

# Sistema Internacional de Alturas IHRS (*International Height Reference System*)

Laura Sánchez ([lm.sanchez@tum.de](mailto:lm.sanchez@tum.de))

Vicepresidente del Sistema Global de Observación Geodésica - GGOS  
(*Global Geodetic Observing System*)

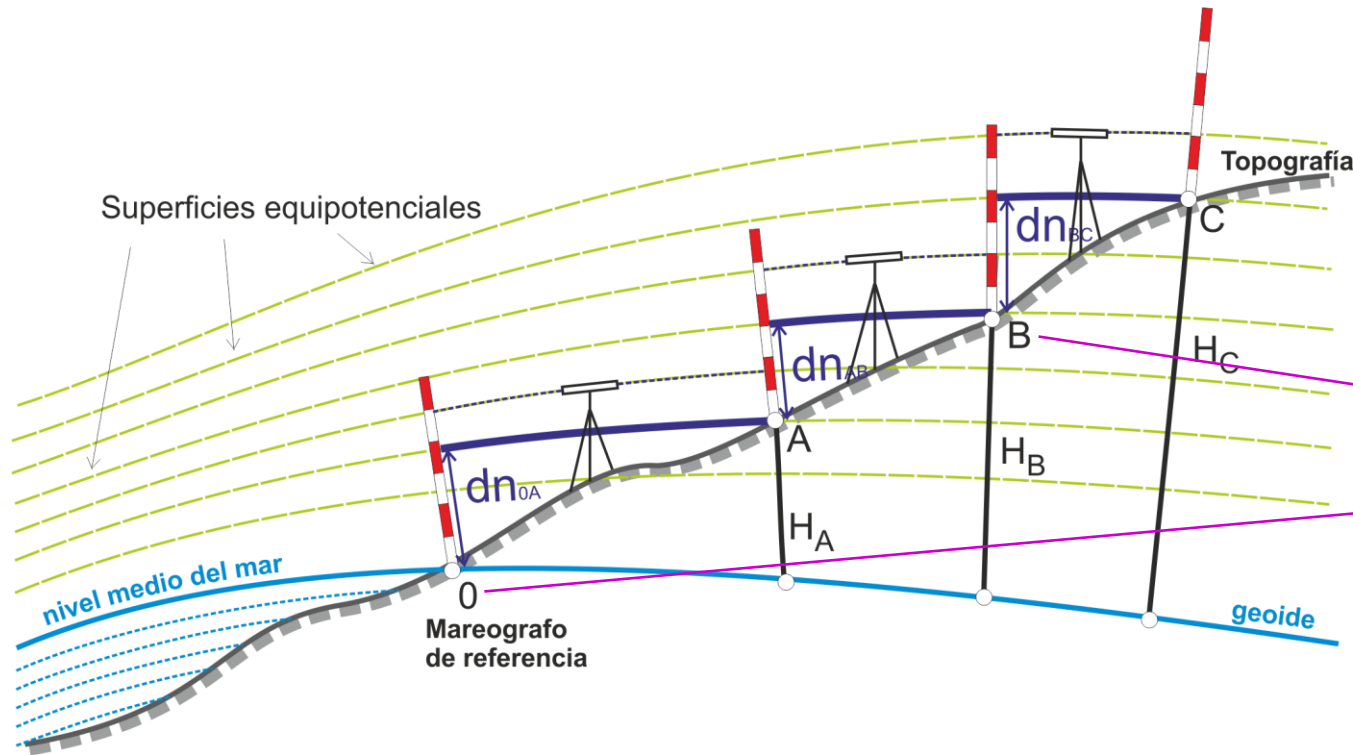
Coordinadora de GGOS Focus Area “Unified Height System”

Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut  
Technische Universität München (DGFI-TUM)  
Alemania



Webinar Sistema Unificado de Alturas  
Instituto Geográfico Militar  
Santiago de Chile, Chile  
2022-03-17

# Sistemas de alturas existentes



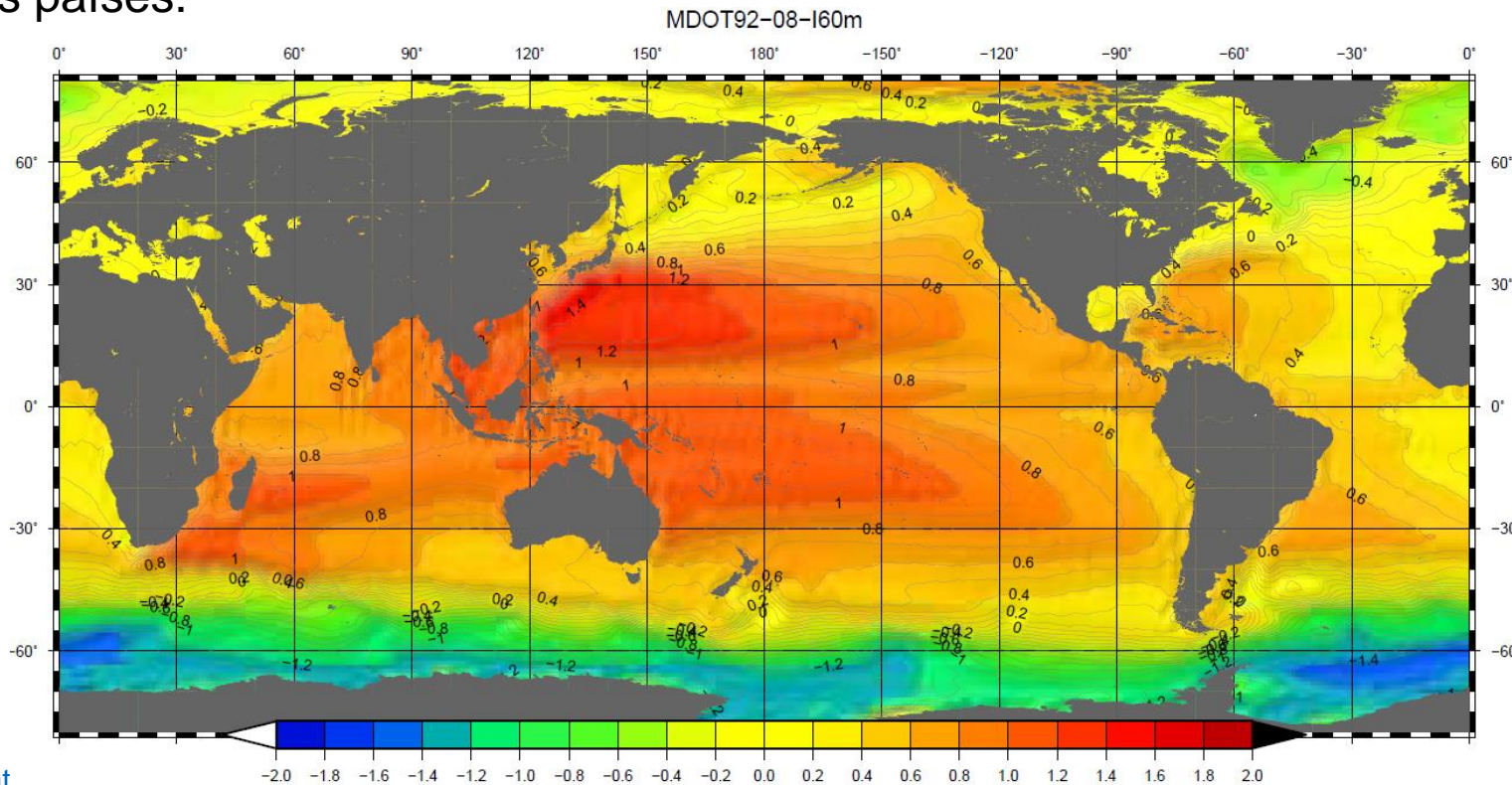
$$H_P = \frac{C_P}{\hat{g}} = \frac{W_0 - W_P}{\hat{g}}$$

$$C_B = W_0 - W_B = \int_0^B g \delta n \cong \sum_0^B g dn$$

- Basados en **nivelación geodésica** referida a un registro local del nivel medio del mar (mareógrafo).
- Determinación de las diferencias de potencial de gravedad → **alturas físicas**.
- Determinación de **alto costo** en tiempo y dinero.
- Precisión mejor que  $\pm 1$  mm entre **puntos vecinos**, pero errores sistemáticos de hasta **dm en regiones remotas**.
- En uso desde hace **150 años** (cartografía, desarrollo urbano y rural, acueductos, construcción de obras de ingeniería, etc.).

# Sistemas de alturas existentes

- Las alturas niveladas se refieren al nivel medio del mar determinado en mareógrafos seleccionados.
- Como la superficie del mar presenta ligeras colinas y valles (topografía) debido a las corrientes oceánicas, la temperatura del agua y la salinidad, el nivel medio del mar puede estar más cerca o más lejos de la figura de equilibrio de la Tierra (geoide) en función de la ubicación geográfica.
- De esta forma, la cota cero definida por un país (o región) difiere hasta  $\pm 2$  metros de la cota cero definida por otros países.



## Neue Zürcher Zeitung

INTERNATIONALE AUSGABE

Samstag/Sonntag, 27./28. Dezember 2003 · Nr. 300

### **Berechnungsfehler beim Brückenbau in Laufenburg.**

Beim Bau der Brücke über den Rhein in Laufenburg hat eine Kontrolle ergeben, dass zwischen der von Schweizer Seite her gebauten Brücke und dem Trassee für die Strasse auf deutscher Seite eine Höhendifferenz von 54 Zentimetern besteht. Ursache des Fehlers ist die Tatsache, dass die Horizonte auf deutscher und auf Schweizer Seite auf unterschiedlichen Referenzhorizonten basieren. Deutschland bezieht sich auf die Meereshöhe der Nordsee – die Schweiz auf das Mittelmeer. (ap)

- Construcción de un puente sobre el Río Rin entre Suiza y Alemania (Laufenburg).
- Discrepancia de 54 cm entre las trazas del Puente iniciadas en la orilla suiza y en la orilla alemana.
- Las alturas en Alemania se refieren al nivel medio del mar en el Mar Nórdico (Amsterdam); las alturas en Suiza se refieren al nivel medio del mar en el Mar Mediterráneo (Marsella).

# Cotas cero inconsistentes

3sat

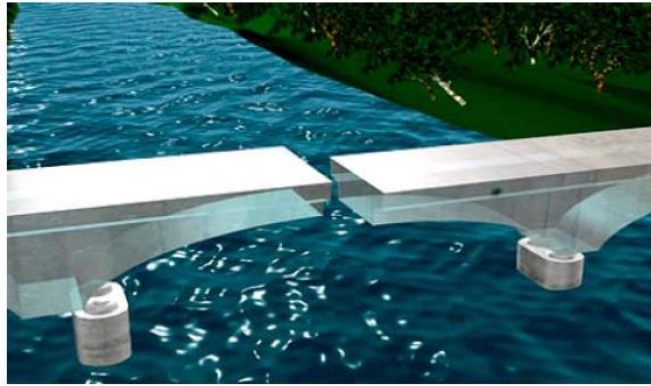
3sat.de Homepage ▶ Sendungen A-Z ▶ hitec

Montags und sonntags



Ausgewählte Videos

- Das Stromnetz von morgen
- Killer-Keime
- Die Vermessung der Lust
- Energiebilanz
- A380 Megajet oder Megaflop?
- Grenzenlose Windkraft?



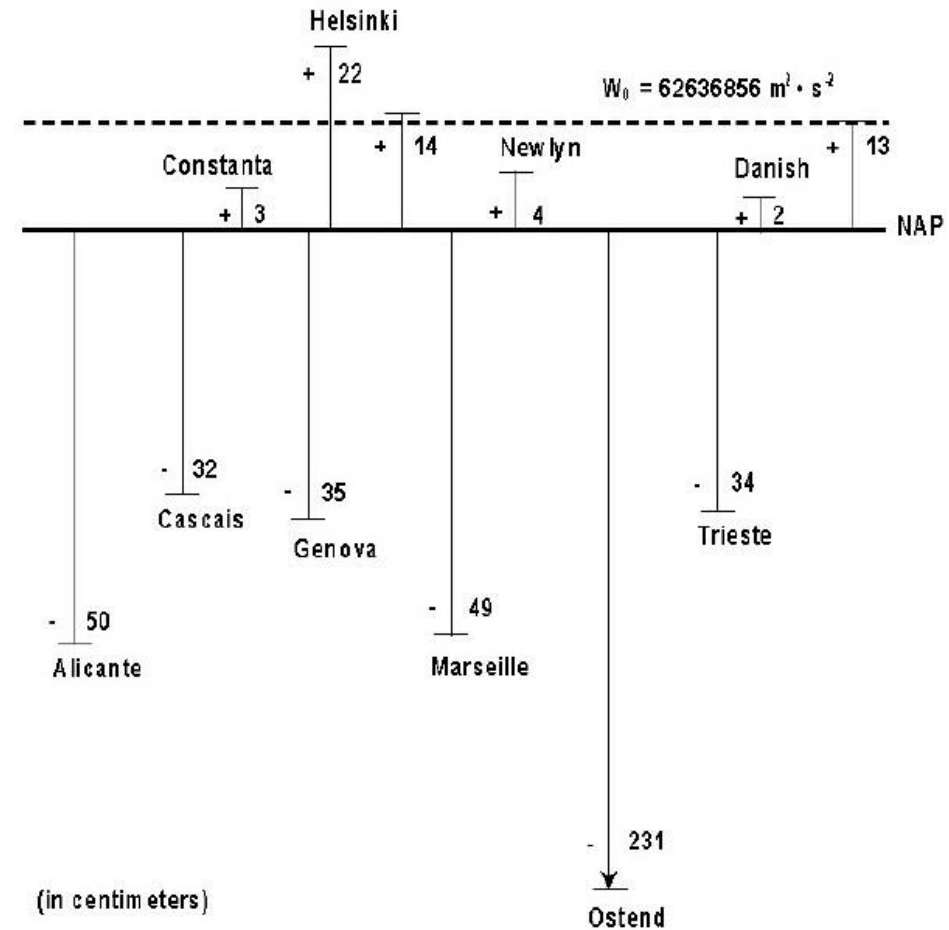
**Der Brückenbau-Fauxpas in Laufenburg**  
Thema zur Sendung "Verrechnet - Die Anatomie des Irrtums"

Die Brücke war schon fast fertig, als der Fehler bemerkt wurde. Die Folge: Es wurde auf deutscher Seite die Rampe zur Brückenauffahrt abgesenkt. Kostenpunkt 50.000 Euro und viel Häme für diesen Lapsus. Der Rechenfehler ist 12 Jahre, über den gesamten Projektzeitraum unentdeckt geblieben.

- Los ingenieros conocían la diferencia de altura entre ambos sistemas de altura,
- pero corrigieron la diferencia (27 cm) con un signo equivocado (error de 54 cm).
- Este error se descubrió cuando el puente estaba casi listo.
- Para corregir el error (para que el puente fuera utilizable) fueron necesarios 50.000 Euros más.

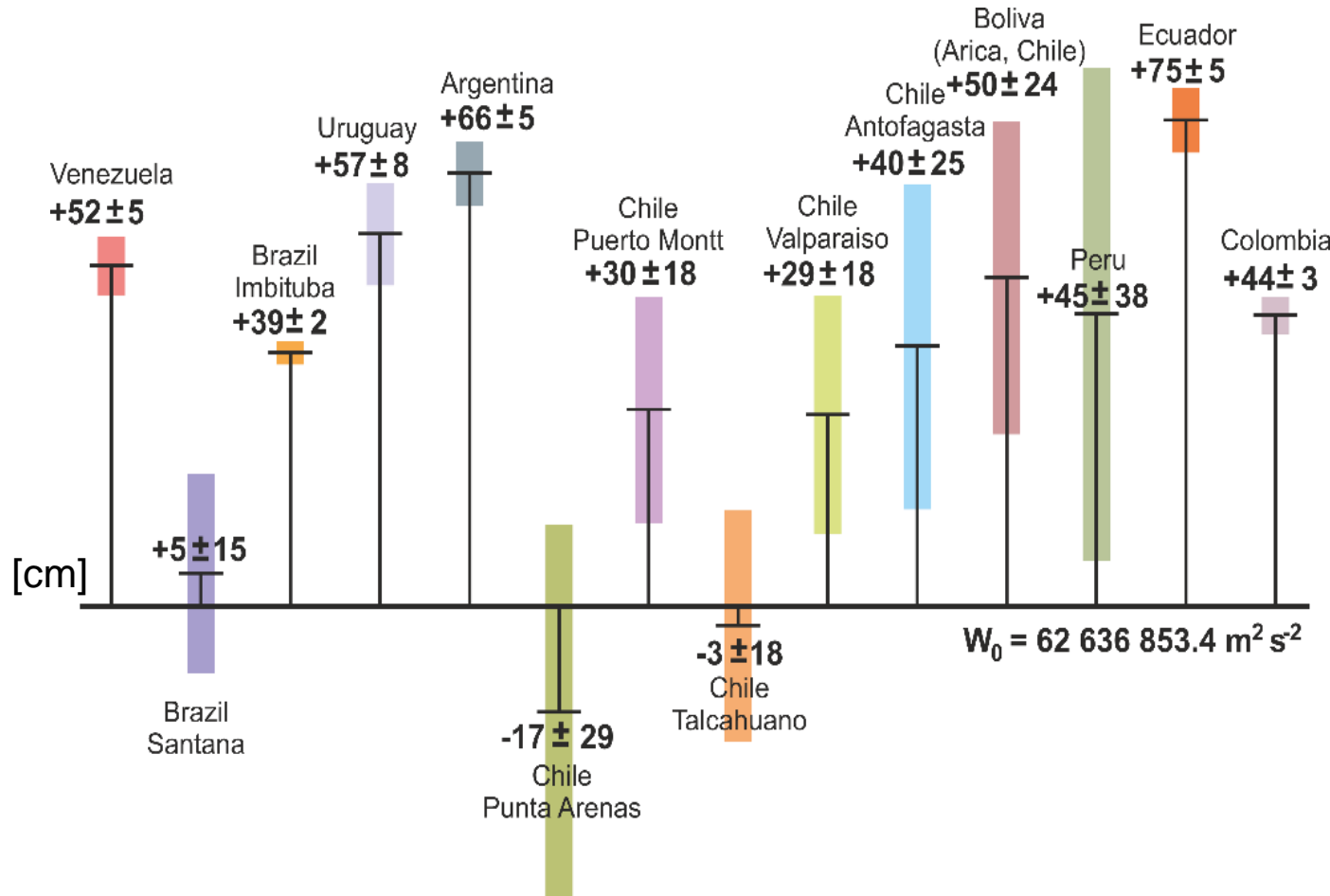
# Discrepancias entre los sistemas de alturas existentes

Reference Tide Gauges of European Height Systems



Source: <http://www.bkg.bund.de/geodIS/EVRS/>

# Discrepancias entre los sistemas de alturas existentes

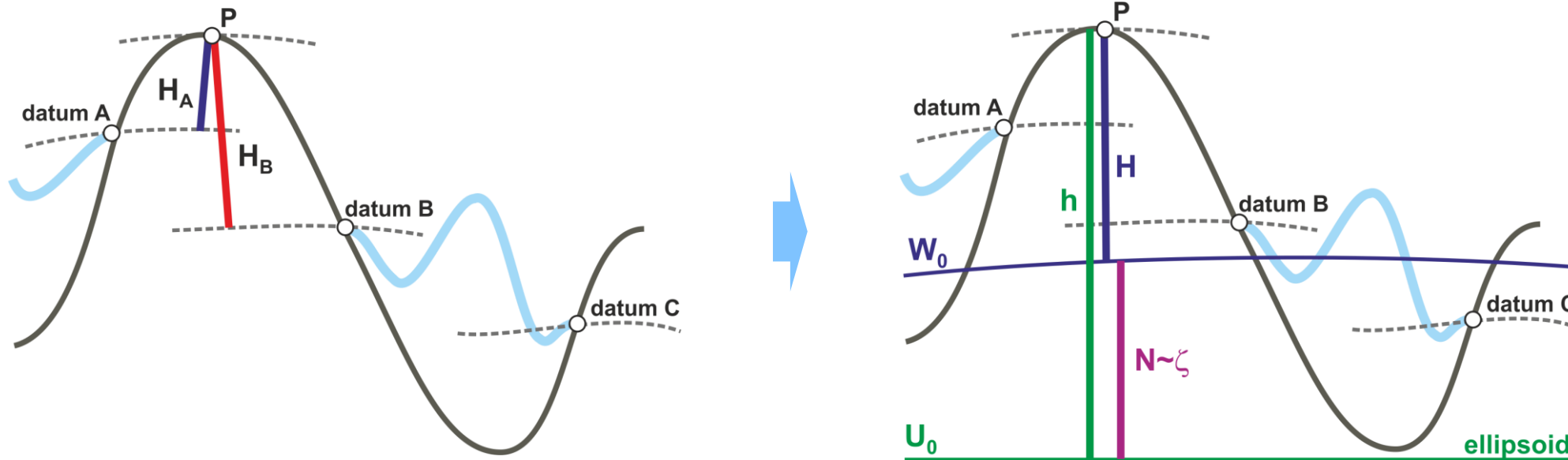


Fuente: <https://doi.org/10.1093/gji/ggx025>

# Sistema global unificado de alturas

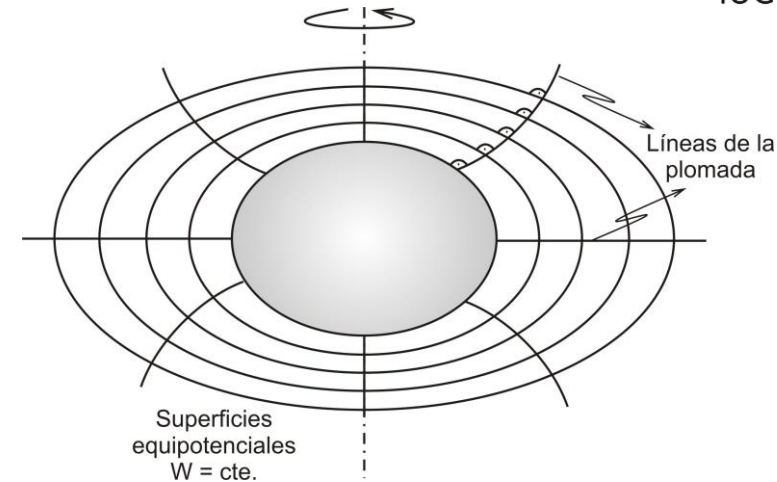
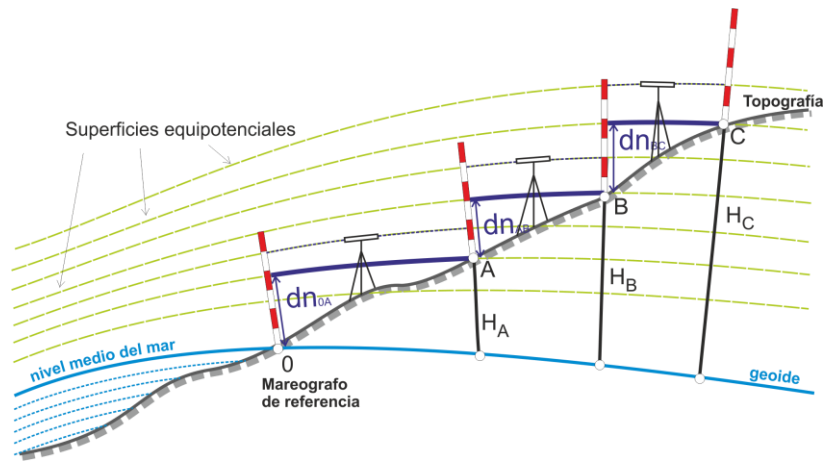
## Sistema de referencia moderno

- que sirva de estándar para la determinación de alturas físicas con alta precisión en cualquier lugar del mundo,
- que permita referir las alturas físicas de cualquier país a una única superficie equipotencial global ( $W_0$ ),
- que tenga en cuenta el cambios de coordenadas a través del tiempo.





# Sistemas locales vs sistema global de alturas



- **Nivel de referencia:** mareógrafo con  $W_0$  local
- **Coordenada vertical:** números geopotenciales locales

$$H_P^{local} = \frac{W_0^{local} - W_P}{\hat{g}} = \frac{C_P^{local}}{\hat{g}}$$

- **Método:** nivelación + gravimetría
- **Coordenada horizontal** secundaria
- **Monitoreo:** complicado porque una renivelación es dispendiosa y costosa

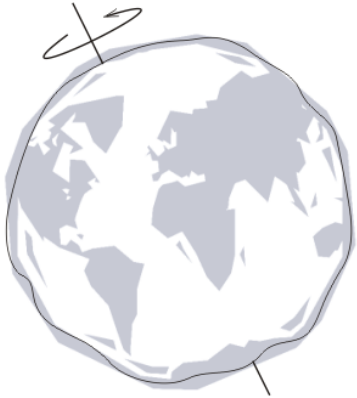
- **Nivel de referencia:** superficie equipotencial global  $W_0$
- **Coordenada vertical:** números geopotenciales globales

$$-\Delta W_P = C_P = W_0 - W_P$$

- **Método:** modelado del campo de gravedad terrestre para la determinación de  $W_P$
- **Coordenada horizontal geocéntrica** con GNSS
- **Monitoreo:** con posicionamiento continuo GNSS y cambios del campo de gravedad terrestre

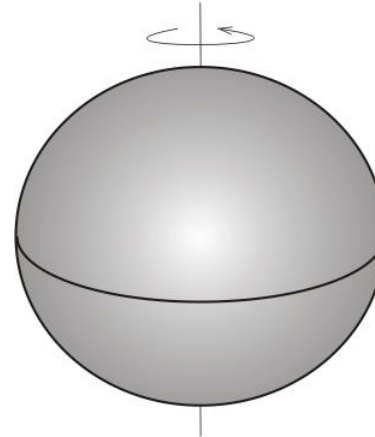
# Modelado del campo de gravedad

Geoide (realidad)



- Radio ecuatorial: **a**
- Aplanamiento:  **$C_2$**
- Velocidad de rotación:  $\omega$
- Masa: **M**
- Distribución **heterogénea** de masas
- Variación radial de gravedad **desconocida**
- Campo de gravedad real: **g**
- Campo de potencial real: **W**
- Superficie de nivel principal ( **$W_0$ ,  $H_0$** ):  
**geoide**

Elipsoide (modelo)



- Radio ecuatorial: **a**
- Aplanamiento: **f ( $J_2$ )**
- Velocidad de rotación:  $\omega$
- Masa: **M**
- Distribución **homogénea** de masas
- Variación radial **constante** de gravedad
- Campo de gravedad teórico:  $\gamma$
- Campo de potencial teórico: **U**
- Superficie de nivel principal ( **$U_0$ ,  $h_0$** ):  
**elipsoide de nivel**

Diferencias:

Anomalía de la gravedad

$$\rightarrow \Delta g = g - \gamma$$

Potencial de perturbación

$$\rightarrow T = W - U$$

Ondulación (altura) geoidal

$$\rightarrow N = T/\gamma = h - H$$

→ Para determinar el potencial  $W$  ( $= U + T$ ) en cualquier punto, debe conocerse el potencial de perturbación  $T$ ; el cual a su vez, se necesita para determinar el geoide.

# Sistema Internacional de Alturas IHRS

## International Height Reference System (IHRS)

- 1) Sistema de referencia **convencional** definido por la **Asociación Internacional de Geodesia** (Resolución IAG No. 1, Praga, julio 2015)
- 2) Coordenada vertical son **diferencias de potencial** con respecto a un valor  $W_0$  convencional:

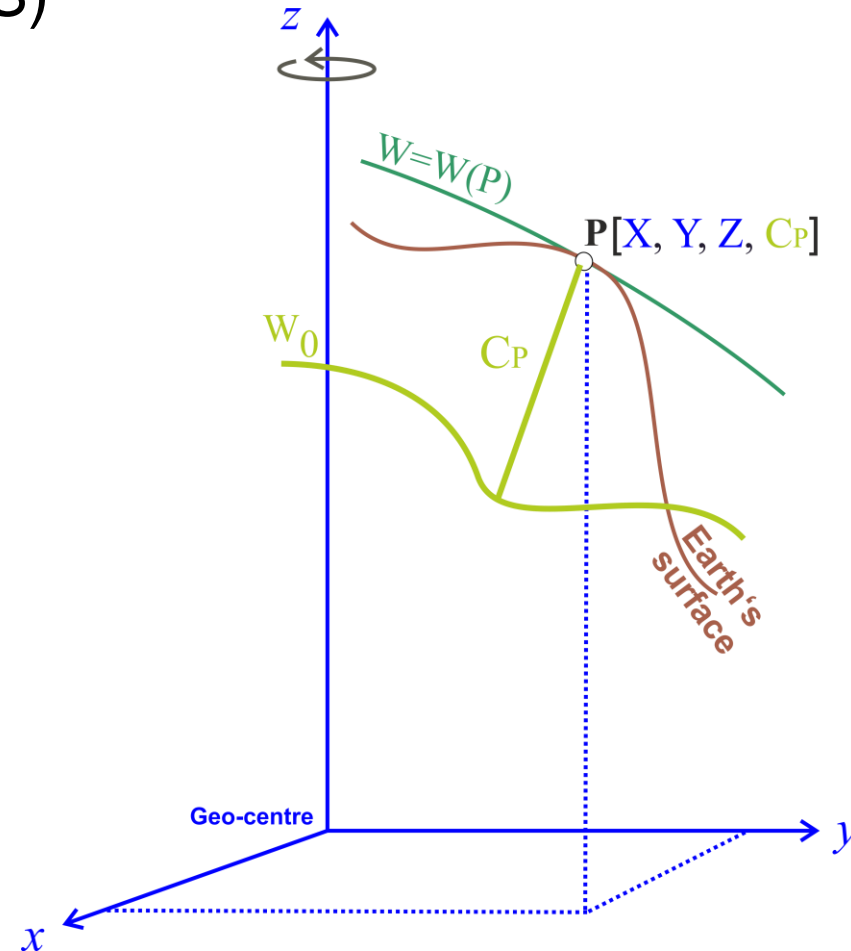
$$C_P = C(P) = W_0 - W(P) = -\Delta W(P)$$

$$W_0 = \text{const.} = 62\,636\,853.4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$$

- 2) La posición de  $P$  se define en el ITRF

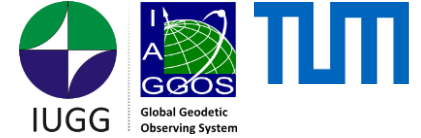
$$\mathbf{X}_P (X_P, Y_P, Z_P); \text{ i.e., } W(P) = W(\mathbf{X}_P)$$

- 3) La determinación de  $\mathbf{X}(P)$ ,  $W(P)$  (o  $C(P)$ ) incluye sus cambios a través del tiempo,  $\dot{\mathbf{X}}(P)$ ,  $\dot{W}(P)$  (o  $\dot{C}(P)$ ).
- 4) Coordenadas en **mean-tide system / mean (zero) crust.**
- 5) Las unidades son **metro y segundo (SI)**.



Ver: Ihde J. et al.: *Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHRS)*. *Surv Geophys* 38(3), 549-570, <https://doi.org/10.1007/s10712-017-9409-3>, 2017  
 Sánchez L. et al.: *A conventional value for the geoid reference potential  $W_0$* , *J Geod*, 90(9): 815-835, <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0913-x>, 2016.

# Realización del IHRS: International Height Reference Frame (IHRF)



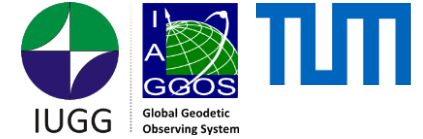
Un marco de referencia materializa un sistema de referencia de dos maneras:

- físicamente, mediante el establecimiento de puntos de referencia materializados con pilares o instrumentos de observación,
- matemáticamente, mediante la determinación de coordenadas asociadas al sistema de referencia.
- Las coordenadas de los puntos de referencia se obtienen a partir de las mediciones pero siguiendo la definición del sistema de referencia.

La implementación del IHRS requiere principalmente:

- 1) Una red global de referencia
- 2) La determinación de coordenadas precisas ( $W$ ,  $\dot{W}$ ,  $\mathbf{X}$ ,  $\dot{\mathbf{X}}$ ) en las estaciones de referencia
- 3) Estándares, convenciones y procedimientos detallados para asegurar que la realización (IHRF) obedece estrictamente la definición (IHRS)
- 4) Una infraestructura operacional y organizacional que garantice el mantenimiento, la continuidad y la disponibilidad del IHRF a largo plazo.

# Configuración de la red de referencia del IHRF



## 1) Jerarquía:

- Una red global → distribución homogénea con
- Una red principal o primaria (**core network**) → para asegurar estabilidad y perdurabilidad a largo plazo
- **Densificaciones regionales y nacionales** → para asegurar acceso al marco de referencia desde cualquier lugar

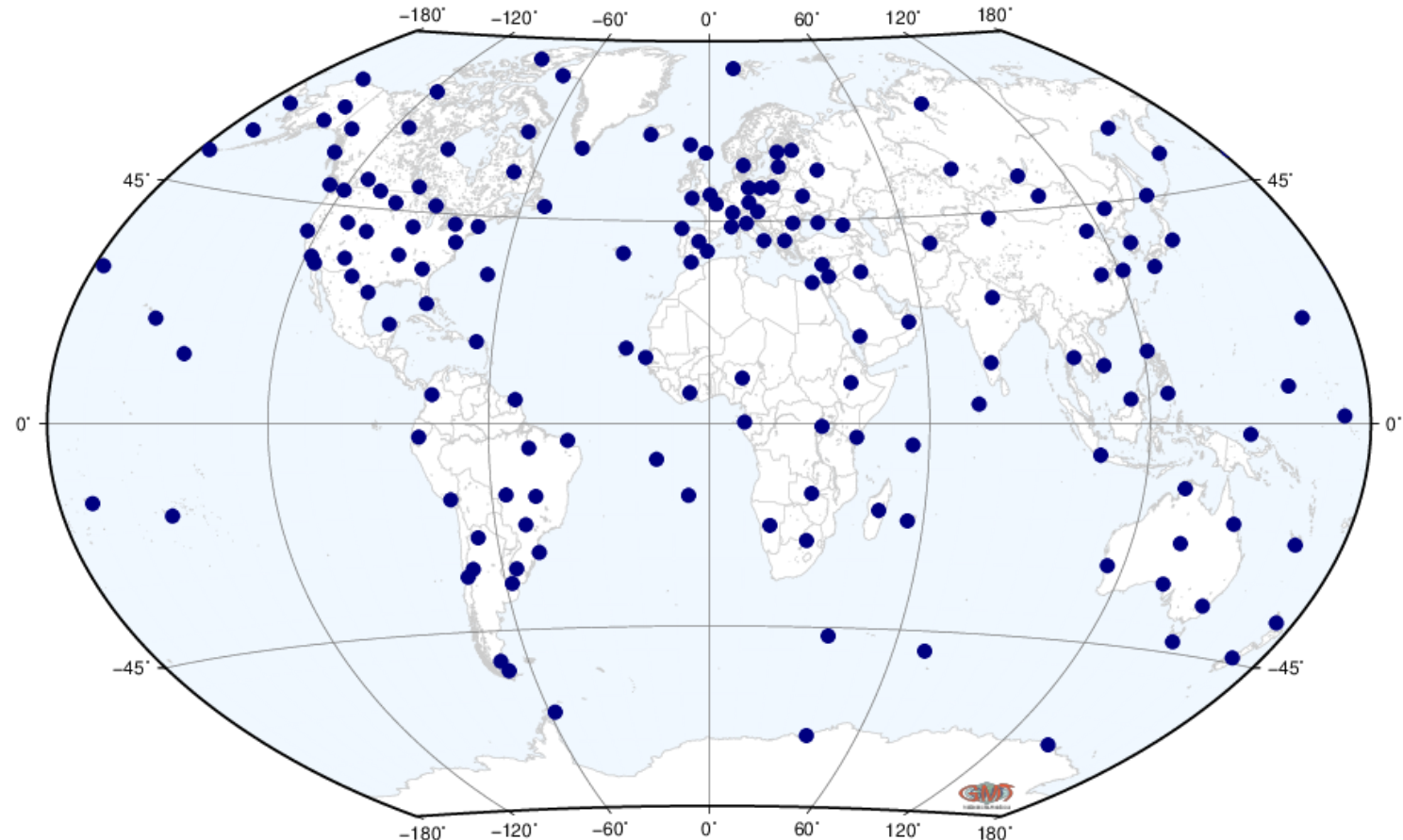
## 2) Co-localizada con:

- **Observatorios geodésicos fundamentales** → conexión directa entre  $\mathbf{X}$ ,  $W$ ,  $g$  y realización del tiempo (relojes de referencia);
- **Estaciones GNSS de operación continua** → para detectar deformaciones del marco de referencia (preferencia por estaciones ITRF y sus densificaciones regionales SIRGAS, EPN, APREF, etc.);
- **Mareógrafos de referencia y redes verticales nacionales** → para vincular los sistemas de alturas existentes al IHRF;
- Estaciones de **International Gravity Reference Frame - IGRF** (Resolución IAG 2 (2015)).

## 3) Requerimiento primordial: **disponibilidad de gravimetría terrestre (aérea) alrededor de las estaciones para la determinación precisa de valores de potencial $W$ .**

# Red primaria (core network) del IHRF (~170 estaciones)

- Selección de estaciones coordinada por **GGOS-FA Unified Height System** con el apoyo de **GGOS Bureau of Networks and Observations**, el **Bureau Gravimétrique International** (estaciones absolutas de gravedad) y las **subcomisiones regionales de la IAG** para marcos de referencia y modelado del geoide.
- No es una “**red inamovible o eterna**” pueden agregarse o retirarse estaciones según necesidades específicas.
- Esta red primaria debe ser **densificada mediante redes regionales y nacionales**.



## 1) Regiones sin (o con muy pocos) datos de gravedad terrestre (áerea)

- Única opción para determinar los valores de potencial es el uso de modelos globales de gravedad (GGM)
- Precisión esperada en torno a  $\pm 40$  cm o incluso peores en regiones con fuertes gradientes topográficos (en Los Andes se han registrado precisiones peores que 3 m)
- Podrían alcanzarse precisiones en torno a  $\pm 10$  cm si se incluyen nuevos y mejores datos de gravedad terrestre en los GGM (p. ej. EGM2020)
- Para evitar múltiples valores de potencial proporcionados por diferentes GGM en el mismo punto, es necesario seleccionar un GGM como modelo de referencia.

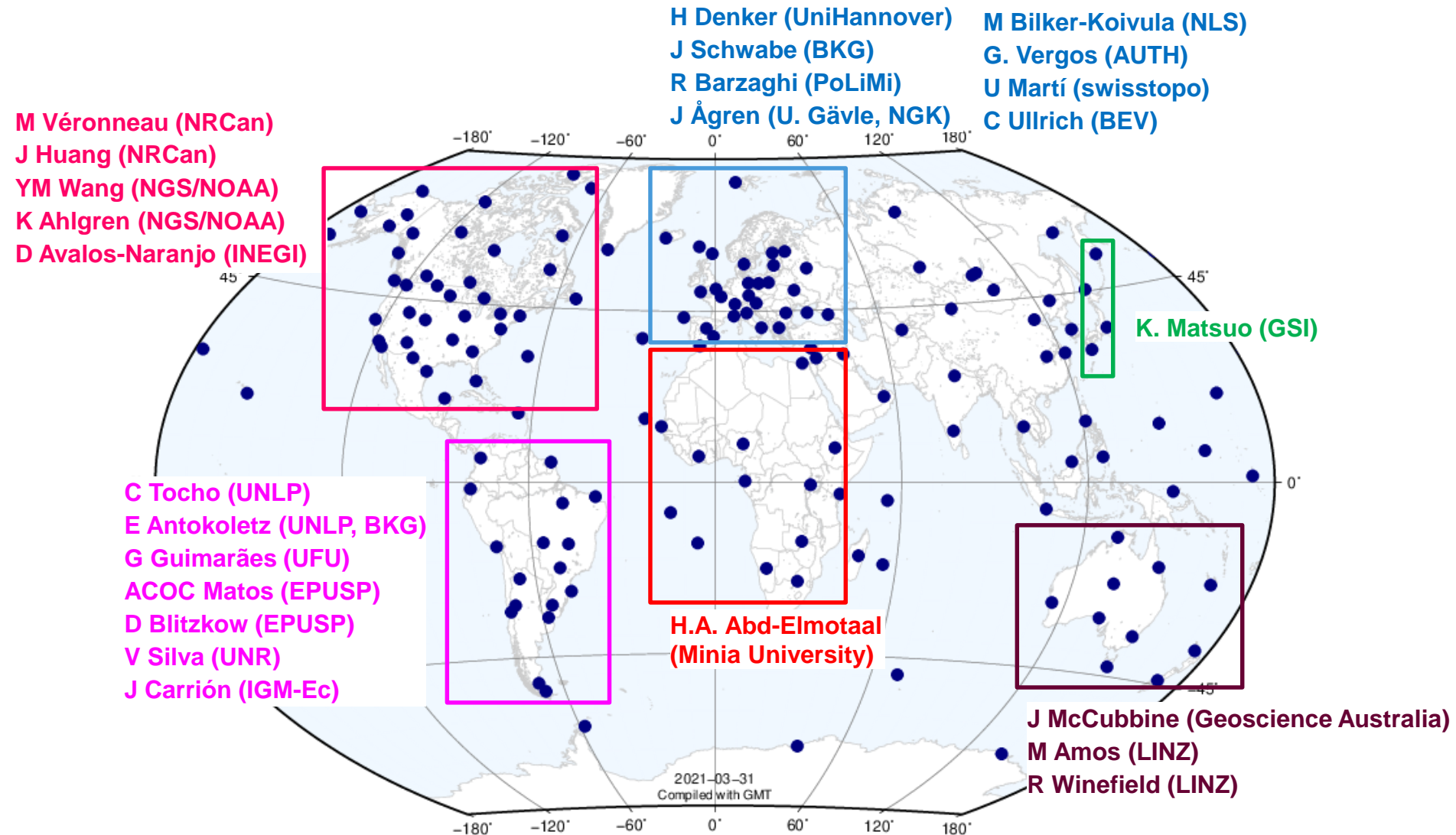
## 2) Regiones con algunos datos de gravedad terrestre, pero con pobre cobertura o calidad de datos desconocida

- Baja fiabilidad de los modelos de geoide existentes
- Se recomienda adelantar levantamientos gravimétricos adicionales alrededor de las estaciones IHRF para aumentar la precisión del potencial calculado en esas estaciones específicas.

## 3) Regiones con buena cobertura y calidad de los datos de gravedad terrestre

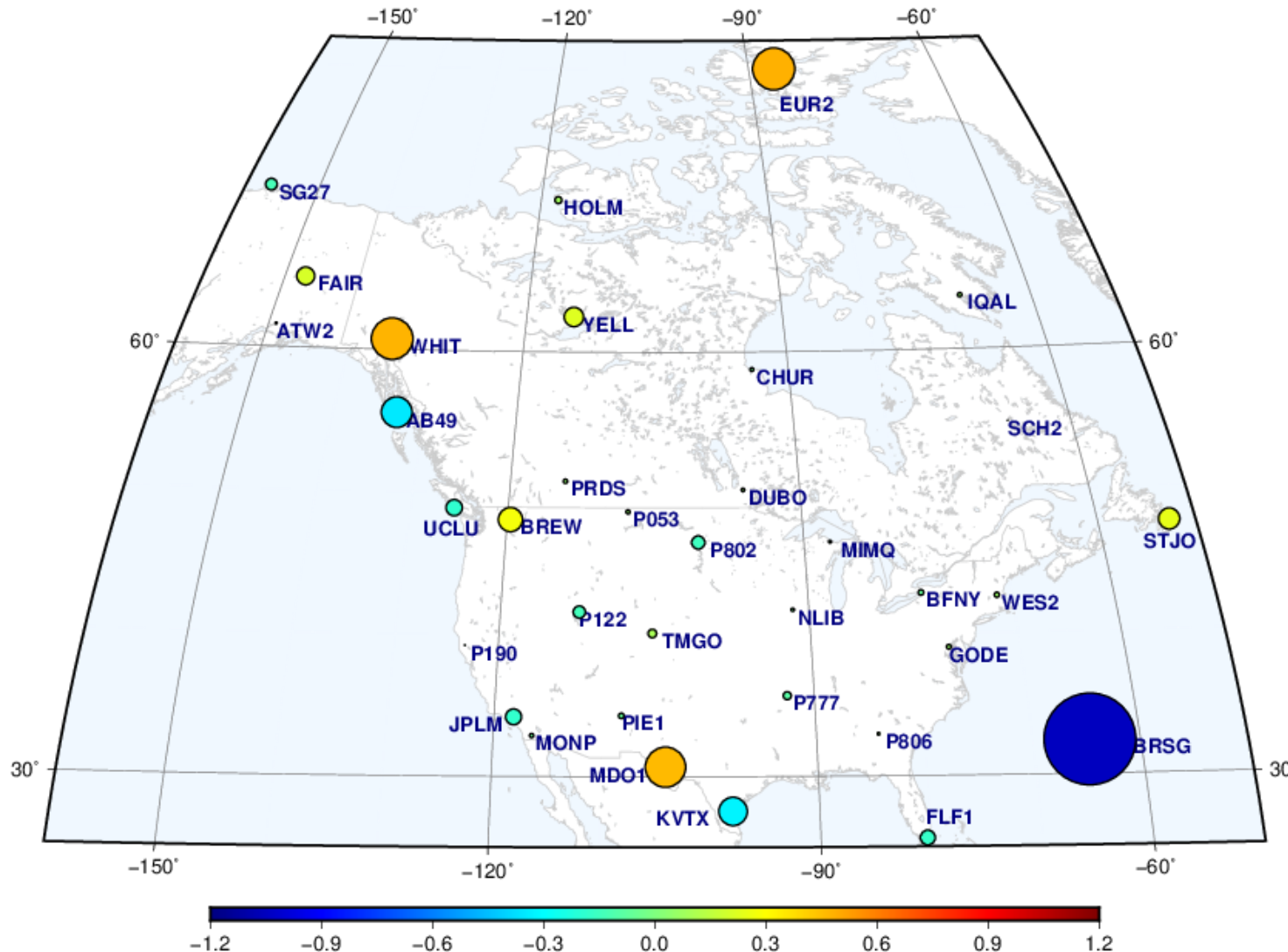
- Los valores de potencial pueden inferirse a partir de modelos regionales precisos del geoide
- Precisión esperada en torno a  $\pm 3$  cm hasta  $\pm 8$  cm.

# Actividades en curso: Cálculo de una primera solución para el IHRF





# Actividades en curso: Cálculo de una primera solución para el IHRF



Diferencia entre los valores de potencial obtenidos del modelo de geoides canadiense PCGG20\_21A y del modelo de cuasigeoides de USA xG20B (aporte de M Véronneau, J Huang, YM Wang y K Ahlgren):

Promedio: 1 cm (-0.01 m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>)  
STD: 3 cm (0.26 m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>)  
Min.: -11 cm (-1.05 m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>)  
Max.: 5 cm (0.48 m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>)

EGG2016	GCG2016	Difference
18032.74	18032.81	0.07
15946.68	15946.73	0.05
15381.77	15381.78	0.02
1019.01	1018.97	-0.04
16690.78	16690.73	-0.04
6070.26	6070.18	-0.08

Números geopotenciales IHRF obtenidos de los modelos de cuasigeoide de Europa **EGG2016** y de Alemania **GCG2026** (**aporte de H Denker y J Schwabe**)

Diferencias (6 estaciones)

Promedio: 0.6 mm (-0.006 m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>)

STD: 5 mm (0.050 m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>)

Min.: -8 mm (-0.080 m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>)

Max.: 6 mm (0.065 m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>)

# Actividades en curso: Cálculo de una primera solución para el IHRF

Canada (11 estaciones):  
Modelo PCGG20\_21A  
Precisión promedio 3.5 cm

Europa (40 estaciones):  
Modelo EGG2016  
Precisión promedio 5 cm

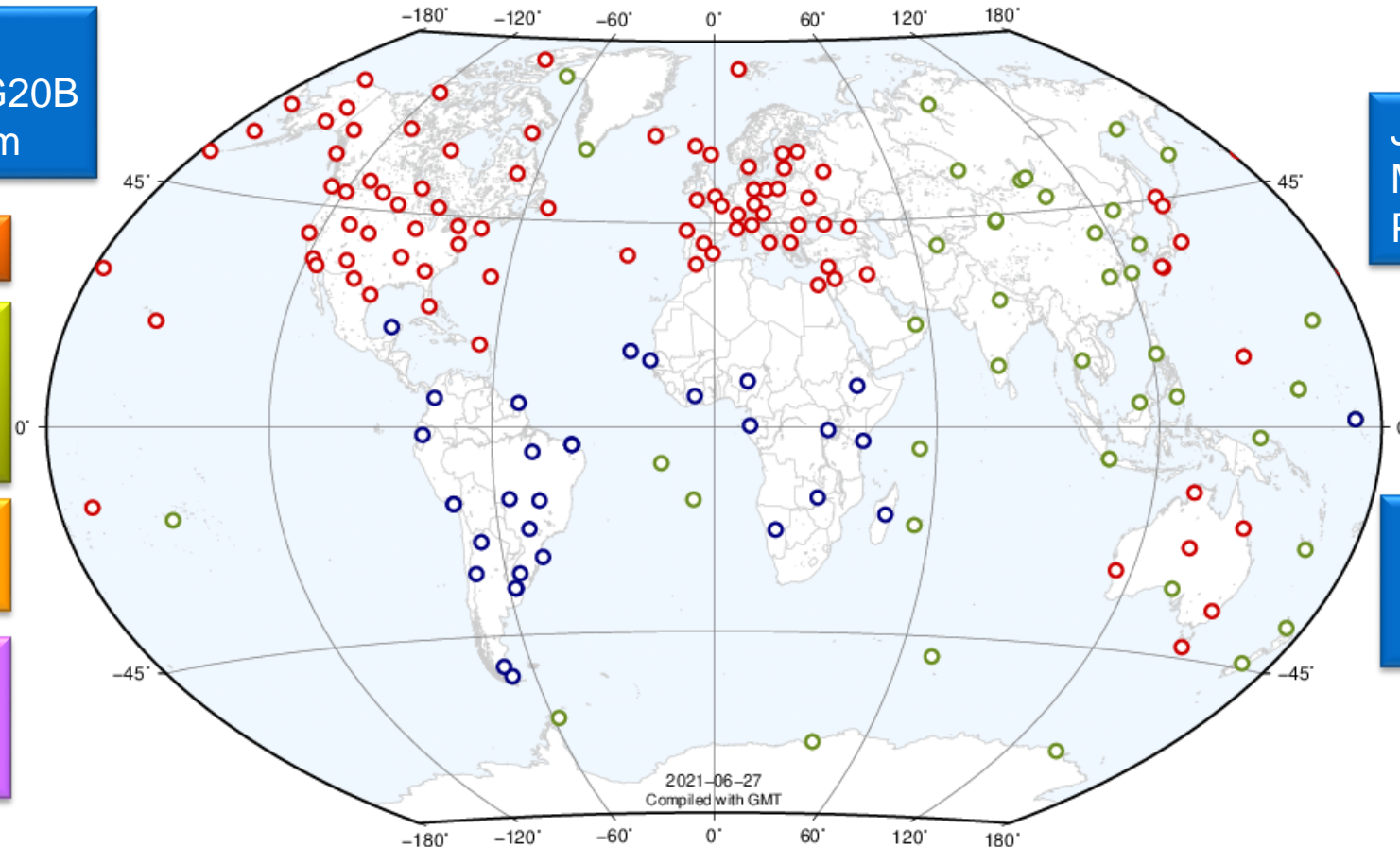
USA (30 estaciones)  
Modelo NAPGD2022 - xG20B  
Precisión promedio 4.5 cm

En progreso:

América del Sur:  
Comparación de modelos  
regionales y nacionales

Africa: uso de un modelo  
continental

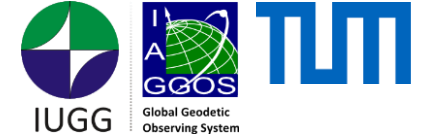
Asia y Oceanía:  
Inventario de modelos de  
geoide disponibles



Japón (5 estaciones):  
Modelo JGEOID2019  
Precisión promedio 5.7 cm

Australia (6 estaciones):  
Modelo AGQG2017  
Precisión promedio 6.2 cm

# Validación de las coordenadas IHRS/IHRF

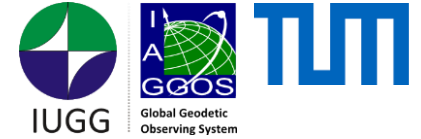


Con base en las investigaciones desarrolladas durante los últimos 6 años, se han propuesto las siguientes estrategias de validación:

- **Cálculo redundante**: dos centros de procesamiento determinan los valores de potencial utilizando los mismos datos de entrada con métodos diferentes
- **Calibración del método de cálculo**: Determinación de los valores de potencial para una estación IHRF virtual con datos de entrada específicos y comparación de dichos valores con los resultados obtenidos por otros centros de cálculo
- Establecimiento de **estaciones auxiliares** a distancias de más o menos 100 km, conectadas a las estaciones principales con nivelación (+ gravimetría) para comparar diferencias de potencial entre la nivelación y el modelado del campo de gravedad.

**Objetivo primario:** mejorar el modelado del campo de gravedad (potencial, geoide o cuasigeoide) mediante el aumento de mediciones de gravedad sobre o cerca de la superficie terrestre (aerogravimetría) y estandarización y calibración de los métodos de cálculo.

# Actividades internacionales en desarrollo



- 1) Cálculo de la primera solución del IHRF basada en los recursos existentes y con el apoyo de expertos regionales y locales.
- 2) Desarrollo de estrategias (modelos) que permitan mejorar el modelado de efectos topográficos.
- 3) Desarrollo de estrategias para la determinación de los cambios de potencial a través del tiempo  $\dot{W}$ .
- 4) Desarrollo de estrategias para la determinación de índices de precisión confiables.
- 5) Diseño de un 'elemento IHRS/IHRF' dentro del Servicio Internacional del Campo de Gravedad (IGFS: International Gravity Field Service) para asegurar el mantenimiento y disponibilidad del IHRF:
  - Actualizaciones regulares del IHRF<sub>yyyy</sub> para considerar:
  - Nuevas estaciones;
  - Cambios de las coordenadas en el tiempo  $\dot{\mathbf{X}}$ ,  $\dot{W}$ ;
  - Mejoramiento en la determinación de  $\mathbf{X}$  y  $W$  (más mediciones, mejores estándares, modelos y algoritmos de cálculo, etc.).

# Nueva altura del Monte Everest (Monte Qomolangma)



## 8,848.86 meters -- China, Nepal jointly announce new height of Mt. Qomolangma

Source: Xinhua | 2020-12-08 18:03:44 | Editor: huaxia

BEIJING, Dec. 8 (Xinhua) – The new height of Mount Qomolangma, the world's highest peak, is 8,848.86 meters, China and Nepal jointly announced on Tuesday.

The announcement came as Chinese President Xi Jinping and his Nepali counterpart Bidya Devi Bhandari exchanged letters jointly announcing the height.

Xi said in his letter that China and Nepal reached consensus last year on the joint announcement of the new height of the peak.

For more than a year, the two countries' survey teams have overcome all kinds of difficulties, solidly carried out their work, and finally reached a conclusion on **the snow-covered height based on the International Height Reference System, he said.**

Calling Mount Qomolangma "an important symbol of the China-Nepal traditional friendship," Xi said it is agreed by both countries as the boundary peak and the "Peak of China-Nepal Friendship."

Xi said the joint announcement of the new height of Mount Qomolangma with his Nepali counterpart is of great significance in carrying forward the undertakings of the predecessors to the future, and showcasing the high level of the continuous development of China-Nepal relations.

# Nueva altura del Monte Everest (Monte Qomolangma)

1856: el matemático Radhanath Sickdhar establece que el Mt Everest (llamado así en 1865) es el más alto del mundo (con respecto al nivel medio del mar) – triangulación desde el Golfo de Bengala: 8840 m

1954: Survey of India, nivelación trigonométrica: 8848 m

1975: Chinese team, nivelación trigonométrica: altura no publicada

1999: National Geographic Society, GPS + EGM96: 8850 m

2005: Chinese Academy of Sciences, nivelación trigonométrica: 8844 m

Mayo 2019: Survey Department of Nepal:  
GPS + modelo local de geoide  
(aerogravimetría) y nivelación trigonométrica

Mayo 2020: Chinese Academy of Sciences:  
Beidou + modelo local de geoide  
(aerogravimetría)

↪ 8848.86 m con respecto al IHRM/IHRF ◀



# Agradecimientos

