

Infraestructura operacional para el Sistema Internacional de Alturas IHRS (International Height Reference System)

¹Laura Sánchez, ²Riccardo Barzaghi, ³George Vergos

¹GGOS Focus Area “Unified Height System”, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Technische Universität München (DGFI-TUM), Alemania

²International Gravity Field Service (IGFS), Politecnico di Milano, Italia

³International Gravity Field Service (IGFS), Department of Geodesy and Surveying, Aristotle University of Thessaloniki, Grecia

Simposio SIRGAS2020, 2020-10-23



Motivación

- Un sistema global de alturas como el IHRF no puede ser implementado por una sola persona, o una sola entidad o un solo país. La implementación del IHRF solo es posible bajo una cooperación internacional global, fuerte y estructurada como la construida bajo la Asociación Internacional de Geodesia (IAG).
- Una de las metas primarias en la realización del IHRF es establecer una estructura operacional coordinada que garantice el mantenimiento, perdurabilidad y uso apropiado del IHRS/IHRF: Actualizaciones regulares del IHRF para considerar nuevas estaciones, cambios de las coordenadas en el tiempo, mejoramiento en la determinación de coordenadas (más mediciones, mejores estándares, modelos y algoritmos de cálculo, etc.).
- La IAG promueve y ha instalado varios servicios científicos internacionales que se ocupan de almacenar, procesar y proveer información geodésica básica y productos elaborados. Bajo este contexto, nuestro objetivo es identificar
 - cómo los servicios existentes en la IAG pueden dar apoyo al IHRS/IHRF
 - qué elementos e interfaces adicionales se requieren para el IHRS/IHRF.



Servicios de la Asociación Internacional de Geodesia

IERS: International Earth Rotation and Reference Systems Service (<https://www.iers.org/>)

IDS: International DORIS Service (<https://ids-doris.org/>)

IGS: International GNSS Service (<http://www.igs.org/>)

ILRS: International Laser Ranging Service (<https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/>)

IVS: International VLBI Service (<https://ivscg.gsfc.nasa.gov/>)

IGFS: International Gravity Field Service (<http://igfs.topo.auth.gr/>)



El IGFS albergaría
la estructura
organizacional para
el IHRG/IHRF

BGI: Bureau Gravimetric International (<http://bgi.omp.obs-mip.fr/>)

ICGEM: International Centre for Global Earth Models (<http://icgem.gfz-potsdam.de/>)

IDEMS: International Digital Elevation Models Service (<https://idems.maps.arcgis.com/>)

IGETS: International Geodynamics and Earth Tide Service (<http://igets.u-strasbg.fr/>)

ISG: International Service for the Geoid (<http://www.isgeoid.polimi.it/>)

PSMSL: Permanent Service for Mean Sea Level (<https://www.psmsl.org/>)

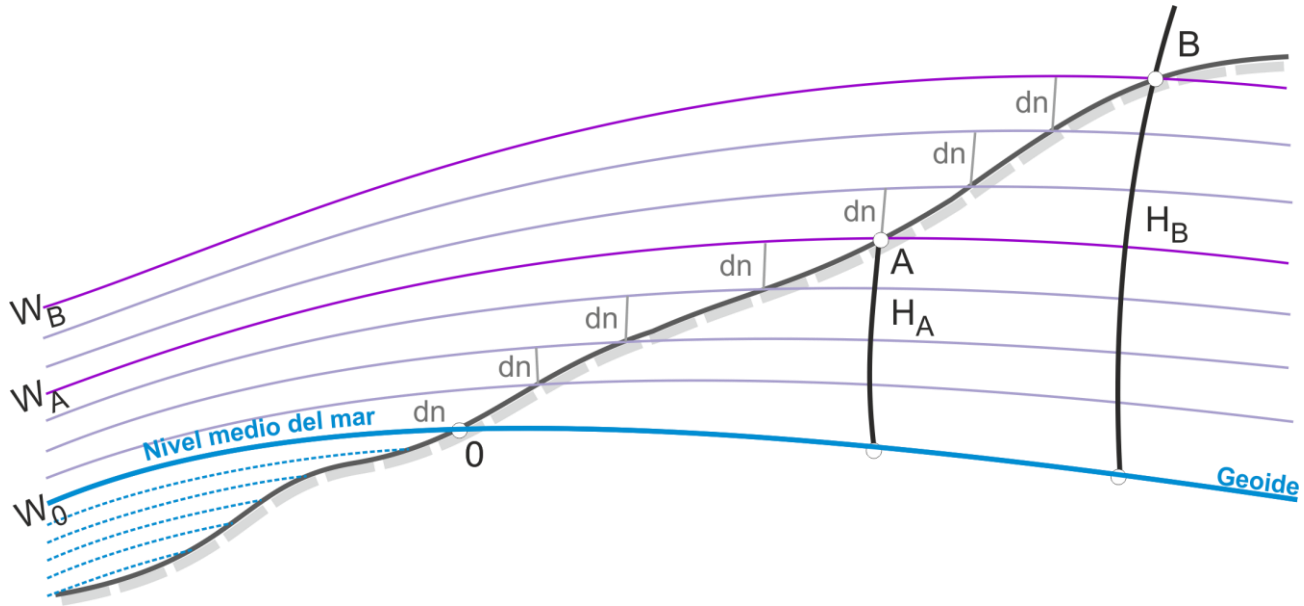


Introducción: sistemas de alturas clásicos

Superficie de referencia:

Definición: el geoide (o cuasigeoide).

Realización: nivel medio del mar registrado en un mareógrafo durante cierto período de tiempo.



Coordenadas:

Definición: alturas ortométricas (o normales).

Realización: nivelación geodésica de primer orden con reducciones por efectos del campo de gravedad terrestre.

$$C_B = W_0 - W_B = \int_0^B g \delta n \cong \sum_0^B g dn \quad \rightarrow \quad H_B = \frac{W_0 - W_B}{\hat{g}} = \frac{C_B}{\hat{g}}$$

$$\begin{array}{ccc} \updownarrow & & \updownarrow \\ [m \text{ s}^{-2}] [m] = [m^2 \text{ s}^{-2}] & & [m^2 \text{ s}^{-2}] / [m \text{ s}^{-2}] = [m] \end{array}$$

International Height Reference System (IHRIS)

Resolución IAG No. 1, Praga, julio 2015

- 1) Coordenada vertical son **diferencias de potencial** con respecto a un valor W_0 convencional (que representa una superficie de referencia global):

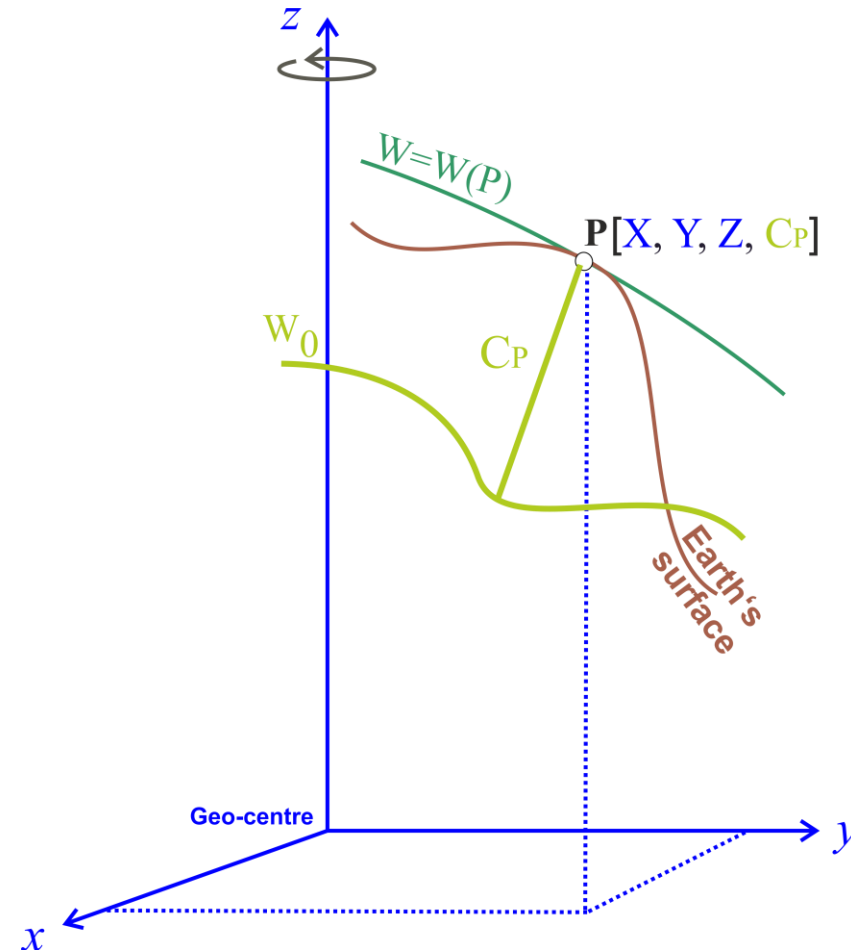
$$C_P = C(P) = W_0 - W(P) = -\Delta W(P)$$

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

- 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 (IHRIS)*. *Surv Geophy* 38(3), 549-570, 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, 10.1007/s00190-016-0913-x, 2016.

Realización del IHRS

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 realización 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).



Configuración de la red de referencia del IHRF



1) Jerarquía:

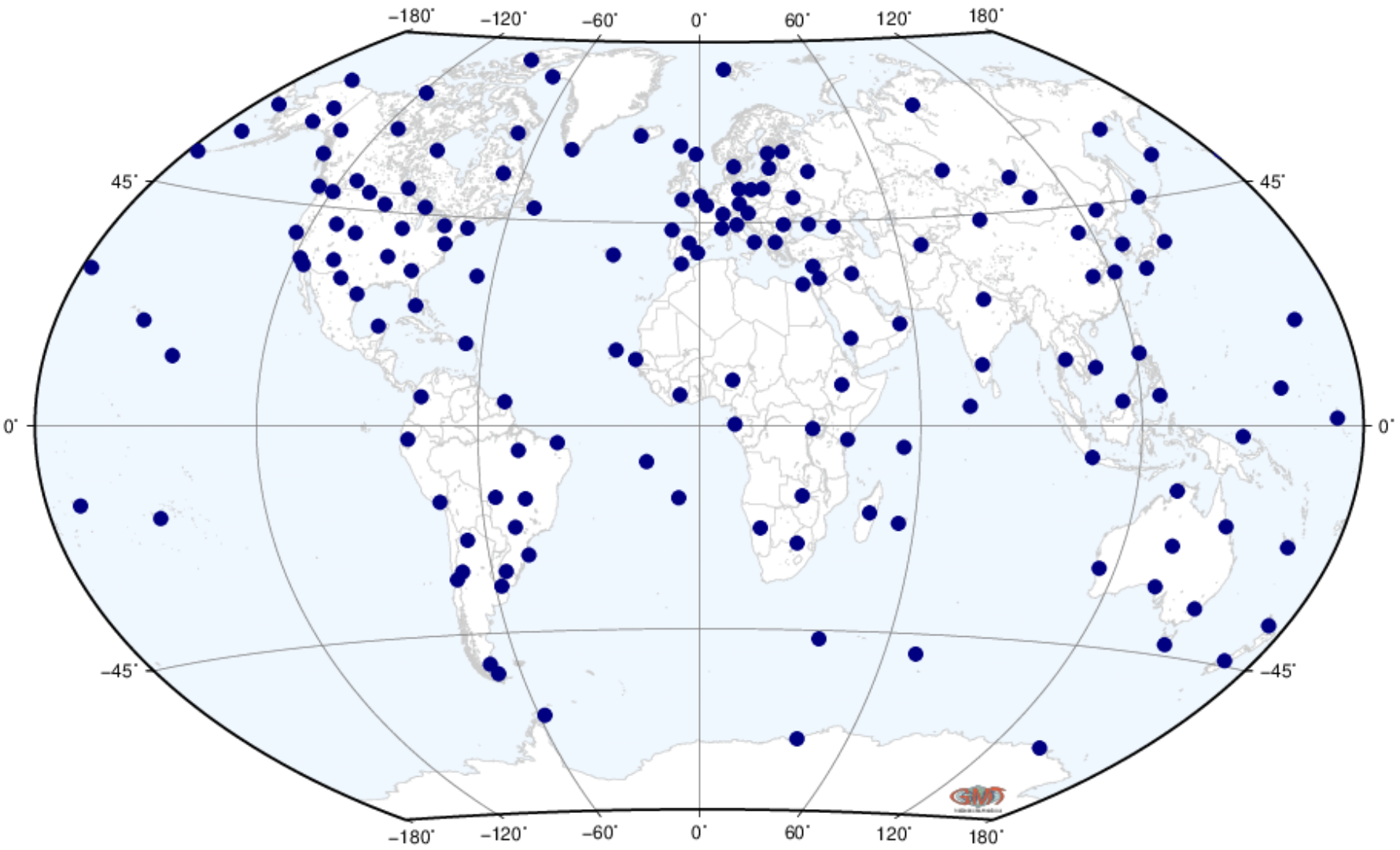
- Una red global → distribución homogénea con
- Una red principal o primaria (**core network**) → para asegurar estabilidad y perdurabilidad a largo plazo
- **Densificaciones regionales y nacionales** → para asegurar acceso al marco de referencia desde cualquier lugar

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 del *International Gravity Reference Frame* - **IGRF** (see IAG Resolution 2, Prague 2015).

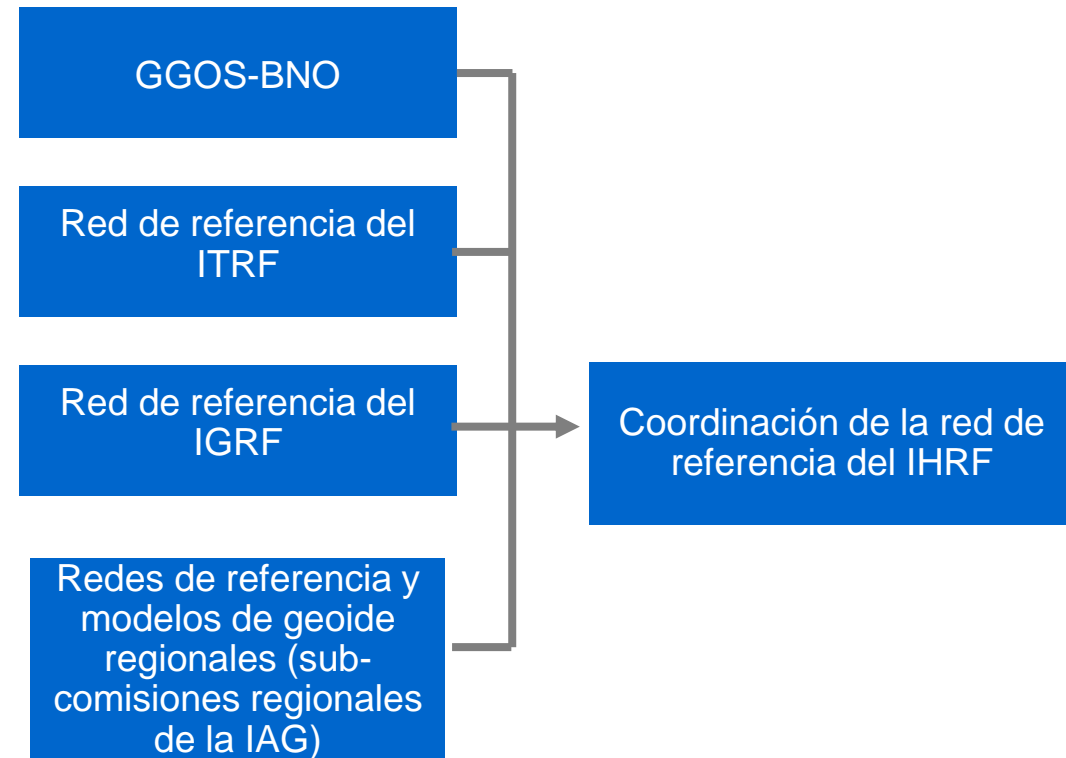
3) Requerimiento primordial: disponibilidad de gravimetría terrestre (aérea) alrededor de las estaciones para la determinación precisa de valores de potencial W .

Primera propuesta para la red primaria del IHRF (septiembre 2020)



Coordinación de la red de referencia del IHRF

- Selección de estaciones con el apoyo de *GGOS Bureau of Networks and Observations* (observatorios geodésicos), el *IERS* (estaciones ITRF), el *BGI* (estaciones absolutas de gravedad) y las subcomisiones regionales de la IAG para marcos de referencia y modelado del geoide.
- No es una “red muerta” pueden agregarse o retirarse estaciones según necesidades específicas.
- La red primaria debe ser densificada mediante redes regionales y nacionales.



Posibilidades para la determinación de coordenadas IHRF:

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

1) Modelos globales de gravedad de alta resolución (GGM-HR)

$$W(X, Y, Z) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n [C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda] P_{nm}(\cos\theta) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos(90^\circ - \theta)$$

Datos de entrada

GGM
ICGEM

2) Modelado regional preciso del campo de gravedad (métodos para la determinación del geoide o cuasigeoide)

$$W_P = U_P + T_P \quad ; \quad T_P = T_{P, \text{satellite-only}} + T_{P, \text{residual}} + T_{P, \text{terrain}}$$

$$W_P = U_P + \gamma \zeta_P + (W_0 - U_0)$$

Datos de entrada

GGM ICGEM	Datos terrestres (aéreos + marinos) de gravedad BGI + banco de datos nacionales	Modelos topográficos ICGEM + IDEMS + modelos detallados
--------------	--	--

3) Conversión de los sistemas de alturas existentes al IHRF

$$W_P = (W_0^{local} + \delta W) - C_P; \quad \delta W = W_0^{IHRF} - W_0^{local}$$

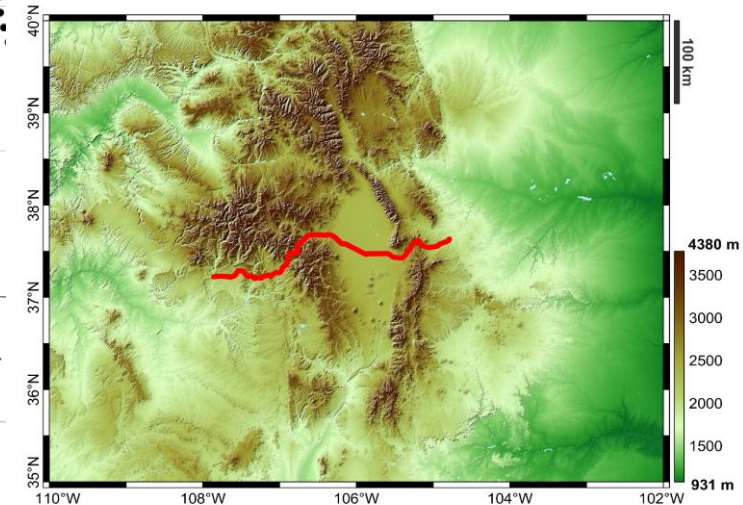
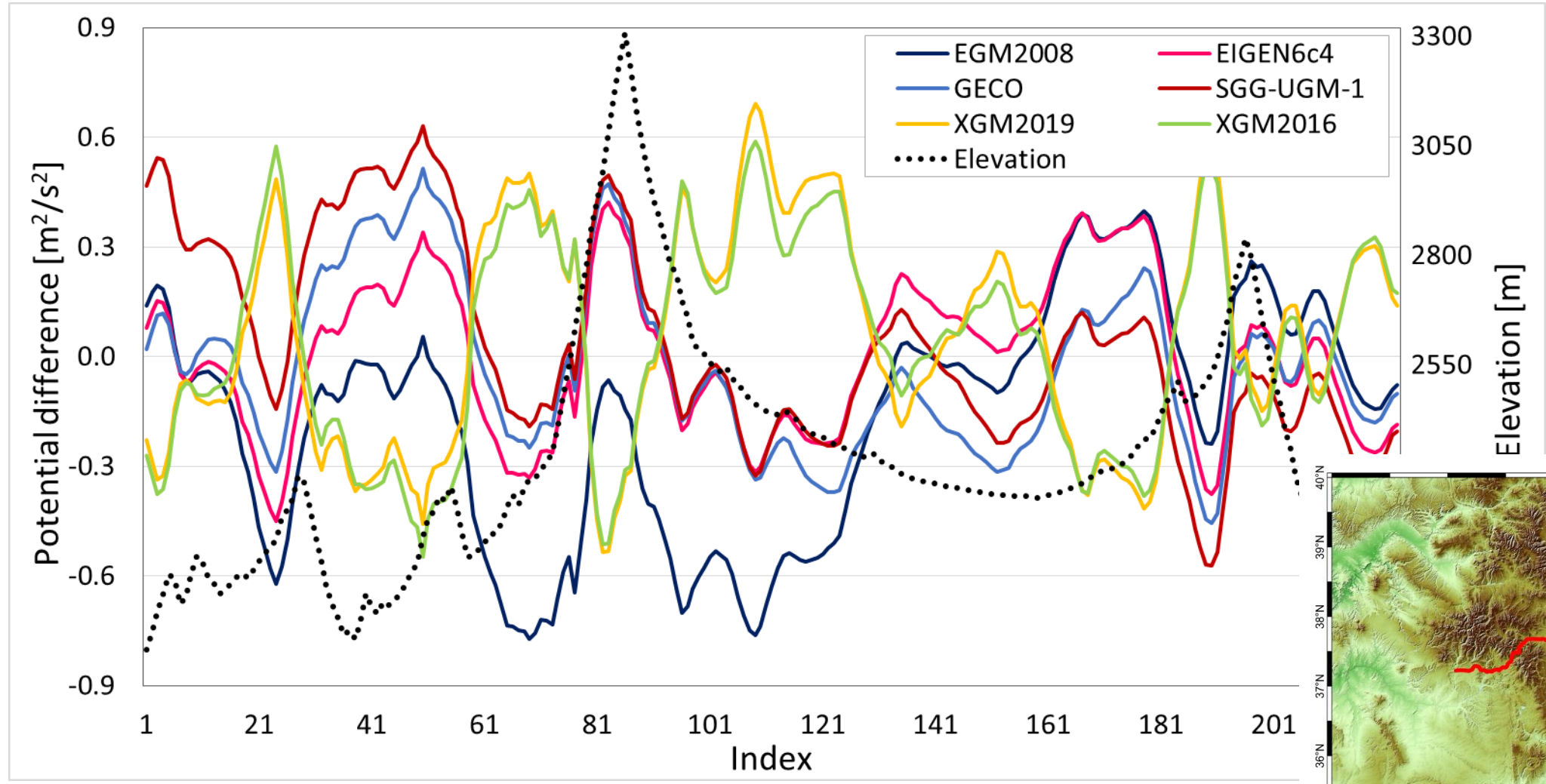
Catálogo de los sistemas de alturas existentes



Coordenadas IHRF basadas en modelos globales de gravedad

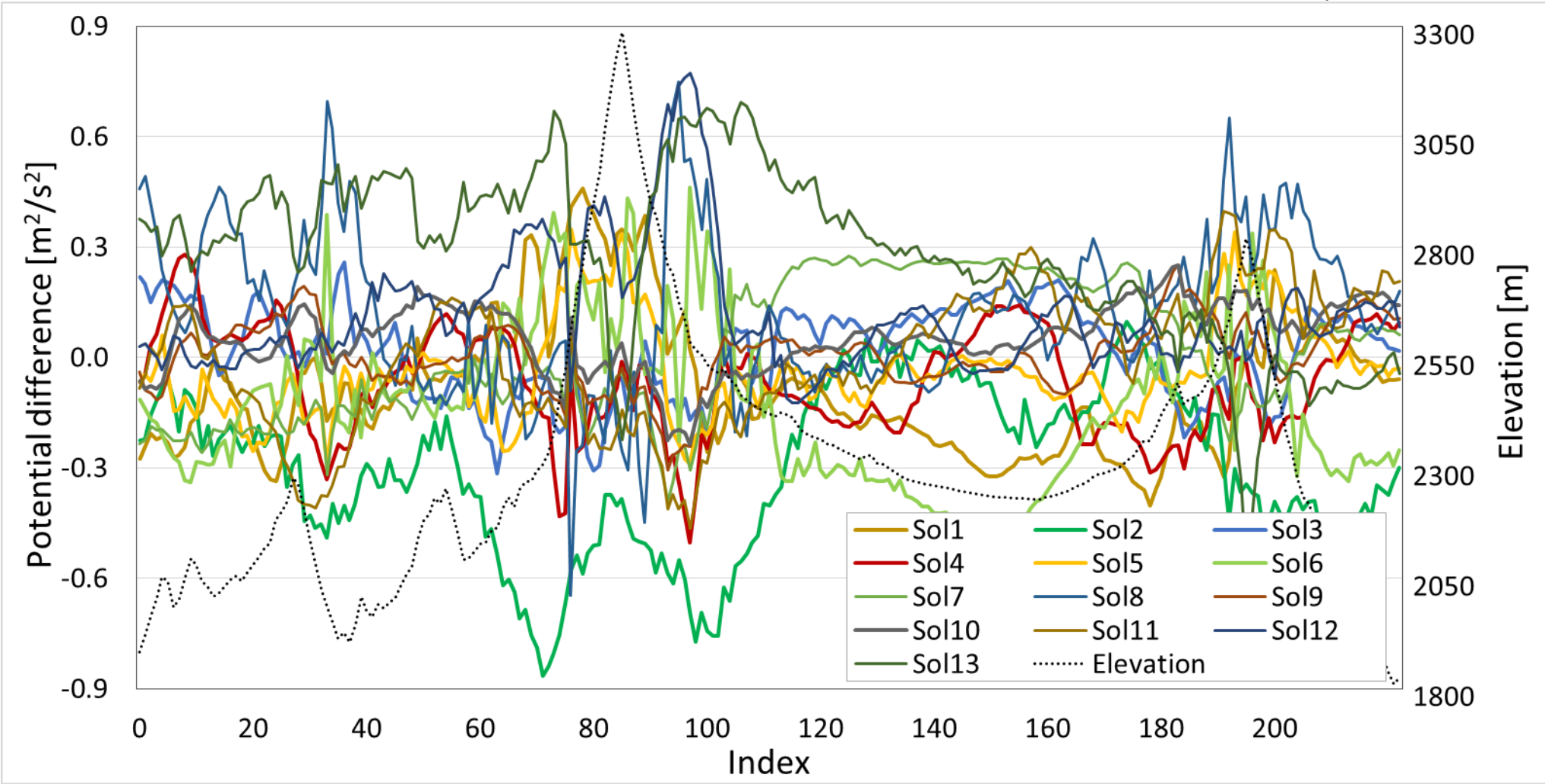


“Experimento Colorado”



Coordenadas IHRF basadas en el modelado regional del campo de gravedad (modelos regionales/nacionales/locales de (cuasi-)geoide)

“Experimento Colorado”



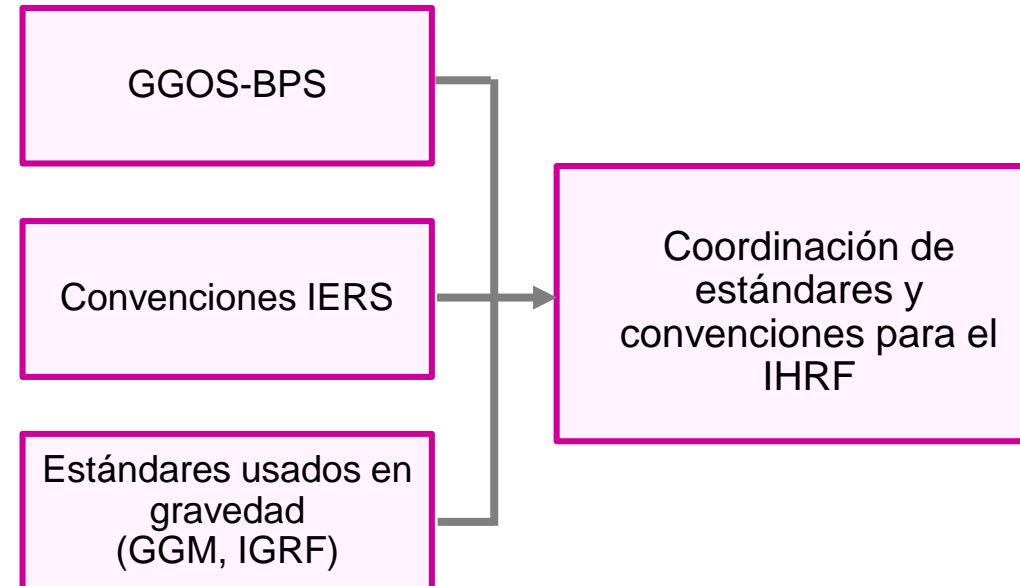
Discrepancias entre coordenadas IHRF determinadas con diferentes métodos

- Los valores de potencial (coordenadas IHRF) dependen de los **datos de entrada** (GGM, gravedad terrestre/aérea/marina/satelital, modelos topográficos) y su preparación, de los **modelos matemáticos**, de los **métodos de cálculo**, de las **aproximaciones o modificaciones específicas** en zonas específicas, etc.
- Es necesario identificar y cuantificar que proporción de las discrepancias se genera por:
 - Diferente tratamiento de los datos de entrada,
 - Diferentes aproximaciones matemáticas y métodos de cálculo.
- A fin de que los resultados sean comparables y consistentes en la mayor medida, debe **estandarizarse cuanto sea posible** (e.g., elipsoide de referencia, sistema de mareas, constantes físicas y numéricas, etc.).



Coordinación de estándares y convenciones para el IHRF

Como el IHRF se basa en la combinación de una componente geométrica (coordenadas X en el ITRF) y una componente física (determinación del potencial W en el punto definido por X), debe asegurarse consistencia entre los estándares que se utilizan en geometría y geodesia física. La interacción con *GGOS Bureau of Networks and Observations* se ocupa de “estandarizar los estándares” utilizados dentro de la IAG.



Determinación descentralizada del IHRF

- Un cálculo “centralizado” de los valores de potencial es muy complicado porque la gravimetría terrestre es reservada
- Un procedimiento “estándar” de cálculo no es apropiado porque
 - La disponibilidad y calidad de datos gravimétricos son muy diferentes de region a región
 - Zonas de diferentes características demandan diferentes aproximaciones (p.ej. Modificación de las funciones kernel, extensión de los radios de integración, reducciones geofísicas como GIA, etc.).
- Por tanto, expertos regionales/nacionales deben ser involucrados en el cálculo de las coordenadas IHRF en sus regiones y ellos deben poner a disposición sus resultados para la realización global del IHRF.

Centros de cálculo nacionales/regionales para el IHRF



Productos

Valores de potencial

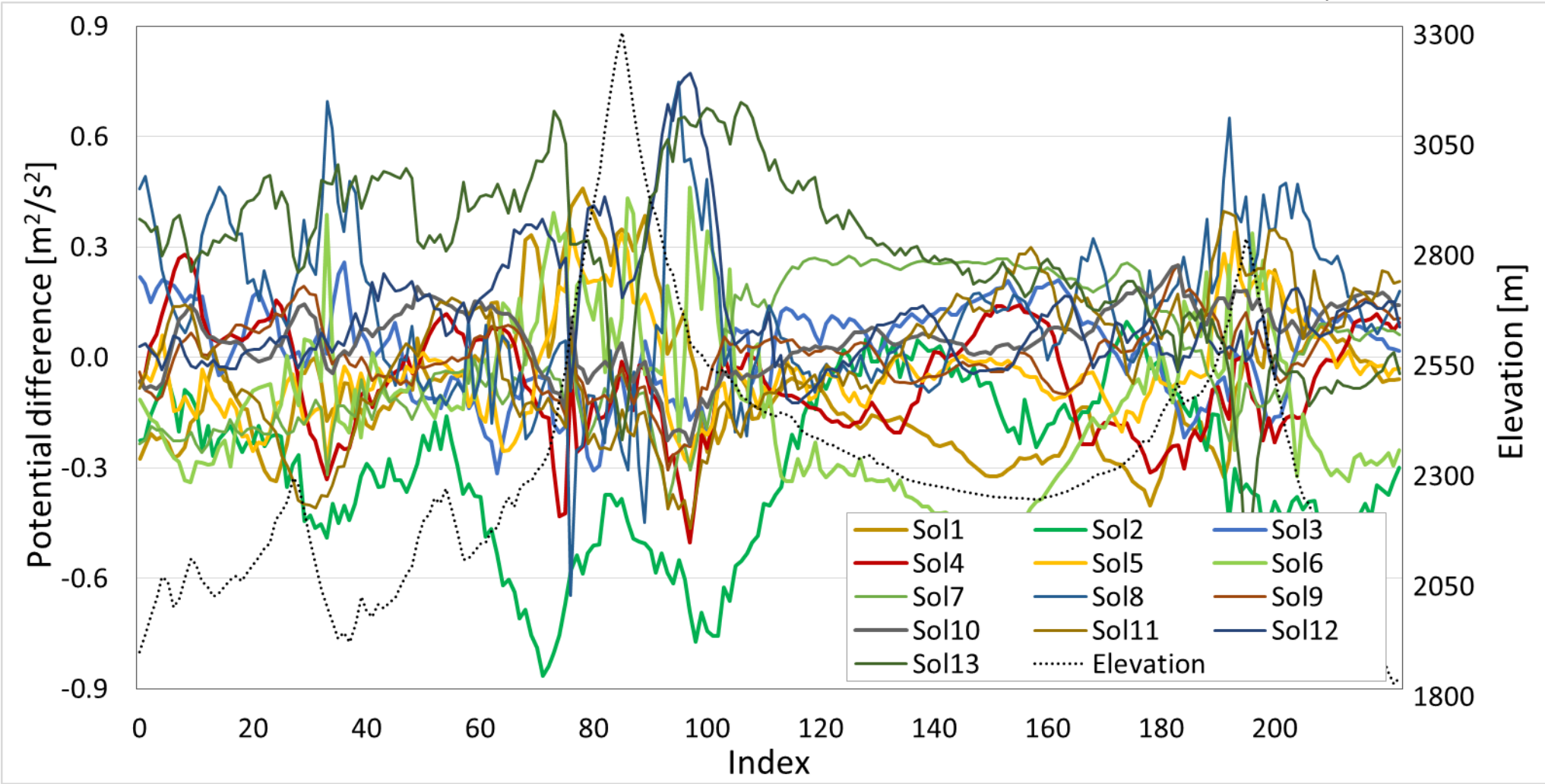
Parámetros de transformación entre sistemas locales y el IHRF

Valores medios de anomalías o perturbaciones de gravedad

Modelos de (cuasi)geoide de alta resolución

Coordenadas IHRF basadas en el modelado regional del campo de gravedad (modelos regionales/nacionales/locales de (cuasi-)geoide)

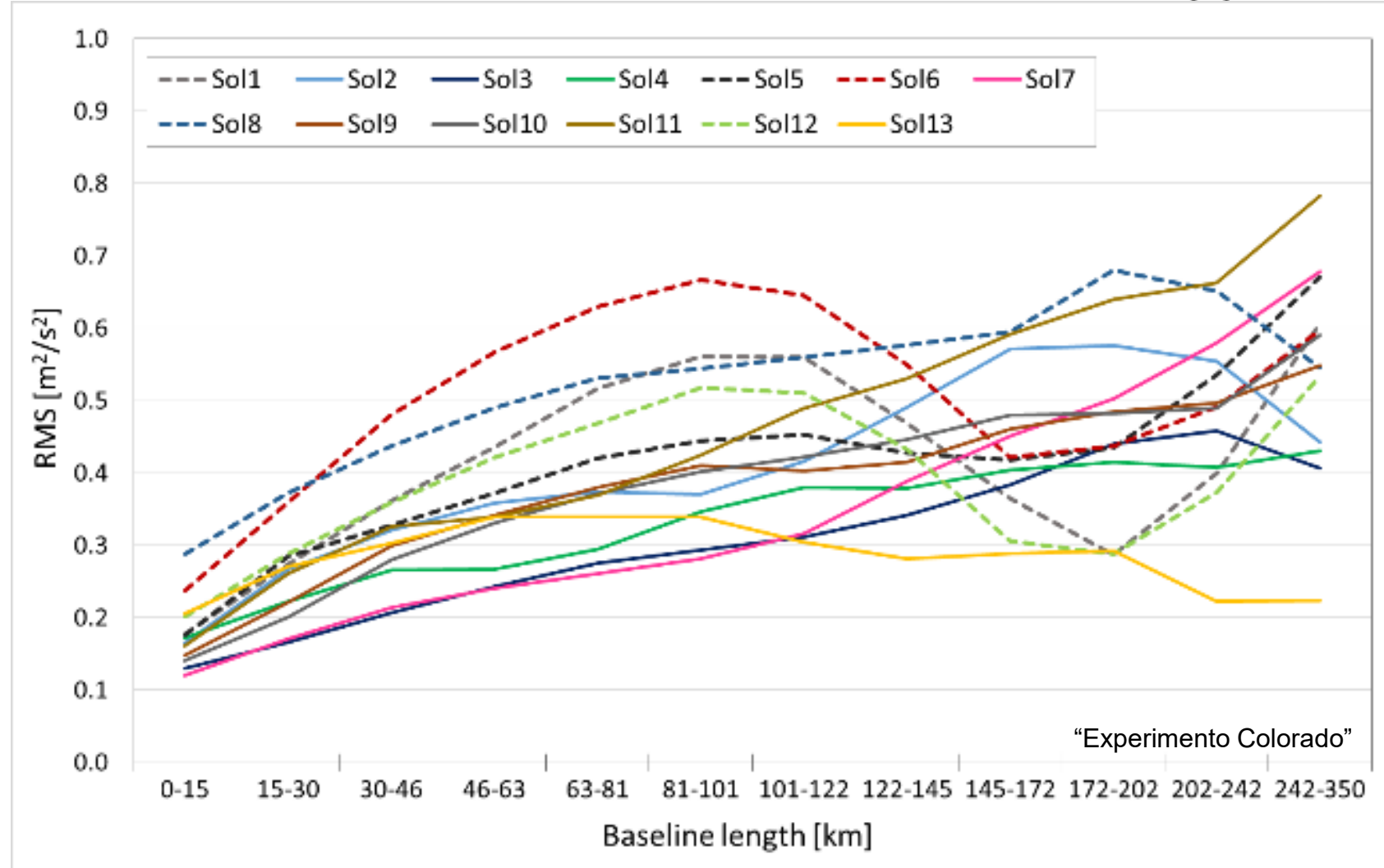
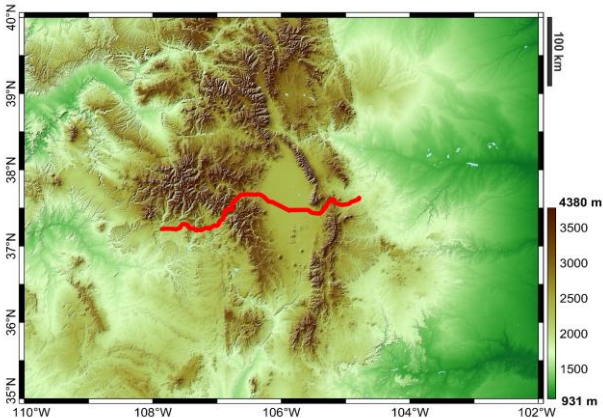
“Experimento Colorado”



Validación de los productos asociados al IHRF

$$\Delta C_{i,j} = (C_{mod,i} - C_{mod,j}) - (C_{lev,i} - C_{lev,j})$$

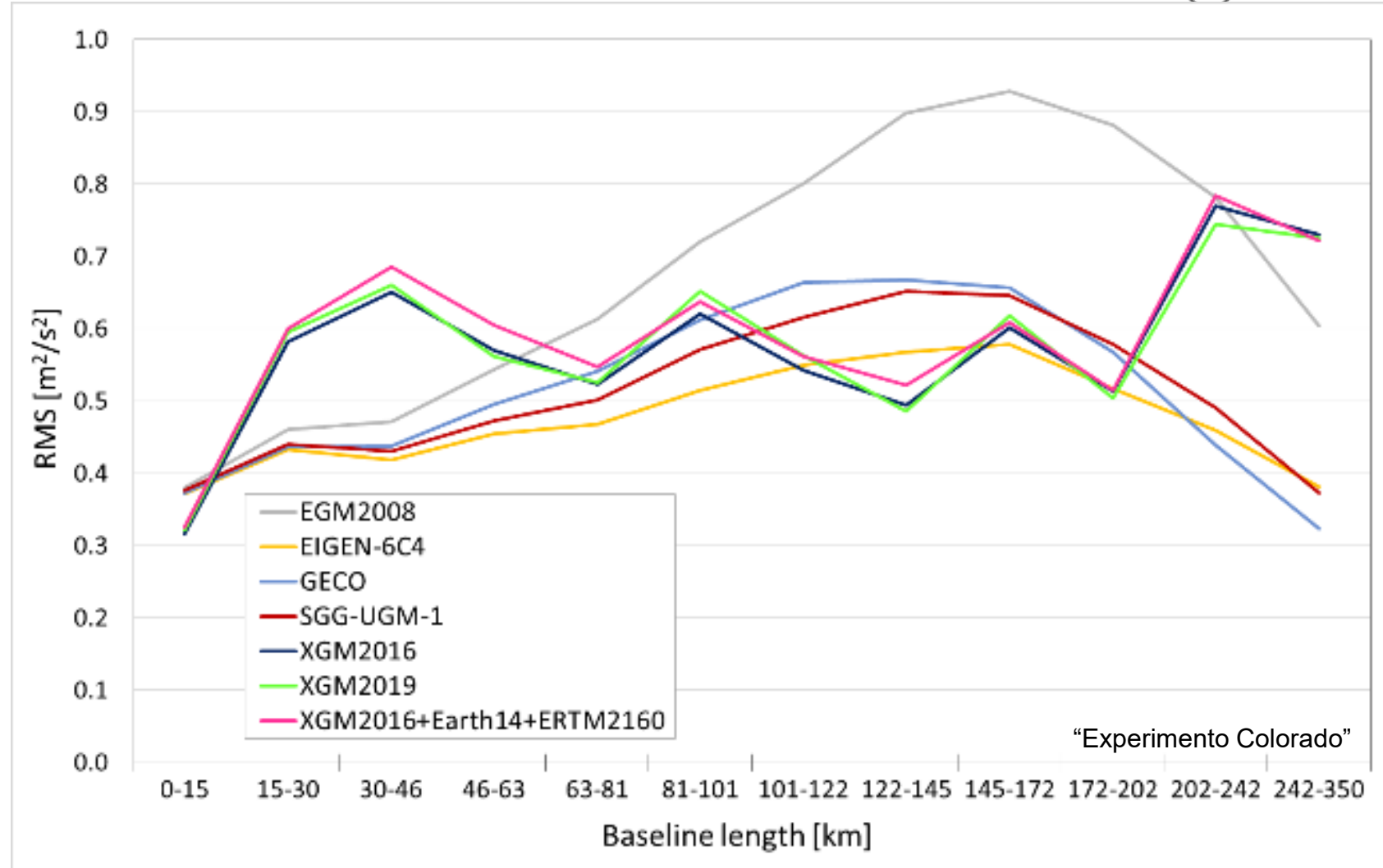
Los valores RMS de las diferencias ΔC_{ij} indican la consistencia entre los valores de potencial obtenidos de los modelos y aquellos obtenidos de la nivelación en función de la distancia.



Validación de los productos asociados al IHRF

$$\Delta C_{i,j} = (C_{mod,i} - C_{mod,j}) - (C_{lev,i} - C_{lev,j})$$

Los valores RMS de las diferencias ΔC_{ij} indican la consistencia entre los valores de potencial obtenidos de los modelos y aquellos obtenidos de la nivelación en función de la distancia.



Validación de los productos asociados al IHRF

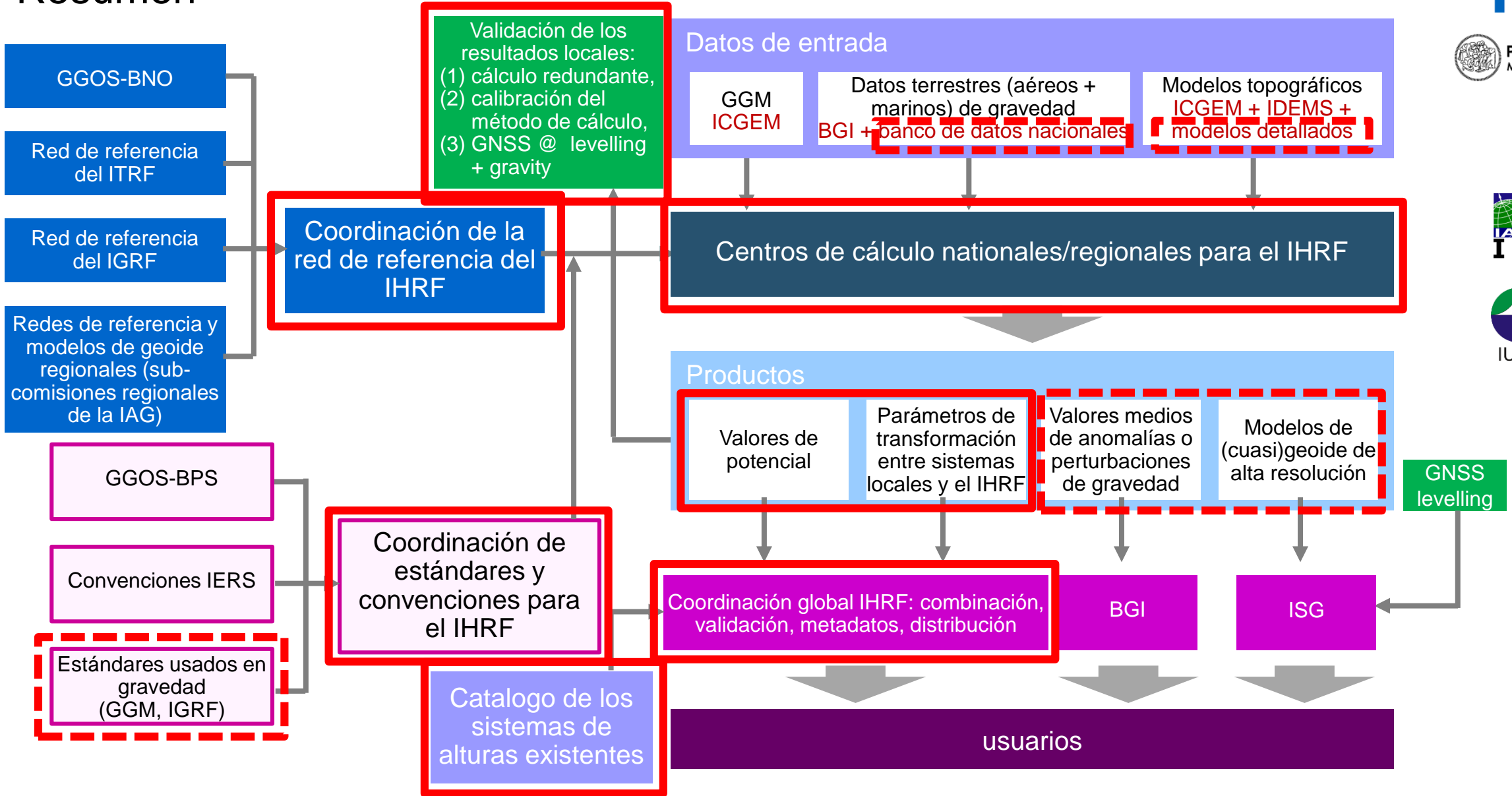
Para garantizar que las coordenadas IHRF calculadas por los centros locales/nacionales/regionales son consistentes entre sí, se requieren estrategias de evaluación de los resultados:

- **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.

Esta evaluación debe ser independiente de los centros de cálculo y debe ser coordinada a nivel global.



Resumen



Actividades internacionales en desarrollo

- 1) Comparación detallada de las soluciones calculadas para el experimento Colorado a fin de identificar con exactitud las fuentes de divergencia y elaborar un documento con estándares concretos para el cálculo de valores de potencial IHRF.
- 2) Cálculo de la primera solución (estática) del IHRF basada en los recursos existentes y con el apoyo de expertos regionales y locales.
- 3) Desarrollo de estrategias (modelos) que permitan mejorar el modelado de efectos topográficos.
- 4) Desarrollo de estrategias para la determinación de los cambios de potencial a través del tiempo \dot{W} .
- 5) Desarrollo de estrategias para la determinación de índices de precisión confiables.
- 6) Preparación de los términos de referencia para el 'elemento IHRS/IHRF' dentro del Servicio Internacional del Campo de Gravedad (IGFS)



Más información

<https://ihrs.dgfi.tum.de/en/>

Sánchez and Barzaghi (2020) **Activities and plans of the GGOS Focus Area Unified Height System**. European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2020, https://presentations.copernicus.org/EGU2020/EGU2020-8625_presentation.pdf

Journal of Geodesy, Special Issue “**Reference systems in Physical Geodesy**” (IHRF, IGRF, determinación precisa de modelos de (cuasi)geoid – Experimento Colorado)

<https://link.springer.com/journal/volumesAndIssues/190?tabName=topicalCollections>

Wang et al. (2020) **Colorado geoid computation experiment – Overview and summary**, J Geod, Special Issue on Reference Systems in Physical Geodesy, in review.

Sánchez et al. (2020). **Strategy for the realization of the International Height Reference System – IHRS**, J Geod, Special Issue on Reference Systems in Physical Geodesy, in review.

Ihde et al. (2017) **Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHRS)**. Surv Geoph, <https://doi.org/10.1007/s10712-017-9409-3>

Sánchez and Sideris (2017) **Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHRS)**. Geoph J Int 209(2), 570-586, <https://doi.org/10.1093/gji/ggx025>

Sánchez et al. (2016) **A conventional value for the geoid reference potential W_0** . J Geod, <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0913-x>

Angermann et al. (2016) GGOS Bureau of Products and Standards: Inventory of standards and conventions used for the generation of IAG products, J Geod 90, 1095-1156, <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0948-z>

