

SIRGAS frente a la implementación del IHRS (International Height Reference System)

Laura Sánchez
Leader GGOS-FA Unified Height System



Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI-TUM)
Technische Universität München

Simposio SIRGAS2018
Aguascalientes, México, octubre 8, 2018

International Height Reference System (IHR)

Resolución IAG No. 1, 2015

- 1) Coordenada vertical son **diferencias de potencial** con respecto a un valor W_0 convencional:

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

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

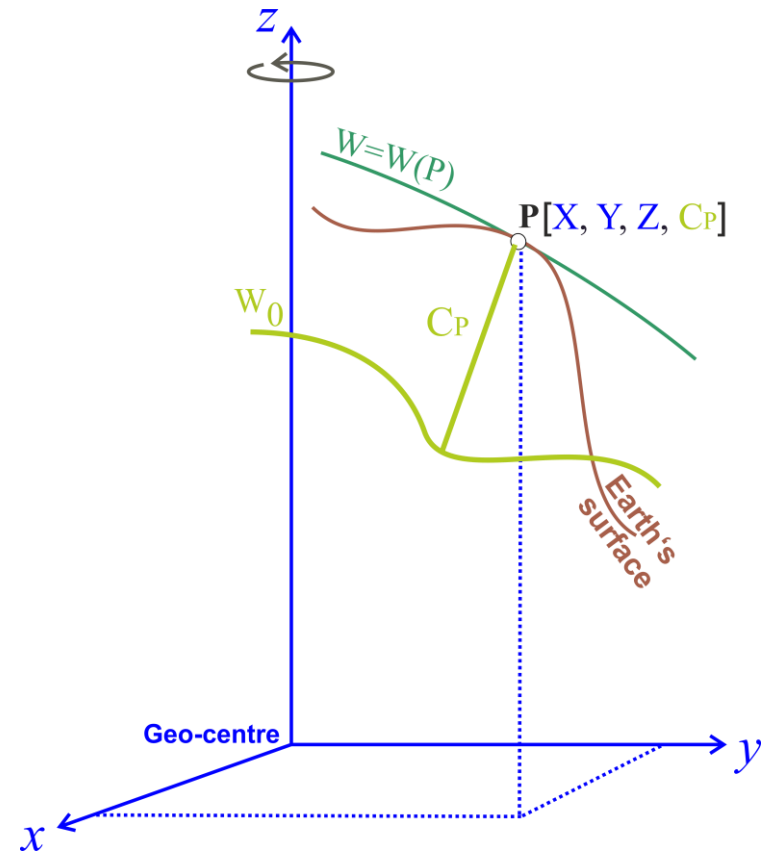
- 2) La posición de P se define en el ITRF

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

- 3) La determinación de $\mathbf{X}(P)$, $W(P)$ (o $C(P)$) incluye sus cambios a través del tiempo, $\dot{\mathbf{X}}(P)$, $\dot{W}(P)$ (or $\dot{C}(P)$).

- 4) Coordenadas en **mean-tide system / mean (zero) crust.**

- 5) Las unidades son **metro** y **segundo** (SI).

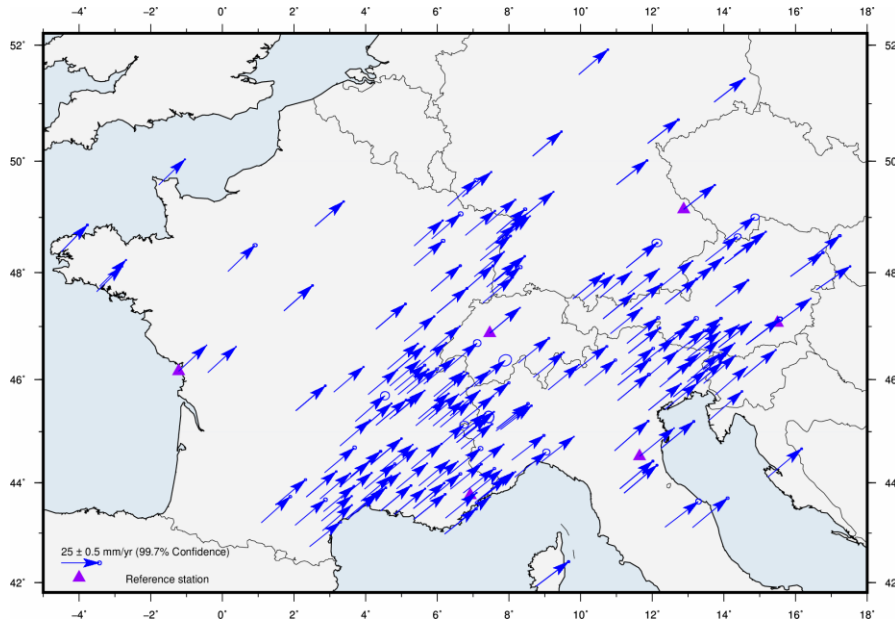


Ver: Ihde J. et al.: *Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHR)*. *Surv Geophy* 38(3), 549-570, 10.1007/s10712-017-9409-3, 2017

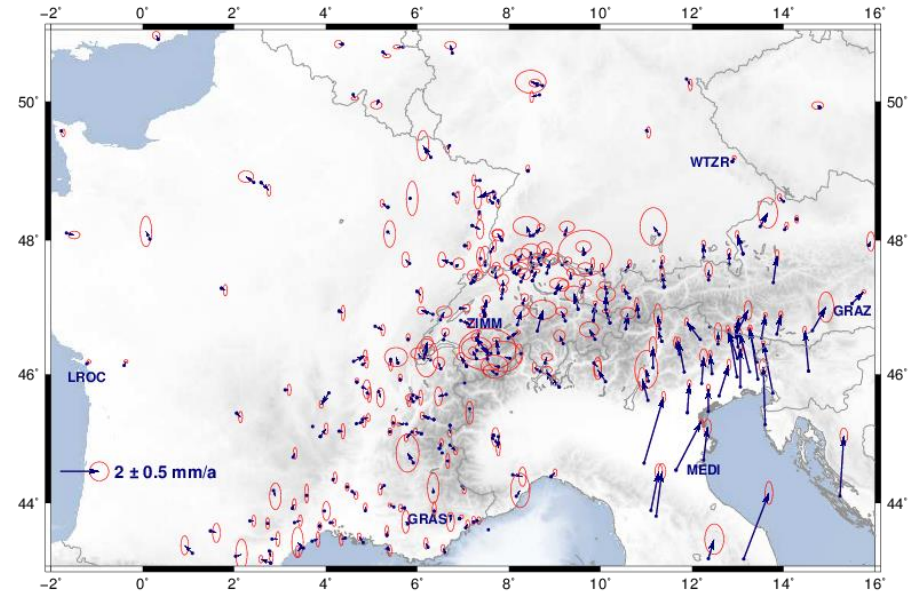
- 1) Parece obvio; sin embargo, el ITRF no siempre es la referencia de las coordenadas geométricas
- 2) Ejemplo: [European Terrestrial Reference System 89](#) (ETRS89)
 - ‘amarrado’ a la parte estable de la placa Eurasia (plate-fixed system/frame)
 - con el objetivo de que no haya cambios relativos de posición entre las estaciones geodésicas, ni cambio de las coordenadas a través del tiempo (velocidades cero)
- 3) Qué hacen en Europa:
 - Las órbitas de los satélites GNSS están dadas en el ITRF
 - Levantamientos GNSS usan órbitas en ITRF y obtienen coordenadas en ITRF
 - Las coordenadas ITRF son transformadas al ETRS utilizando la llamada ‘transformación Altamimi-Boucher’, que lo que hace es descontar el movimiento de la placa Eurasia de las coordenadas ITRF de las estaciones

Coordenadas geométricas en el ITRF

Velocidades en ITRF



Velocidades en ETRS



Inconvenientes de coordenadas ‘plate-fixed’:

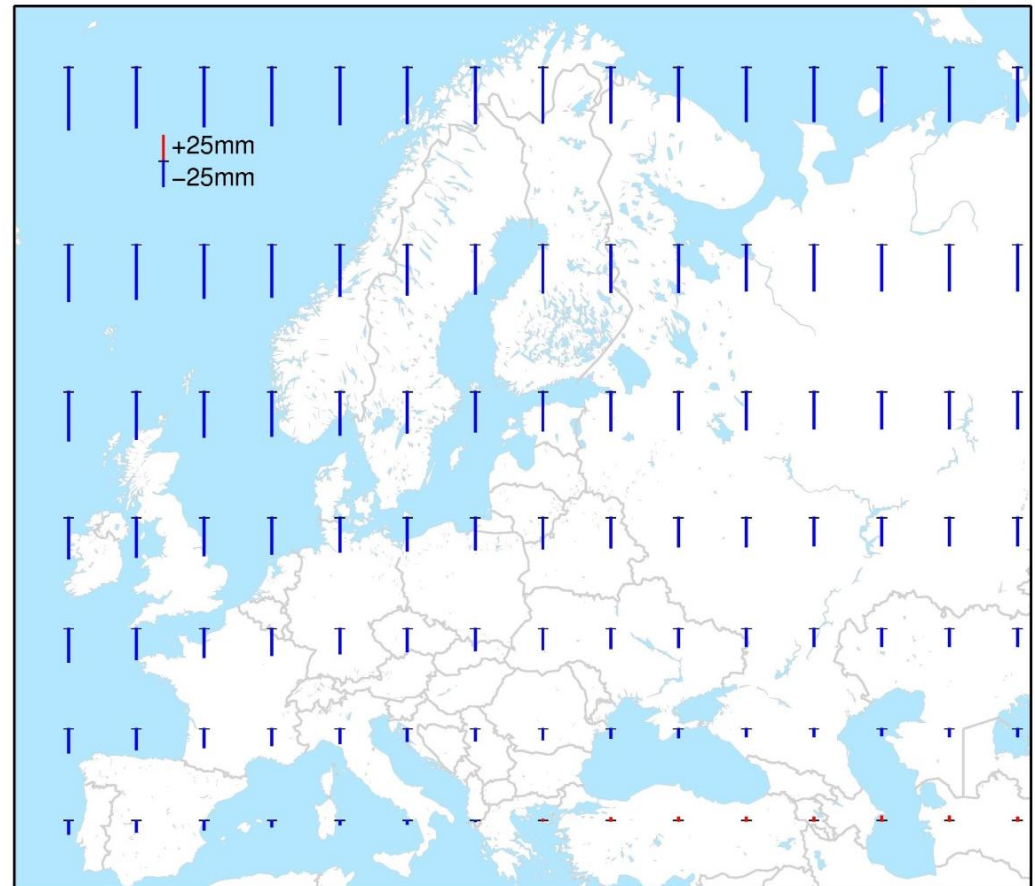
- 1) La precisión de las coordenadas de referencia en los países que no están ubicados en la ‘parte estable’ de la placa Eurasia decrece considerablemente año a año
- 2) La transformación Altamimi-Boucher no tiene en cuenta posibles deformaciones intra-placa, por lo que la precisión de las coordenadas ETRS es mucho más baja que la precisión de las coordenadas ITRF

Coordenadas geométricas en el ITRF

Inconvenientes de coordenadas
'plate-fixed' (continuación):

- 3) Usuarios de aplicaciones globales basadas en el ITRF (navegación, servicios de augmentación, etc.) deben hacer esfuerzos adicionales para manejar consistentemente ITRF y ETRS
- 4) El uso de coordenadas ETRS en la combinación de alturas elipsoidales, alturas físicas (nivelación+gravimetría) y modelos geoidales introduce errores adicionales en $h-H-N$ (h cambia hasta 7 cm!)

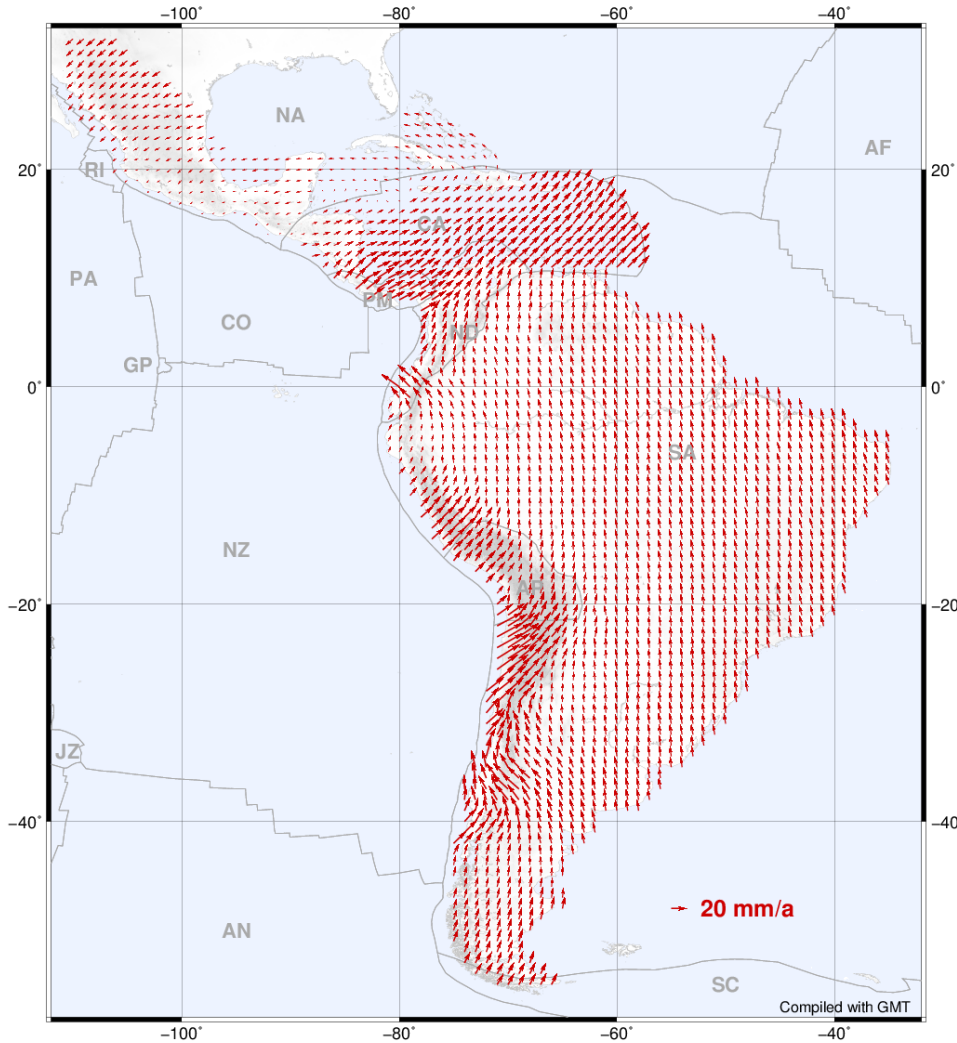
ITRF1989 – ITRF2008



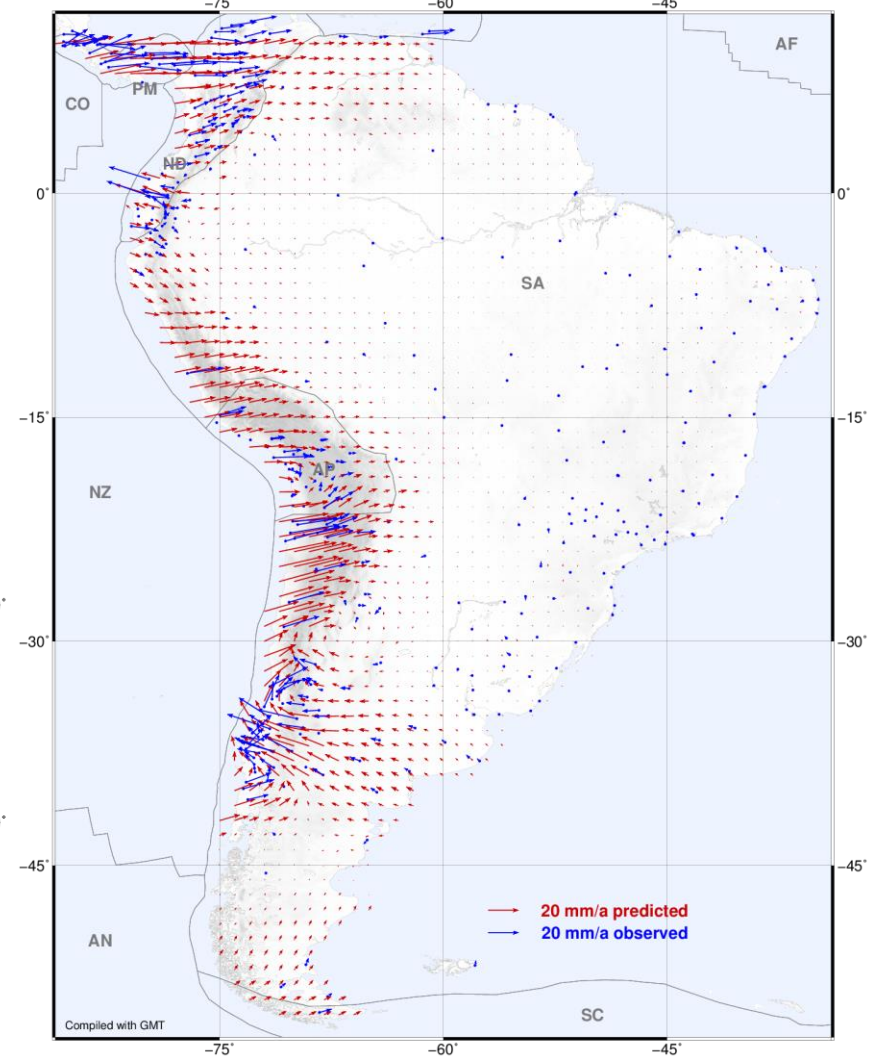
Cortesía: G. Liebsch, BKG

Coordenadas 'plate-fixed' en América Latina

Velocidades en ITRF

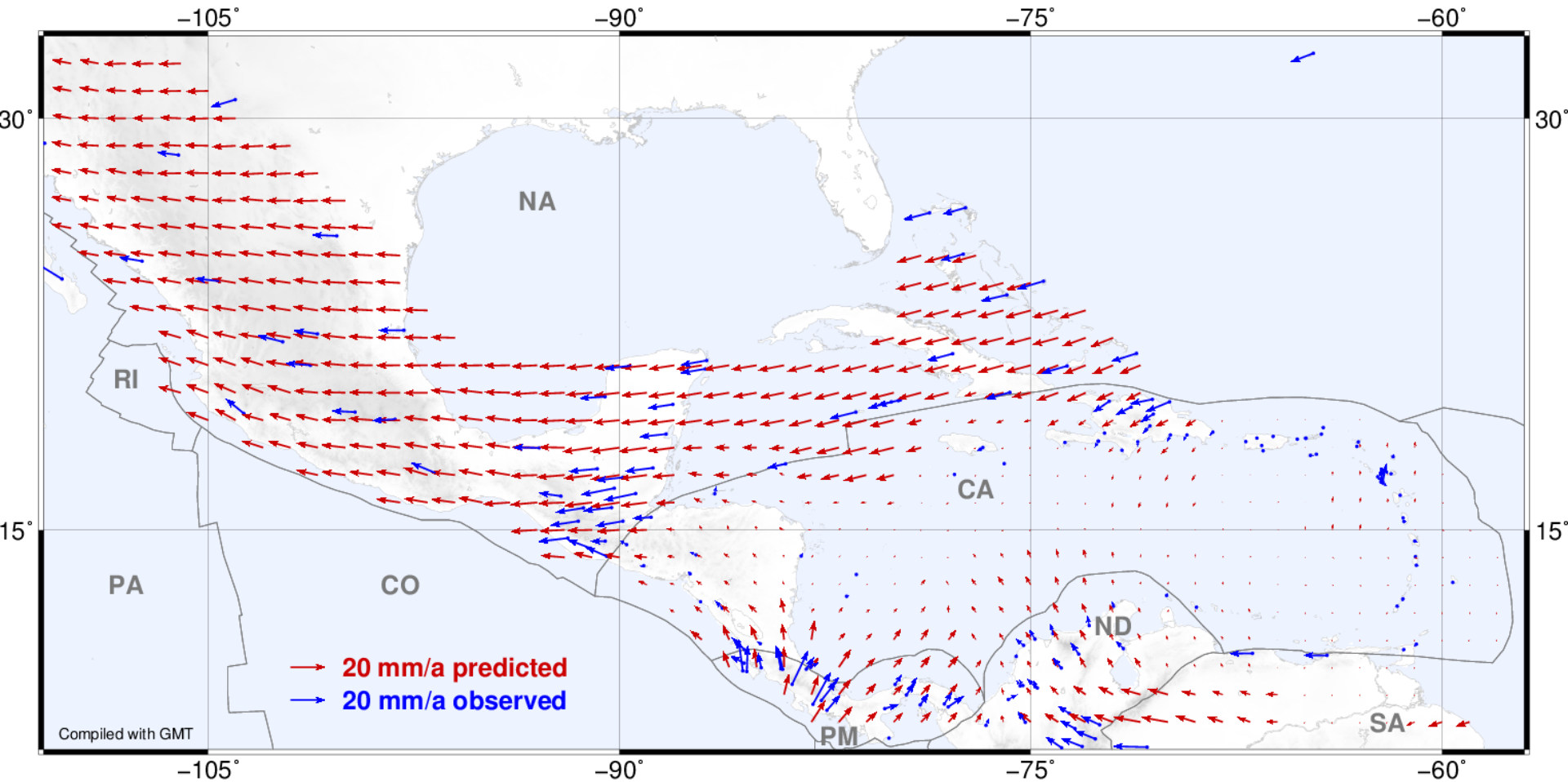


Velocidades 'amarradas' a la placa Suramérica



Coordenadas 'plate-fixed' en América Latina

Velocidades 'amarradas' a la placa Caribe

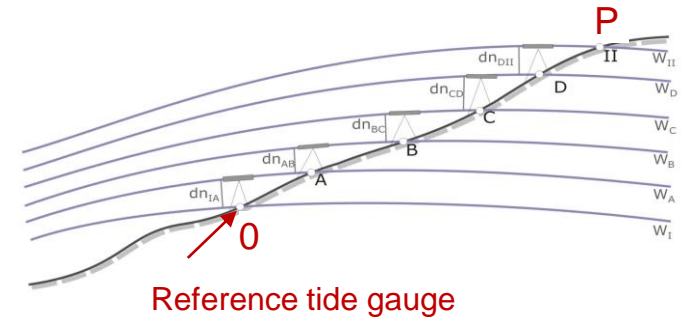


- 1) SIRGAS es la densificación regional del ITRF en América Latina
 - 2) Sus coordenadas no son solo posiciones $[X, Y, Z]$, sino también velocidades $[V_x, V_y, V_z]$
 - 3) Estaciones SIRGAS de operación continua pueden convertirse en estaciones de referencia del IHR, para ello se requiere
 - que funcionen de manera continua (la intermitencia desfavorece el monitoreo del marco de referencia);
 - que el procesamiento de sus mediciones GNSS ‘continuas’ también sea ‘continuo’ y que se utilicen estándares actualizados según lo indique el IGS y el IERS. Esto incluye reprocesamiento de mediciones históricas;
 - levantamientos gravimétricos alrededor de las estaciones a fin de realizar la componente física del IHR (valores de potencial)
 - conexión con las redes verticales (tantas como sean posibles).
- Actividades relacionadas con el mantenimiento y procesamiento de las mediciones GNSS en las estaciones SIRGAS deben desarrollarse bajo la coordinación y orientación del SIRGAS-GTI (chair: V. Cioce)

Coordenadas verticales asociadas a la gravedad

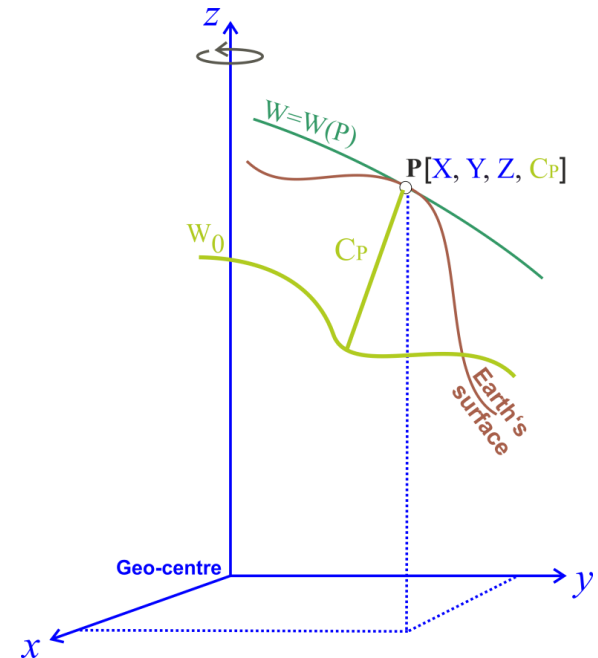
- Con nivelación, determinamos **números geopotenciales** con respecto a un datum vertical local

$$H_P^{local} = \frac{W_0^{local} - W_P}{\hat{g}} = \frac{C_P^{local}}{\hat{g}} \quad ; \quad C_P = \cong \sum_0^P g \, dn$$



- Con el IHR5, el objetivo es determinar **números geopotenciales 'globales'** con respecto a un **datum convencional global** definido por un valor de referencia W_0 . Como W_0 is una convención, conocido e invariable, la coordenada vertical son directamente **valores de potencial W_P** :

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



Posibilidades para la determinación de valores de potencial $W(P)$

1) Modelos globales de gravedad de alta resolución

$$W_p = f(X_p, GGM)$$

2) Modelado de alta resolución del campo de gravedad

$$W_p = W_{P, \text{satellite-only}} + W_{P, \text{high-resolution}}$$

Modelo global de gravedad basado en técnicas satelitales:

Satellite tracking from ground stations (SLR)
Satellite-to-satellite tracking (CHAMP, GRACE)
Satellite gravity gradiometry (GOCE)
Satellite altimetry (oceans only)



Modelado de alta resolución:
(Stokes o Molodenskii)

Satellite altimetry (oceans only)
Gravimetry, astro-geodetic methods, levelling, etc.
Terrain effects

3) Valores de potencial inferidos de modelos de (cuasi)geoide:

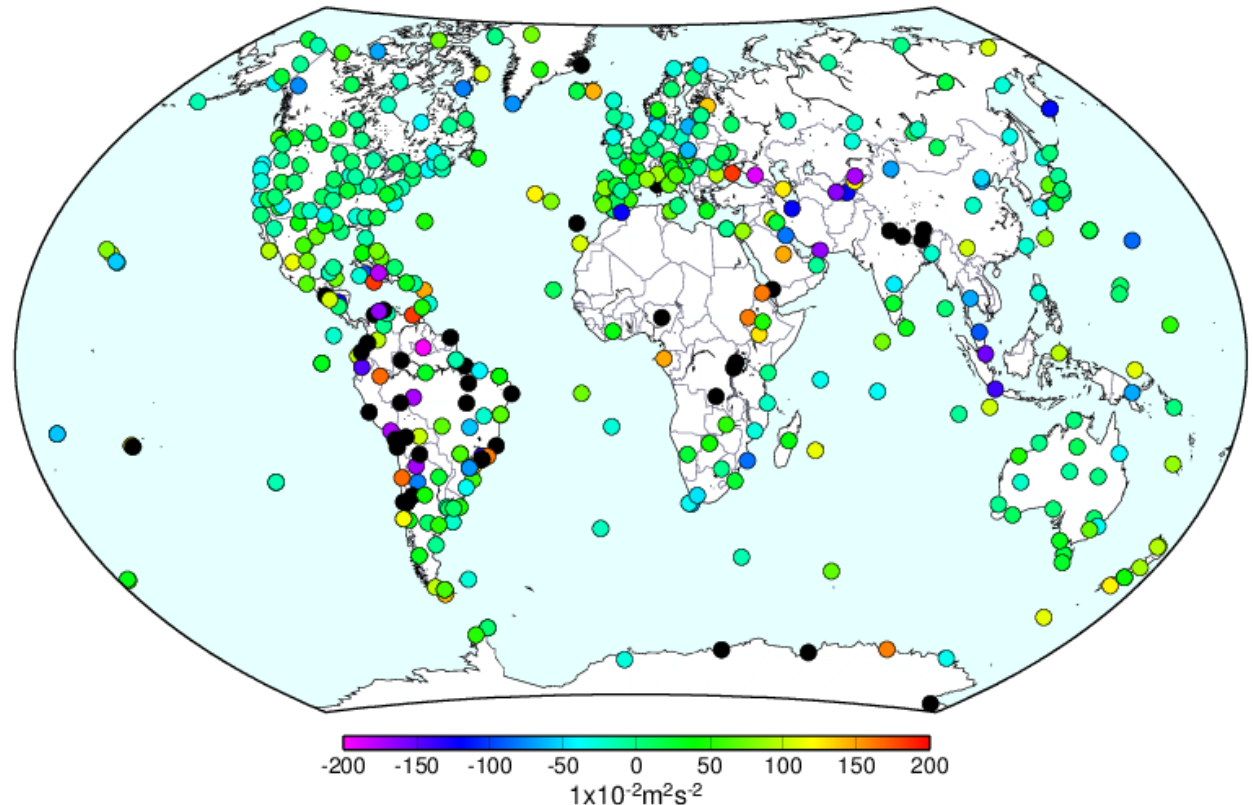
$$W_p = U_p + \gamma \zeta_p + (W_0 - U_0)$$

4) Nivelación + gravimetría (previa unificación de los datum verticales en el IHRS/IHRF)

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

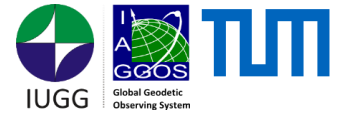
W(P) derivado de modelos globales de gravedad de alta resolución (n = 2190)

- Diferencias de valores de potencial W_P obtenidos del EGM2008 (Pavlis et al. 2008) y EIGEN6C4 (Förste et al. 2014), ambos con $n=2190$
- Discrepancias mayores que ± 20 cm (algunos valores, especialmente en América del Sur, sobrepasan ± 2 m)



➤ Este método no puede utilizarse (aún) en la realización del IHRS.

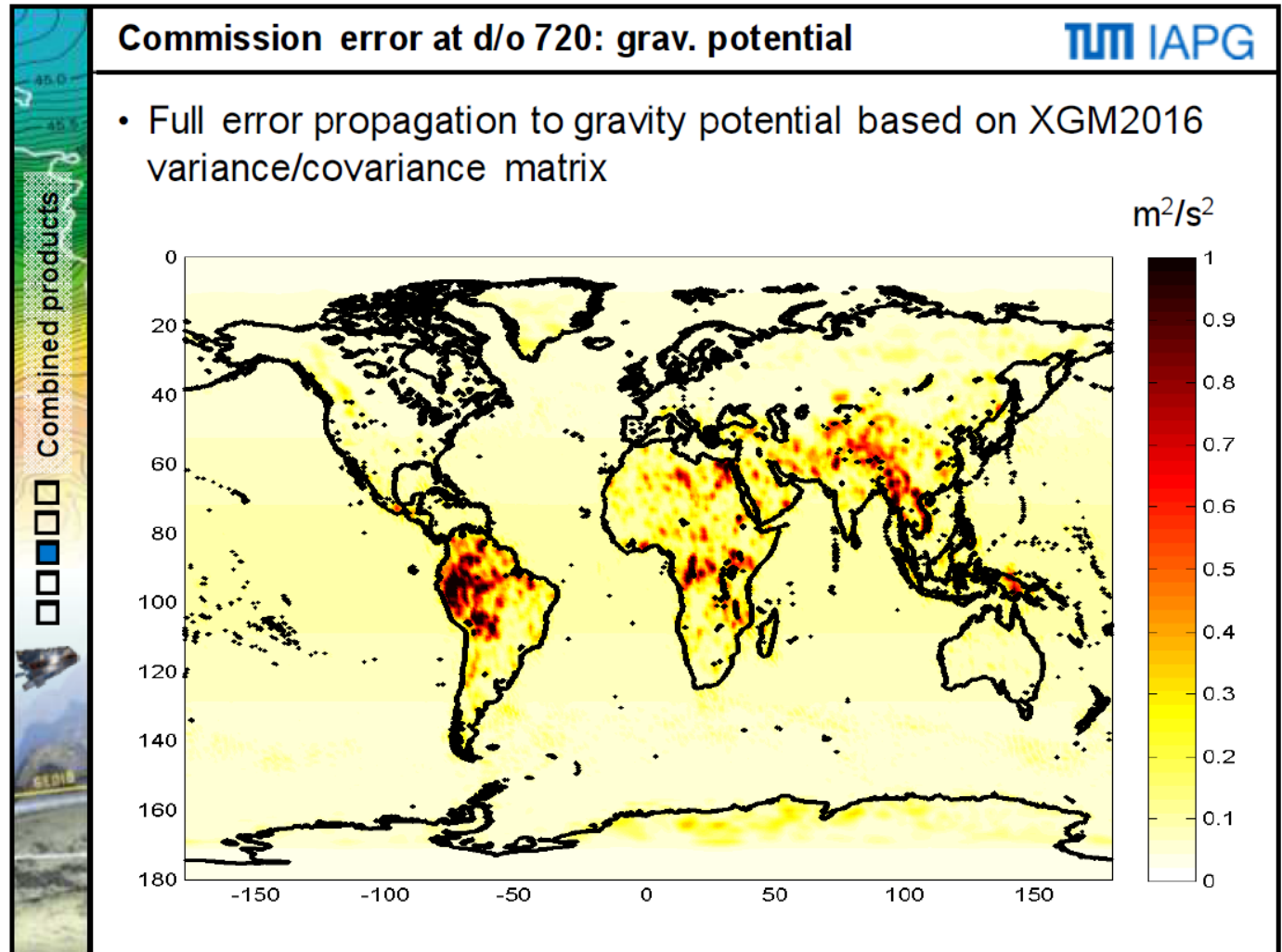
W(P) derivado de modelos globales de gravedad de alta resolución (n = 2190)



- NGA y TUM están trabajando conjuntamente en una nueva generación de modelos globales de gravedad (EGM2020).
- Se basan en la combinación rigurosa (propagación de errores) de modelos de gravedad derivados de mediciones satelitales y mallas con valores medios (5min) de anomalías de gravedad obtenidos del banco de datos de NGA.
- Versión actual XGM2016, n=720
- Al error de omisión (10 cm) debe agregarse el error de comisión.

W(P) derivado de modelos globales de gravedad de alta resolución (n = 2190)

➤ El modelo EGM2020 tampoco permitirá una realización precisa del IHRs (especialmente en América del Sur).



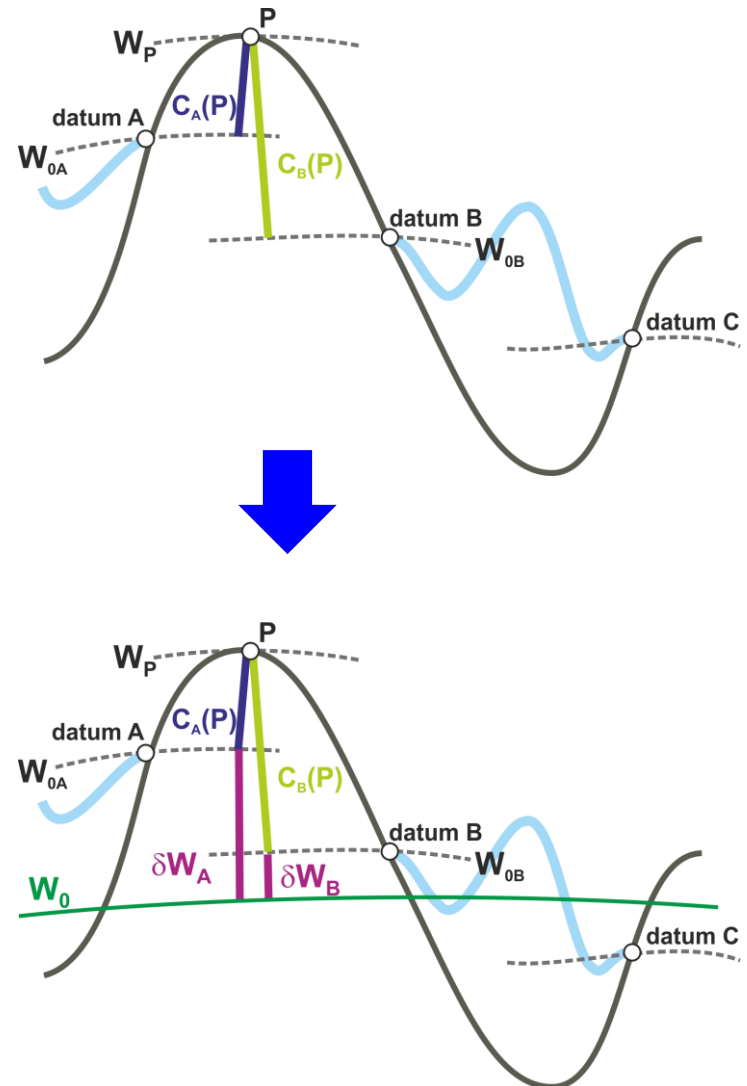
W(P) obtenido de nivelación + gravimetría

- Números geopotenciales (diferencias de potencial) asociados a **datums verticales locales**. Su potencial “absoluto” no se conoce
 $W_{0,local} = ?$

- Para determinar W_P es necesario estimar la **diferencia de nivel** entre el W_0 global y los locales $W_{0,local}$
 $\rightarrow \delta W = W_0 - W_{0i}$

$$W_P = (W_{0,local} + \delta W) - C_P;$$

- Precisión estimada de δW : **cm en regiones con buena infraestructura geodésica**, **dm en regiones menos desarrolladas**, casos extremos hasta de 1 m.

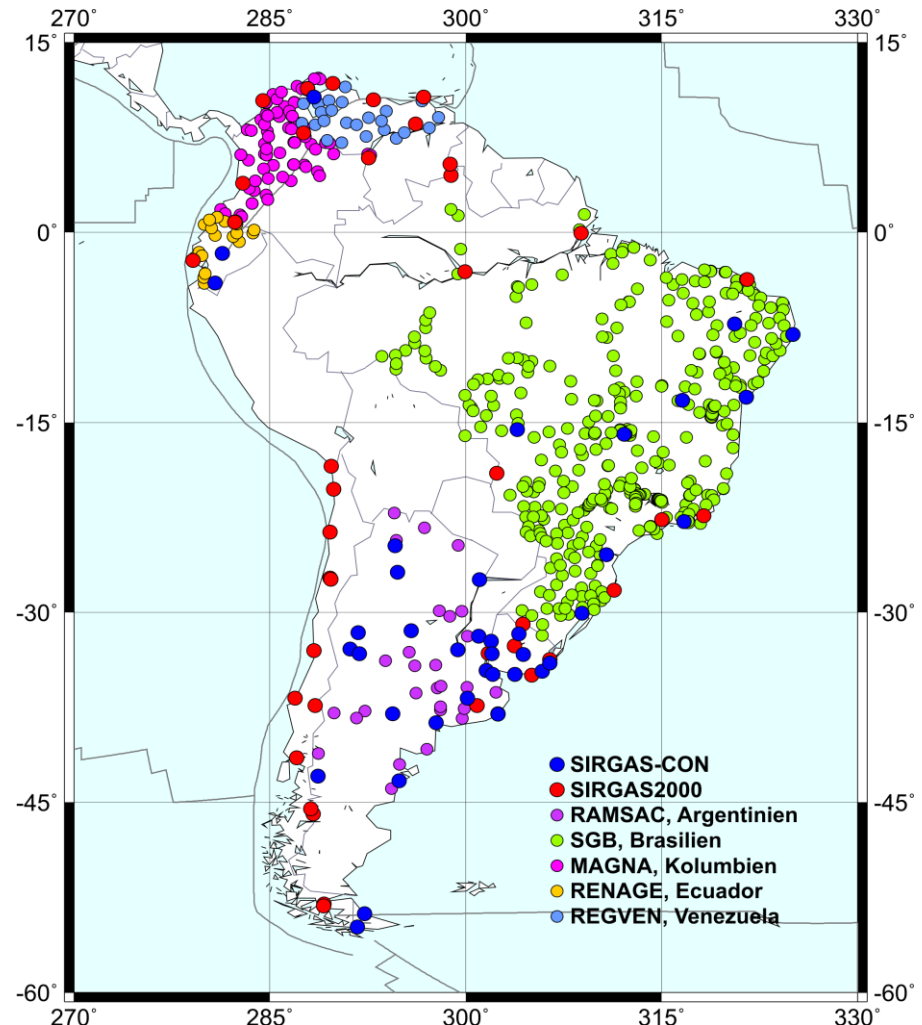


W(P) obtenido de nivelación + gravimetría

Ejemplo: δW para los sistemas de alturas de América del Sur con respecto al valor W_0 del IHRIS.

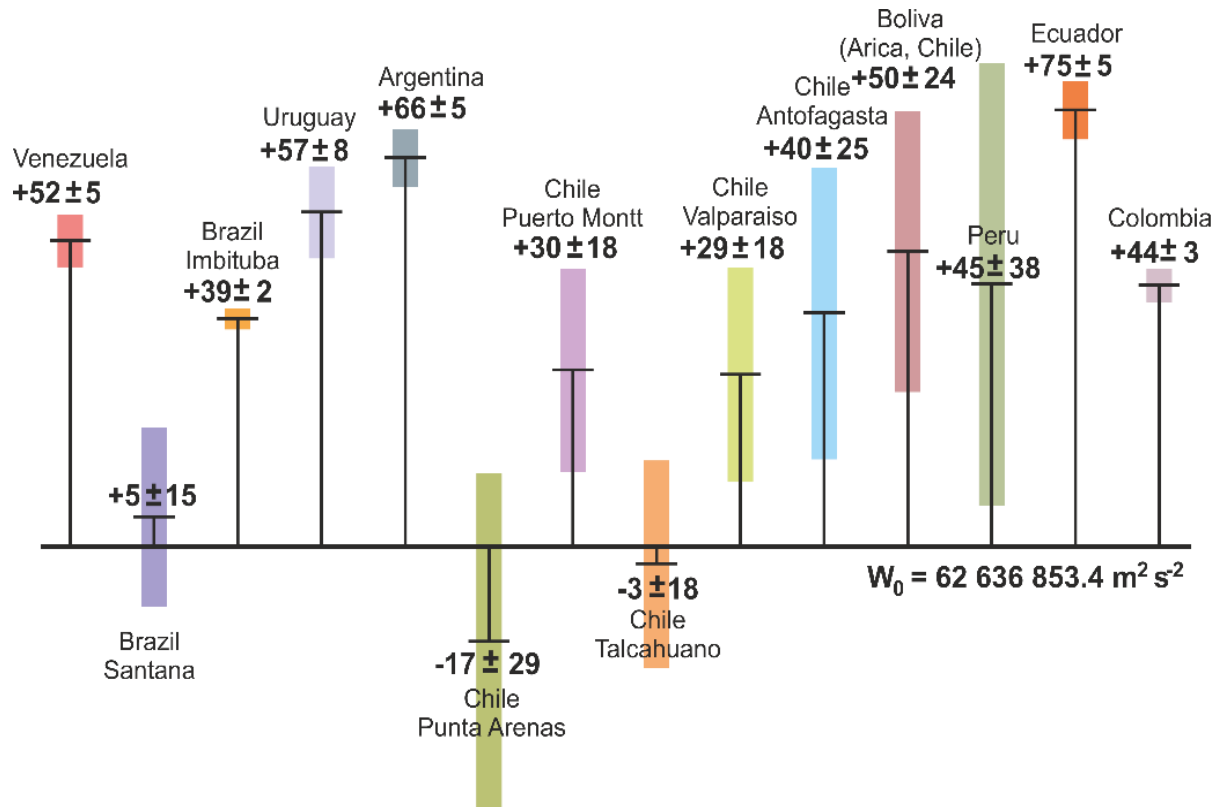
Datos de entrada:

- Estaciones de referencia SIRGAS2000, SIRGAS-CON, densificaciones nacionales.
- Con alturas niveladas conocidas.
- Modelos de geoide nacionales o GGM.
- Datos proporcionados parcialmente por los países miembros de SIRGAS, otros datos obtenidos de los sitios web de los Institutos Geográficos, otros datos simulados.



W(P) obtenido de nivelación + gravimetría

Ejemplo: δW (en cm) para los sistemas de alturas de América del Sur con respecto al valor W_0 del IHRF.



- Esta estrategia se puede utilizar para integrar al IHRF/IHRF los sistemas de alturas existentes, pero no es lo suficientemente precisa para establecer la red de referencia del IHRF.

W(P) obtenido del modelado detallado del campo de gravedad

Es el único método que actualmente permite el mayor acercamiento posible a la precisión necesaria para establecer el IHRF

$$W_P = W_{P,satellite-only} + W_{P,high-resolution}$$

Modelo global de gravedad basado en técnicas satelitales

Satellite tracking from ground stations (SLR)
 Satellite-to-satellite tracking (CHAMP, GRACE)
 Satellite gravity gradiometry (GOCE)
 Altimetría satelital (solo en océanos)



Modelado de alta resolución (Stokes o Molodensky)

Altimetría satelital (solo en océanos)
 Gravimetría terrestre (aérea, marina), métodos astrogeodésicos, nivelación, etc.
 Efectos topográficos.

$$W_P = U_P + T_P$$

$$T_P = T_{P,satellite-only} + T_{P,residual} + T_{P,terrain}$$

un GGM

Gravimetría terrestre (aérea)

un DTM

➤ Si el potencial de perturbación T_P se utiliza para el cálculo del (cuasi)geoide:

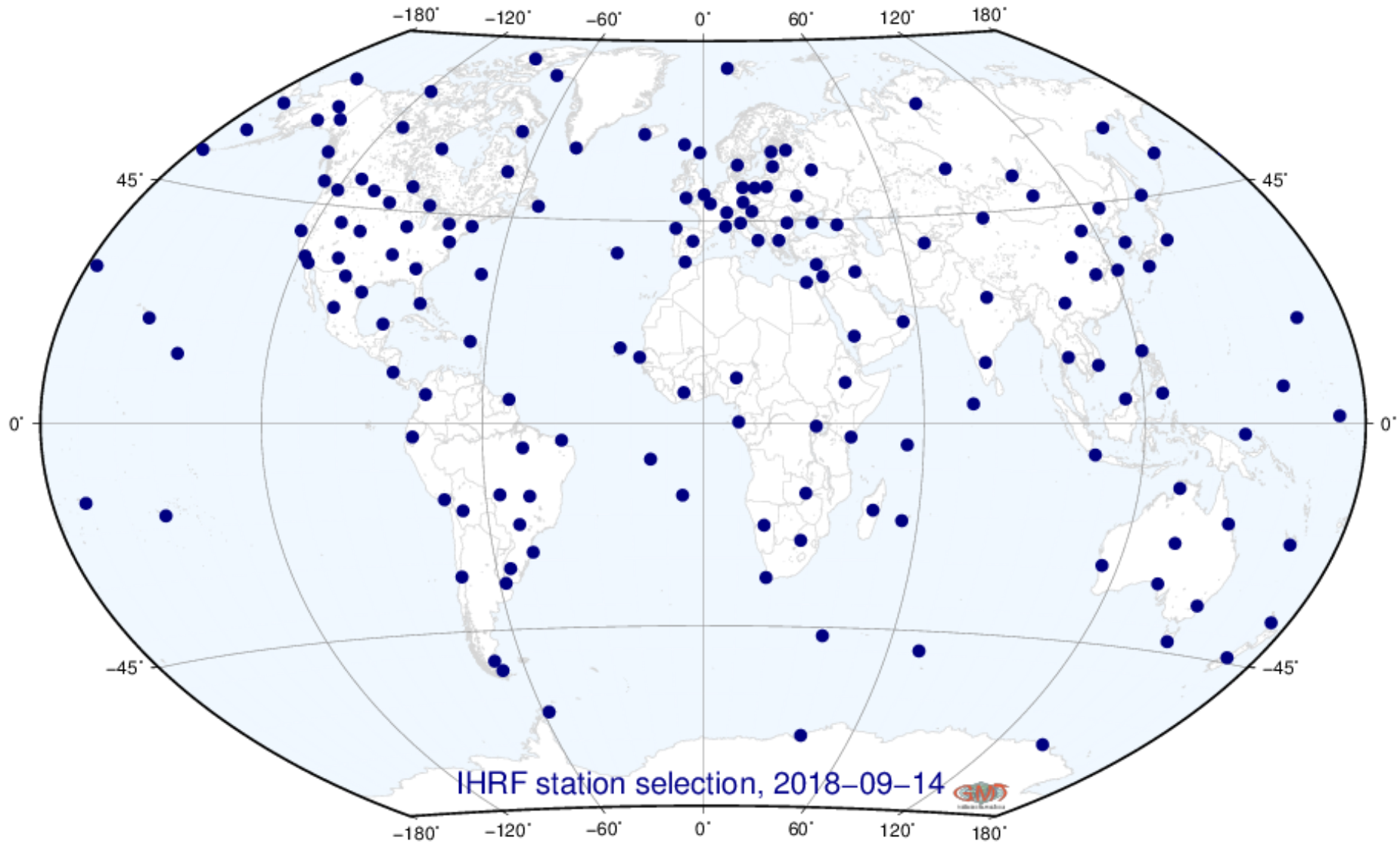
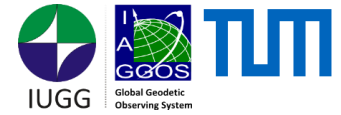
$$N_P \approx \zeta_P = \frac{T_P}{\gamma_P}$$

se garantiza consistencia entre la realización „regional/nacional“ del geoide y el marco global IHRF.

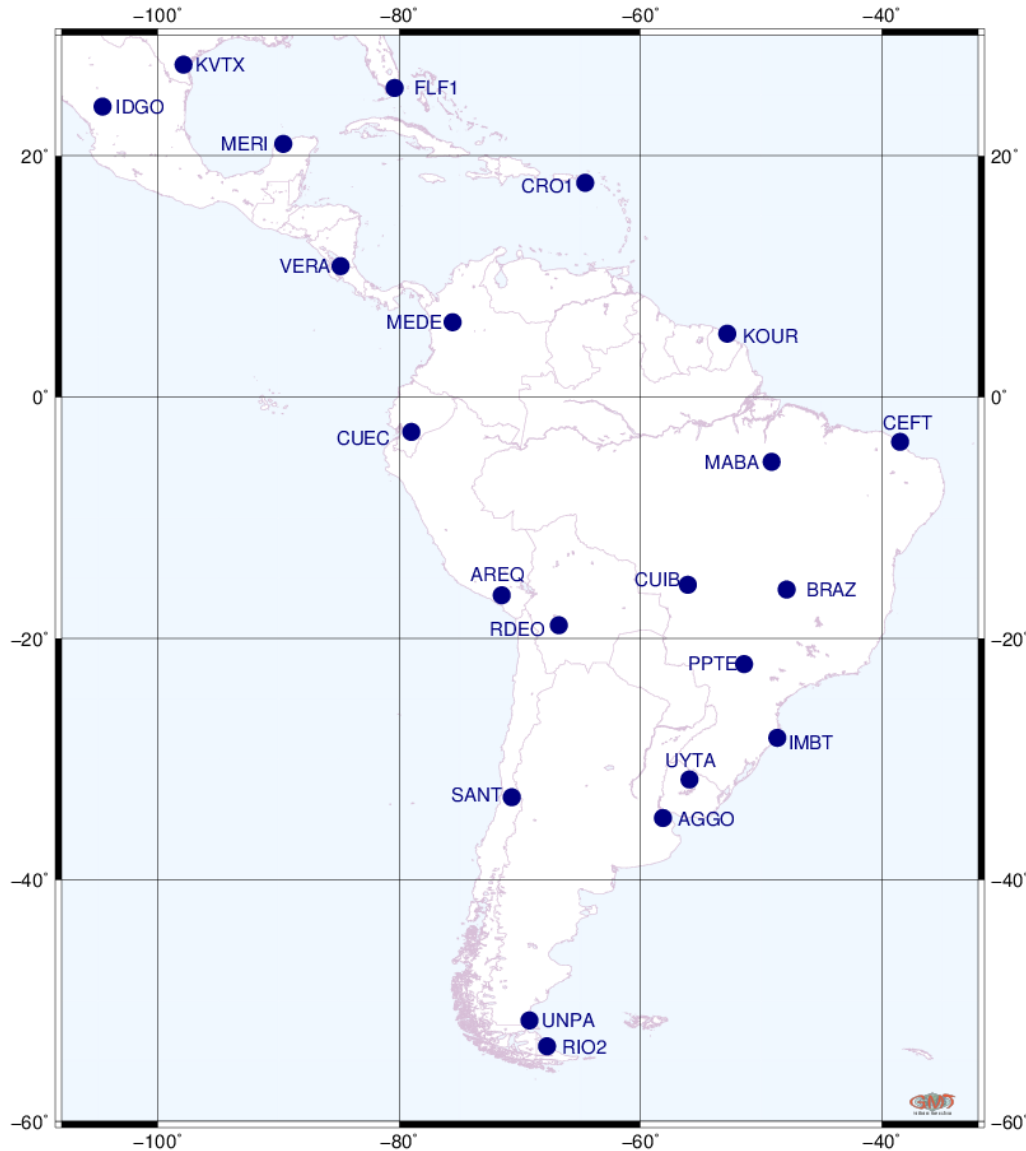
1) Establecimiento de estaciones IHRs en la Región SIRGAS:

- Selección de algunas estaciones SIRGAS de operación continúa en cada país.
- Las estaciones deben estar materializadas por pilares o trípodes permanentes empotrados directamente en el suelo. Antenas GNSS ubicadas en edificios no son bienvenidas.
- Levantamiento gravimétrico alrededor de las estaciones SIRGAS seleccionadas: por lo menos 150 puntos de gravedad distribuidos homogéneamente alrededor de la estación hasta una distancia máxima aproximada de 200 km.
- La posición de los puntos gravimétricos debe estimarse con posicionamiento GPS (precisión en cm es suficiente).
- En zonas de actividad sísmica (los Andes, Centro América) conviene la identificación (o materialización) precisa de los puntos gravimétricos a fin de facilitar levantamientos gravimétricos repetitivos.
- Se recomienda que los levantamientos gravimétricos relativos se apoyen directamente en una estación de gravedad absoluta.
- La cantidad de estaciones SIRGAS seleccionadas por cada país para conformar el IHRF depende de las capacidades nacionales disponibles. Si dichas capacidades son muy limitadas conviene hacer el esfuerzo por incluir al menos una estación por país.
- La distribución de las estaciones debe ser más o menos homogénea sobre toda la Región SIRGAS.

Red de referencia para el IHRF (165 estaciones)



Estaciones IHRF en la region SIRGAS



2) Viculación de los sistemas de alturas existentes al IHRIS/IHRF

- Nivelación geodésica (junto con gravimetría) de estaciones SIRGAS de operación continua. Ideal si las estaciones seleccionadas para el IHRF son niveladas.
 - Posicionamiento GNSS preciso en los mareógrafos de referencia: algunos ocupados durante SIRGAS2000, otros con estación SIRGAS de operación continua. En el primer caso se necesitan ocupaciones repetitivas para determinar las velocidades en la estación SIRGAS2000. En ambos casos se requiere el desnivel entre mareógrafo y estación GNSS.
 - Conexión de las redes verticales de países vecinos por medio de nivelación geodésica.
 - Combinación de alturas elipsoidales, números geopotenciales, registros mareográficos, observaciones de altimetría satelital y modelado detallado del campo de gravedad terrestre.
- Todas estas actividades deben desarrollarse bajo la coordinación y orientación del SIRGAS-GTIII (chair: S.R.C. de Freitas)