Invitación a la realización del Sistema de Referencia Internacional de Alturas (IHRS) en la Región SIRGAS

Laura Sánchez (lm.sanchez@tum.de)
GGOS Focus Area Unified Height System
Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI-TUM)
Technische Universität München

Reunión del Consejo Directivo de SIRGAS
Quito, Ecuador, Noviembre 17 de 2016

Estructura de la IAG

International Council for Science (ICSU): 121 nations, 32 unions

International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)

International Association of Geodesy (IAG)

Commissions

- 1 Reference Frames
  - 1.3b SIRGAS
- 2 Gravity Field
  - 2.4b Gravity and Geoid in South America
  - 2.4c Gravity and Geoid in North and Central America
- 3 Geodynamics
- 4 Applications

Inter-Commission Committee on Theory

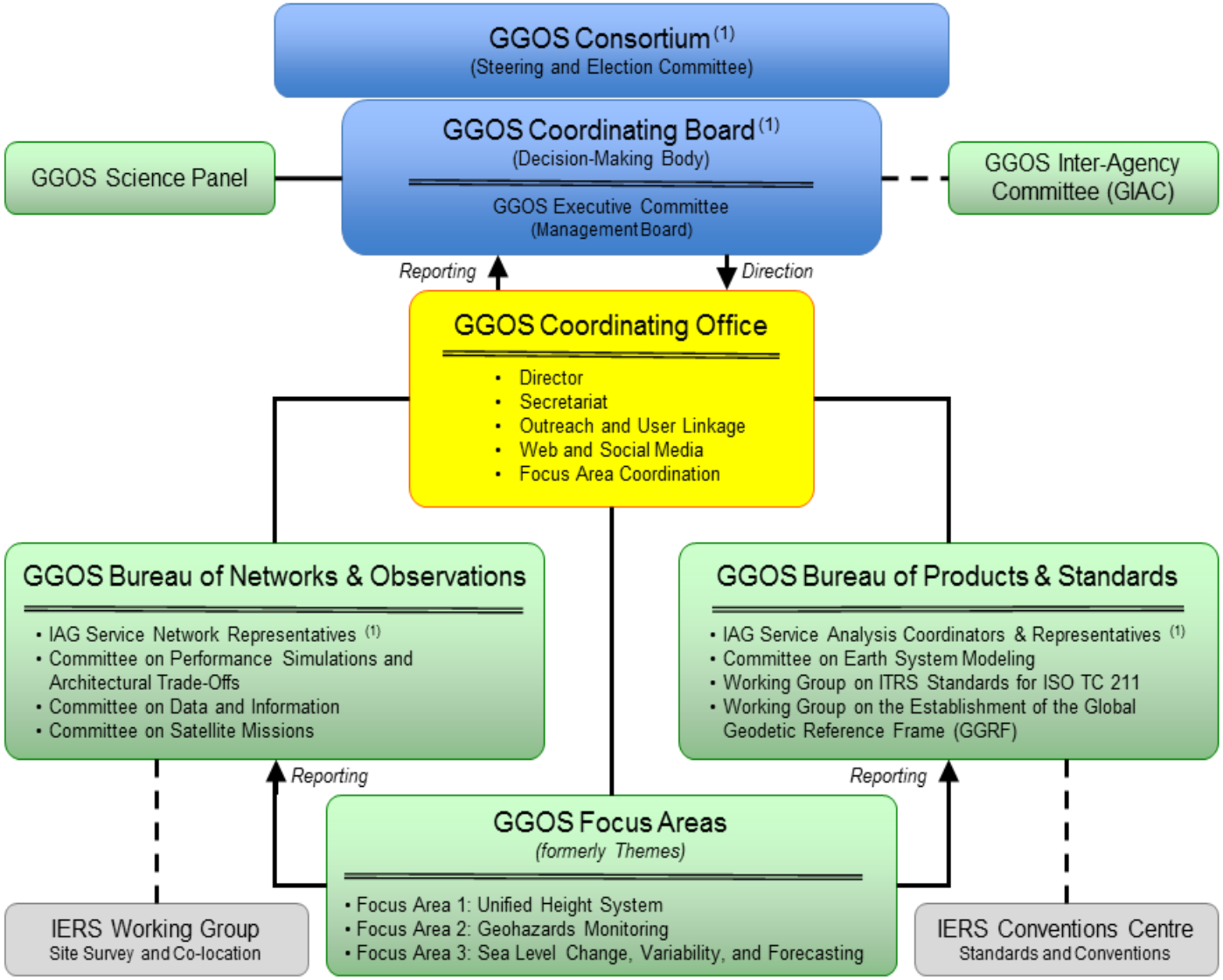
Scientific Services

Geom.: IERS, IGS, IDS, ILRS, IVS

Gravim.: IGFS, BGI, ICGEM, IDEMS, IGETS, ISG

Combin.: BIPM, PSMSL

Global Geodetic Observing System (GGOS)



(1) GGOS is built upon the foundation provided by the IAG Services, Commissions, and Inter-Commission Committees

Antedecentes

1) La Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) expide en 26 de febrero de 2015 la Resolución No. A/RES/69/266 para promover el establecimiento de un Marco de Referencia Geodésico Mundial (GGRF: *Global Geodetic Reference Frame*) para el desarrollo sostenible.

2) La Asociación Internacional del Geodesia (IAG: *International Association of Geodesy*), como organización responsable del avance de la Geodesia a nivel mundial, elabora un documento que describe los fundamentos científicos sobre los que debe implementarse el GGRF para alcanzar los objetivos previstos por la ONU.

3) La ONU (a través de la resolución y los nuevos comités permanente y regionales para el GGRF) provee el marco gubernamental necesario para la promoción y establecimiento del GGRF.

4) La IAG proporciona los fundamentos científicos y teóricos, la infraestructura observacional y métodos de análisis necesarios, y una amplia red humana compuesta por cientos de geodestas trabajando mancomunadamente a nivel global en pro del GGRF.

El concepto de la IAG sobre el GGRF (1)

1) El GGRF es la realización del GGRS (Global Geodetic Reference System).

2) El GGRS define un sistema de referencia común para determinar de manera consistente y simultánea la geometría (tamaño, figura, superficie), el campo de gravedad y la orientación de la Tierra en cualquier momento (es decir que incluye sus cambios a través del tiempo).

3) La realización precisa del GGRS (el GGRF) is indispensable para generar información geoespacial confiable requerida en

   – la determinación de los cambios que se suceden dentro del Sistema Tierra (monitoreo del cambio global, prevención y mitigación de desastres naturales, etc.)

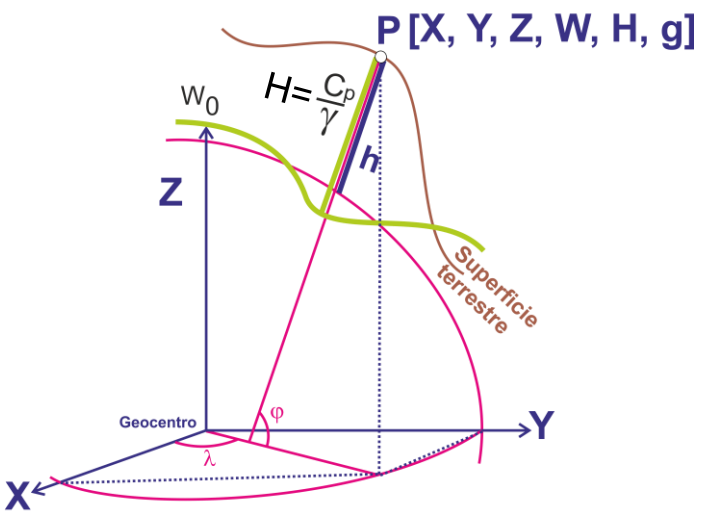
   – la generación de políticas para el desarollo sostenible (infraestructuras de datos espaciales, desarrollo urbano y rural, transporte, construcción, cartografía, ciencias de la Tierra, etc.)

El concepto de la IAG sobre el GGRF (2)

GGRF

Componente terrestre

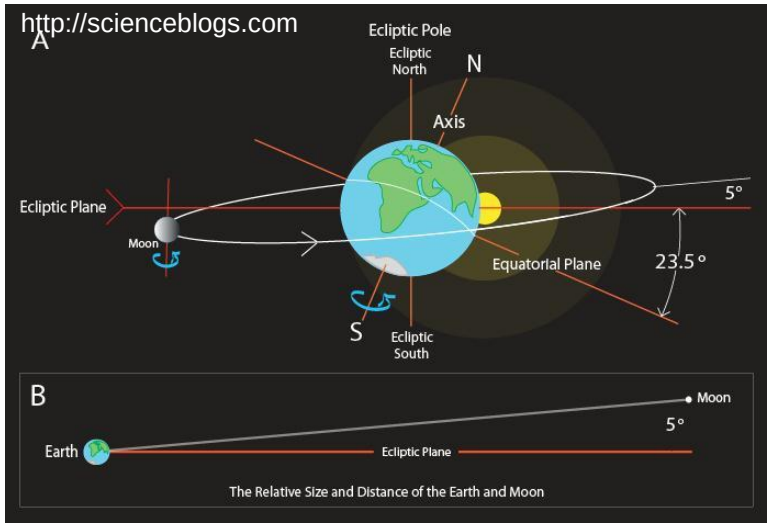
Marco de referencia común para determinar y describir la geometría y el campo de gravedad de la Tierra en cualquier momento.



Las coordenadas de cualquier punto ubicado sobre o en las cercanías de la superficie terrestre deben estar dadas por la posición geocéntrica $\mathbf{X}$, el potencial de gravedad W, su altura física H y el valor de gravedad g.

Componente celeste

Marco de referencia para describir la orientación de la Tierra en el espacio exterior en cualquier momento.



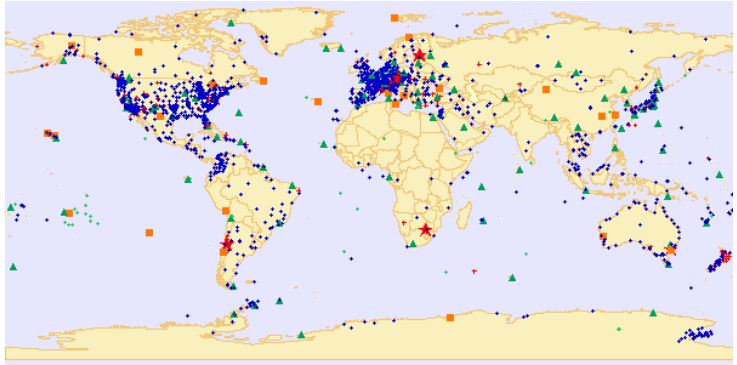
La relación entre la componente terrestre y la componente celeste está dada por los parámetros de orientación terrestre (EOPs).

El concepto de la IAG sobre el GGRF (3)

GGRF

Componente terrestre

ITRF: International Terrestrial Reference Frame



+

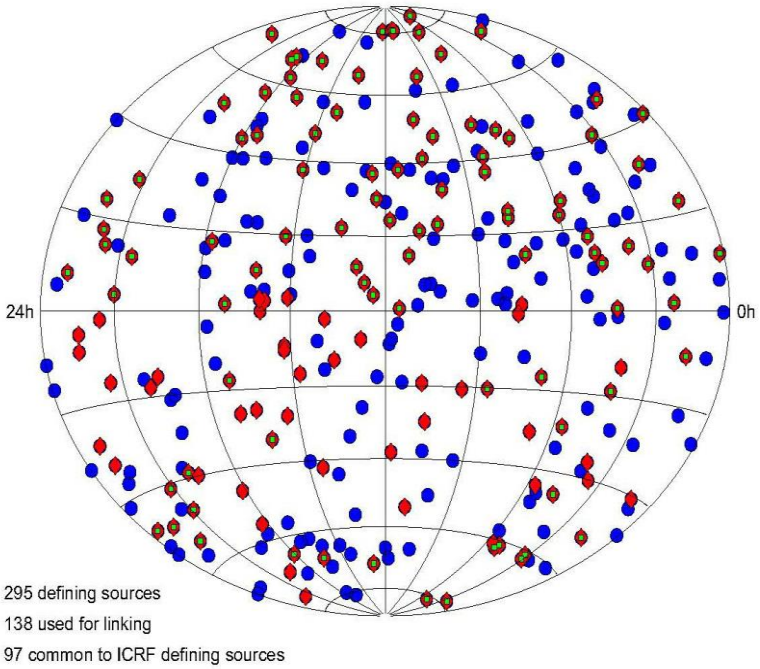
IHRF: International Height Reference Frame
Resolución IAG No. 1 de 2015: Definition and realization of the International Height Reference System (IHRS)

+

IGRF: International Gravity Reference Frame
Resolución IAG No. 2 de 2015: Establishment of a global absolute gravity reference system

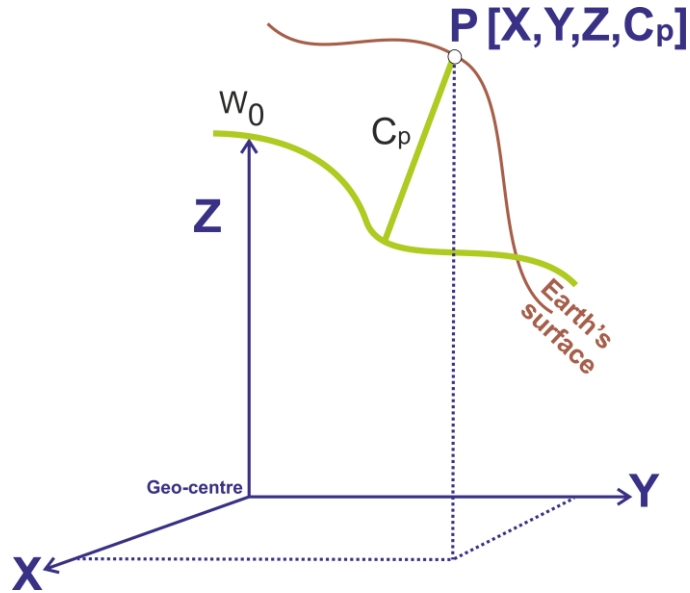
Componente celeste

ICRF: International Celestial Reference Frame



International Height Reference System (IHRS)
Resolución IAG No. 1, julio 2015

1) Las coordenadas verticales son diferencias de potential con respecto a un valor W_0 convencional:
   - $C_P = C(P) = W_0 - W(P) = -\Delta W(P)$
   - valor convencional de referencia
     $W_0 = const. = 62\,636\,853.4\ \mathrm{m^2s^{-2}}$
2) La posición P está dada por el vector geocéntrico $\mathbf{X}_P\ (X_P, Y_P, Z_P)$ en el ITRF, i.e. $W(P) = W(\mathbf{X}_P)$



3) La determinación de $\mathbf{X}(P)$, $W(P)$ (or $C(P)$) incluye su variación en el tiempo, i.e., $\dot{\mathbf{X}}(P)$, $\dot{W}(P)$ (or $\dot{C}(P)$).

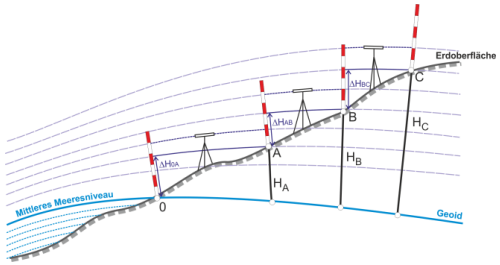
$\mathbf{X}(P)$ se estima con el ITRF (SIRGAS en América Latina), $C(P)$ es la diferencia W_0-$W(P)$, como W_0 es constante y adoptado convencionalmente, la tarea inminente es la determinación precisa de $W(P)$: Presición esperada:

- Posiciones: $3\times10^{-2}\ \mathrm{m^2s^{-2}}$ (3 mm)
- Velocidades: $3\times10^{-3}\ \mathrm{m^2s^{-2}/a}$ (0.3 mm/a).

Posibilidades para la determinación de W_P

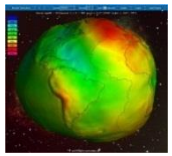
1) Nivelación + gravimetría:

$$W_P = W_0 - C_P; \quad C_P = \int_0^P g\, dn$$



2) Modelos globales de gravedad de alta resolución (n = 2190)

$$W_P = f\left(X_P, GGM\right)$$



3) Modelado detallado del campo de gravedad:

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

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.

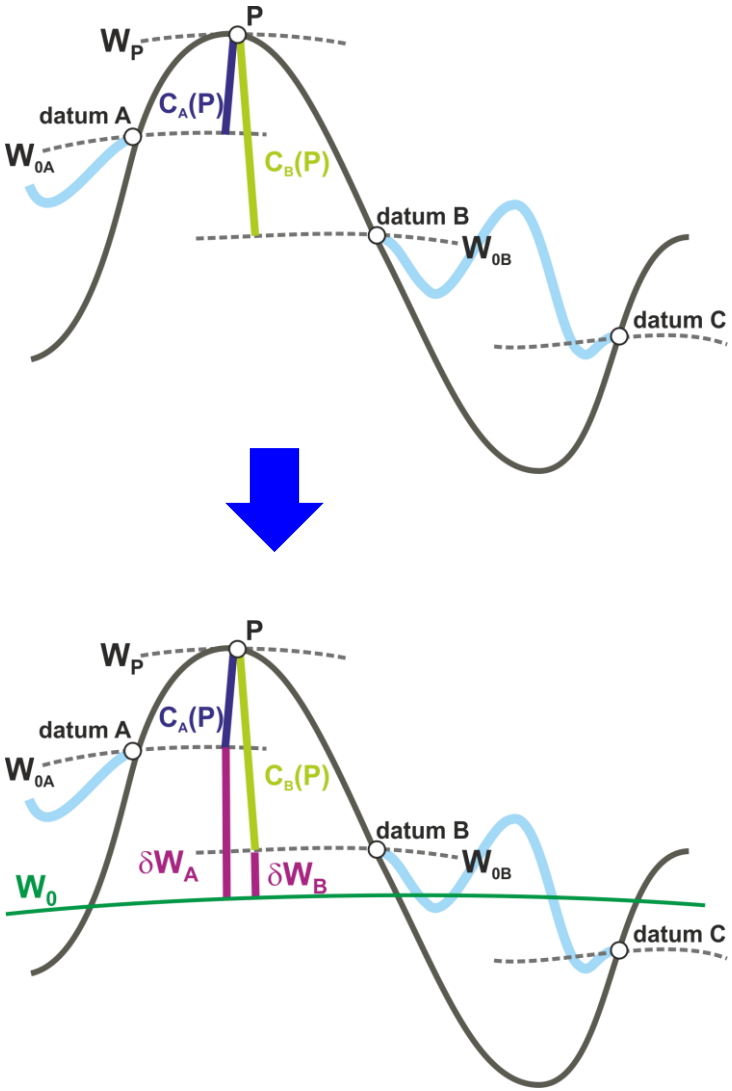
1) W_P obtenido de nivelación + gravimetría

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

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

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

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

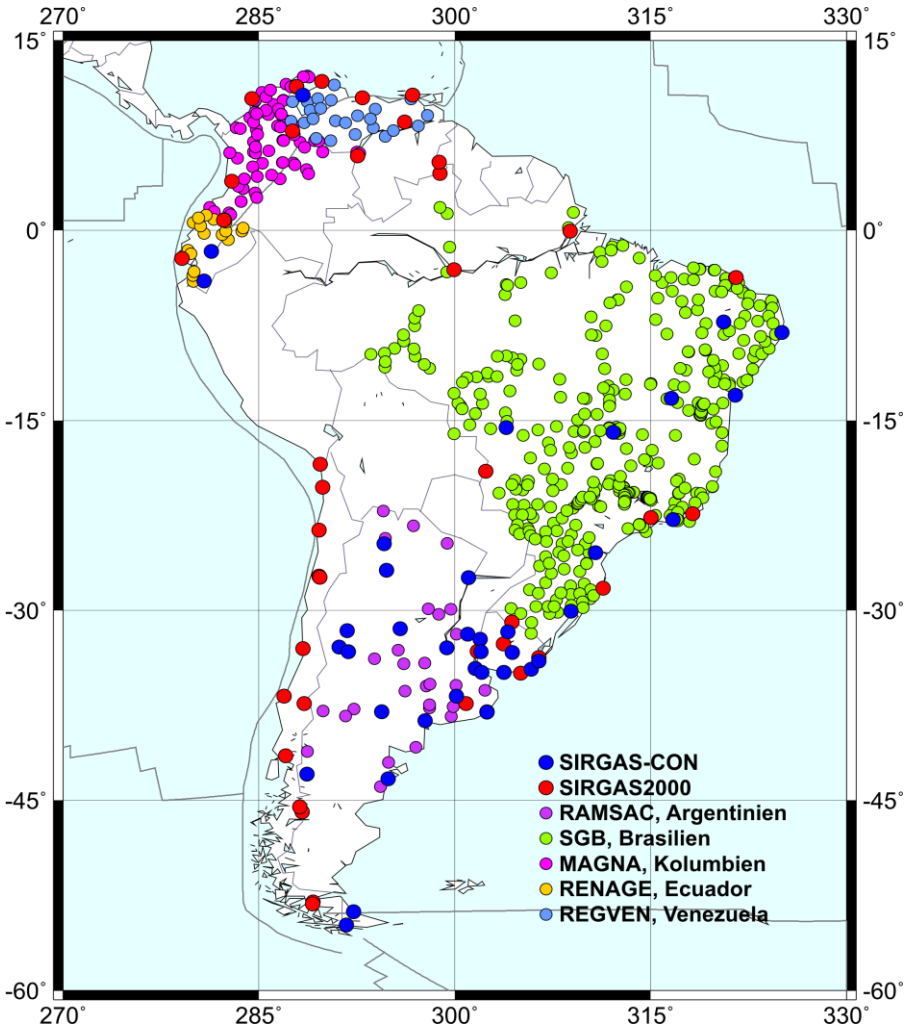


1) W_P obtenido de nivelación + gravimetría

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

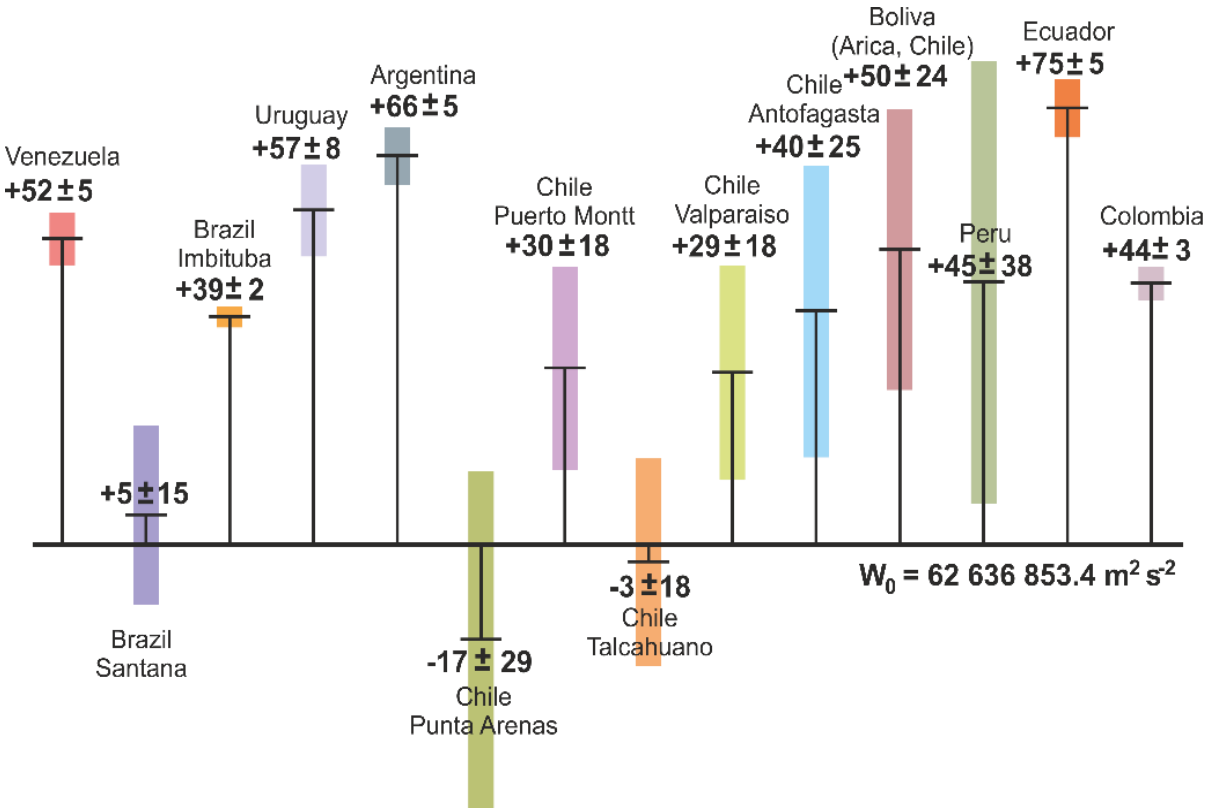
Datos de entrada:

- 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.



1) W_P obtenido de nivelación + gravimetría

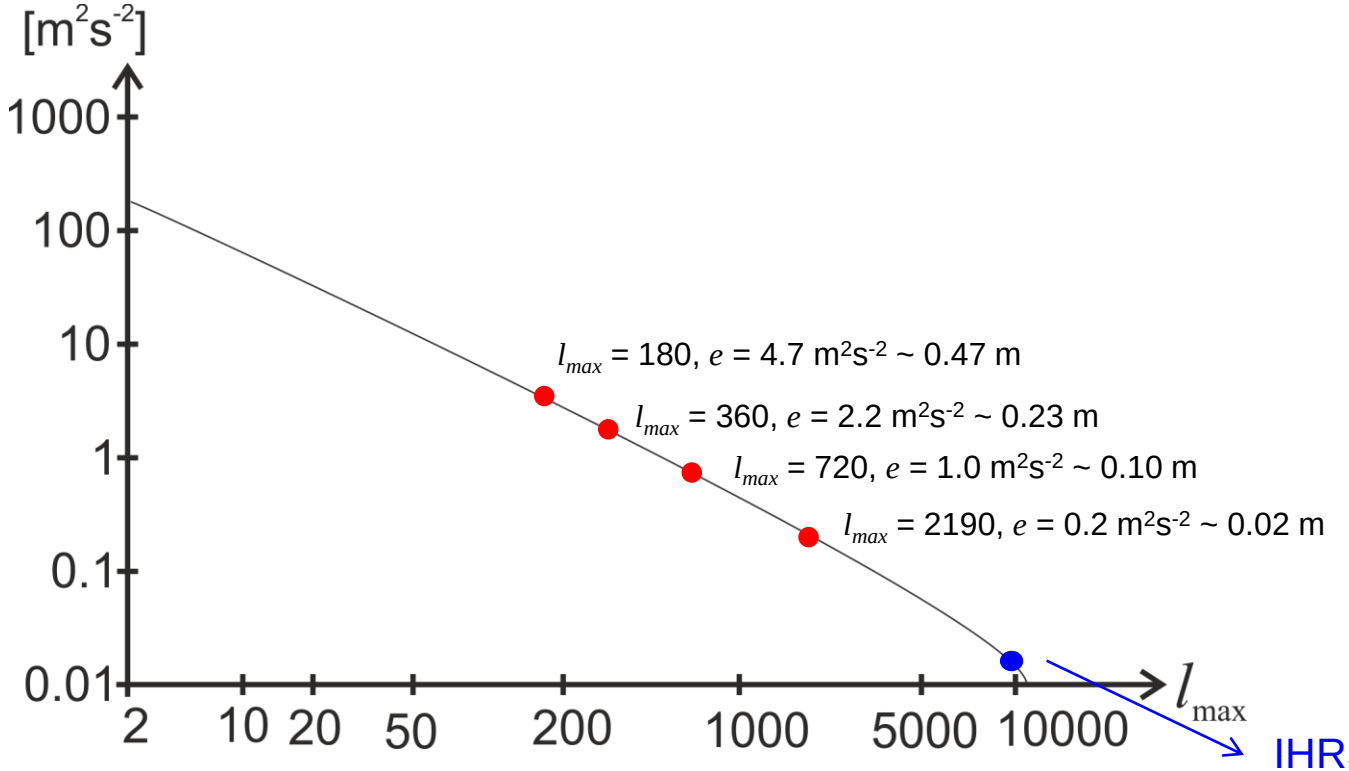
Ejemplo: δW (en cm) para los sistemas de alturas de América del Sur con respecto al valor W_0 del IHRS.



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

2) W_P derivado de modelos globales de gravedad de alta resolución (n = 2190)

Error de omisión (e) en [m^2s^{-2}] de acuerdo con Tscherning and Rapp (1974)

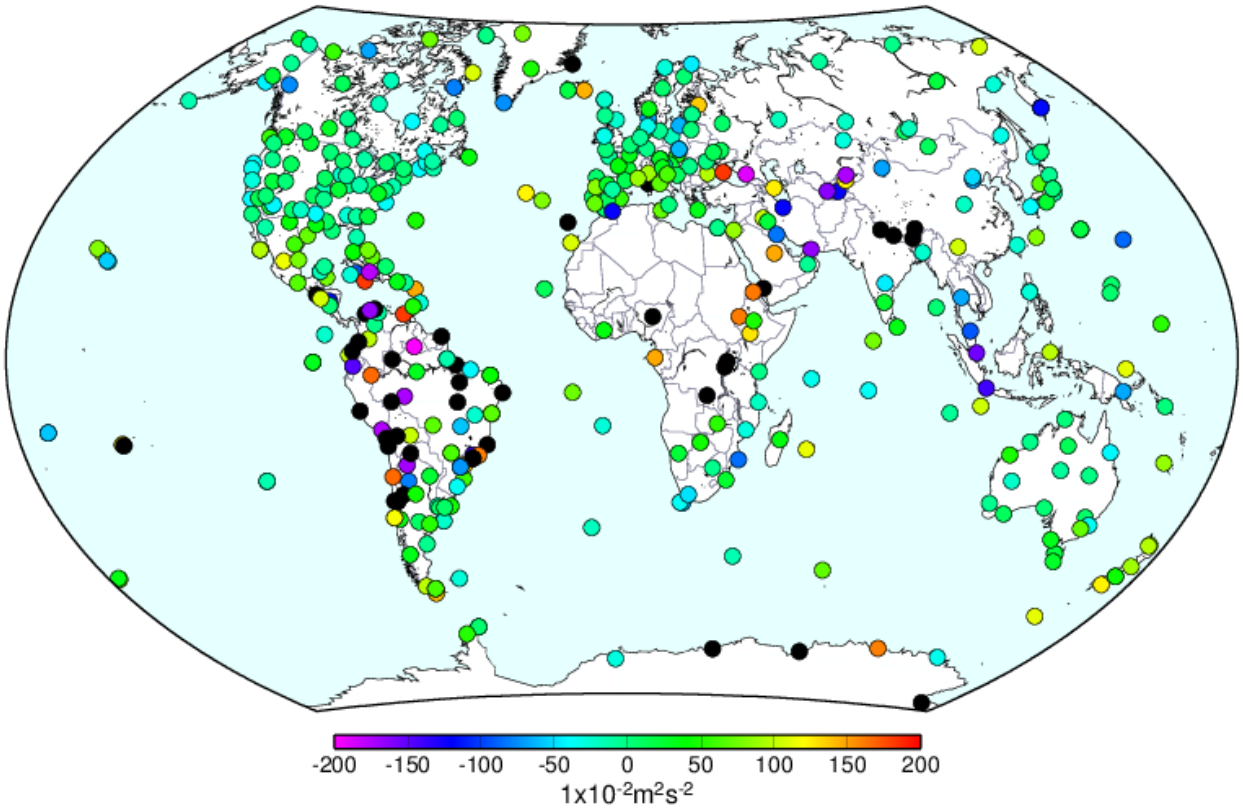


IHRS requiere
$\sigma_{(W(P))} = 0.01\ m^2s^{-2}$
$l_{max} \sim 10800$

El error de comisión debe agregarse al error de omisión y la suma de ambos no puede ser mayor que $\sigma_{(W(P))} = 0.03\ m^2s^{-2}$

2) 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, llegan hasta ± 2 m)
- Precisión requerida: ±3 mm



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

3) W_P obtenido del modelado detallado del campo de gravedad

Es el único metodo que actualmente permite el mayor acercamiento possible a la precision necesaria para establecer el IHRS

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

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 (a´rea, 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

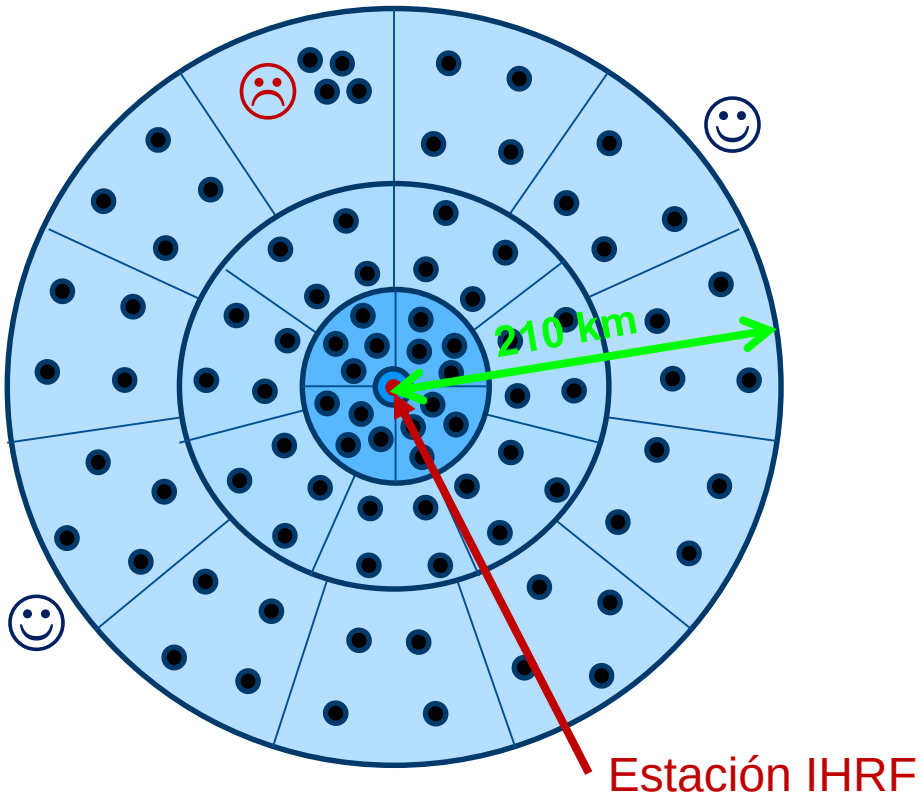
Requerimientos para la gravedad terrestre necesaria en el cálculo de $T_{P,\,residual}$

- Puntos gravimétricos distribuidos homogenéamente alrededor de las estaciones de referencia del IHRF hasta una distancia de 210 km (~ 2°).
- Valores de gravedad existentes o a ser medidos.
- Precisión media de los valores de gravedad: de ±20 µGal a ±100 µGal.
- Se prefiere que los levantamientos gravimétricos nuevos se apoyen en una estación de gravedad absoluta.
- Coordenadas de los puntos gravimétricos con posicionamiento GPS ($\sigma = \pm 2$ cm).
- En áreas montañosas ~50% adicional de puntos gravimétricos.
- Mientras más puntos gravimétricos estén disponibles, más precisos serán los resultados.

Ejemplo de la distribución de puntos gravimétricos al rededor de las estaciones IHRF

- Cuatro zonas concéntricas, divididas en diferentes compartimentos (ver siguiente diapositiva).
- Zona uno: radio 10 km, un compartimento.
- Zona dos: radio de 10 km a 50 km, cuatro compartimentos.
- Zona tres: radio de 50 km a 110 km, siete compartimentos.
- Zona cuatro: radio de 110 km a 210 km, once compartimentos.
- En áreas planas: por lo menos 4 puntos de gravedad en cada compartimento.
- En áreas montañosas: por lo menos 6 puntos de gravedad en cada compartimento.
- Puntos en cada compartimento distribuidos lo más homogéneamente posible.
- Por supuesto, si hay una cantidad mayor de puntos de gravedad disponibles, todos ellos son bienvenidos!

Ejemplo de la distribución de puntos gravimétricos al rededor de las estaciones IHRF



Plantilla según la contribución de los efectos gravimétricos al geoide ($\Delta g = 1 \cdot 10^{-6}\ ms^{-2} \rightarrow 1$ mm)		
Distancia	Celdas	No. de puntos **plano/montaña**
10 km	1	**4/8**
50 km	4	**20/30**
110 km	7	**30/45**
210 km	11	**50/75**
Total	23	**104/158**

Contribución/integración de SIRGAS en el IHRS/IHRF

1) Establecimiento de estaciones IHRS en la Región SIRGAS:
   - Selección de algunas estaciones SIRGAS de operación continúa en cada país.
   - Se prefieren estaciones materializadas por pilares o trípodes permanentes empotrados directamente en el suelo. Antenas GNSS ubicadas en edificios altos (más de dos pisos) no son aconsejables.
   - Levantamiento gravimétrico alrededor de las estaciones SIRGAS seleccionadas: 158 puntos de gravedad distribuídos homogéneamente alrededor de la estación hasta una distancia máxima aproximada de 200 km.
   - La posición de los puntos gravimétricos debe estimarse con posicionamiento GPS (precision en cm es suficiente).
   - En zonas de actividad sísmica (los Andes, Centro América) conviene la identificación (o materialización) precisa de los puntos gravimétricos a fín 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.

Contribución/integración de SIRGAS en el IHRS/IHRF

2) Integración (unificación) de los sistemas de alturas existentes al IHRS/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.

Contribución/integración de SIRGAS en el IHRS/IHRF

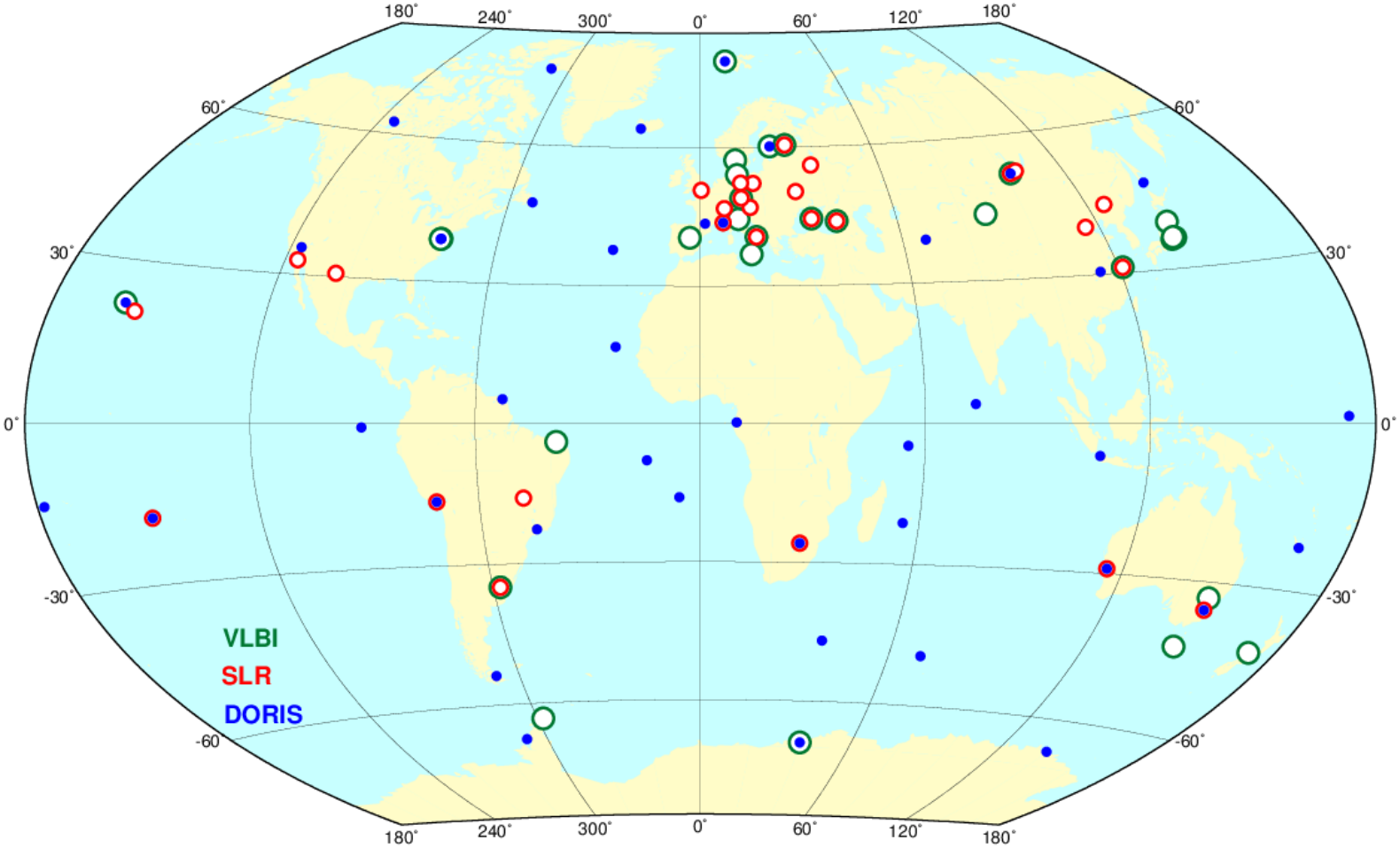
3) Participación activa y efectiva en las actividades del Grupo de Trabajo 3 (Datum vertical) :
   - Capacitación teórica y programas computacionales para el procesamiento de datos gravimétricos.
   - Capacitación teórica y programas computacionales para el ajuste de redes verticales y cálculo de números gepotenciales.
   - Talleres de trabajo dedicados al problema vertical: Santiago de Chile (1998), Simposio Veres en Cartagena (2001), Río de Janeiro (2012), visitas técnicas del presidente del GT3 a Colombia, Ecuador y Perú (2013), La Paz (2014), Curitiba (2015), Quito (2016), San José (2017)
   - Si se logra concretar el ajuste continental de las redes verticales y se dispone de los valores de gravedad alrededor de las estaciones SIRGAS/IHRF, pueden desarrollarse talleres avanzados para el cálculo preciso de W_P y la integración al IHRF de los sistemas verticales existentes.

Qué hacer ya mismo? Sugerencias...

1) Los representantes nacionales contactan a las agencias nacionales a cargo de las redes de referencia para seleccionar aquellas estaciones GNSS de operación continua que podrían ser consideradas para el IHRS/IHRF.
2) Esa selección preliminar se le allega al SIRGAS-GTIII para evaluar la distribución de las estaciones: si hay dos estaciones muy cercanas, p. ej. en zonas limítrofes, se estaría haciendo dos veces el mismo trabajo. De allí, es mejor hacer la selección de manera coordinada con el SIRGAS-GTIII antes de empezar la gravimetría.
3) Una vez hecha la selección de las estaciones, se adelantan las mediciones gravimétricas (con posicionamiento GPS) por parte de las agencias nacionales correspondientes.
4) Los valores de gravedad y las posiciones GPS se entregan al SIRGAS-GTIII, quien junto con el GGOS Focus Area Unified Height System (UHS) adelantarían cálculos preliminaries y desarrollo de estrategías adecuadas para la realización del IHRS.
5) GGOS Focus Area UHS y GTIII retornan a los países miembros de SIRGAS con propuestas concretas sobre cómo deben procesarse las estaciones IHRF y con guías detalladas sobre cómo agregar nuevas estaciones IHRF en sus territorios y cómo adelantar la integración de los sistemas de alturas existentes en el IHRS/IHRF.

Selection of possible IHRF reference stations

1) Geodetic observatories (GGOS core stations)
2) Existing VLBI stations collocated with GPS
3) Existing SLR stations collocated with GPS
4) Existing DORIS stations collocated with GPS



VLBI sites (4-char code of collocated GNSS stations is included)

Badary	BADG						
Fortaleza	BRFT	CEEU	FORT				
Simeiz	CRAO	KTVL					
Washington	GODE						
Hobart	HOBT	UF05	UF03	HOB1	HOB2		
Koganei	KGNI	KGN0					
Kauai	KOKV	KOKB	KOKF	KOKG	KOKR	KOKC	
Kashima	KSMV						
La Plata	LPGS						
Matera - A	MATE	MAT1	MATG				
Medicina	MEDI	MSEL					
Metsahovi	METG	METZ	MET3	METS			
Mizusawa	MIZU	GMIZ	MZSW				
Noto	NOTO	NOT1					
Ny-Alesund	NYAL	NYAC	NYA1	NYAG	NYA2		
O'higgins	OHI2	OHI3					
Onsala	ONSA	OS0G	ONS1				
Parkes	PARK						
Shanghai I	SHAO						
Svetloe	SVTL	SVT3					
Syowa	SYOG						
Tsukuba	TSKB	TSKA	TSBA	TSUK	TKBA	TKSC	TSK2
Urumqi	URUM	GUAO					
Washington	USNO						
Warkworth	WARK						
Westford	WES1	WES2					
Wettzell	WTZS						
Yebes	YEBE	YEB1					
Zelenchuks	ZECK						

SLR sites (4-char code of collocated GNSS stations is included)

Arequipa	AREQ	AREV	AREG		
Badary	BADG				
Beijing	BJFS				
Borowiec	BOR1	BORG			
Brasilia	BRAZ				
Changchun	CC06	CHAN			
Simeiz	CRAO	KTVL			
Golosiiv - K	GLSV				
Grasse (OCA)	GRAS	GRAC			
Graz Lustbue	GRAZ	GRAA	GRAB		
Herstmonceux	HERS	HERT			
Hartebeestho	HRAO	HARK	HARB	HRAG	
Irkoutsk	IRKT	IRKM	IRKG	IRKJ	IRKZ
La Plata	LPGS				
Maui I	MAO0	HAL1	MAUI		
Matera - ASI	MATE	MAT1	MATG		
Fort Davis	MDO1				
Mendeleevo	MDVO	MDVG	MDVZ	MDVJ	
Monument Pea	MONP				
Papeete	PAMA	THTI			
Potsdam	POTS	POTM			
Shanghai I	SHAO				
Mount Stroml	STR2	STR1	STR3		
Svetloe	SVTL	SVT3			
Wettzell	WTZS				
Yarragadee	YAR1	YAR2	YARR	YAR3	
Zelenchukska	ZECK				
Zimmerwald	ZIMM				

DORIS sites (1/2) (4-char code of collocated GNSS stations is included)

Arequipa	AREQ	AREV	AREG				
Ascension	ASC1	ASCG					
Badary	BADG						
Cibinong	BAKO	LABG	CIBG				
Cold Bay -	BAY1	BAY2	CDB7	BAY5	BAY6		
Belgrano	BEL1	BELG					
Cachoeira	CHPI	CHPG					
Palmeira -	CPVG	CVDS	TGCV				
Ile de la	CZTG						
Dionysos	DION	DYNG					
Arta Geoph	DJIG	PAR0					
Ile des Pe	DUM1						
Futuna	FTNA						
Santa Cruz	GALA	GLPS					
Washington	GODE	GODZ	GODW	GUSN	GODN	GODS	GODG
Goldstone	GOLD	MOJ1	GOLD	GOL2			
Grasse (OC	GRAS	GRAC					
Gavdos	GVD0						
Hartebeest	HART	HRAO	HARK	HARB	HRAG		
Kerguelen	KERG	KRGG	S25G	S25M	S25A	KETG	
Betio island	KIRI						
Kitab	KIT3	KITG					
Kauai	KOKV	KOKB	KOKF	KOKG	KOKR	KOKC	
Kourou	KOUR	KOU1	GKOU	KOUG			
Krasnoyars	KSTU	KRAS	KRSN				
Male airpo	MALE	HULE	MALD				
Marion Isl	MARN						
Metsahovi	METG	METZ	MET3	METS			
Virginia K	MIA3	MIA4	AOML	MIA1			
Manila - T	MMA8	RP01	PTAG	PTGG	JPLU		

DORIS sites (2/2) (4-char code of collocated GNSS stations is included)

Port Mores	MORE	NMB2					
Libreville	NKLG						
Noumea	NOUM	NRMG	NRMD				
Ny-Alesund	NYAL	NYAC	NYA1	NYAG	NYA2		
Owenga (Ch	OWNG						
Papeete	PAMA	TAHI	THTI	PAPE	FAA1	TAHT	GTHT
	THTG	TAH2	TAH1	GAMB			
Ponta Delg	PDEL						
La Reunion	REUN						
Reykjavik	REYK	REYZ					
Rio Grande	RIOZ	RIOG	RIO2	RGDG			
Rothera	ROT1	ROTH					
Mahe Islan	SEY1	SEYG	SEY2				
Saint-Paul	SPTG						
Saint-Hele	STHL						
ST JOHN'S	STJO	STJ2	STJ3				
Mount Stro	STR2	STR1	STR3				
Mindelo, S	SVCT						
Syowa	SYOG						
Thule	THU1	THU2	THU3	THU4			
Toulouse	TOUL	TLSE	TLMF	TLSG			
Washington	USNO	USNX					
Wuhan - Ji	WUHN	WHJF	GWUH	JFNG	WUH2		
Yarragadee	YAR1	YAR2	YARR	YAR3			
Yellowknif	YELL	YEL2	YEL3				
Yuzhno-Sak	YSSK						