



SIRGAS-GTIII: Datum Vertical Reporte 2005

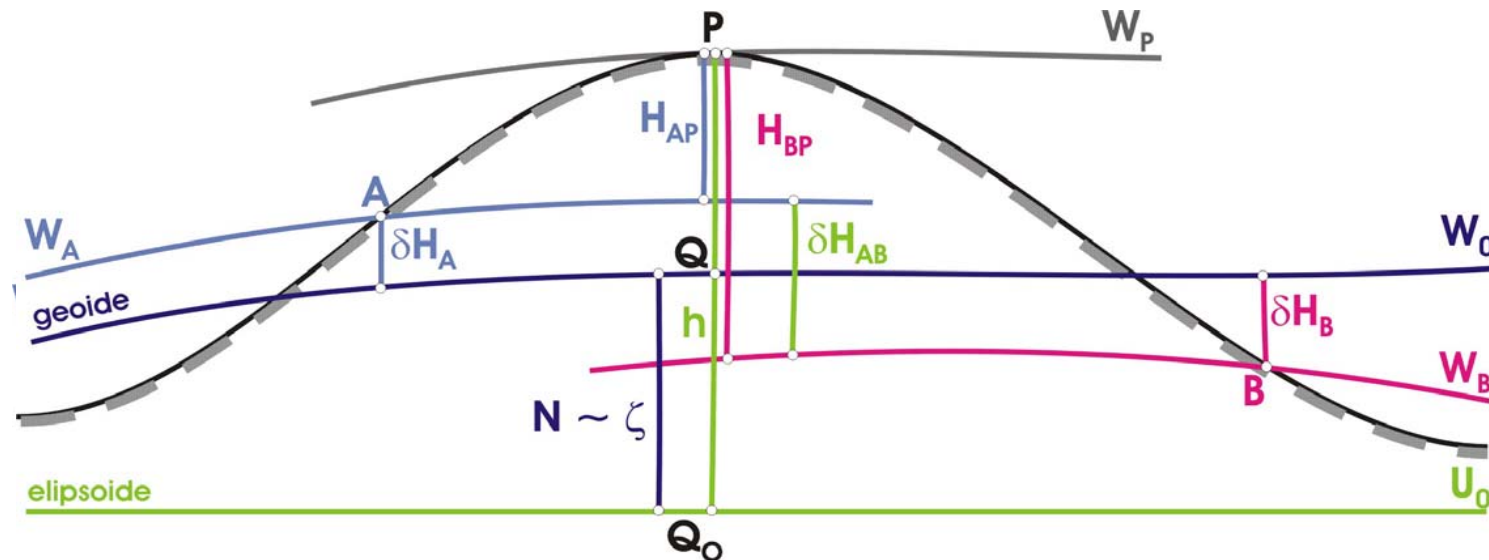
Laura Sánchez



Reunión SIRGAS 2005
Caracas, noviembre 17 y 18 de 2005

SIRGAS-GTIII: Datum vertical

Objetivo central: Definir, realizar y adoptar un sistema vertical de referencia unificado para América del Sur, el cual a su vez, debe ser de carácter global. Esto incluye la modernización de los sistemas existentes mediante su transformación al nuevo.



$$H_{AP} + \delta H_A = H_{BP} - \delta H_B \quad h_p = H_p + N_p$$

Sistema vertical de referencia unificado para América del Sur

1. Alturas: Elipsoidales (componente geométrica) ✓
Normales (componente física)

⇒ $H^N = h - \zeta$; $H^N = C/\gamma_m$; $H^N = \sum dn + k^N$

2. Superficies de referencia:
Elipsoide GRS80 (Elipsoidales) ✓
Cuasigeoide (Normales)

⇒ **Nivel de referencia: $H^N = 0$ [m] ; $W = W_0$ [m²s⁻²]**

3. Marco de referencia:
Estaciones SIRGAS2000
(mareógrafos + estaciones fronterizas + estaciones permanentes)

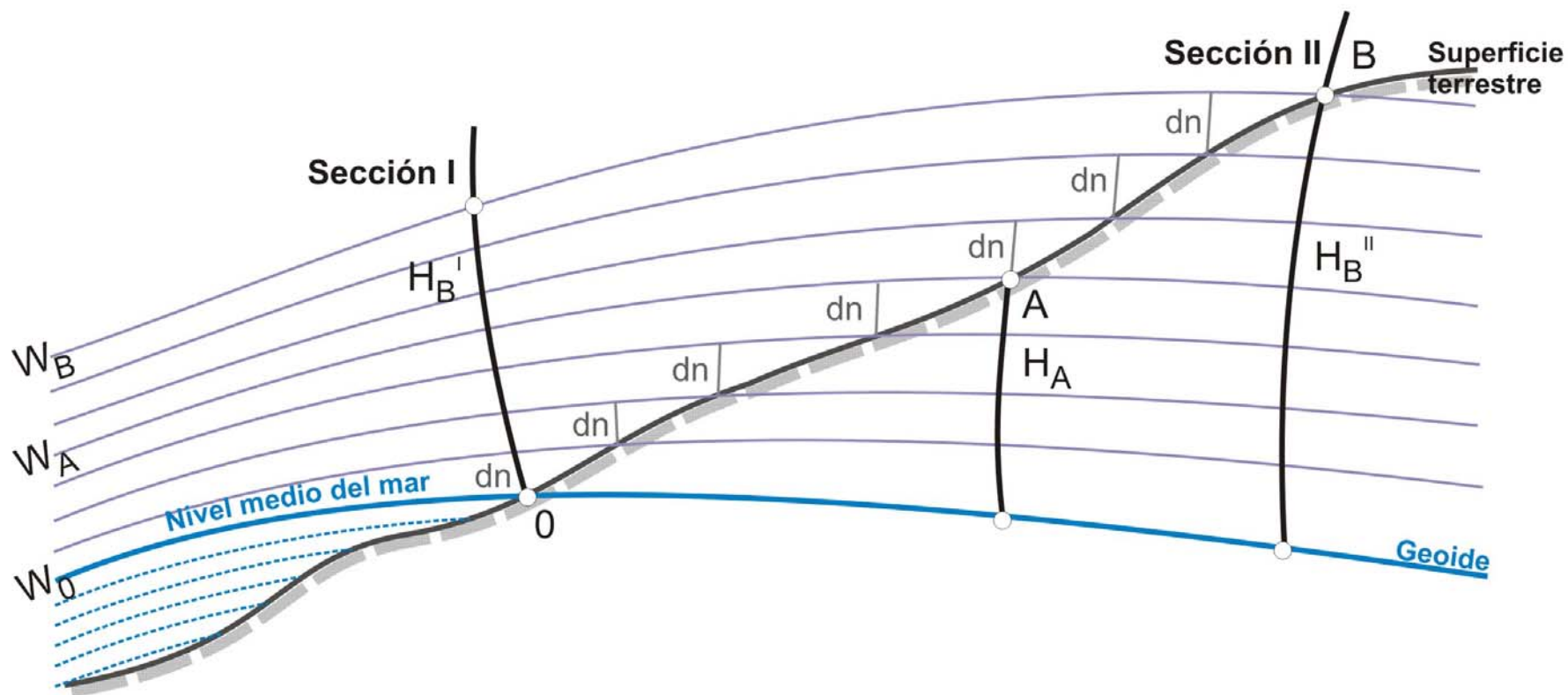
⇒ **Coordenadas SIRGAS, nivelación geométrica + gravimetría**

4. Mantenimiento del sistema de referencia:
Cambios del marco de referencia a través del tiempo

1. Efectos del campo gravedad (k^N) en la nivelación geométrica
2. Determinación de W_0 como valor de referencia para el ajuste de los números geopotenciales
3. Términos de transformación entre los sistemas de alturas existentes y el valor de referencia W_0
4. Proyecto TIGA (Tide GAuge benchmark monitoring project) en América del Sur
5. Actividades recientes asociadas a la determinación de alturas geoidales en América del Sur (D. Blitzkow)
6. Requerimientos inmediatos y futuros dentro del SIRGAS-GTIII
7. Discusión

Actividades asociadas a las alturas físicas

Nivelación geométrica y campo de gravedad



$$H_B \neq \sum dn$$

$$H_B = \sum (dn \cdot g) / g' = (W_0 - W_B) / g'$$

Errores de cierre para un circuito de nivelación

Error de cierre de un circuito de nivelación en términos de los desniveles medidos (dn), diferencias de potencial (ΔC) y desniveles reducidos por la corrección dinámica (δH^D , $\varphi = 0^\circ$), por la corrección ortométrica según Helmert (δH^O) y la corrección normal de Molodensky (δH^N).

Punto nodal	S [km]	Σdn [m]	$\Sigma \Delta C$ [$m^2 s^{-2}$]	$\Sigma \delta H^D$ [m]	$\Sigma \delta H^O$ [m]	$\Sigma \delta H^N$ [m]
A66CW8	282,12	-130,9916	-1281,267	-130,9390	-130,9219	-130,9243
4TE4	467,47	+1333,9722	+13044,818	+1333,7078	+1334,0790	+1333,9259
A23CW6	472,01	-1202,8411	-11763,552	-1202,7688	-1203,1571	-1203,0016
A66CW8						
Σ	1221,60	+0,1395	-0,001	0,0000	0,0000	0,0000

Actividades asociadas a las alturas físicas
Errores de cierre en nivelación

RED DE NIVELACIÓN ARGENTINA: CIERRES POR POLIGONO		
Polígono	Desnivel bruto	Desnivel geopotencial
127	-2.591	-2.210
128	-0.190	0.000
129	-0.069	0.006
130	0.054	0.000
131	Sin cierre Falta Línea N(160)	
132	0.005	0.000
133	-0.014	0.000
134	-1.239	0.000
135	1.044	0.000
136	0.019	0.000
137	-1.880	0.000
138	-0.021	0.000
139	0.183	0.000
140	0.155	-0.006
141	8.245	0.000
144	-57.573	-0.136
145	0.043	0.000

Fuente: J. Moirano, G. Font



Correcciones gravimétricas para un circuito de nivelación

$$H^{DYN} = \frac{C}{\gamma_o^\phi}$$

$$H^o = \frac{C}{g_m}$$

$$g_m = \frac{1}{H^o} \int_0^{H^o} g dH^o$$

$$H^N = \frac{C}{\gamma_m}$$

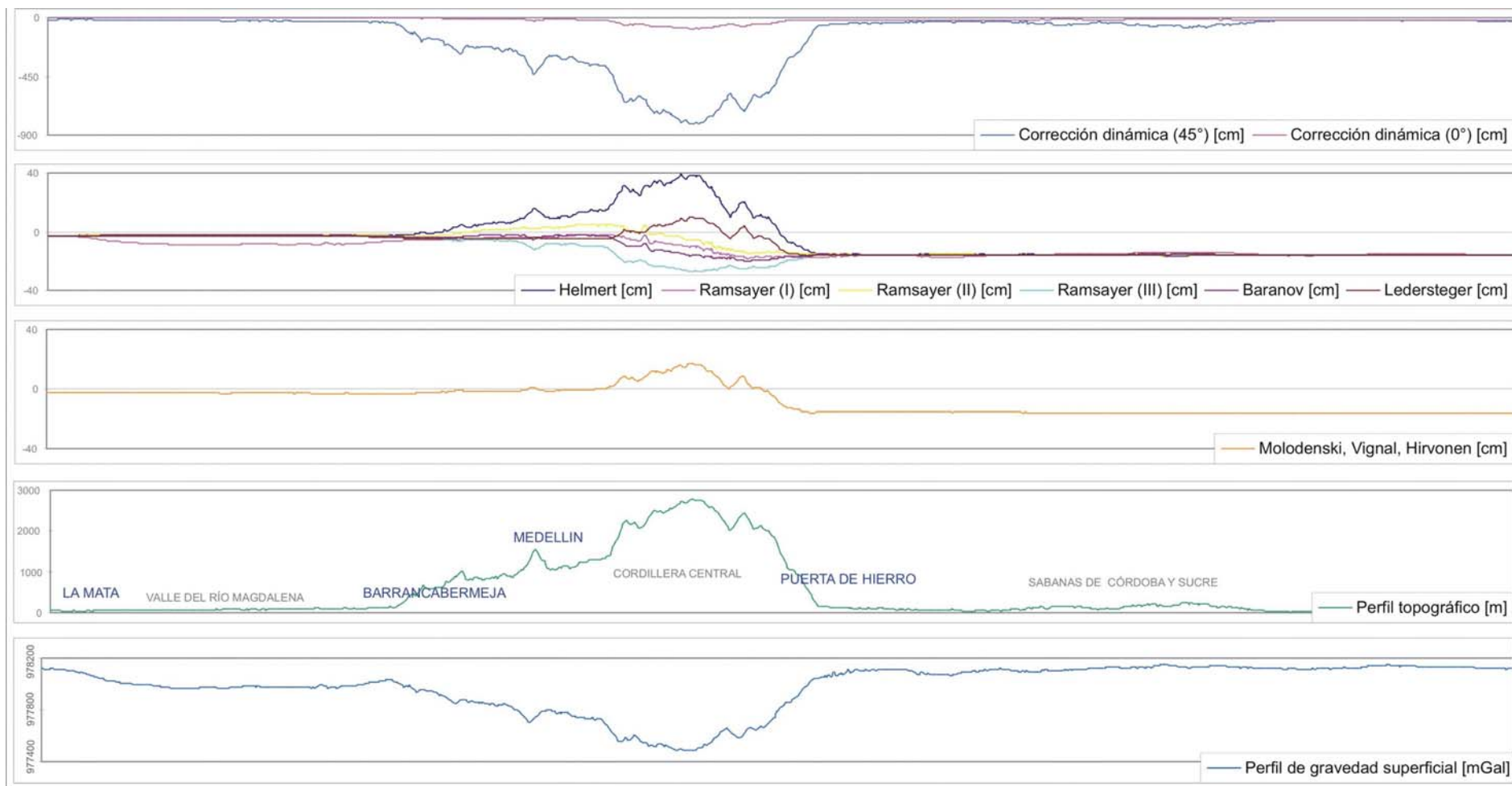
$$\gamma_m = \frac{1}{H^N} \int_0^{H^N} \gamma dH^N$$

Para alturas...	Corrección	Máximo [cm]	Mínimo [cm]	Promedio [cm]
dinámicas	Dinámica para $\phi=0^\circ$	-2,14	-83,81	-16,77
	Dinámica para $\phi=45^\circ$	-12,78	-814,56	-144,11
ortométricas	Helmert	30,03	-16,35	-4,46
	Ramsayer I	-2,11	-18,07	-11,56
	Ramsayer II	5,03	-16,48	-9,00
	Ramsayer III	-2,71	-27,25	-10,75
	Baranov	-2,04	-20,17	-10,75
	Ledersteger	9,64	-16,49	-9,07
normales	Molodenski	16,80	-16,16	-7,96
	Vignal	16,78	-16,16	-7,96
	Hirvonen	16,80	-16,16	-7,96

S = 1200 km, H = 15 m ... 2800 m

Actividades asociadas a las alturas físicas

Correcciones gravimétricas para un circuito de nivelación



$S = 1200 \text{ km}$, $H = 15 \text{ m} \dots 2800 \text{ m}$

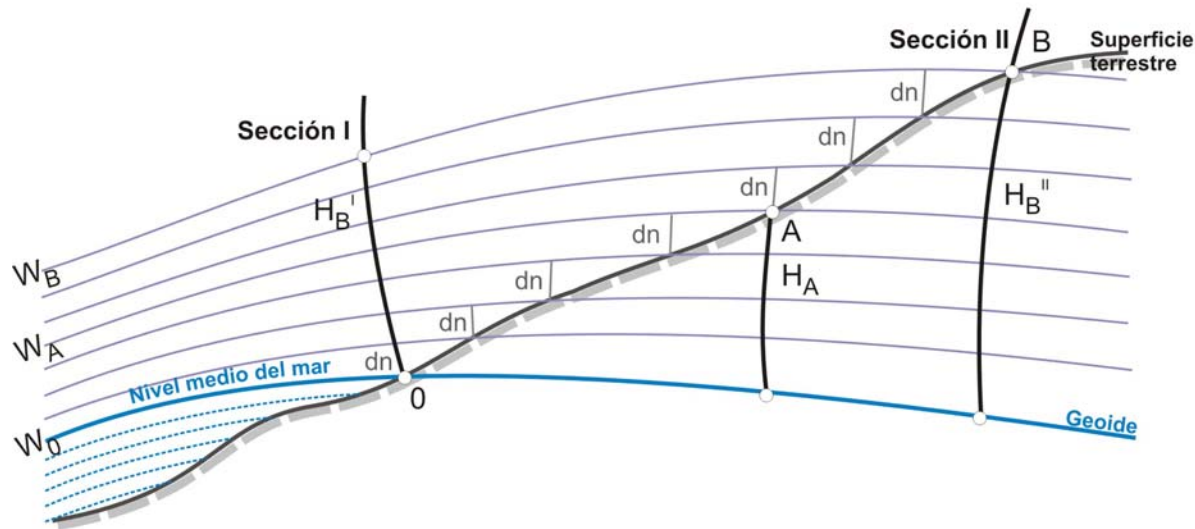
Conclusión

Las alturas 'ajustadas' existentes **NO** pueden ser utilizadas para recalcular las diferencias de nivel originales.

Las diferencias de nivel medidas directamente en campo deben disponerse en formato digital, si es necesario deben ser transcritas al computador.

Actividades asociadas a la superficie física de referencia (W_0)

W_0 como referencia para el ajuste de números geopotenciales



En la nivelación geométrica se observan diferencias, la obtención de valores absolutos de nivel (altura) requiere de un punto (superficie) de partida con un valor de referencia $H^N=0$, ó W_0

Actualmente W_0 corresponde con la superficie de nivel que pasa por cada mareógrafo.

Unificación:

W_0 en un mareógrafo (Europa: $W_0 = U_0^{GRS80}$)

W_0 promedio de varios mareógrafos (USA, 4 mareógrafos)

W_0 global

Determinación empírica de W_0

Definición Gauss-Listing:

$$\int_{S_o} (W - W_0) dS_o = \min \quad S_o \text{ superficie total del océano}$$

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

Constantes

Modelo de la superficie media del mar (Mean Sea Surface -MSS-)

Modelo global de gravedad (Global Gravity Model -GGM-)

→ GM, ω

→ (r, θ, λ)

→ C_{nm}, S_{nm}

Modelos GGM utilizados

Parámetro	EGM96	TEG4	GGM02S	EIGEN-CG03C
a [m]	6 378 136,3	6 378 136,3	6 378 136,3	6 378 136,46
GM [m^3s^{-2}]	$398\,600,4415 \times 10^9$	$398\,600,4415 \times 10^9$	$398\,600,4415 \times 10^9$	$398\,600,4415 \times 10^9$
n_{max}	360	200	120	360
Sistema de mareas	Tide-free	Zero-tide	Zero-tide	Tide-free
Época de referencia	1986	1986	2000	1997
Coefficientes con velocidades	C_{20}, C_{21}, S_{21}	C_{20}, C_{21}, S_{21}	C_{20}, C_{21}, S_{21}	C_{20}, C_{30}, C_{40}
Transformación del C_{20} al sistema...	Zero-tide $-3,11080 \times 10^{-8} * 0,3 \sqrt{5}$ (Lemoine et al. 1998)	Tide-free Rapp (1989), Ec. 9, con $k = 0,3$	Tide-free $+4,1736 \times 10^{-9}$ (Tapley et al. 2005)	Zero-tide Rapp (1989), Ec. 9, con $k = 0,3$
Referencia	Lemoine et al. 1998	Tapley et al. 2001	Tapley et al. 2005	Förste et al. 2005

Actividades asociadas a la superficie física de referencia (W_0)

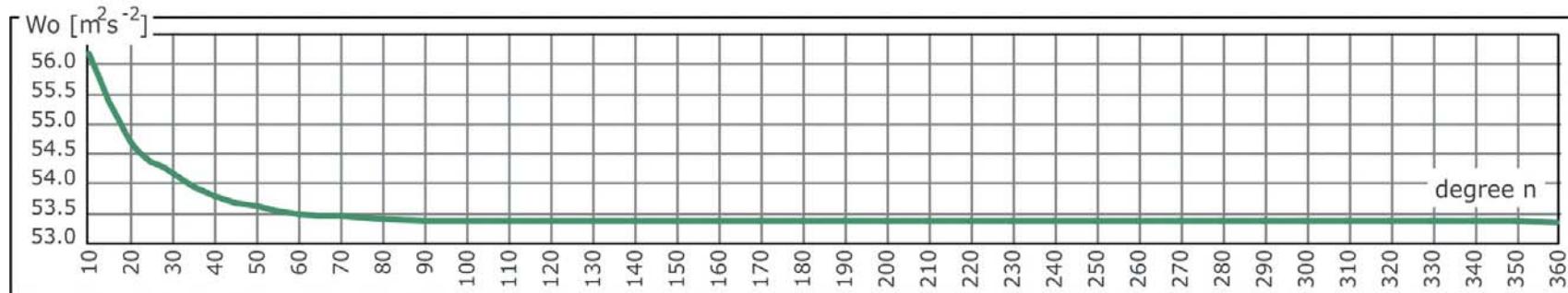
Moldeos MSS utilizados

Nombre	CLS01	KMS04	GSFC00.1
Elipsoide de referencia	$a = 6\,378\,136.3\text{ m}$ $1/f = 298.257$ $GM = 398\,600,4415 \times 10^9\text{ m}^3\text{s}^{-2}$		
Cobertura	80°S... 82°N	82°S... 82°N	80°S... 80°N
Resolución espacial	1/30 ~ 2'	1/60 ~ 1' 1/30 ~ 2'	1/30 ~ 2'
Años incluidos	1993...1999	1993...2001	1993...1998
Fuentes de datos	T/P ERS-1/2 GEOSAT	T/P T/P TDM ERS-1 ERM+GM ERS-2 ERM GEOSAT GM GFO ERM	T/P ERS-1/2 GEOSAT ERM GEOSAT GM
Referencia	Hernandez, Schaeffer (2001)	Andersen et al. (2004)	Koblinsky et al. (1999)

Actividades asociadas a la superficie física de referencia (W_0)

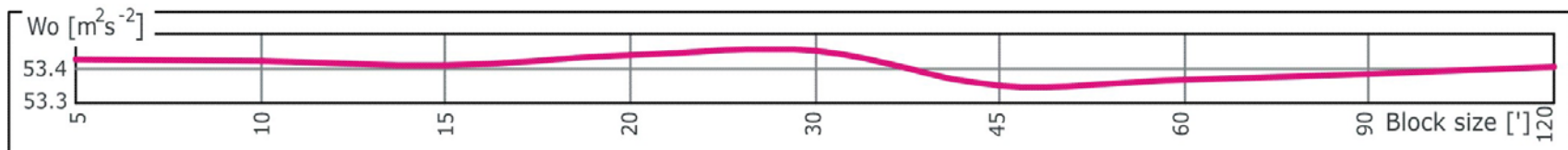
Convenciones para la determinación de W_0 (I)

a) Dependencia de W_0 en función de la resolución espectral del GGM:



➔ W_0 debe derivarse de *satellite-only GGMs*, $n = 120 \dots 160$

b) Dependencia de W_0 en función de la resolución espacial del modelo MMS:



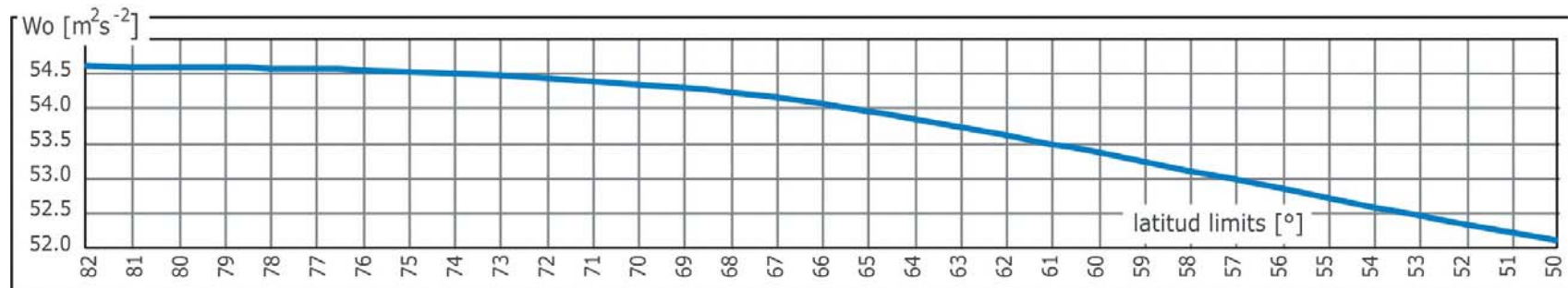
➔ Celdas de $1^\circ \times 1^\circ$ son adecuadas

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

Actividades asociadas a la superficie física de referencia (W_0)

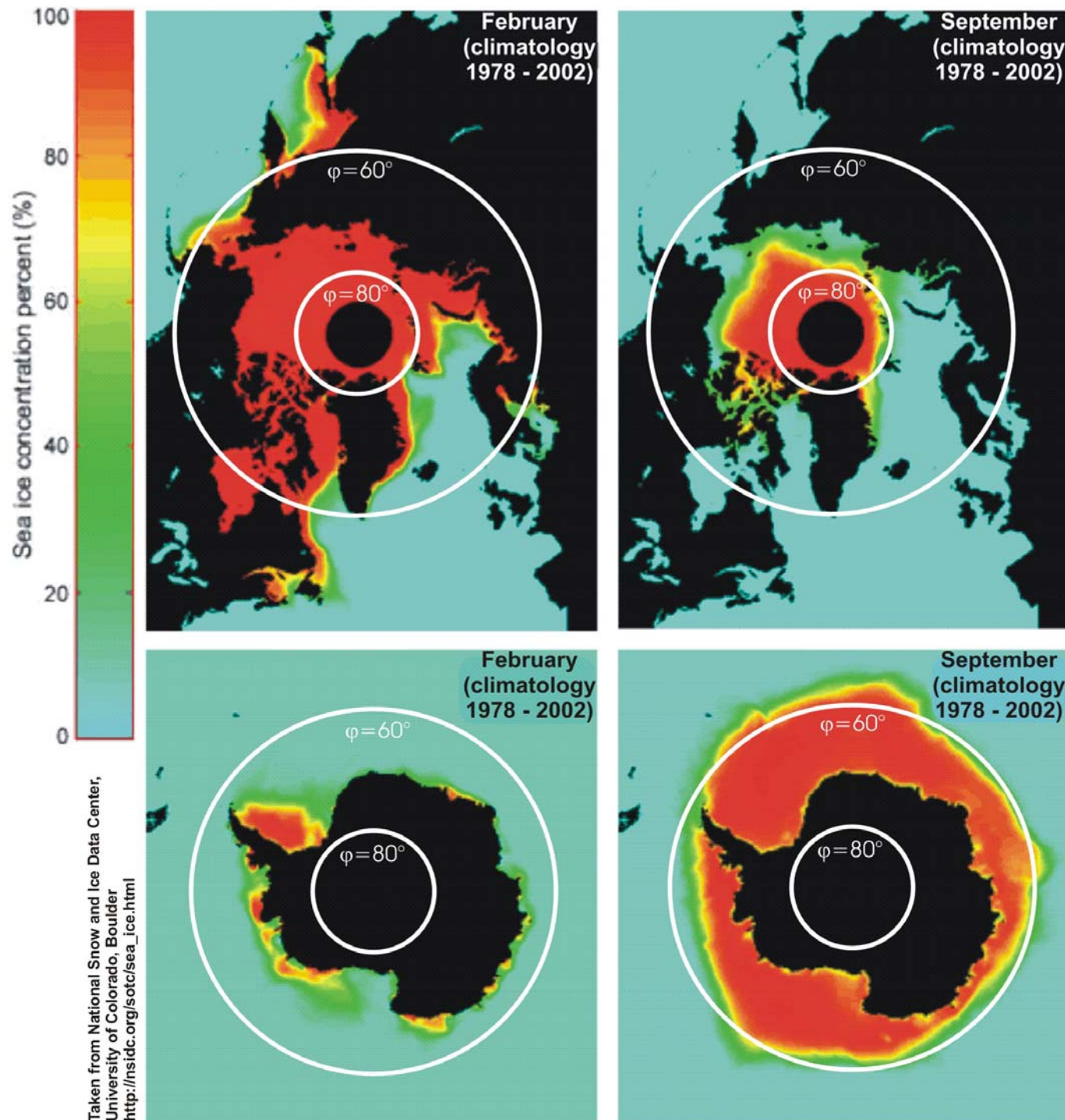
Convenciones para la determinación de W_0 (II)

c) Dependencia de W_0 en función de la extensión latitudinal:



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





Taken from National Snow and Ice Data Center,
University of Colorado, Boulder
http://nsidc.org/sotc/sea_ice.html

Contenido de hielo
(100%) en el agua del
mar:

Invierno:

Ártica: $\varphi = \sim 60^\circ\text{N}$

Antártica: $\varphi = \sim 60^\circ\text{S}$

Verano:

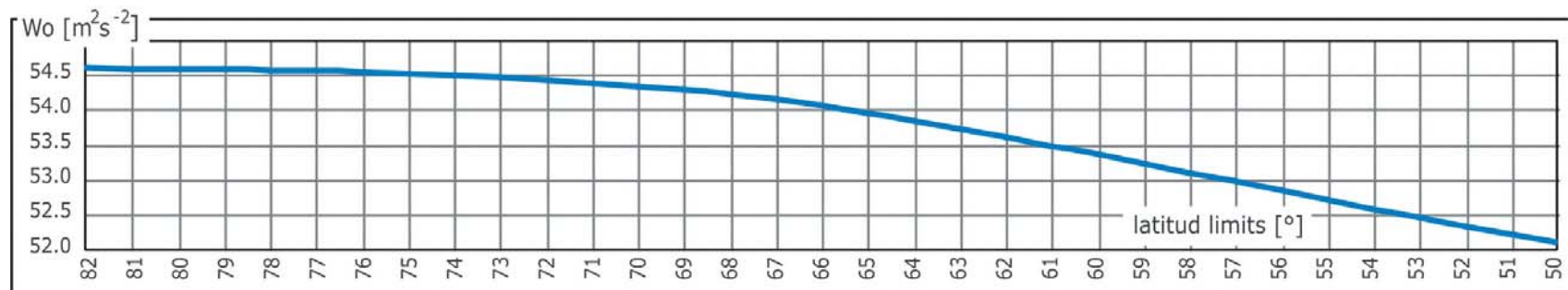
Ártica: $\varphi = \sim 72^\circ\text{N}$

Antártica: línea de costa

Actividades asociadas a la superficie física de referencia (W_0)

Convenciones para la determinación de W_0 (II)

c) Dependencia de W_0 en función de la extensión latitudinal:



Deben evitarse los efectos provenientes del ciclo polar (hielo en el agua y congelamiento y descongelamiento polar estacional).

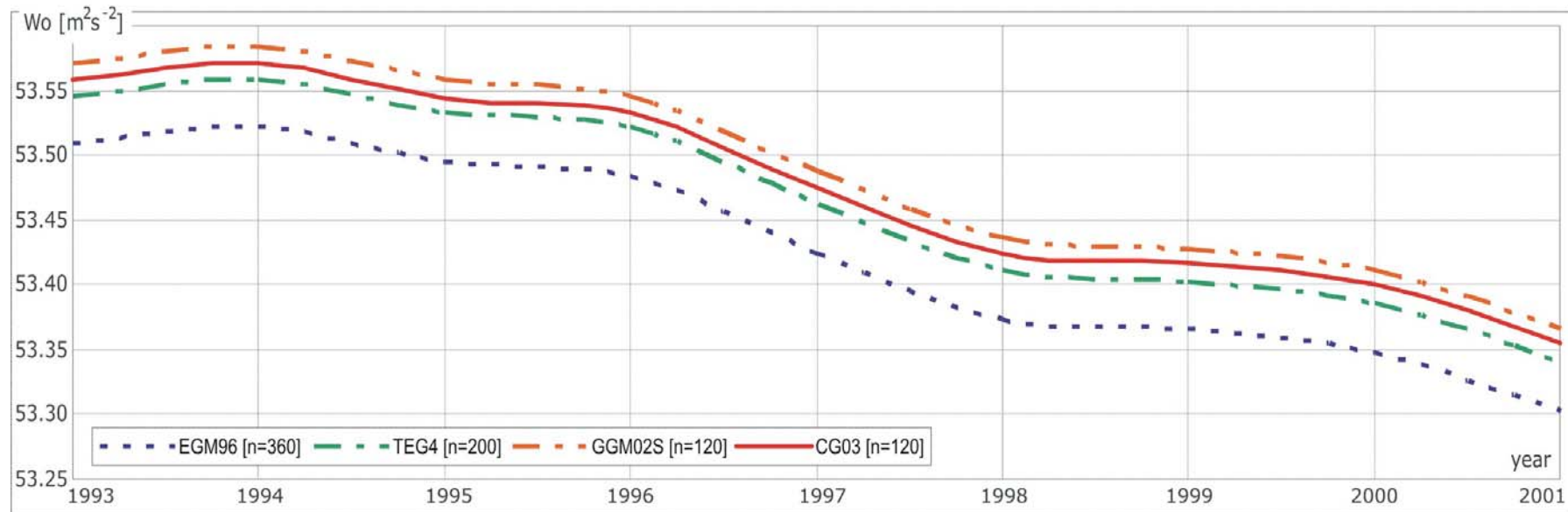
Las discrepancias entre los modelos MSS (e.g. GFSC00.1, CLS01, KMS04) son considerables (> 5 cm) en altas latitudes, al norte y sur de $\varphi = 60^\circ$ N/S.

➔ La zona de cálculo de W_0 debe estar limitada por $\varphi = 60^\circ$ N/S.

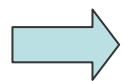
Actividades asociadas a la superficie física de referencia (W_0)

Convenciones para la determinación de W_0 (III)

d) Dependencia de W_0 en función del tiempo



MSS : modelos anuales MSS derivados en el DGFI de información T/P (1999-2001)
+ modelo de mareas FES2004 (Lettelier et al. 2004)
+ modelo de *tendencia* (sea state bias) Chamber et al. (2003).



Debe adoptarse una época de referencia: los coeficientes del GGM y las alturas del MSS deben reducirse a la misma época.

Valores W_0 obtenidos de diferentes modelos MSS y GGMs

MSS	n	EIGEN-CG03C	EGM96	TEG4	GGM02S	φ [N/S]
CLS01	120	62 636 853,35	62 636 853,37	62 636 853,38	62 6368 53,36	60/60
	200	53,35	53,37	53,37		60/60
	360	53,35	53,36			60/60
KMS04	360	53,24	53,26			60/60
GSFC00.1	360	53,58	53,59			60/60
CLS01	120	62 636 854,61	62 636 854,62	62 636 854,65	62 636 854,61	82/80
	200	54,61	54,62	54,64		82/80
	360	54,61	54,61			82/80
KMS04	360	54,46	54,45			82/82
GSFC00.1	360	54,93	54,93			80/80

MSS-Models:

- CLS01 (Hernandez and Schaeffer 2001)
- KMS04 (Andersen et al. 2004)
- GSFC00.1 (Koblinsky et al. 1999)

GGMs:

- EGM96 (Lemoine et al. 1998)
- TEG4 (Tapley et al. 2001)
- GGM02 (Tapley et al. 2005)
- EIGEN-CG03C (Förste et al. 2005)

GGM: EIGEN-CG03C, $n = 120$ época 2000.0

Modelo MSS: Derivado de T/P, entre $\varphi = 60^\circ \text{N/S}$,
con resolución de $1^\circ \times 1^\circ$, época 2000.0

Constantes: $GM = 398\,600,4415 \times 10^9 \text{ m}^3\text{s}^{-2}$;
 $\omega = 7\,292\,115 \times 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$

Procedimiento: Definición Gauss-Listing, **evaluación empírica**
del potencial real en una malla de alturas MSS
y **promedio** de los valores W , utilizando $\cos \varphi$ como peso.

$$W_0 = 62\,636\,853,4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$$

Algunos cometarios sobre W_0 (I)

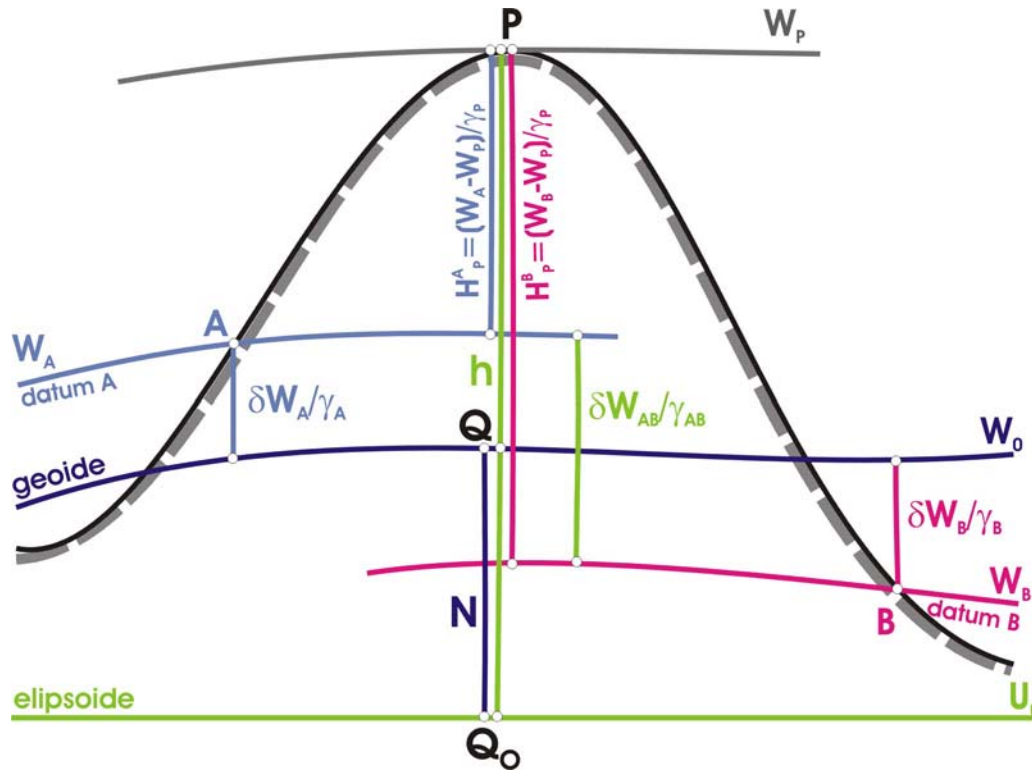
- El valor de referencia W_0 puede seleccionarse arbitrariamente, pero se prefiere que éste sea derivado de observaciones reales del campo de gravedad terrestre y de la superficie del mar.
- El *estado del arte* permite la determinación empírica de W_0 ; ya no se requiere la solución clásica de asumir (suponer) W_0 igual a un potencial normal predeterminado U_0 .
- Al igual que cualquier sistema de referencia, W_0 debe basarse en convenciones acordadas y adoptadas, las cuales deben garantizar la fiabilidad y repetibilidad del valor utilizado.
- El valor W_0 presentado ha sido calculado utilizando la representación básica del campo de gravedad en una expansión de armónicos esféricos, no ha sido necesaria la introducción de formulaciones teóricas complicadas.

Algunos cometarios sobre W_0 (II)

- La fiabilidad del valor W_0 calculado ha sido probada mediante diferentes combinaciones de 4 modelos MSS con 4 GGMs.
- La constante GM utilizada corresponde al Terrestrial Time (TT). Si se utiliza el valor de GM para el Geocentric Coordinate Time (TCG), W_0 cambia aproximadamente en $\sim 1 \times 10^{-9}$, i.e. $\sim 0,06 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$.
- El valor de W_0 recomendado varía $\sim 3 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ($\sim 4 \times 10^{-8}$) con respecto a otros cálculos globales (e.g. Bursa et al. 1997, 1999, 2000, 2002, 2004 y Ardalan et al. 2005). No son claras las razones de esta divergencia, es necesario comparar detalladamente, tanto las metodologías de Bursa et al. y Ardalan et al., como los modelos MSS y GGM que ellos han utilizado. → Taller de trabajo en abril 2006 bajo el ámbito del ICP1.2 (Vertical Reference Frames) de la IAG.

Actividades asociadas a la vinculación entre los datum clásicos y W_0

Relación entre los sistemas clásicos de alturas y el nivel de referencia W_0



$$\delta W_i = W_0 - W_i \quad \Rightarrow \quad \delta H_i = \frac{\delta W_i}{\gamma_i}$$

$$\delta H_i = h - H_i^N - \zeta$$

a) Determinación de δW_i (δH_i) en:

- Mareografos principales, incluyendo los de referencia.
- Áreas marinas adyacentes a los mareografos (SSTop).
- Estaciones SIRGAS2000.

b) Determinación de

$$\delta H_{ij} = \frac{\delta W_i}{\gamma} - \frac{\delta W_j}{\gamma} = H_j^N - H_i^N$$

en los puntos fronterizos.

c) Solución combinada mediante un ajuste por mínimos cuadrados.

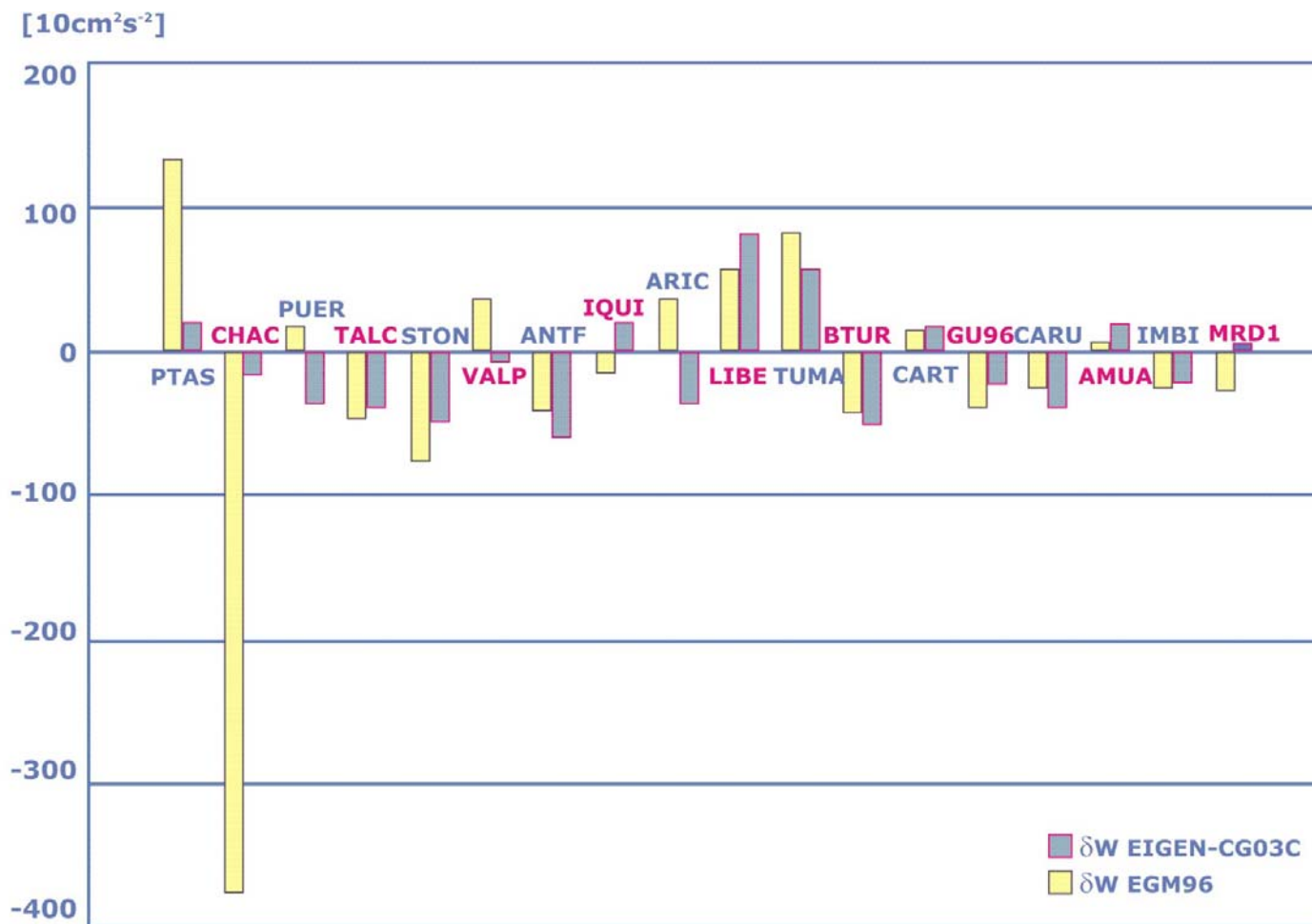
Actividades asociadas a la vinculación entre los datum clásicos y W_0

Discrepancias preliminares entre los datum clásicos de alturas y el nuevo nivel de referencia W_0 (I)

Evaluación de W_i en los mareografos $[\varphi, \lambda, h-H^N]$

γ del GRS80 en la superficie terrestre (Teoría de Molodensky)

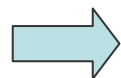
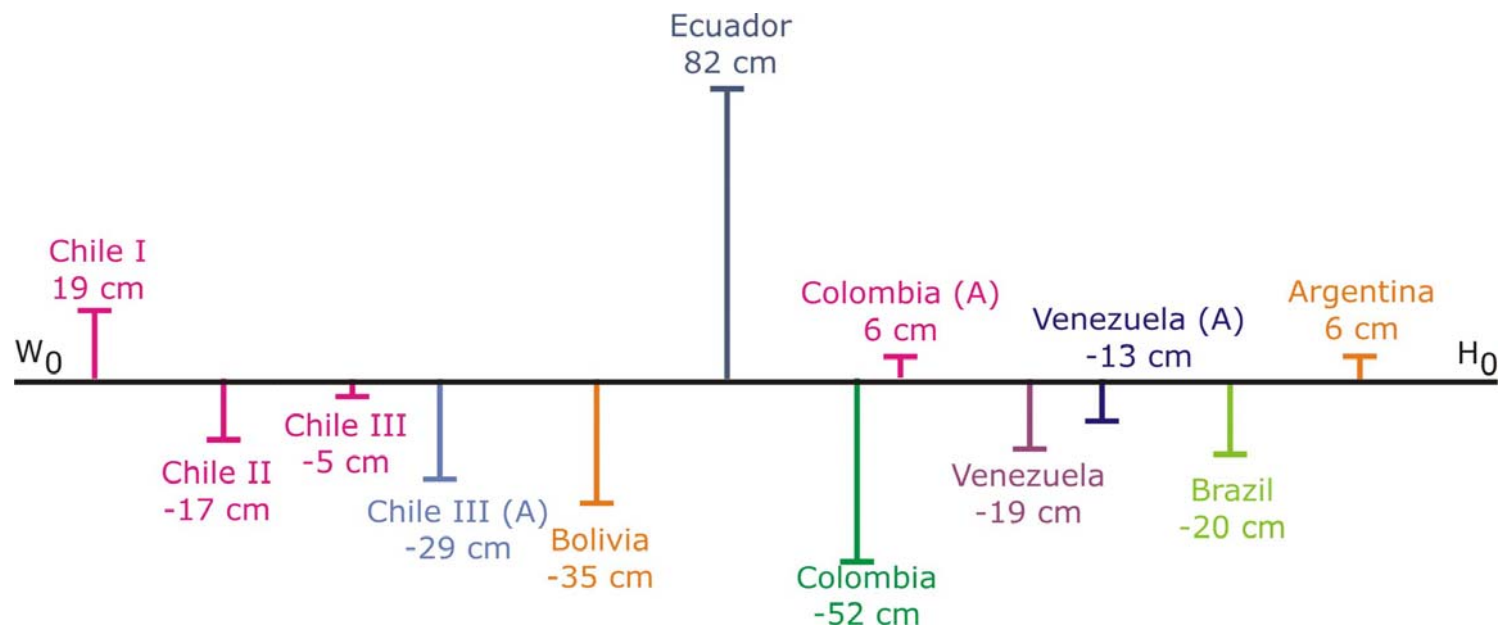
ζ del EGM96 y del EIGEN-CG03C, se incluyen términos de orden cero: δGM y $[W_0 - U_0]$



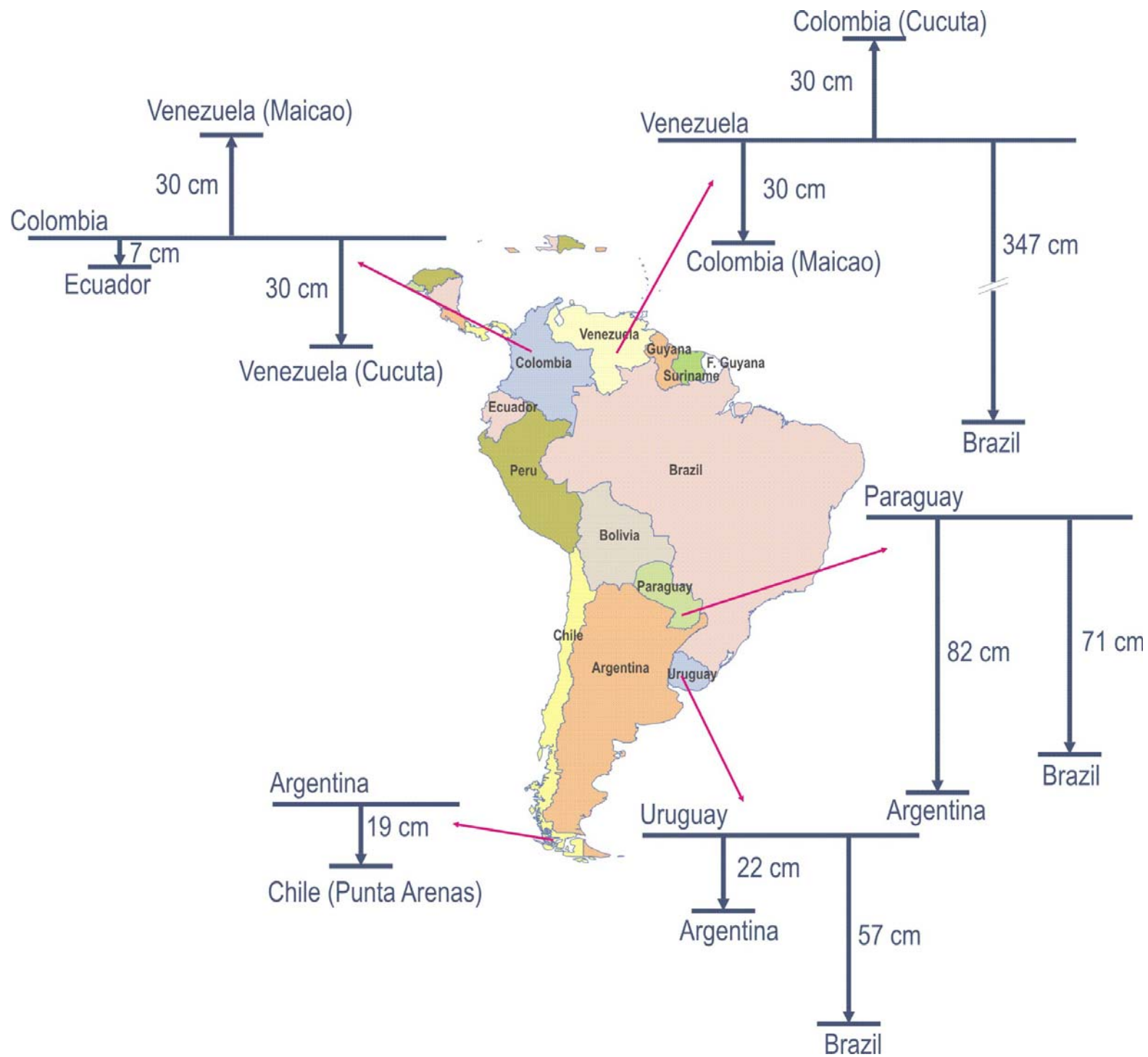
Actividades asociadas a la vinculación entre los datum clásicos y W_0

Discrepancias preliminares entre los datum clásicos de alturas y el nuevo nivel de referencia W_0 (II)

Evaluación de W_i en los mareografos $[\varphi, \lambda, h-H^N]$
 γ del GRS80 en la superficie terrestre (Teoría de Molodensky)
 ζ del EIGEN-CG03C, se incluyen términos de orden cero: δGM y $[W_0 - U_0]$



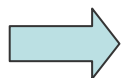
La conexión de los sistemas verticales a través de un punto (o pocos puntos) conduce a resultados **no** fiables, es necesario incluir una red de referencia homogénea (i.e. SIRGAS2000) con h , H^N y ζ de alta precisión.



Actividades asociadas a la vinculación entre los datum clásicos y W_0

Discrepancias preliminares entre los datum clásicos de alturas y el nuevo nivel de referencia W_0 (III)

Nombre	Cuasigeoide local		EIGEN-CG03C	
	δH_i^{TG} [cm]	δH_i^{SSTop} [cm]	δH_i^{TG} [cm]	δH_i^{SSTop} [cm]
TG I	-18	-22	56	43
Ref. TG	-25	-30	-52	-41
TG II	-23	-20	15	29
Media	-22 ± 3	-26 ± 6	6 ± 53	10 ± 49



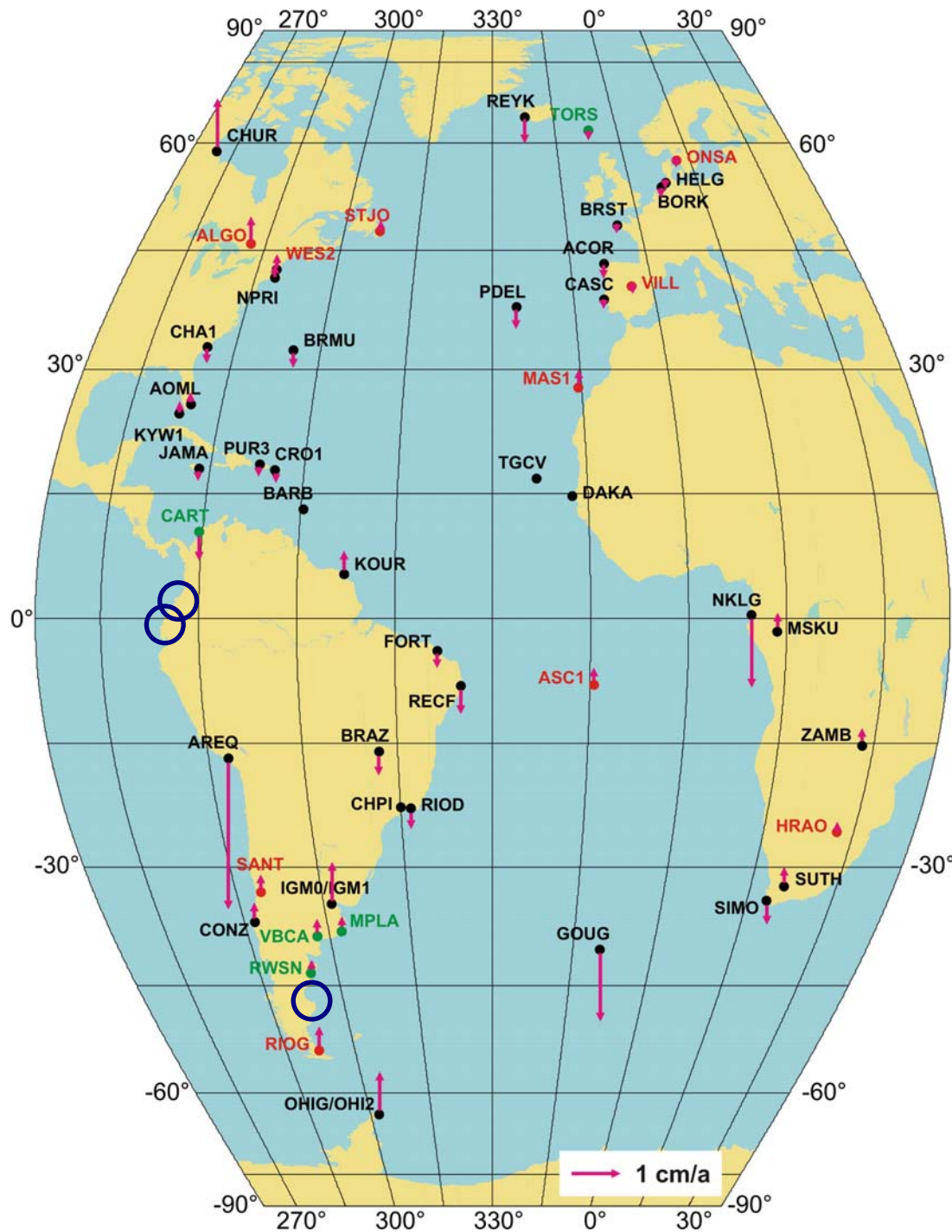
La determinación de δH_i debe basarse en modelos cuasigeoidales de alta resolución derivados de *satellite-only* GMMs (CHAMP, GRACE, GOCE) en combinación con gravedad terrestre de alta calidad.

Los valores δH_i obtenidos en los mareografos y de la SSTop correspondiente, deben ser combinados con los δH_i derivados en las otras estaciones SIRGAS2000.

Proyecto TIGA: TId e GAUge benchmark monitoring project

- Proyecto del IGS
- DGFI procesa una red de 54 estaciones (22 en mareografos) en el Atlántico Norte y Sur
- Soluciones semanales, cuyos archivos SINEX son remitidos a los centros de análisis correspondientes (TAAC: TIGA Associated Analysis Centers)
- Una semana por mes entre junio de 2000 y diciembre de 2003, cada semana desde enero de 2004 hasta hoy.
- Se programa el recálculo de todos los datos disponibles siguiendo el criterio de calibración absoluta de antenas GNSS
- Nuevos mareografos: Puerto Deseado (Argentina), Buenaventura y Tumaco (Colombia)

ociadas al monitoreo del sistema vertical
Proyecto TIGA en DGFI



Comparación velocidades
 DGFI05P01_TIGA e IGB00

Punto	Norte [mm/a]	Este [mm/a]	Altura [mm/a]
CHUR	0,3	0,5	0,3
CRO1	1,9	-4,3	-1,2
FORT	-1,3	0,4	-2,3
GOUG	-6,1	5,3	6,3
NKLG	0,9	-2,8	-2,8
OHI2	1,2	-0,6	0,4

Estaciones DGFI
Estaciones fiduciales

bre 17 y 18 de 2005





Actividades *administrativas* (I)

Participación en el IAG Intercommission project 1.2: Vertical Reference Frames

2. Reunión de trabajo: Cairns, agosto 2005

Reunión específica W_0 y convenciones WHS: Praga, abril 2006.

Página WEB, capítulo GTIII: texto borrador distribuido entre los miembros en enero de 2005, remitido a E. Lauría en octubre 2005.

Reportes (texto y revisión): Boletín SIRGAS 8, Conferencia Cartográfica de la ONU, Reporte (*mid-term*) para IAG, Reporte SIRGAS2000 (capítulo GTIII).

Correspondencia electrónica (solicitando datos!): abril 26, junio 13, julio 07, septiembre 09, octubre 10. Intercambio con: Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Perú, Uruguay (México).



Actividades *administrativas* (II)

- **Chile y Colombia** han entregado la información correspondiente a las estaciones SIRGAS2000 y a las conexiones internacionales, avanzan en los datos de los puntos nodales
- **Argentina y Uruguay** entregarán la totalidad de la información requerida en el futuro próximo
- **Brasil** avanza en la depuración e integración de las bases de datos nivelados y gravimétricos
- **Bolivia, Ecuador, Perú, Paraguay, Venezuela ...?**