

NUEVO AJUSTE DE LA RED DE NIVELACIÓN DE ALTA PRECISIÓN DE LA ARGENTINA

Diego Piñón¹, Hernán Guagni¹, Sergio Cimbaro¹

¹ Instituto Geográfico Nacional

XXVII Reunión Científica de La Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas

10-14 de noviembre de 2014



Índice

- Introducción
- Motivación
- Cálculo de números geopotenciales
- Procedimientos
- Resultados
- Conclusiones

Introducción

Breve reseña histórica

- A principios del siglo XX el Instituto Geográfico Militar (IGM) inicia las labores de construcción y medición de la red de nivelación.
- En 1923 se vincula la red de nivelación al mareógrafo de Mar del Plata, materializando el origen vertical de la red.
- En 1941 se sanciona la Ley de La Carta (ley 12.696), y con ella se proyecta una nueva red de nivelación de alta precisión.
- En 1969 el IGM envía a la U.S. Army Topographic Command (USATC) toda la información altimétrica de Argentina para ajustar la red de nivelación.
- En 1971 se oficializan las cotas calculadas por el USATC.
- En 1997 SIRGAS genera el grupo GTIII (“Datum Vertical”). A partir del año 2001 el IGM y la FCAG-UNLP comienzan a trabajar cooperativamente para determinar alturas geopotenciales .
- En 2000 se conforma el grupo “Origen de Potencial” en el seno del Subcomité de Geodesia. Algunos de sus objetivos son calcular los desniveles geopotenciales y determinar alturas físicas.
- En 2010 el IGN inicia el proceso de reajuste de la Red de Nivelación de Alta Precisión.

Introducción (cont.)

Situación de la Red de Nivelación de Alta Precisión

- **407 líneas de nivelación**
 - Aprox. 59.000 km de nivelación
 - Aprox. 18.000 pilares
 - Valores gravimétricos (80%)
- **247 puntos nodales**
- **156 polígonos**



Introducción (cont.)

Ajuste del año 1969

- 227 líneas de Alta Precisión
 - Aprox. 34.000 km de nivelación
- A partir de ese momento se han ajustando las nuevas líneas construidas y medidas a la malla original del año 1969.
 - Aprox. 25.000 km de nivelación



Motivación

- No existe en la Argentina un ajuste completo de la red de Alta Precisión.
- En 1969 sólo unas pocas líneas tenían valores gravimétricos.
- Contribuir con SIRGAS en la generación de un sistema altimétrico regional unificado basado en números geopotenciales.

Números Geopotenciales y Alturas Físicas

- El campo gravitatorio terrestre es un campo conservativo, y por lo tanto se puede definir un potencial (W).
- La separación entre las superficies equipotenciales varía de acuerdo a la distribución de masas de la tierra.
- La superficie equipotencial que se aproxima al nivel medio del mar se lo denomina geoide (W_0).
- En la nivelación geométrica los instrumentos (nivel y miras) se orientan siempre normales a las superficies equipotenciales (niveles esféricos y tubulares).

Números Geopotenciales y Alturas Físicas (cont.)

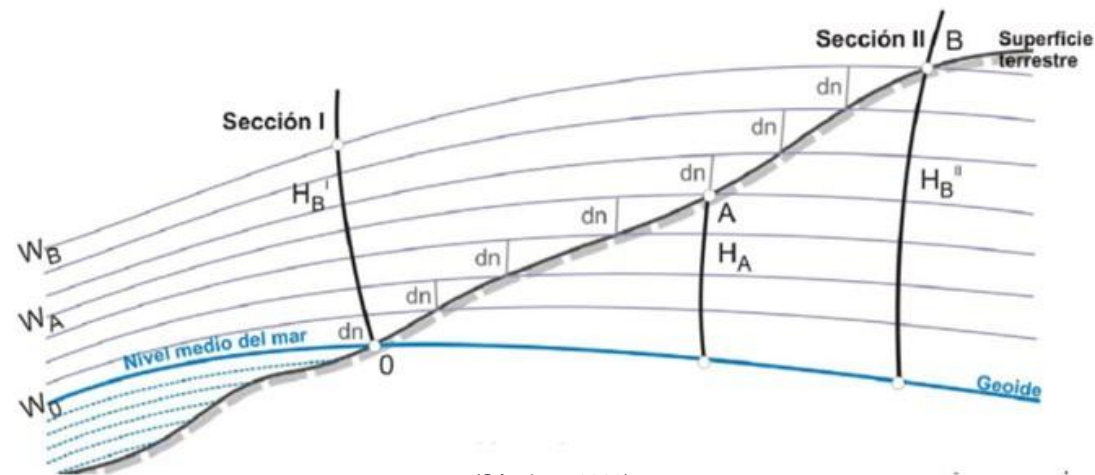
La derivada direccional del potencial (W) corresponde con el vector fuerza en esa dirección, entonces:

$$-\frac{dW}{dh} = g \rightarrow \text{gravedad}$$

$$dW = g dh \rightarrow \text{desnivel}$$

$$-\int_0^1 dW = \int_0^1 g(h) dh$$

$$W_0 - W_1 = \int_0^1 g(h) dh$$



(Sánchez, 2009)

Números Geopotenciales y Alturas Físicas (cont.)

Número geopotencial

$$C_1 = W_0 - W_1$$

$$C_1 = \int_0^1 g(h) dh$$

$$C_1 = \sum_{i=1}^n \frac{g_i + g_{i+1}}{2} \delta h_i \quad \longrightarrow \quad \text{función discreta}$$

- Carece de sentido geométrico.
- Unidad de medida es $\text{kgal m} = 10 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$

Números Geopotenciales y Alturas Físicas (cont.)

Altura ortométrica de Helmert (1890)

$$H = \frac{C}{\bar{g}} \longrightarrow \text{gravedad media}$$

$$\bar{g} = \frac{1}{H} \int_0^H g(h) dh$$

$$\bar{g} = g + \frac{0.0424 H}{C} \longrightarrow \text{reducción placa de Bouguer } (\rho = 2.67 \text{ g cm}^{-3}) \text{ y aire libre}$$

$$H = \frac{C}{g + 0.0424 H} \longrightarrow \text{altura ortométrica de Helmert}$$

- Posee sentido geométrico. Distancia entre la punto y el geoide a lo largo de la línea de plomada.
- Unidad de medida es el metro.

Números Geopotenciales y Alturas Físicas (cont.)

Altura ortométrica de Mader (1954)

$$\bar{g} = g + 0.0424 H + \frac{C_T}{2}$$

$$H = \frac{C}{g + 0.0424 H + \frac{C_T}{2}}$$

$$C_T = \frac{G\rho}{2} \iint_{\sigma} \frac{(H - H_P)^2}{l^3} d\sigma \longrightarrow \text{Aproximación plana de la corrección topográfica (Moritz, 1968)}$$

- La gravedad varía linealmente a lo largo de la línea de la plomada.
- Considera la influencia topográfica sobre la gravedad observada.

Procedimiento

Digitalización de planillas de observación



Procedimiento (cont.)

Planillas de observación en formato digital

Línea N(393) - DESDE PF10N(391) - HASTA PASO JAMA
Año de medición: 2012 - Operador: Ricardo Torres

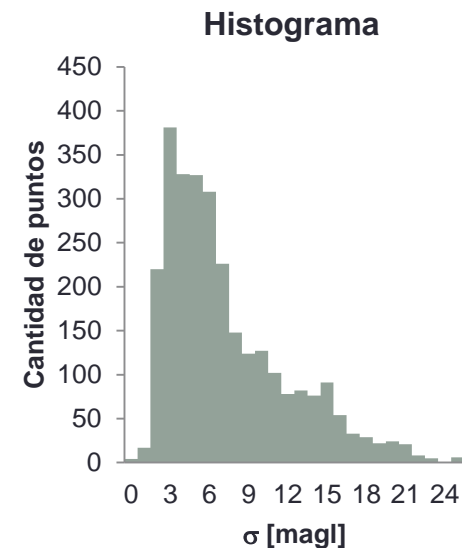
NÚMERO DE PF	DESNIVELES					DISTANCIAS					COORDENADAS						ESTADO DEL PUNTO FIJO	GRAV. IGSN71 [mgal]	
	IDA [m]	VUELTA [m]	IDA-VUE [m]	PTO. DE REF.	PROM. [m]	IDA [m]	VTA [m]	IDA-VUE [m]	PROM [m]	SUMA [m]	Latitud			Longitud					PREC.
											Grad	Min	Seg	Grad	Min	Seg			
PF10N(391)	0.00000	0.00000	0.00000	P	0.00000	0	0	0	0	0	-23	36	11.3	-66	46	18.5	GPS	S/N	977706.55
1	31.11117	-31.11571	-0.00454	P	31.11344	3033	3038	-5	3035	3035	-23	36	51.9	-66	47	52.6	GPS	S/N	977702.26
2	60.03972	-60.04410	-0.00438	P	60.04191	5694	5695	0	5694	8729	-23	37	36.9	-66	50	50.8	GPS	S/N	977691.19
3	64.49236	-64.49532	-0.00296	P	64.49384	6476	6477	-2	6477	15206	-23	35	31.2	-66	53	33.7	GPS	S/N	977667.37
4	36.51286	-36.51460	-0.00174	P	36.51373	6104	6102	2	6103	21309	-23	32	48.9	-66	55	26.0	GPS	S/N	977650.71
5	3.78706	-3.78406	0.00300	P	3.78556	6082	6083	-1	6083	27392	-23	29	42.2	-66	56	28.2	GPS	S/N	977648.88
6	3.27787	-3.27985	-0.00198	P	3.27886	6033	6032	1	6032	33424	-23	26	33.8	-66	57	8.9	GPS	S/N	977643.18
7	6.73807	-6.73581	0.00226	P	6.73694	5789	5787	1	5788	39212	-23	23	29.1	-66	57	20.3	GPS	S/N	977641.81
8	-9.81077	9.80654	-0.00423	P	-9.80866	6152	6149	3	6150	45362	-23	20	28.9	-66	58	48.1	GPS	S/N	977636.78
9	-26.31098	26.30990	-0.00108	P	-26.31044	6455	6458	-3	6457	51819	-23	17	31.7	-67	0	34.2	GPS	S/N	977637.89
10	-3.30268	3.30351	0.00083	P	-3.30310	5996	5991	5	5994	57813	-23	14	29.8	-67	0	47.1	GPS	S/N	977634.67
11	185.91755	-185.91527	0.00228	P	185.91641	6059	6060	-1	6060	63873	-23	13	34.6	-67	3	45.6	GPS	S/N	977602.50

Procedimiento (cont.)

Interpolación de gravedades

El 20% de los puntos no poseen gravedad observada

- PREDGRAV (Drewes, 1978) → provisto por SIRGAS
- Método → colocación por mínimos cuadrados
- Resultados → error medio de **7 mgal**



Tolerancia

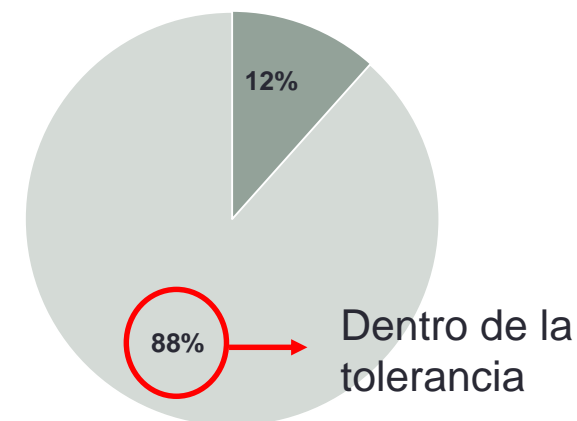
$$T[\text{mm}] = 3 \times \sqrt{L[\text{km}]}$$

La precisión que debe tener un desnivel entre 2 puntos consecutivos distanciados **3 km.** debe ser inferior a **5 mm.**

Precisión gravimétrica

H [m]	δg [mgal]
10	553.2
50	110.6
100	55.3
500	11.1
1000	5.5
2000	2.8
3000	1.8
4000	1.4

Porcentaje de pts. dentro de tolerancia



Procedimiento (cont.)

Correcciones topográficas

Método de Hammer (1939)

MDE → SRTM_v4.1 (resolución de 3")

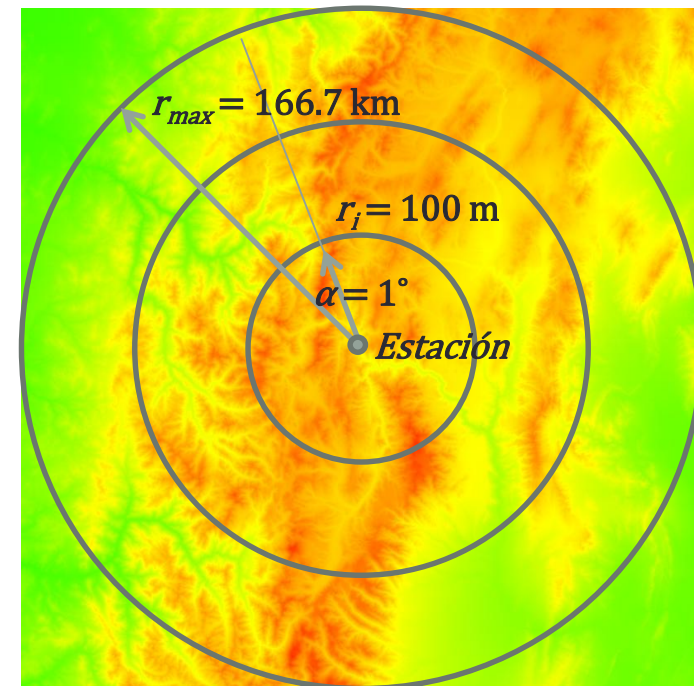
$$C_T = \sum_{i=0}^n \rho \frac{2\pi}{n} G \left(r_{i+1} - r_i + \sqrt{r_i^2 + \Delta h_i^2} - \sqrt{r_{i+1}^2 + \Delta h_i^2} \right)$$

Densidad → $\rho = 2.67 \text{ [g cm}^{-3}\text{]}$

Paso angular → $\alpha = \frac{2\pi}{n = 360^\circ} = 1^\circ$

Paso linear → $r_i = 100 \text{ [m]}$

Radio máximo → $r_{max} = 166.7 \text{ [km]}$

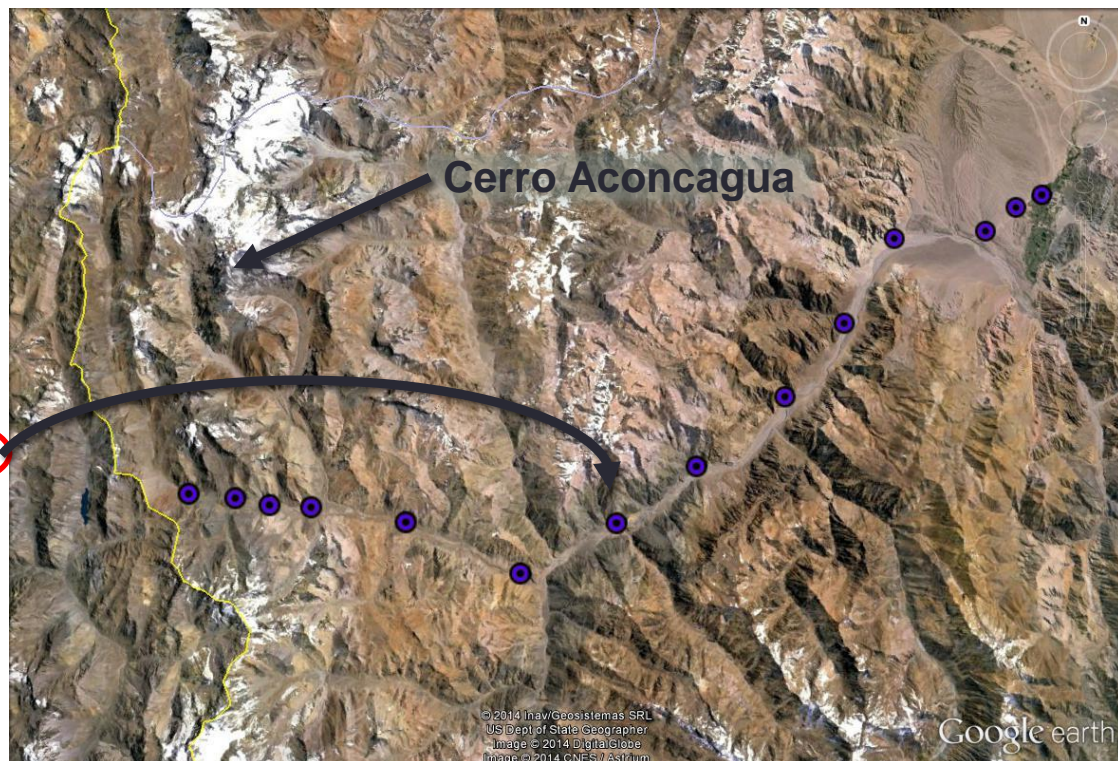


Procedimiento (cont.)

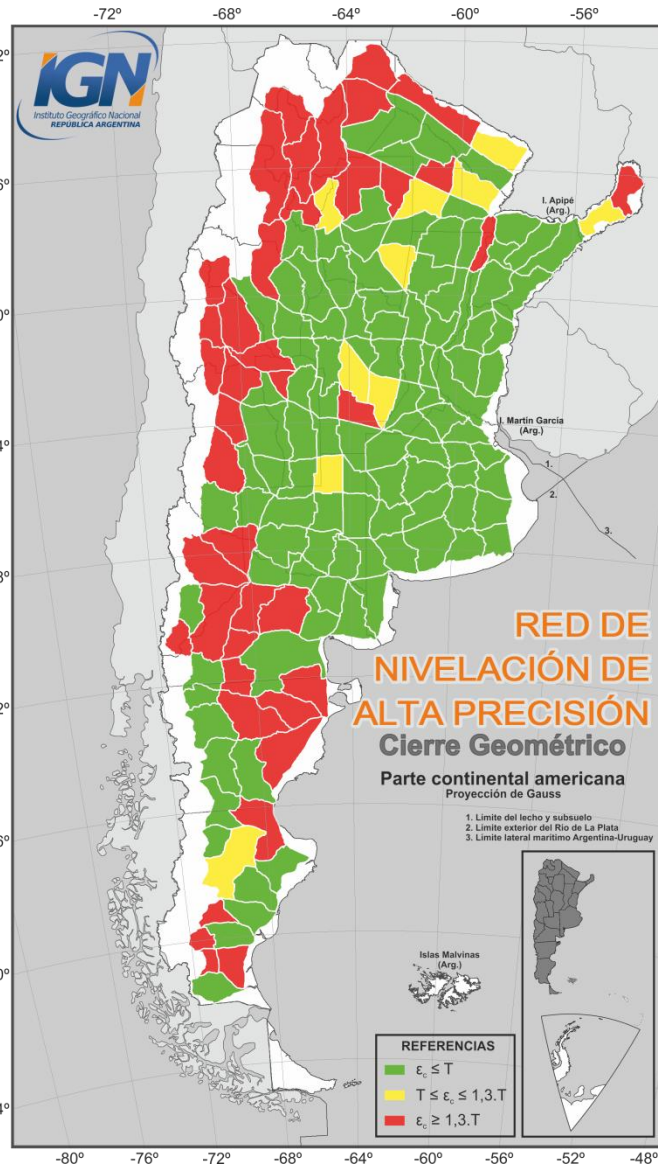
Correcciones topográficas

Método de Hammer (1939)

Punto Fijo	Latitud			Longitud			C_T [mgal]
	Grad	Min	Seg	Grad	Min	Seg	
NODAL 131	-32	35	19.7	-69	21	16.5	6.10
1	-32	35	54.0	-69	22	36.4	6.75
2	-32	36	59.4	-69	24	11.6	8.09
3	-32	37	26.4	-69	28	49.2	19.05
4	-32	41	10.6	-69	31	26.5	28.67
5	-32	44	20.5	-69	34	26.2	40.23
6	-32	47	16.9	-69	38	44.9	44.50
7	-32	49	38.2	-69	42	33.1	45.22
8	-32	51	42.3	-69	47	4.3	30.44
9	-32	49	47.3	-69	52	35.8	27.56
10	-32	49	15.3	-69	57	3.9	24.36
11	-32	49	13.7	-69	59	1.2	29.92
12	-32	48	57.7	-70	0	41.9	29.30
13	-32	48	49.8	-70	3	0.2	26.59



Procedimiento (cont.)

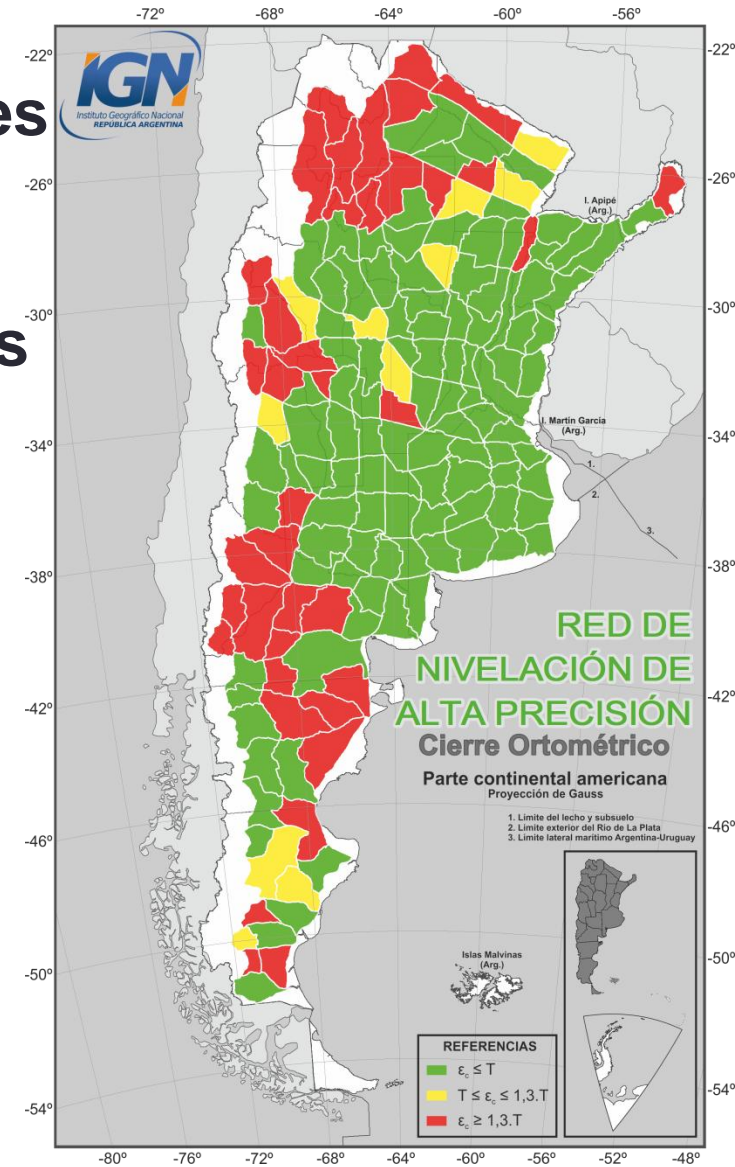


**Control de cierres
geométricos
y ortométricos
de los polígonos
de nivelación**



$$T[\text{mm}] = 3 \times \sqrt{L[\text{km}]}$$

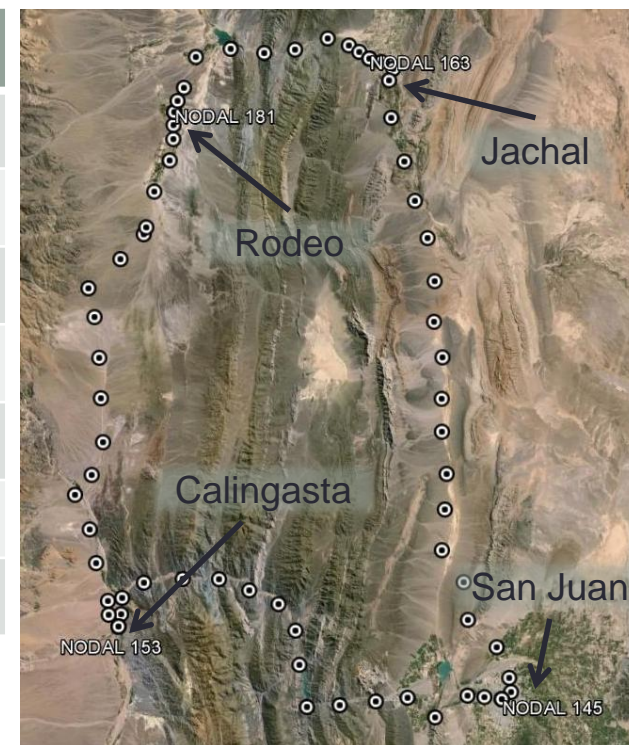
- $\epsilon_c \leq T$
- $T < \epsilon_c \leq 1,3 T$
- $\epsilon_c \geq 1,3 T$



Procedimiento (cont.)

Ej. 1. Polígono 108, provincia de San Juan.

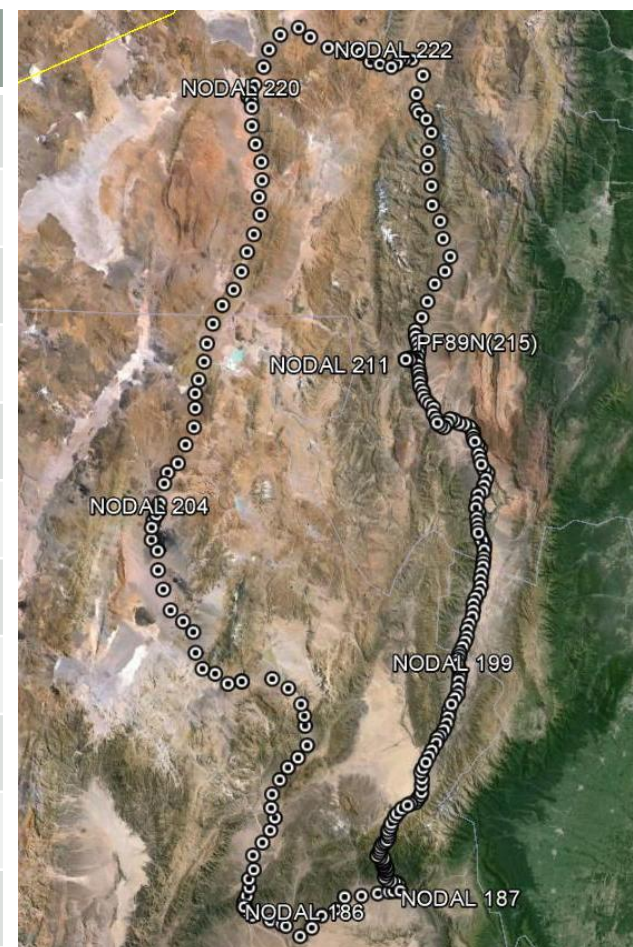
Línea	Desde	Hasta	ΔH Geom [m]	ΔH Ortom [m]	Δ Poten [m^2s^{-2}]	Distancia [m]
349	Nodal 153	Nodal 145	-719.059	-719.094	-7039.926	131684
322	Nodal 145	Nodal 163	526.913	526.952	5158.762	158985
345	Nodal 163	Nodal 181	659.421	659.329	6454.702	60172
348	Nodal 181	Nodal 153	-467.176	-467.195	-4573.026	134824
Σ			0.099	-0.008	0.512	485665
Tolerancia			0.066			



Procedimiento (cont.)

Ej. 2. Polígono 144, provincias de Salta y Catamarca.

Línea	Desde	Hasta	ΔH Geom [m]	ΔH Ortom [m]	Δ Poten [m^2s^{-2}]	Distancia [m]
355	Nodal 220	Nodal 222	82.779	82.752	809.306	108755
356	Nodal 222	PF89N(215)	-1647.979	-1647.425	-16118.218	173374
215	PF89N(215)	Nodal 211	-60.287	-60.293	-589.781	18255
199	Nodal 211	Nodal 199	-159.730	-159.700	-1562.480	193736
196	Nodal 199	Nodal 187	-810.163	-810.312	-7929.272	143314
357	Nodal 187	Nodal 186	185.283	185.270	1813.408	86205
353	Nodal 186	Nodal 204	2109.904	2110.334	20642.618	266684
354	Nodal 204	Nodal 220	299.120	299.162	2925.690	209913
Σ			-1.073	-0.212	-8.729	1200236
Tolerancia			0.104			



Procedimiento (cont.)


Control de cierres ortométrico de los polígonos de nivelación

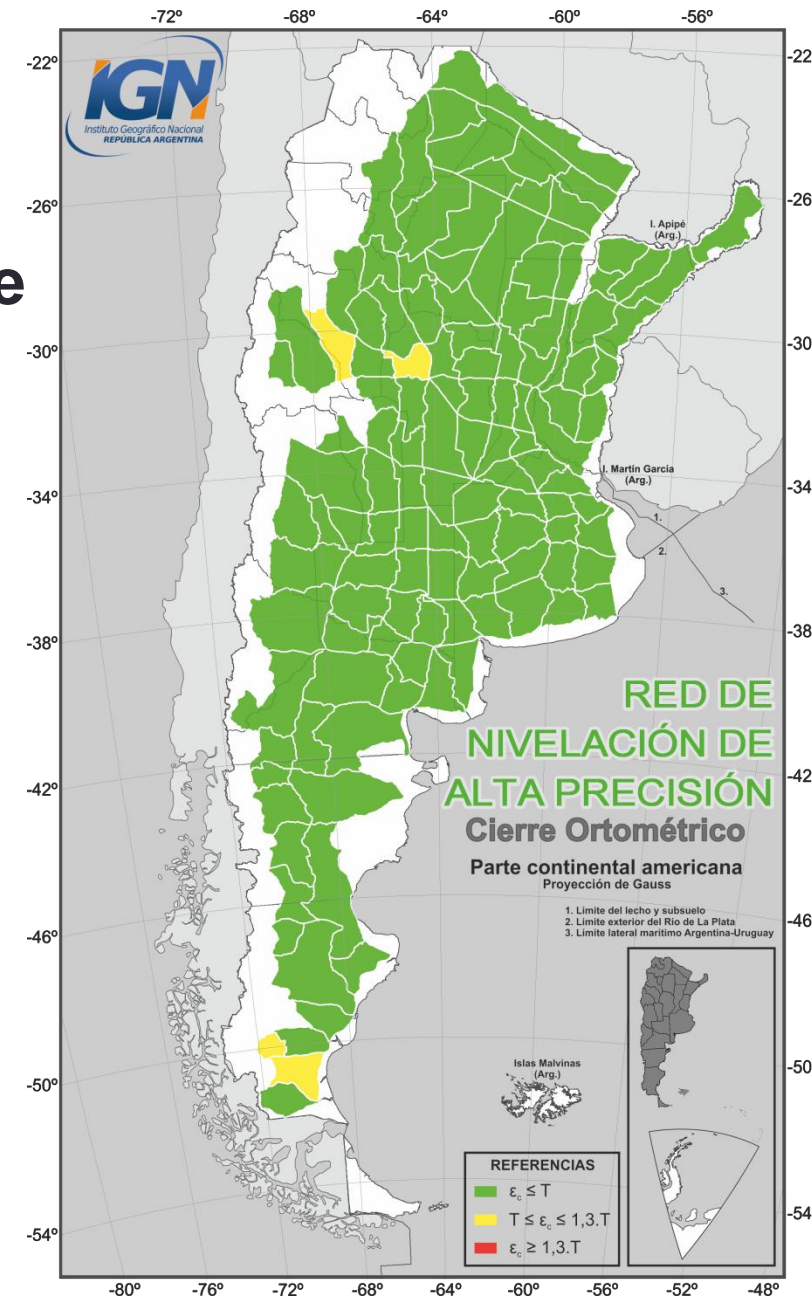
- Se desestimaron 26 líneas del cálculo

$$T[\text{mm}] = 3 \times \sqrt{L[\text{km}]}$$

 $\varepsilon_c \leq T$

 $T < \varepsilon_c \leq 1.3 T$

 $\varepsilon_c \geq 1.3 T$



Procedimiento (cont.)

Ajuste de desniveles geopotenciales por el método de mínimo cuadrados

- Matriz pesos \rightarrow inversa de la distancia
- 381 líneas de nivelación \rightarrow 381 desniveles geopotenciales
- Punto fiducial \rightarrow Nodal 71, Mar del Plata
- $C_{\text{Nodal 71}} = 121.649780 \text{ m}^2\text{s}^{-2} = 12.413 \text{ m}$
- $\sigma_0 = 0.028$



Procedimiento (cont.)

Ajuste de desniveles geopotenciales por el método de mínimo cuadrados

Archivo de entrada

Desde	Hasta	ΔC [m ² s ⁻²]	Distancia [m]
Nodal 133	Nodal 151	-37.951	188937
Nodal 151	Nodal 150	644.814	124413
Nodal 138	Nodal 150	-261.548	152673
Nodal 133	Nodal 138	867.989	115778
Nodal 112	Nodal 133	-49.077	198572
Nodal 150	Nodal 149	2112.439	102962
Nodal 123	Nodal 138	562.345	117116
Nodal 138	Nodal 149	1850.919	149119
Nodal 132	Nodal 149	-1421.721	175576
Nodal 112	Nodal 123	255.912	127778

Archivo de salida

Desde	C [m ² s ⁻²]	σC [m ² s ⁻²]
Nodal 133	1097.9401	0.7539
Nodal 151	1059.9487	0.7798
Nodal 150	1704.6629	0.7831
Nodal 138	1965.9774	0.7718
Nodal 112	1147.164	0.7075
Nodal 149	3817.0695	0.7720
Nodal 123	1403.3663	0.8012
Nodal 132	5238.7392	0.8046
Nodal 90	1625.3862	0.7298
Nodal 87	1124.593	0.7005

Procedimiento (cont.)

Ajuste de desniveles geopotenciales no incorporados en el ajuste principal

- 26 líneas de nivelación → 26 desniveles geopotenciales
- Punto fiducial de la Isla Grande de Tierra del Fuego → PF1N(383), Ushuaia
- $C_{PF1N(383)} = 38.427000 \text{ m}^2\text{s}^{-2} = 3.915 \text{ m}$



Procedimiento (cont.)

Cálculo de alturas ortométricas – Paso 1

Punto Fijo	Distancia [m]	Δh [m]	g IGSN71 [mgal]	g prom. [mgal]	$\Delta h \cdot g$ prom [mgal*m]	$\Sigma \Delta h \cdot g$ prom. [mgal*m]	C compensado [m ² /s ²]
NODAL 143	0	0.00000	979460.90				480.876
1	2502	-0.01283	979461.15	979461.03	-12562	-12562	480.751
2	2500	-2.22073	979459.92	979460.54	-2175112	-2187674	459.000
3	2646	-6.08840	979460.20	979460.06	-5963345	-8151019	399.367
4	2601	3.83005	979458.98	979459.59	3751379	-4399640	436.882
5	2562	4.21598	979461.11	979460.05	4129379	-270260	478.176
6	2634	5.24590	979454.05	979457.58	5138137	4867876	529.558
7	2534	10.47888	979453.81	979453.93	10263575	15131451	632.194
8	2567	0.74738	979451.86	979452.84	732019	15863470	639.515
9	2699	-1.87373	979452.11	979451.99	-1835224	14028246	621.163
10	2580	3.38675	979452.49	979452.30	3317160	17345406	654.335
11	2496	0.54050	979452.80	979452.65	529394	17874800	659.629
12	2460	-2.37178	979451.62	979452.21	-2323040	15551760	636.399
13	2495	-1.56965	979451.73	979451.68	-1537396	14014364	621.026
14	2471	-0.08665	979450.96	979451.35	-84869	13929494	620.178
15	2556	-1.39278	979453.01	979451.99	-1364156	12565338	606.536
16	2527	5.74398	979448.79	979450.90	5625941	18191280	662.796
17	2504	1.61258	979450.89	979449.84	1579436	19770716	678.591
18	2676	0.95748	979445.93	979448.41	937797	20708513	687.970
19	2528	-6.69943	979447.74	979446.84	-6561731	14146783	622.353
20	2527	3.52925	979445.02	979446.38	3456711	17603494	656.920
21	2518	-1.98723	979446.44	979445.73	-1946379	15657115	637.457
22	2536	1.23225	979443.47	979444.96	1206921	16864036	649.527
23	2620	-5.29970	979445.17	979444.32	-5190761	11673275	597.619
24	2475	3.63538	979450.90	979448.04	3560661	15233936	633.226
NODAL 142	2540	4.02630	979440.70	979445.80	3943543	19177478	672.662

Surgen del ajuste anterior

Procedimiento (cont.)

Cálculo de alturas ortométricas – Paso 2

Punto Fijo	C [m2/s2]	g IGSN71 [mgal]	C _T [mgal]	g media [mgal]	H [m]
NODAL 143	480.876	979460.90	0.20	979463.08	49.096
1	480.751	979461.15	0.16	979463.31	49.083
2	459.000	979459.92	0.16	979461.98	46.863
3	399.367	979460.20	0.11	979461.98	40.774
4	436.882	979458.98	0.10	979460.92	44.604
5	478.176	979461.11	0.08	979463.22	48.820
6	529.558	979454.05	0.11	979456.39	54.066
7	632.194	979453.81	0.05	979456.57	64.545
8	639.515	979451.86	0.08	979454.66	65.293
9	621.163	979452.11	0.09	979454.84	63.419
10	654.335	979452.49	0.07	979455.35	66.806
11	659.629	979452.80	0.06	979455.68	67.347
12	636.399	979451.62	0.08	979454.41	64.975
13	621.026	979451.73	0.38	979454.60	63.405
14	620.178	979450.96	0.08	979453.68	63.319
15	606.536	979453.01	0.09	979455.68	61.926
16	662.796	979448.79	0.09	979451.70	67.670
17	678.591	979450.89	0.63	979454.14	69.283
18	687.970	979445.93	0.18	979449.00	70.240
19	622.353	979447.74	0.12	979450.49	63.541
20	656.920	979445.02	0.09	979447.90	67.070
21	637.457	979446.44	0.15	979449.27	65.083
22	649.527	979443.47	0.14	979446.35	66.316
23	597.619	979445.17	0.08	979447.79	61.016
24	633.226	979450.90	0.04	979453.66	64.651
NODAL 142	672.662	979440.70	0.34	979443.78	68.678

Alturas ortométricas

$$H = \frac{C}{g + 0.0424 H + \frac{C_T}{2}}$$

Proceso iterativo

Resultados

Diferencias sobre los nodales

$$H_{oficial} - H_{nuevo}$$



$$\delta \leq -0.7 \text{ m}$$



$$-0.7 \text{ m} < \delta \leq -0.4 \text{ m}$$



$$-0.4 \text{ m} < \delta \leq -0 \text{ m}$$



$$0 \text{ m} < \delta \leq 0.4 \text{ m}$$



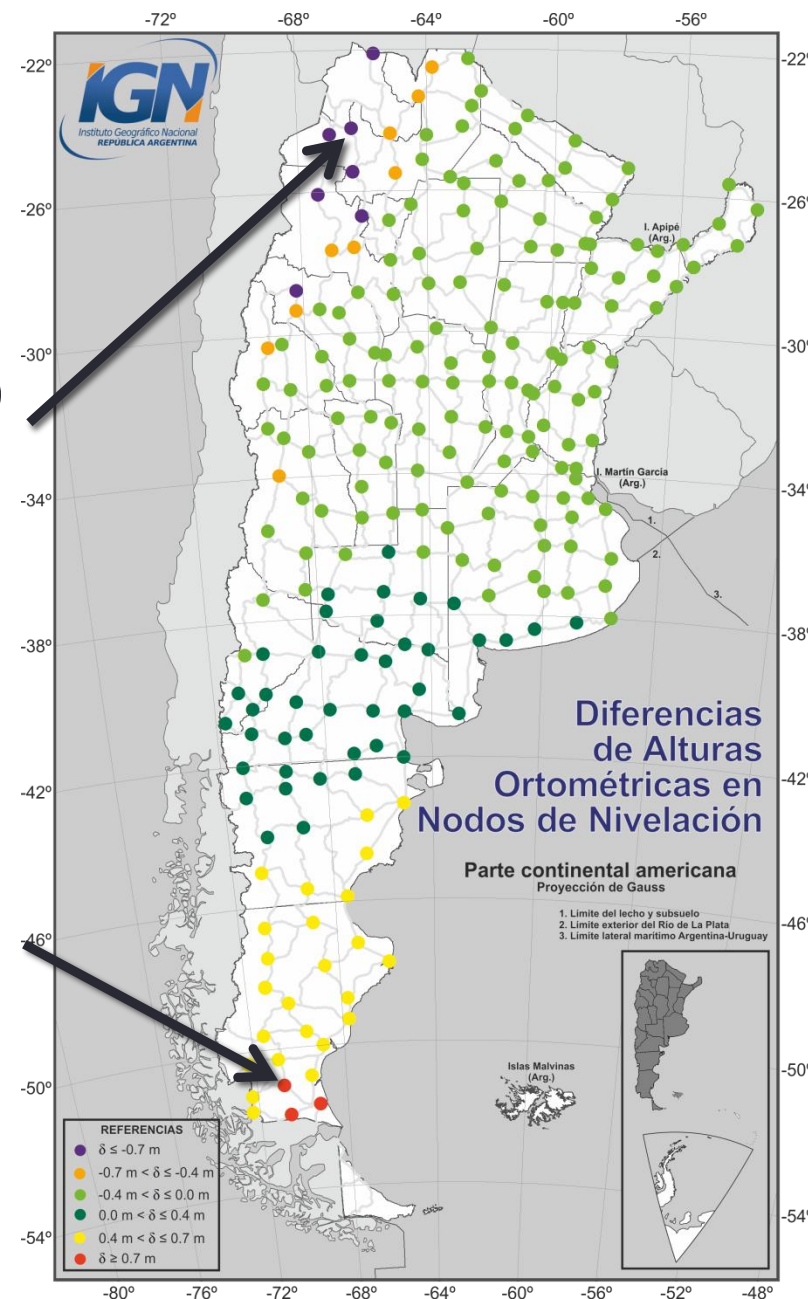
$$0.4 \text{ m} < \delta \leq 0.7 \text{ m}$$



$$\delta \geq 0.7 \text{ m}$$

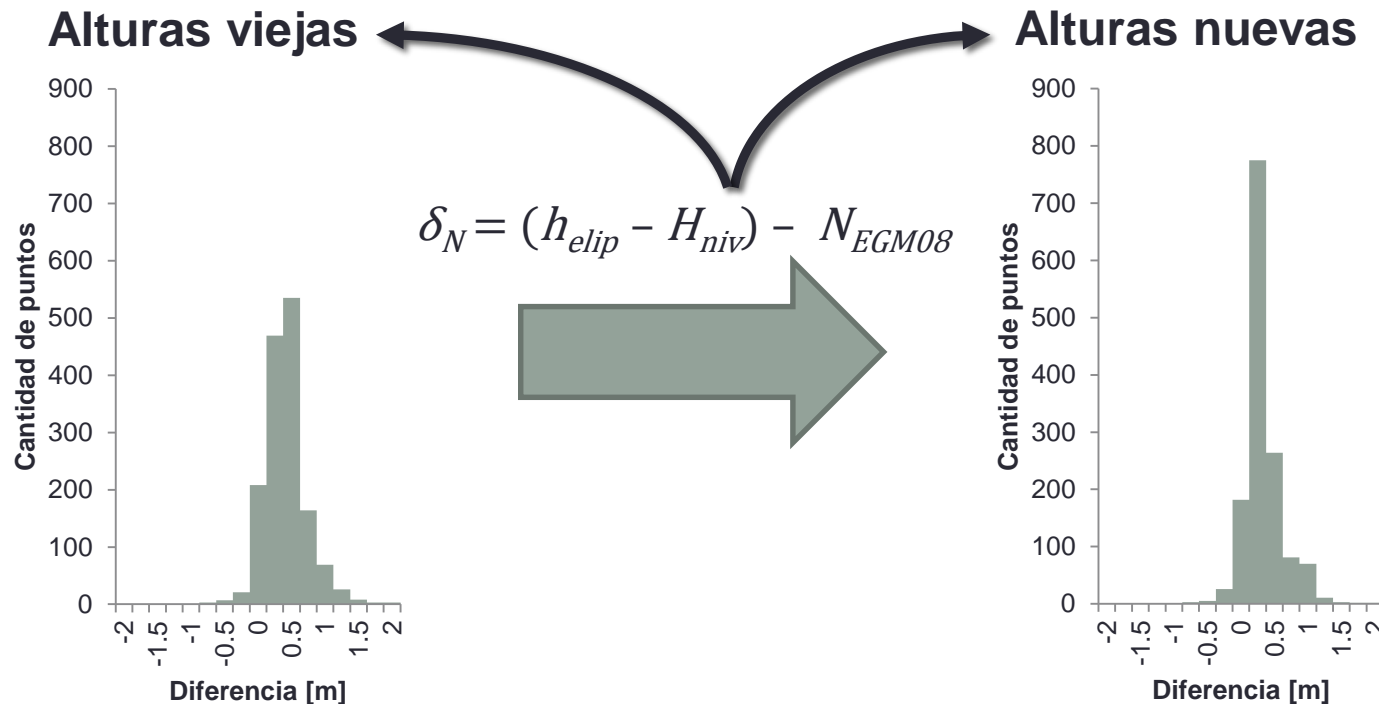
Nodal 220
- 2.258 m

Nodal 6
0.785 m



Resultados (cont.)

Diferencias respecto a EGM08 (aprox. 1500 puntos)



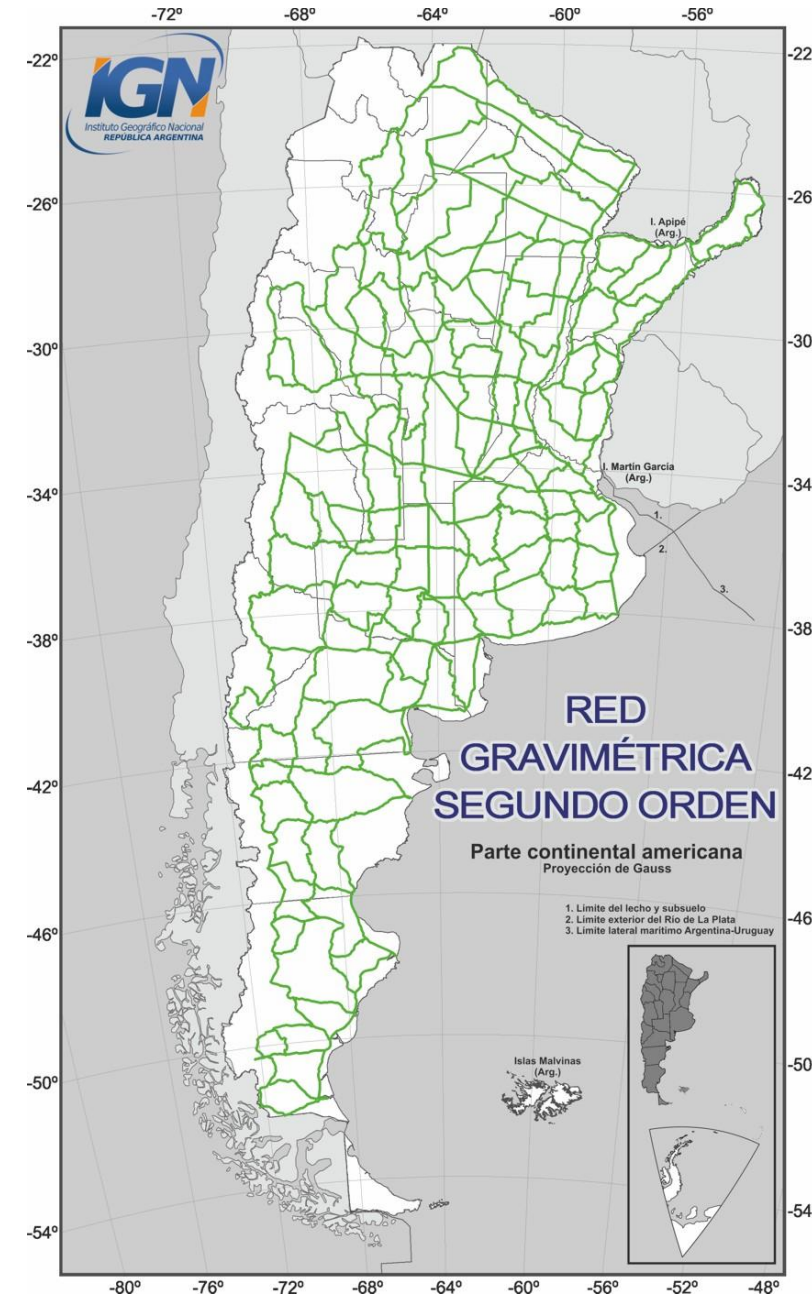
Min.	-0.932 m
Max.	4.153 m
Media	0.363 m
Desv. est.	0.522 m

Min.	-0.921 m
Max.	1.958 m
Media	0.216 m
Desv. est.	0.279 m

Resultados (cont.)

Nuevos valores de gravedad

- En 2012 se inició la medición de una nueva Red Gravimétrica de Primer Orden (RPO) que reemplazará a la antigua red BACARA (1969)
- En 2014 se midió una nueva Red de Gravedad Absoluta (RAGA)
- En 2014 se vinculó se vinculó la RPO a RAGA.
- En 2014 se inició el reproceso de la Red Gravimétrica de Segundo Orden (RSO)



Resultados (cont.)

**Nuevos valores de gravedad
Ej. línea 127 (San Antonio
Oeste hasta Valcheta, Río
negro)**

Gravedades [mgal]	
Min	-23.51
Max	-16.19
Media	-19.74

Alturas [m]	
Min	0.000
Max	0.001
Media	0.000

Punto Fijo	g vieja [mgal]	g nueva [mgal]	Diferencia [mgal]	H (g vieja) [m]	H (g nueva) [m]	Diferencia [m]
NODAL 53	980239.25	980216.17	-23.08	7.272	7.272	0.000
1	980229.30	980206.04	-23.26	9.273	9.273	0.000
2	980242.58	980219.13	-23.45	13.154	13.155	0.000
3	980223.80	980200.32	-23.48	33.045	33.046	0.000
4	980243.24	980219.73	-23.51	57.920	57.920	0.000
5	980223.40	980200.59	-22.81	63.854	63.854	0.000
6	980229.98	980207.88	-22.10	76.504	76.504	0.000
7	980225.50	980204.36	-21.14	84.841	84.841	0.000
8	980221.30	980200.64	-20.66	100.361	100.361	0.000
9	980213.10	980192.68	-20.42	143.979	143.979	0.000
10	980212.16	980191.98	-20.18	167.567	167.567	0.000
11	980215.99	980195.35	-20.64	152.731	152.730	0.000
12	980212.10	980191.49	-20.61	162.624	162.624	0.000
13	980214.41	980193.84	-20.58	159.362	159.362	0.000
14	980213.09	980192.66	-20.43	173.222	173.222	0.000
15	980209.60	980189.52	-20.08	171.685	171.685	0.000
16	980207.90	980187.99	-19.91	171.857	171.857	0.000
17	980207.60	980187.78	-19.82	168.333	168.333	0.000
18	980205.20	980185.42	-19.78	181.438	181.438	0.000
19	980206.51	980186.77	-19.74	184.136	184.136	0.000
20	980203.60	980184.16	-19.44	194.956	194.955	0.000
21	980200.50	980181.34	-19.16	205.115	205.114	0.000
22	980198.29	980179.42	-18.88	215.125	215.124	0.000
23	980195.70	980176.77	-18.93	220.422	220.421	0.000
24	980196.10	980177.15	-18.95	211.458	211.458	0.000
25	980199.13	980180.15	-18.98	186.280	186.280	0.000
26	980200.05	980180.94	-19.11	186.208	186.208	0.000
27	980187.90	980170.11	-17.79	172.419	172.419	0.001
28	980187.18	980169.46	-17.72	166.646	166.646	0.001
29	980180.28	980163.27	-17.01	180.234	180.233	0.001
30	980178.10	980161.34	-16.76	199.865	199.865	0.001
31	980179.61	980162.67	-16.94	194.921	194.921	0.001
32	980184.00	980166.70	-17.30	181.917	181.917	0.001
33	980186.39	980168.72	-17.67	179.380	179.379	0.001
34	980182.94	980165.65	-17.29	180.722	180.721	0.001
35	980176.33	980159.74	-16.59	180.108	180.107	0.001
NODAL 54	980172.81	980156.62	-16.19	177.262	177.261	0.001

Conclusiones

- Resultados muy positivos
 - Gran coherencia con el modelo geopotencial EGM08
- Etapa de validación
 - Es importante controlar como inciden las nuevas gravedades determinadas en el valor de las alturas ortométricas.
- Trabajos a futuro:
 - Ajustar las redes de ordenes inferiores (Precisión y Topográfica)
 - Definir W_0 .
 - Medir gravedad sobre algunas líneas que carecen de esta información.

Muchas gracias por su atención

