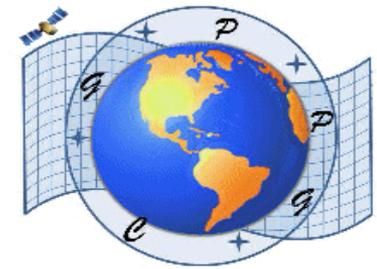




UFPR

Universidade  
Federal do Paraná



## SIMPOSIO SIRGAS 2017

### VÍNCULO DEL *DATUM* VERTICAL ECUATORIANO AL *INTERNATIONAL HEIGHT REFERENCE SYSTEM*



José Luis Carrión Sánchez, MSc.

Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas



POLITECNICO  
MILANO 1863

Prof. Dr. Riccardo Barzaghi

Mendoza, 28 de noviembre de 2017

## CONTENIDOS

I. Introducción

II. Área de estudio y fuentes de datos

III. Métodos

IV. Análisis de resultados

V. Conclusiones y recomendaciones



**Objetivo:** Estimar en términos de geopotencial la discrepancia existente entre la realización original del DVE y la referencia global establecida para el IHRS ( $W_0=62\ 636\ 853.4\ \text{m}^2\text{s}^{-2}$ ).

$$\Delta g_P = g_P - \gamma_Q \quad \delta g_P = g_P - \gamma_P$$

Solución libre y solución fija del PVCG

$$U_P = U_0 + \frac{\partial U_0}{\partial h} h_P$$

$\gamma_0 \leftarrow$

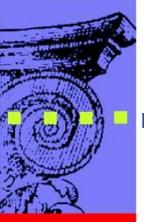
$$W_P = U_P + T_P$$

$$C_{Pi} = W_{0i} - W_P = \sum_0^P g \Delta n$$

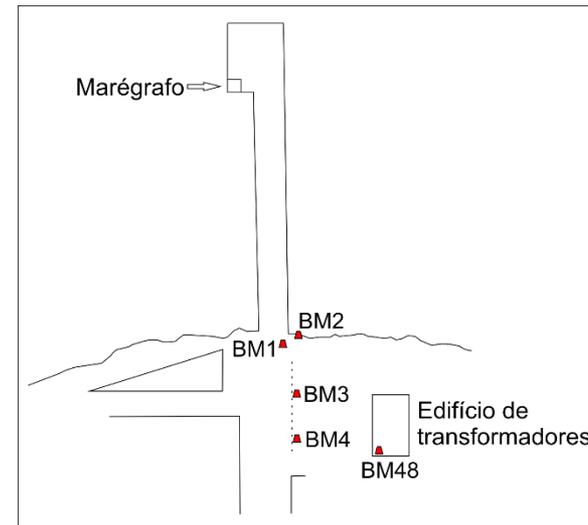
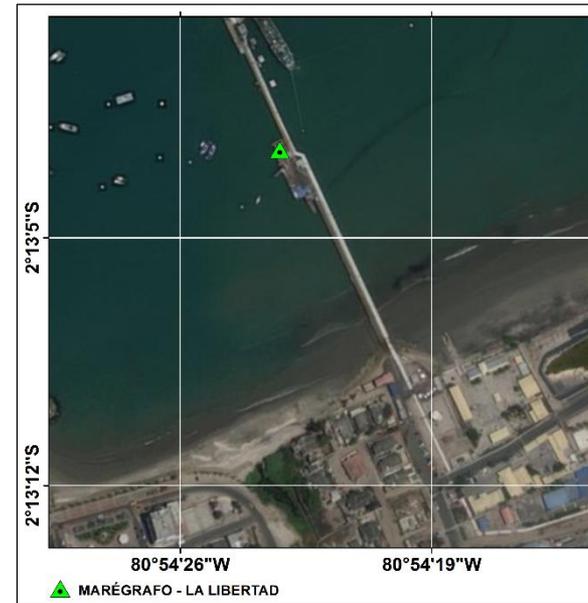
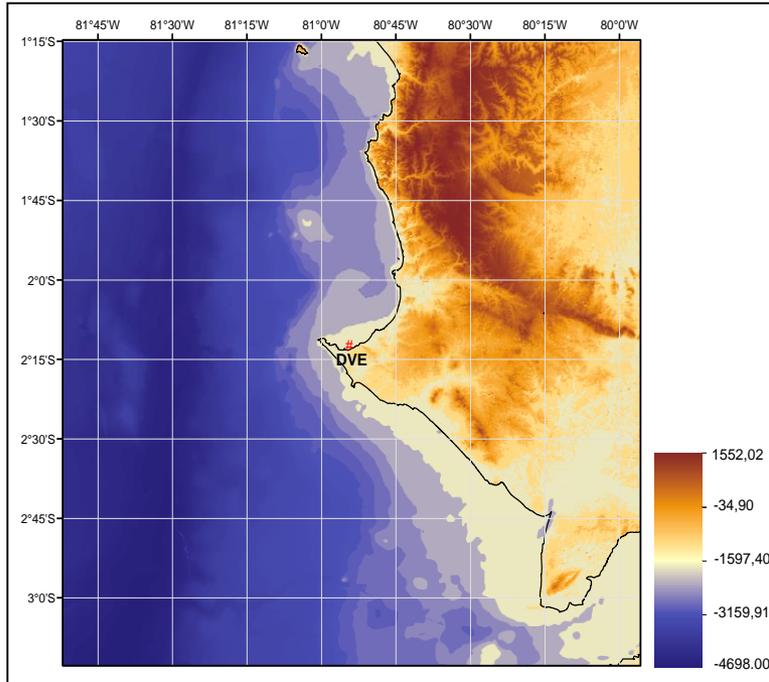
$$C_P - C_{Pi} = W_0 - W_{0i} = \delta W_i \cong [W_0 - (U_P + T_P)] - \sum g_{mj} \Delta n_j$$

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

### DATUM VERTICAL ECUATORIANO



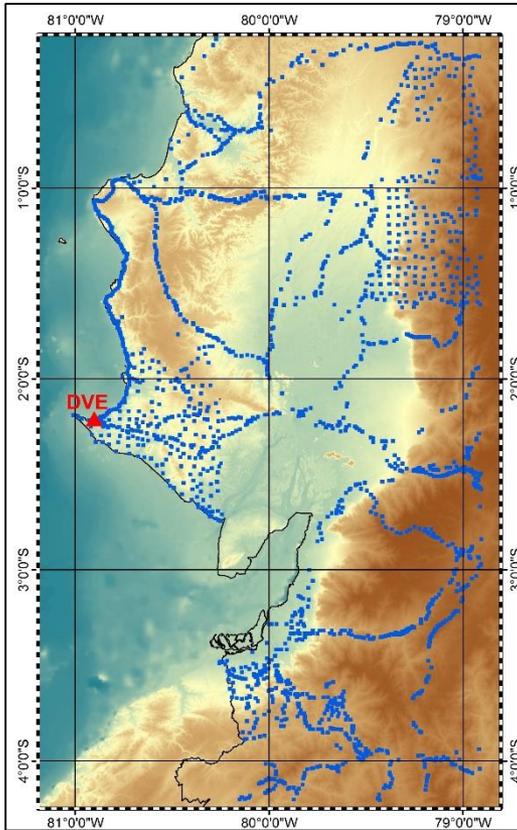
UFPR  
Universidade  
Federal do Paraná



<b>Latitud (°)</b>	- 2°13'10.1178"
<b>Longitud (°)</b>	-80°54'19.4667"
<b>h (m)</b>	18.112

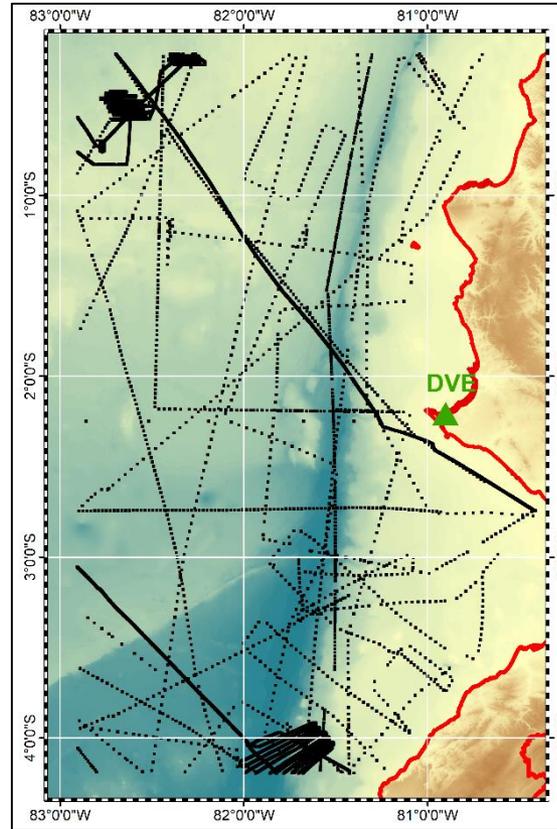
FUENTE: *Los autores*, adaptado de Paredes (1986)

### Gravimetría terrestre



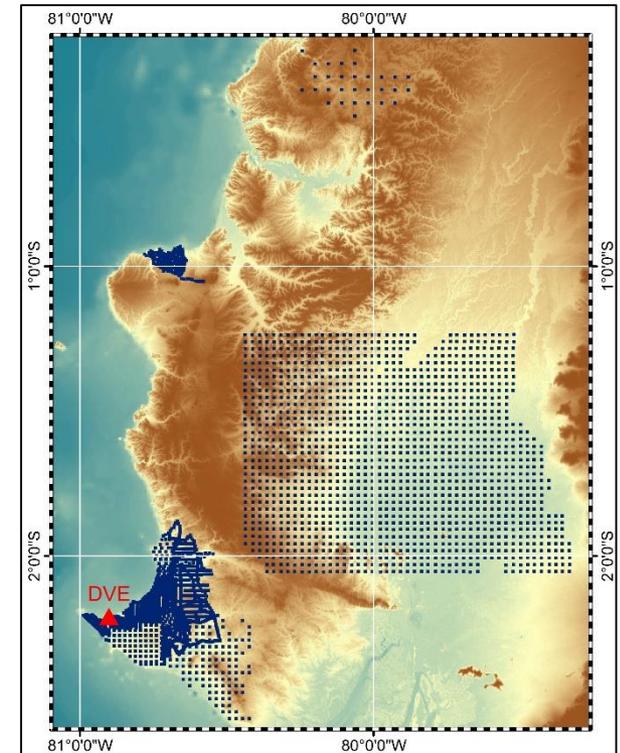
1986 registros (Etapa I)  
4808 registros (Etapa II)  
Proveedor: IGM-EC  
Sistema gravimétrico: IGSN71

### Gravimetría oceánica



8549 registros (Etapa I e II)  
Proveedor: BGI  
Sistema gravimétrico: IGSN71

### Aerogravimetría



3443 registros (Etapa II)  
Proveedor: SGGSA  
Sistema gravimétrico: IGSN71

### INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA:

DTU15 → Región Oceánica  
WGM2012 → Región Continental

Gravedad observada



$\Delta g$  (de superficie o de Molodensky)

Remove



$\Delta g_{RES}$



Solución libre del P.V.C.G

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_1 + \zeta_2 + \dots$$

$$T_0 = \zeta_0 \gamma = \frac{R}{r\pi} \int_{\sigma} Z_0 S(\Psi) d\sigma \quad T_1 = \zeta_1 \gamma = \frac{R}{r\pi} \int_{\sigma} Z_1 S(\Psi) d\sigma$$

$$Z_0 = \Delta g_M$$

$$Z_1 = \frac{R^2}{2\pi} \int_{\sigma} \frac{h - h_P}{l^3} [\Delta g_M + \frac{3\bar{g}}{2R} \zeta_0] d\sigma$$

$$\zeta = \frac{GM}{r\gamma} \left[ \sum_{n=2}^{n_{max}} \left[ \frac{a}{r} \right]^n \sum_{m=0}^n \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \cos m\lambda \sin n\lambda \right] \bar{P}_{nm}(\sin\varphi)$$

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



$$Bias = W_0 - W_P$$



$$W_P = T_P + U_P$$

$$U_P = U_0 + \frac{\partial U_0}{\partial h} h_P$$

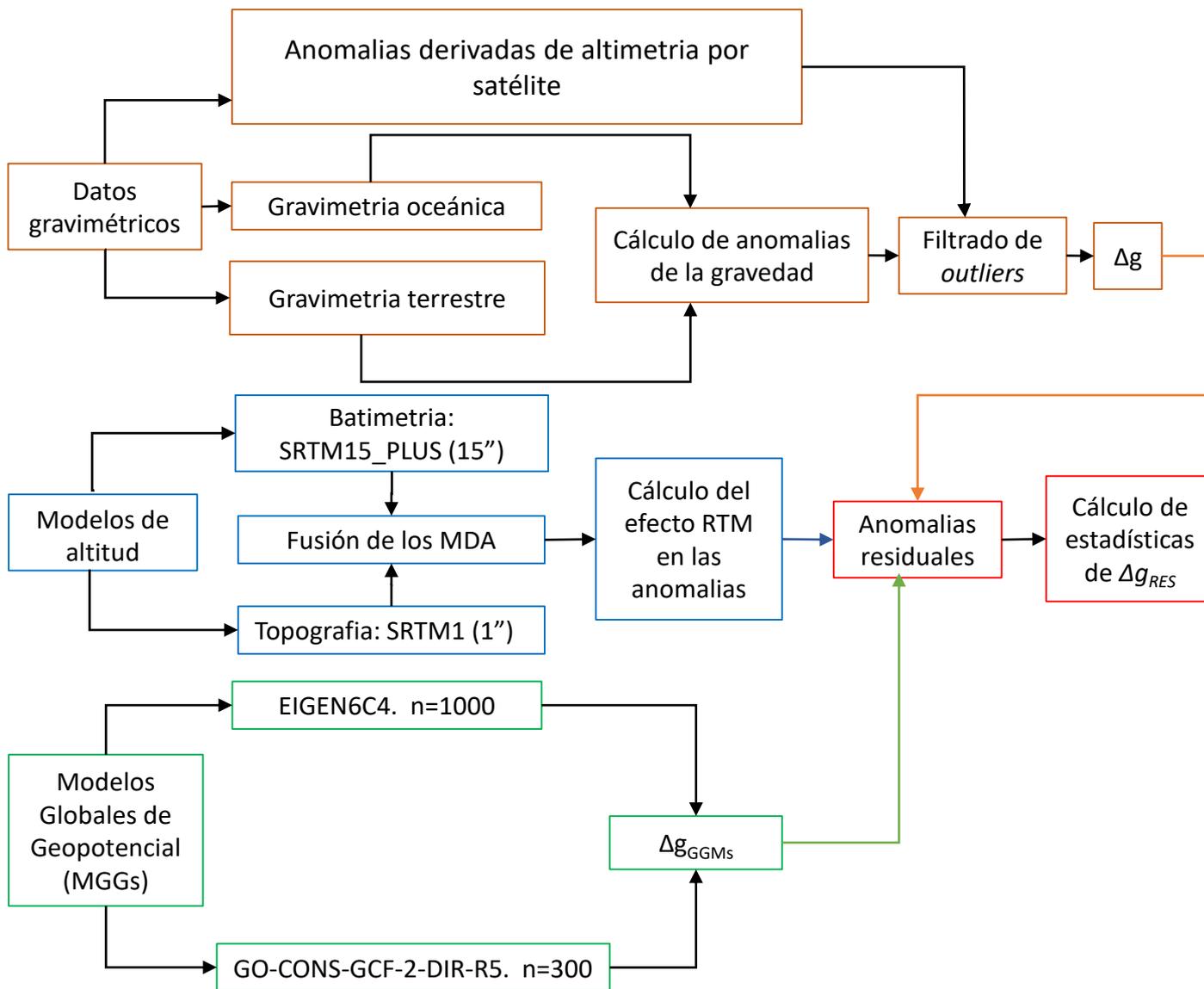
$$T_P = \frac{\zeta_P}{\gamma_0}$$

Restaurar

$$\zeta^P = \zeta_{RES} + \zeta_{MGG} + \zeta_{RTM}$$

$$\zeta_{prism} = \frac{V_{RTM}}{\gamma_Q} \quad ; \quad \zeta_{RTM} = \sum_{i=1}^k \zeta_{prism\ i}$$

# Modelamiento del DVE en el espacio del geopotencial: Solución Libre



## Modelamiento del DVE en el espacio del geopotencial: Solución Libre

Cálculo de anomalías de la gravedad  
para observaciones gravimétricas

$$\Delta g_{Molodensky} = g + (-0.3086 * Hn) - \gamma + \delta g_{atm} + \Delta g_H \quad Hn^* \approx h - N_{EGM2008}$$

Para puntos sin altitud nivelada

$$\Delta g_H = 0.0371(1 - 3\text{sen}^2\varphi) \rightarrow \text{Término de Honkasalo}$$

$$\delta g_{atm} = 0.874 - 9.9 * 10^{-5}h + 3.56 * 10^{-5}h^2 \rightarrow \text{Corrección atmosférica}$$

**h e N:** Transformación *tide free*  $\rightarrow$  *mean tide*

**Observaciones gravimétricas**

Sistema de marea permanente: *mean tide*

Sistema gravimétrico: *IGSN71*

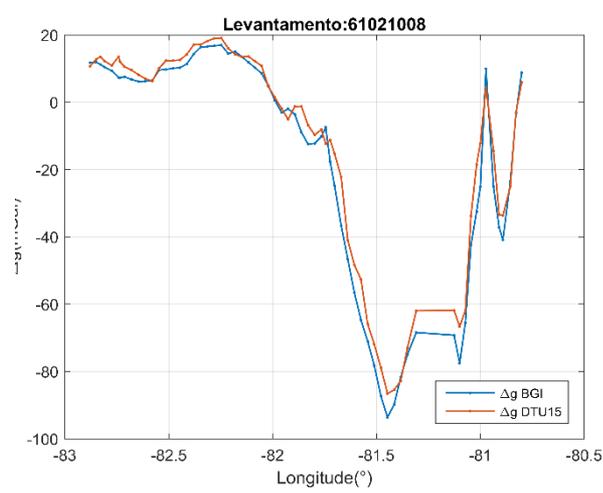
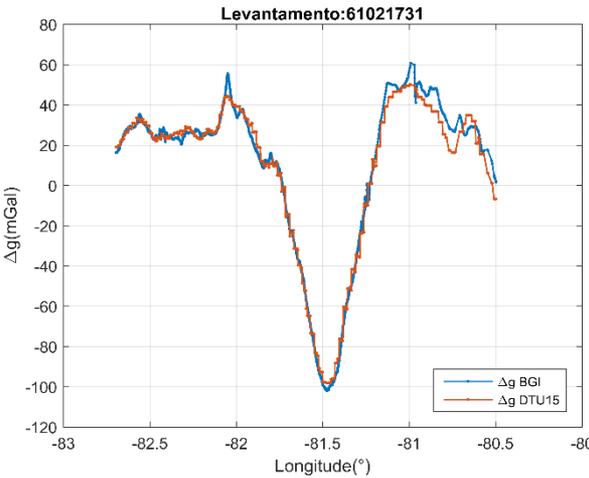
Filtrado de outliers

Base de datos oceánicos del BGI

Transformación  $\Delta g_{BGI}: GRS67 \rightarrow GRS80$

$$\Delta g_{GRS80} = \Delta g_{GRS67} + \gamma_{GRS67} - \gamma_{GRS80}$$

$$\Delta g_{res} = \Delta g_{BGI} - \Delta g_{DTU15}$$



	$\Delta g_{res}$ antes	$\Delta g_{res}$ después
$\sigma$ (mGal)	7.37	4.40
Coef. Correlación	0.9888	0.9962

66.91 % outliers

Conjunto total

$$\Delta g_{res} = \Delta g_{OBS} - \Delta g_{EGM 2008}$$

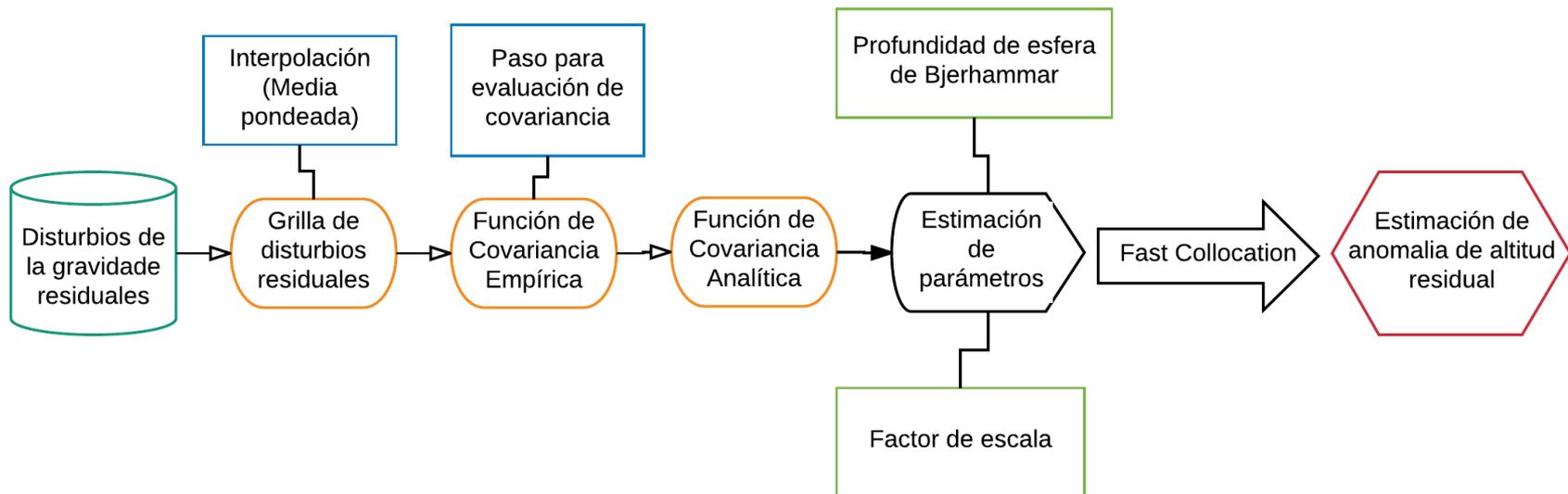
	$\Delta g_{res}$ antes	$\Delta g_{res}$ después
$\sigma$ (mGal)	16.74	11.71
Coef. Correlación	0.9640	0.9820

5.53 % outliers



# Modelamiento del DVE en el espacio del geopotencial: Solución Libre

## ESTIMACIÓN DE LA ANOMALIA DE ALTITUD RESIDUAL



$$\zeta = \zeta_{RES} + \zeta_{GGM} + \zeta_{RTM}$$

$$T_P = \frac{\zeta_P}{\gamma_0}$$

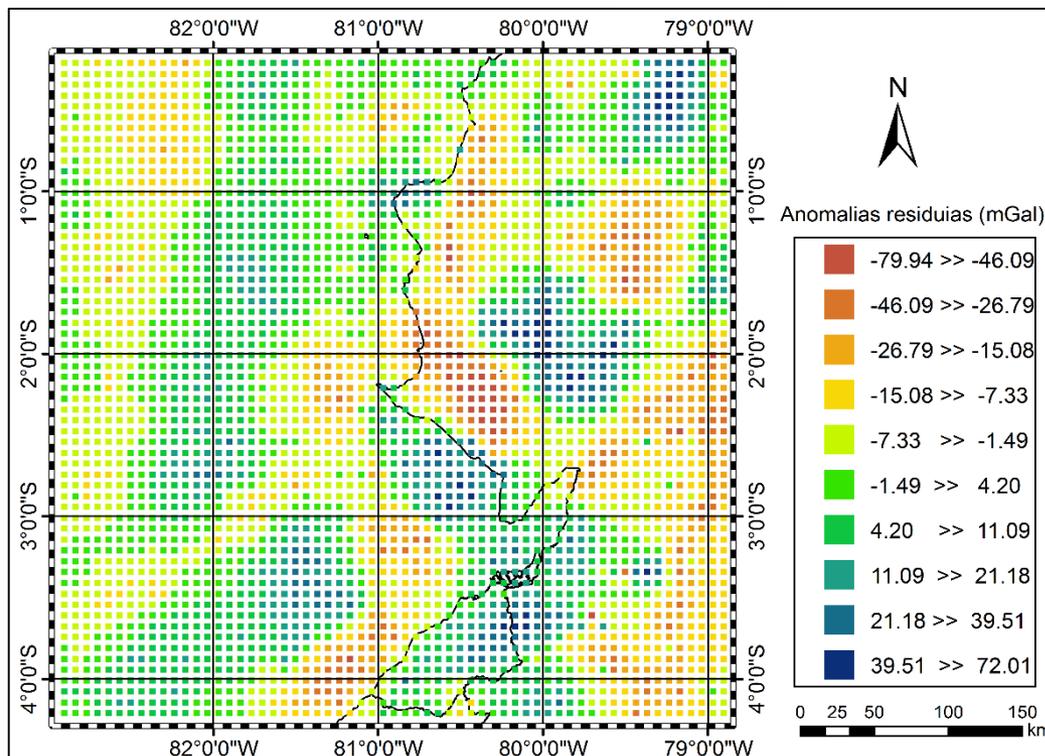


# Modelamiento del DVE en el espacio del geopotencial: Solución Libre

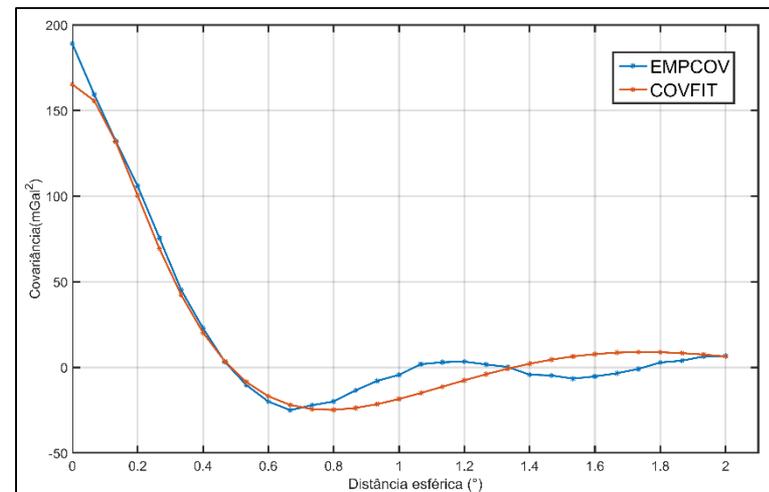
Grilla de anomalias de gravedad residuales

**Interpolación:** Media ponderada  
**GEOGRID (GRAVSOFT)**  
**Espaciamiento:** 4 min arc

GOCO DIR R5 ( $n_{max}=300$ )



## Funciones de covariancia COVFIT, EMPCOV (GRAVSOFT)



# Modelamiento del DVE en el espacio del geopotencial: Solución Libre

BIAS EN EL DVE  
Solución Libre

$$\beta H_0 = \frac{W_P - W_0}{\gamma_0}$$

$$\zeta_P = \zeta_{MGG} + \zeta_{RTM} + \boxed{\zeta_{CMQ}}$$

Residual



Universidade  
Federal do Paraná

		GO_CO_DIR_R5 n=300	EIGEN6C4 n=1000	GO_CO_DIR_R5 n=200	EIGEN6C4 n=200				
	$W_0$ (IAG)	62636853.400							
	$U_0$ (GRS80)	62636860.850							
Con $\zeta_0$	$T_P$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	106.1527	104.7584	106.6032	106.6275	Media (m)	$\sigma$ (m)		
	$W_P$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	62636850.5043	62636849.1101	62636850.9548	62636850.9792				
	$U_P$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	62636745.3195	62636745.3195	62636745.3195	62636745.3195				
	$\zeta_P$ (m)	10.8873	10.7443	10.9335	10.9360				
	$\beta H_0$ (m)	0.2873	0.4303	0.2411	0.2386			0.2557	0.0274
	$dW$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	2.8014	4.1956	2.3509	2.3265				
Sin $\zeta_0$	$T_P$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	115.2964	113.9021	115.7468	115.7702				
	$W_P$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	62636859.6480	62636858.2538	62636860.0985	62636860.1219				
	$U_P$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	62636745.0293	62636745.0293	62636745.3195	62636745.3195				
	$\zeta_P$ (m)	11.8251	11.6821	11.8713	11.8737				
	$\beta H_0$ (m)	-0.6505	-0.5075	-0.6967	-0.6991	-0.6821	0.0274		
	$dW$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	-6.3423	-4.9481	-6.7928	-6.8161				

Gravedad observada

$\delta g$

Remove

$\delta g_{RES}$

Solución fija del PVCG

$$\zeta_{RES} = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_s (\delta g_{RES} + \mu_1 + \dots) H(\psi) ds$$

$$\mu_1 = \frac{R^2}{2\pi} \iint_{\sigma} \frac{h - h_p}{1_0^3} \delta g_{res} d\sigma$$

$$\lambda_0 = 2R \sin\left(\frac{\psi}{2}\right)$$

$\zeta^P = \zeta_{RES} + \zeta_{MGG} + \zeta_{RTM}$

Restaurar

$$\zeta = \frac{GM}{r\gamma} \left[ \sum_{n=2}^{n_{max}} \left[ \frac{a}{r} \right]^n \sum_{m=0}^n \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \cos m\lambda \sin m\lambda \right] \bar{P}_{nm}(\sin\phi)$$

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

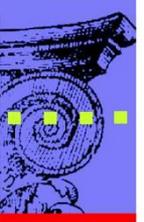
$$Bias = W_0 - W_P$$

$$W_P = T_P + U_P$$

$$U_P = U_0 + \frac{\partial U_0}{\partial h} h_P$$

$$T_P = \frac{\zeta_P}{\gamma_0}$$

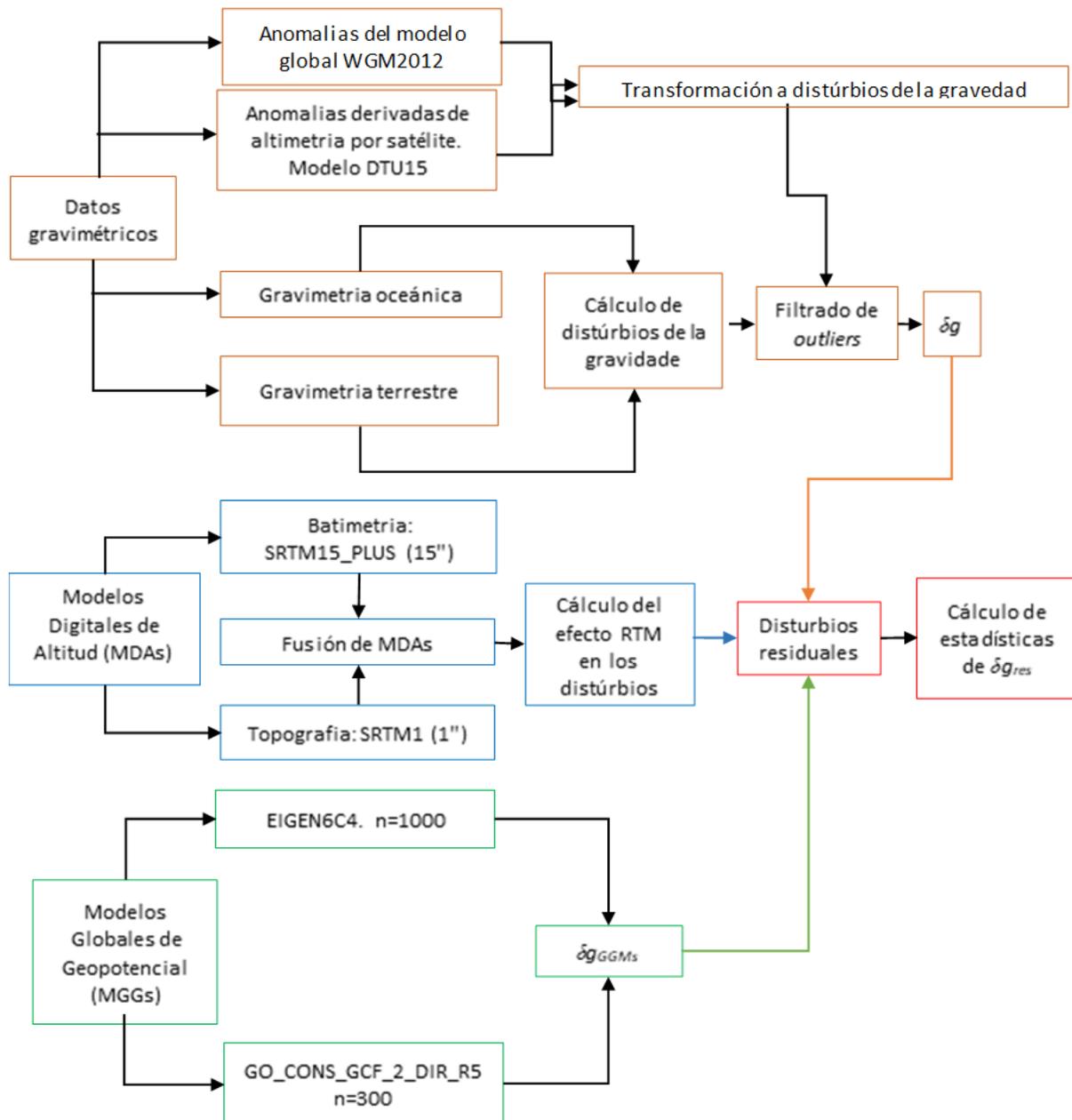
$$\zeta_{prism} = \frac{V_{RTM}}{\gamma_0} \quad ; \quad \zeta_{RTM} = \sum_{i=1}^k \zeta_{prism\ i}$$



UFPR

Universidade  
Federal do Paraná

# Modelamiento del DVE en el espacio del geopotencial: Solución Fija



## Modelamiento del DVE en el espacio del geopotencial: Solución Fija

### Cálculo de disturbios de la gravedad

$$\delta g = g + \Delta g_H - (\gamma - \delta g_{atm} + \delta g_h)$$

### Observaciones gravimétricas

**Sistema de marea permanente:** *mean tide*

**Sistema gravimétrico:** *IGSN71*

**h e N:** Transformación *tide free* → *mean tide*

$$\Delta g_H = 0.0371(1 - 3\text{sen}^2\varphi) \rightarrow \text{Término de Honkasalo}$$

$$\delta g_{atm} = 0.874 - 9.9 * 10^{-5}h + 3.56 * 10^{-5}h^2 \rightarrow \text{Corrección atmosférica}$$

$$\delta g_h \rightarrow \text{Reducción a la gravedad normal a la SF}$$

### Disturbios de la gravedad provenientes del DTU15 y del WGM2012

$$\delta g = \Delta g_{MODELO} - \delta g_h \quad \text{Transformación de anomalías a disturbios}$$

$$\delta g_h = -(0.3087691 - 0.0004398\text{sen}^2\varphi)h + 7.2125 * 10^{-8}h^2 \quad (GRS80)$$

Reducción de la gravedad teórica según la altitud  $h$

Gravedad teórica del teluroide hasta la SF →  $h$ :  $\zeta$  (EIGEN6C4,  $n=2190$ )

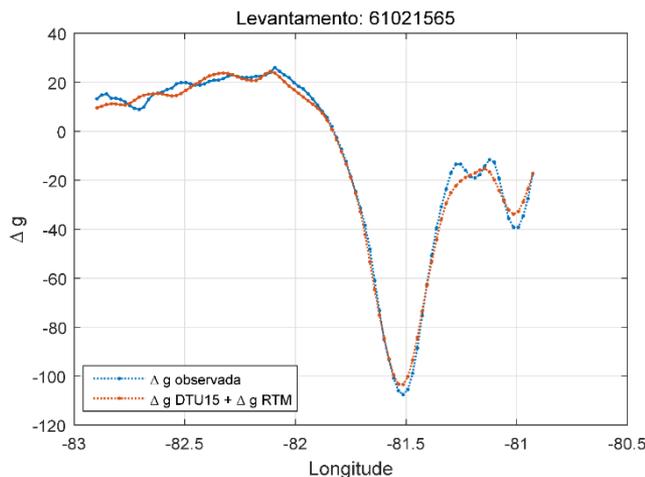
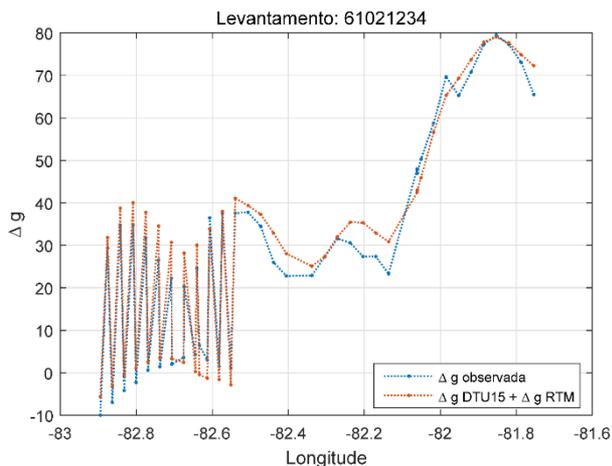
# Modelamiento del DVE en el espacio del geopotencial: Solución Fija

## Eliminación de outliers: base de datos del BGI

UFPR

Universidade Federal do Paraná

$$\delta g_{res} = \delta g_{obs} - \delta g_{DTU15} - \delta g_{RTM} = \delta g_{obs} - \delta g_{modelo}$$



Estadísticas $\Delta g_{res}$ BGI	Antes	Después
$\sigma$ (mGal)	7.02	3.82
Coef. correlación	0.9898	0.9968

66.91% % outliers

## Eliminación de outliers: Conjunto total

$$\delta g_{res} = \delta g_{obs} - \delta g_{EIGEN6C4} - \delta g_{RTM}$$

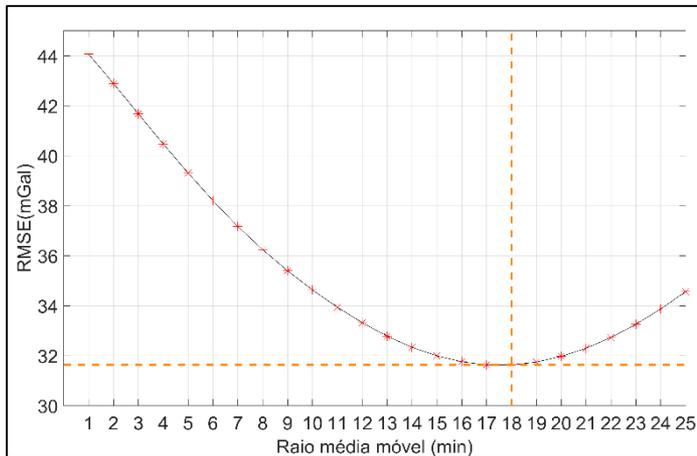
		$\delta g_{res}$ Antes	$\delta g_{res}$ después	% eliminado
$\sigma$ (mGal)	4°x4°	15.77	13.50	
	3°x3°	11.59	10.45	
	2°x2°	10.48	10.08	
Coef. Correlación	4°x4°	0.9729	0.9799	1.03
	3°x3°	0.9849	0.9877	0.71
	2°x2°	0.9886	0.9895	0.53

Distúrbios residuales de la gravedad

$$\delta g_{RES} = \delta g_{obs} - \delta g_{GGM} - \delta g_{RTM}$$

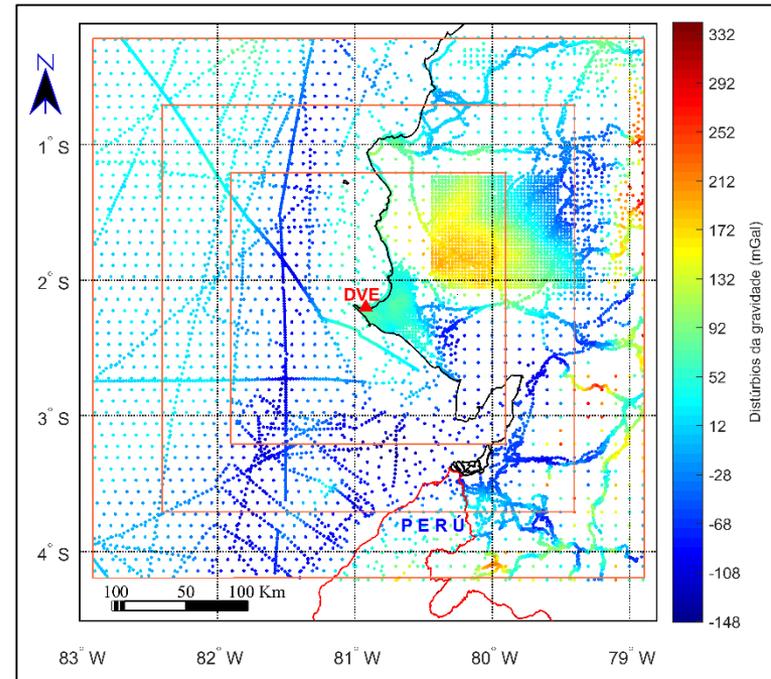
Solución RTM

GOCO\_DIR\_R5 (nmax=300)



$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta g_{RES}^i)^2}$$

$$\delta g - \delta g_{GO\_CONS\_GCF\_2\_DIR\_R5(nmax=300)} - \delta g_{RTM}$$



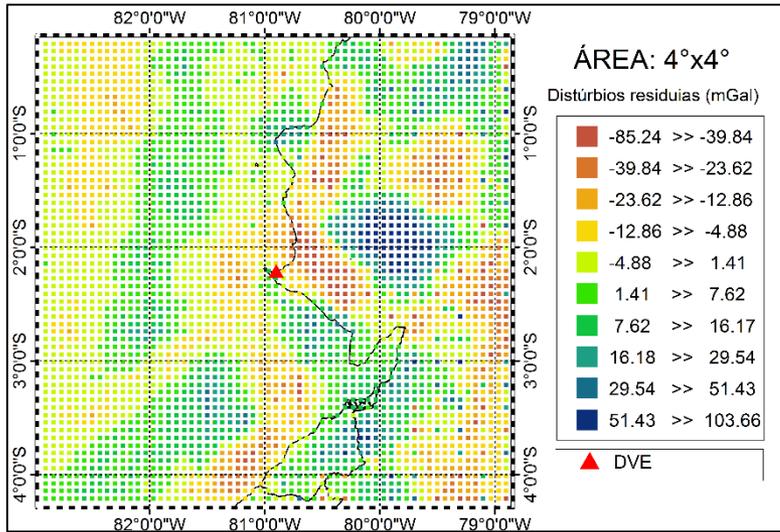
		GO_CO_DIR_R5 nmax=300	GO_CO_DIR_R5 nmax=200
RMSE (mGal)	4°x4°	31.96	35.69
	3°x3°	34.31	37.12
	2°x2°	34.88	39.53
Raio óptimo para media móvil (arc-min)		18	21

# Interpolación: Media ponderada III. MÉTODOS

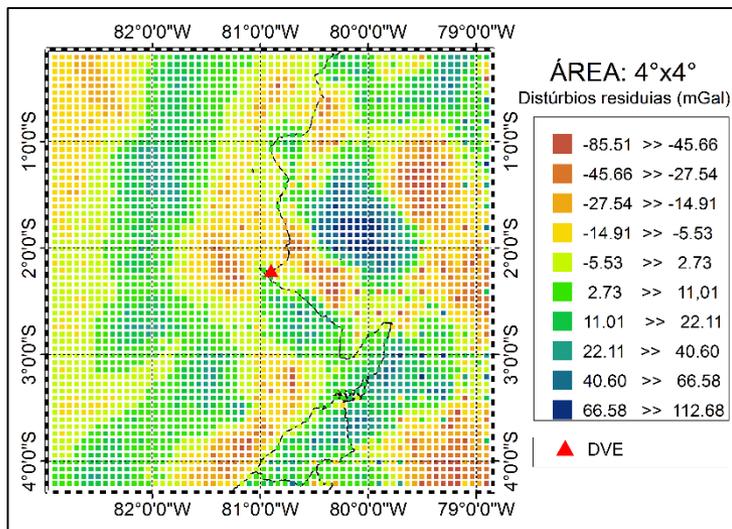
## GEOGRID (GRAVSOFT)

### Espaciamiento: 4 min arc

Grilla  $\delta g_{RES}$  GOCO\_DIR\_R5 ( $n_{max}=300$ )

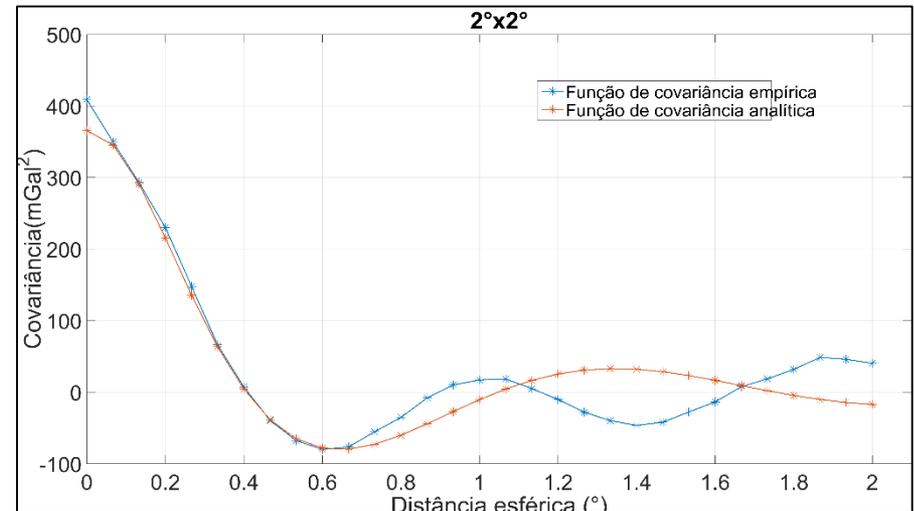
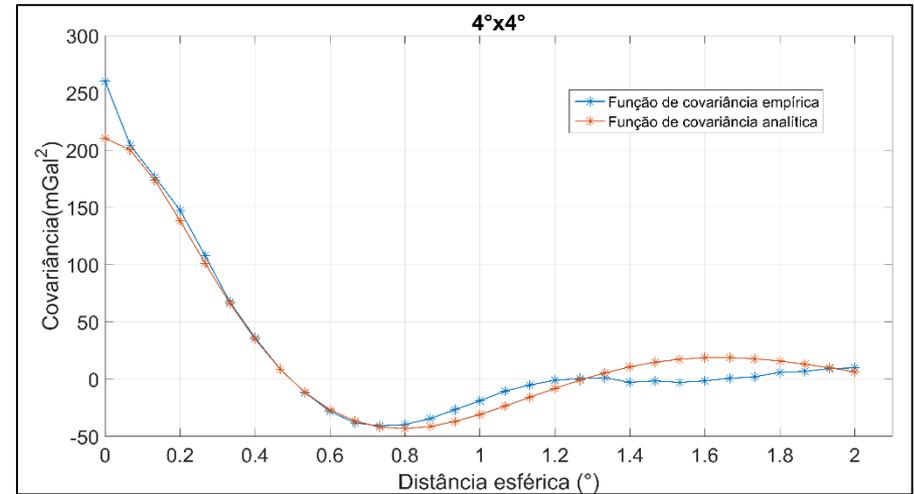


Grilla  $\delta g_{RES}$  GOCO\_DIR\_R5 ( $n_{max}=200$ )



## Funciones de covariancia

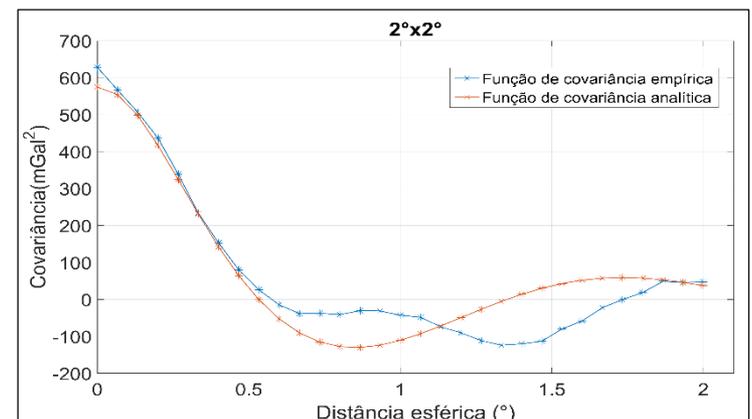
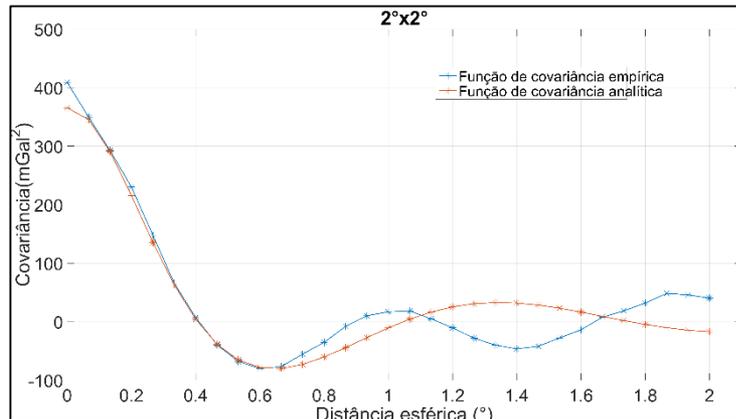
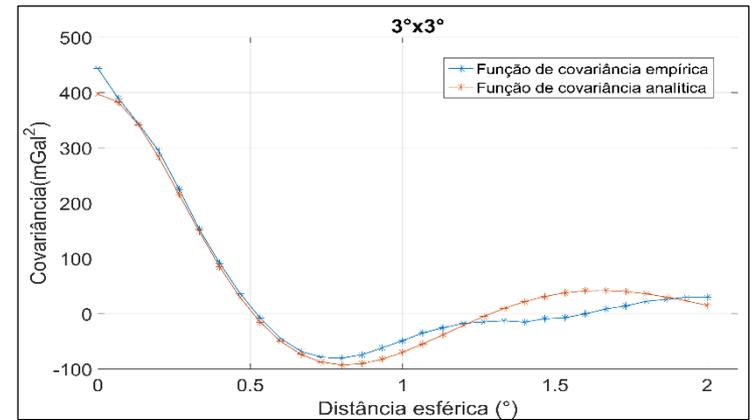
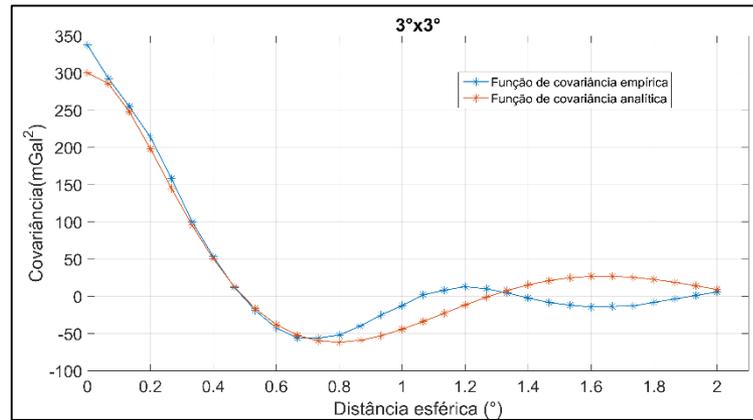
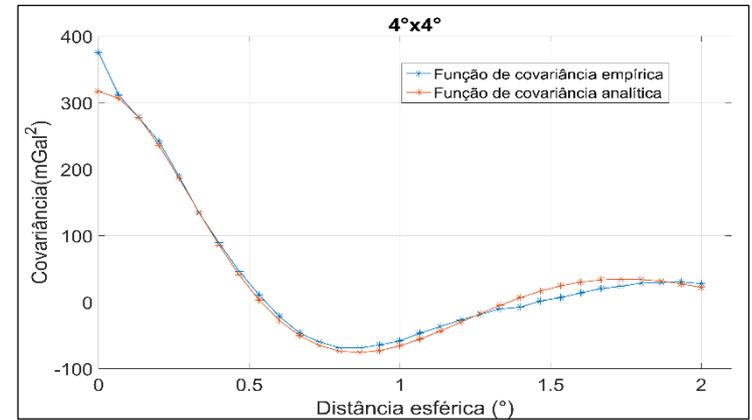
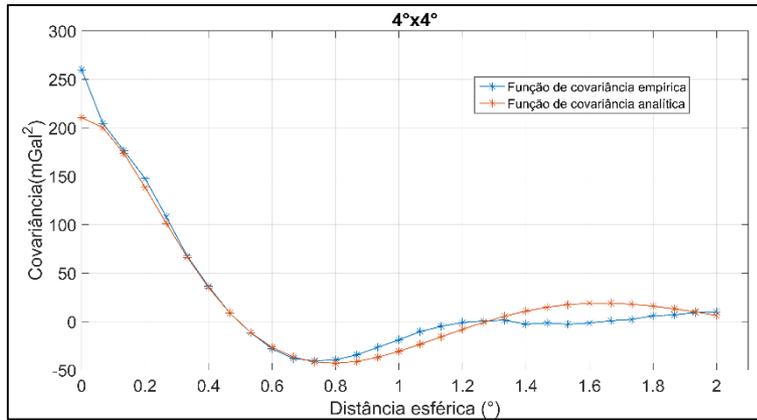
### COVFIT, EMPCOV (GRAVSOFT)



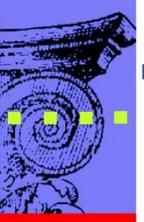
GOCO\_DIR\_R5 ( $n_{max}=300$ )

# Funções de covariância

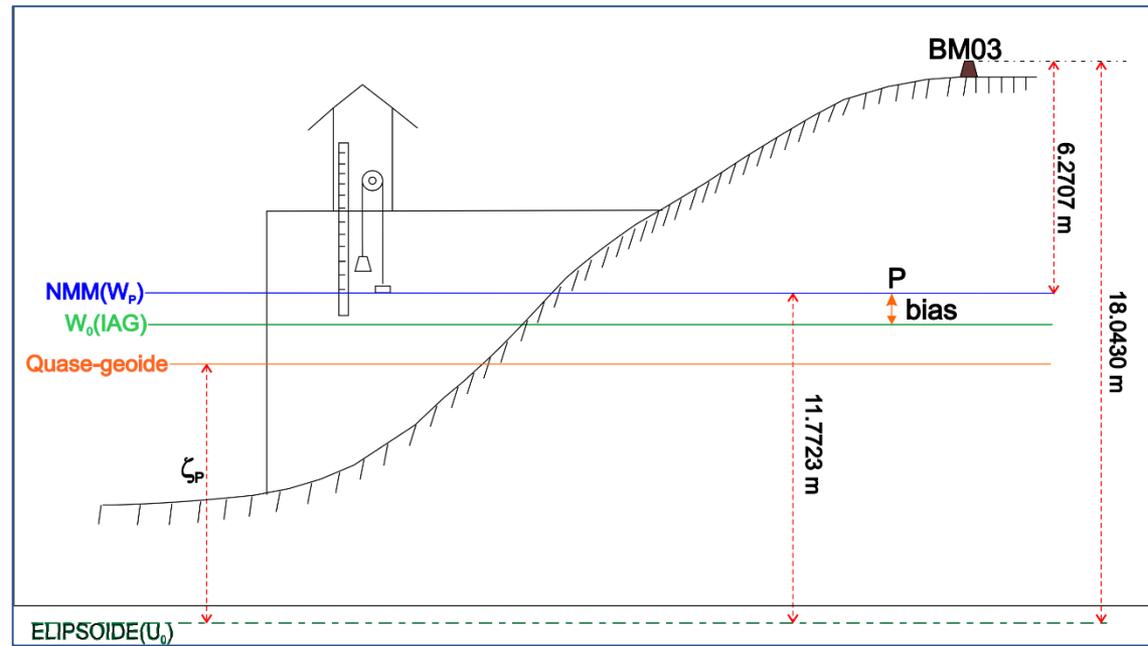
GOCO\_DIR\_R5 ( $n_{max}=200$ )



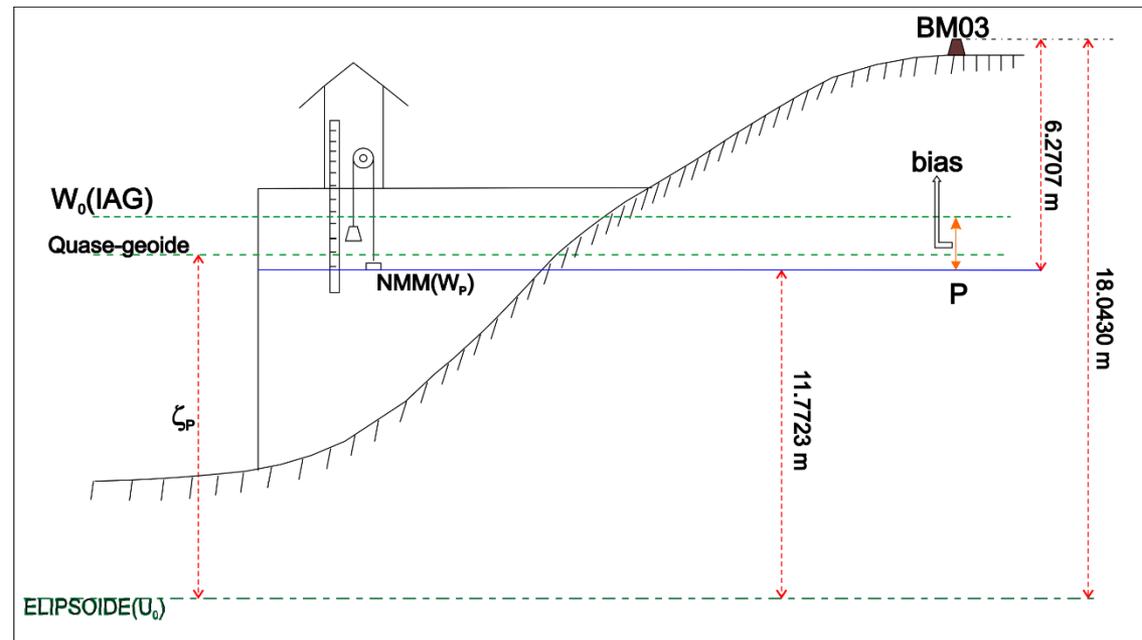
Bias Solución Fija		nmax=300			nmax=200				
		4°x4°	3°x3°	2°x2°	4°x4°	3°x3°	2°x2°		
Con $\zeta_0$	$T_p$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	105.9928	105.7978	106.6851	105.9002	106.1537	108.6692	Media (m)	$\sigma$ (m)
	$W_p$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	62636850.3444	62636850.1494	62636851.0367	62636850.2518	62636850.5053	62636853.0208		
	$U_p$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	62636745.3195			62636745.3195				
	$\zeta_p$	10.8709	10.8509	10.9419	10.8614	10.8874	11.1454		
	dH <sub>0</sub> (m)	0.3037	0.3237	0.2371	0.3132	0.2872	0.0292	0.3069	0.0155
	dW (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	2.9613	3.1563	2.2690	3.0539	2.8004	0.2848		
Sin $\zeta_0$	$T_p$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	115.1365	114.9415	115.8287	115.0439	115.2974	117.8129		
	$W_p$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	62636859.1980	62636859.2931	62636860.1804	62636859.3955	62636859.6490	62636862.1645		
	$U_p$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	62636745.3195			62636745.3195				
	$\zeta_p$	11.8087	11.7887	11.8797	11.7992	11.8252	12.0900		
	dH <sub>0</sub> (m)	-0.6341	-0.6141	-0.7051	-0.6246	-0.6506	-0.9086		
	dW (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	-6.1824	-5.9874	-6.4151	-6.0897	-6.3433	-8.8588		
$W_0$ (IAG) (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	62636853.400			62636853.400					
$U_0$ (GRS80) (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	62636860.850			62636860.850					



Término de grado cero considerado



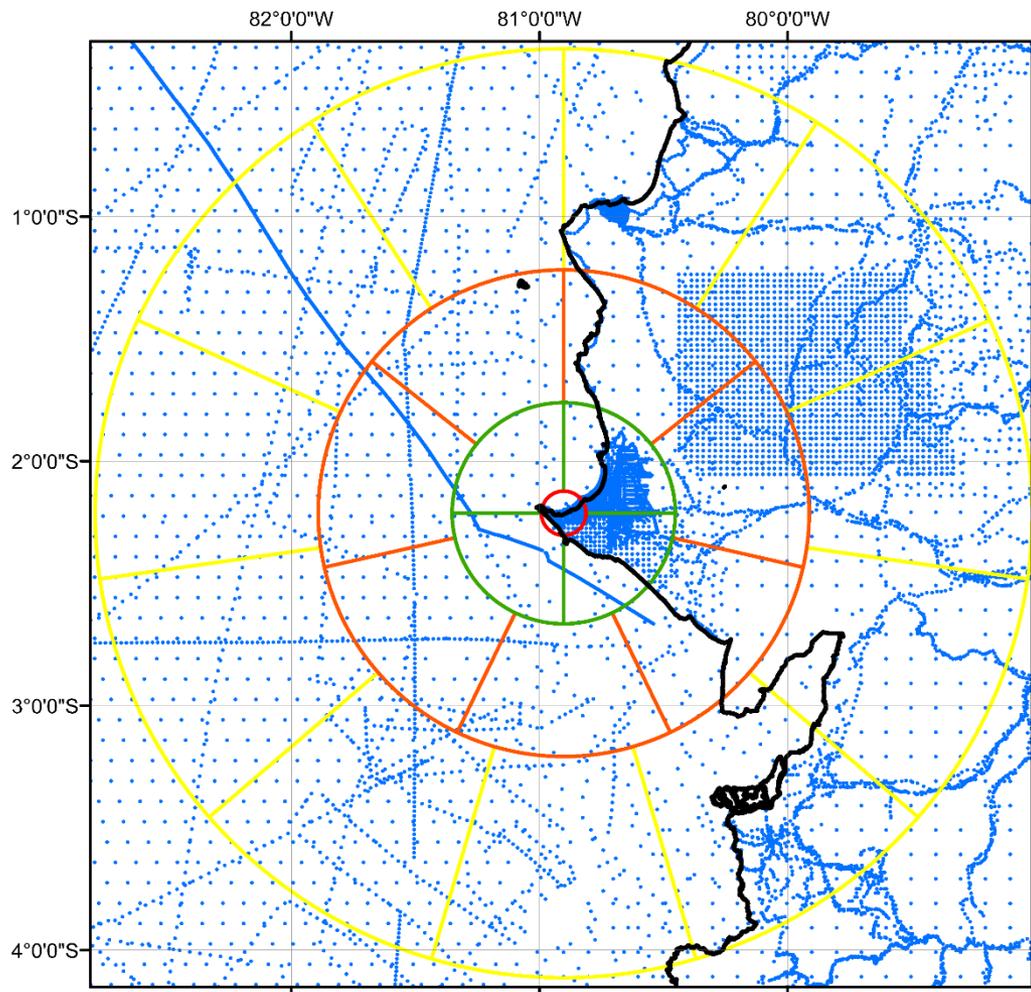
Término de grado cero no considerado





**UFPR**  
Universidade  
Federal do Paraná

## ESTACIONES IHRF



## IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Región	Radio (km)	N° registros
I	10	470
II	50	2265
III	110	1809
IV	210	5733



- Las características heterogéneas de los datos hace que sea necesario compatibilizar los registros gravimétricos en términos de referenciales geodésicos, resoluciones espaciales y sistemas de mareas involucrados.
- La eliminación de errores groseros (*outliers*) fue realizada con el objetivo de desconsiderar del análisis aquellos registros con ruido predominante.
- Soluciones libres resultan en un *bias* del DVE en relación al  $W_0$  del IHRIS de aproximadamente 25 cm cuando considerado el término de grado cero y de -68 cm cuando desconsiderado el término de grado cero.
- Soluciones fijas apuntan a que el DVE se sitúa cerca de 30 cm encima de la referencia global cuando considerado o termo de grado cero y de -63 cm cuando desconsiderado el término de grado cero.
- Aún existen dudas en el ámbito de la IAG con respecto a la forma más adecuada de realizar los vínculos locales con el valor de  $W_0$  del IHRIS. Este análisis aún está en curso en el ámbito del IAG/GGOS *Working Group 0.1.2 on the Strategy for the Realization of the IHRIS*.



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

**GRACIAS!**



### **AGRADECIMIENTOS:**

- Al Instituto Geográfico Militar de Ecuador (IGM-EC) por proporcionar los registros gravimétricos continentales *in-situ* utilizados.
- A la Secretaría Nacional de Educación Superior Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) por la beca de estudios de José Carrión.
- Al CNPq por el apoyo PQ proceso 306936/2015-1