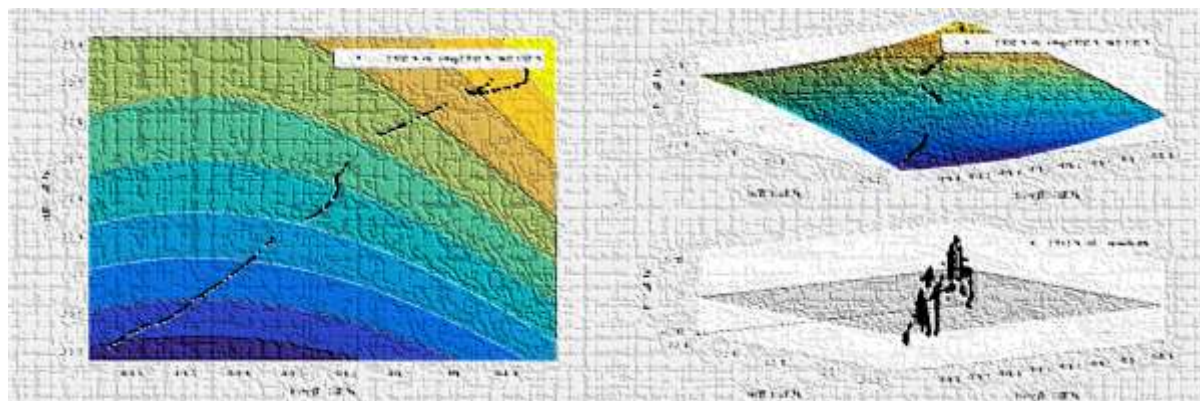




UNIVERSIDAD  
DE SANTIAGO  
DE CHILE



Cálculo y evaluación de la precisión de geoides híbridos en SUDAMÉRICA Y EUROPA,  
mediante la combinación de MGG, datos nivelación/GNSS GNSS obtenidos a partir de  
infraestructura SIRGAS y EUREF



Dr. José Antonio Tarrío Mosquera<sup>1</sup>, Ing. Ángela Ortega<sup>1</sup>, Ing. Bernardo Barraza<sup>1</sup>, TCL Carlos Prado<sup>2</sup>, Dr. Alfonso Núñez García del Pozo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Santiago de Chile

<sup>2</sup>Instituto Geográfico Militar de Chile

<sup>3</sup>Universidad de Salamanca



UNIVERSIDAD  
DE SANTIAGO  
DE CHILE



**SIRGAS**  
Sistema de Referencia Geocéntrico  
para las Américas

2019  
Rio de Janeiro,  
Brasil



## Contenidos

- Introducción
- Motivación
- Metodología
- Datos Empleados
- Resultados y discusión
- Conclusiones



UNIVERSIDAD  
DE SANTIAGO  
DE CHILE



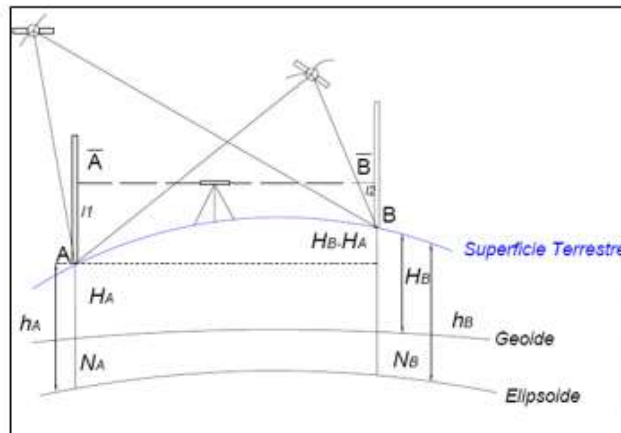
**SIRGAS**  
Sistema de Referencia Geocéntrico  
para las Américas

2019  
Rio de Janeiro,  
Brasil



## Introducción

Nivelación de GNSS.



Fuente: Elaboración propia modificado de GPS: THEORY AND PRACTICE (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER, & COLLINS, 2001).

Teóricamente:

$$h - H - N = 0$$

En la práctica:

$$h - H - N \neq 0$$

- Diferente elipsoide.
- Alturas H y N usan diferentes hipótesis.
- Diferentes sistemas de mareas.
- Diferentes épocas para H y h.

## Definition of the International Height Reference System (IHR) IAG Resolution No. 1, Prague, July 2015

Drewes, Hermann et al The geodesist's handbook 2016. J Geod 90:907–1205. doi:10.1007/s00190-016-0948-z

## Definition and Proposed Realization of the International Height Reference System (IHR)

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

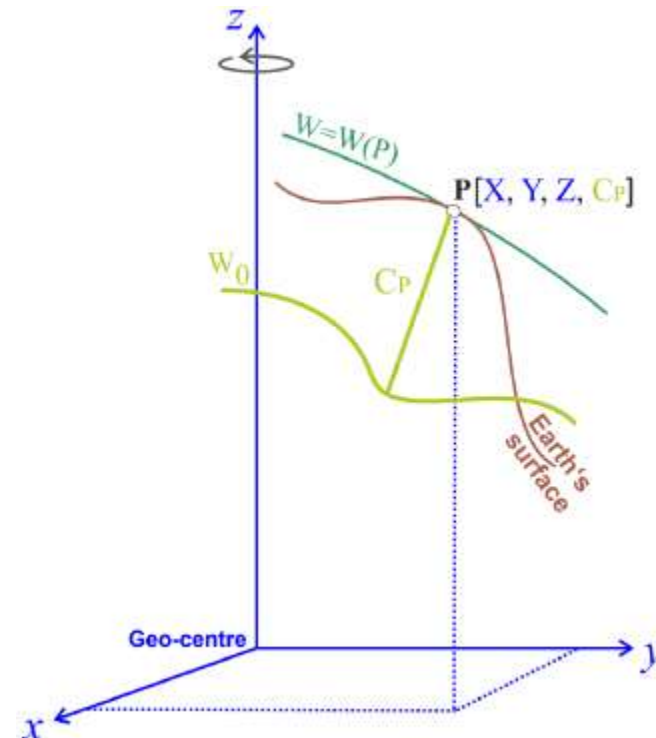


## Introducción

### Definition of the International Height Reference System (IHR)

IAG Resolution No. 1, Prague, July 2015:

1. Las coordenadas verticales son diferencias de potencial con respecto a un valor fijo  $W_0$ .
2. La posición de un punto P se debe dar en el ITRF correspondiente.
3. La estimación de las coordenadas geométricas y físicas debe incluir su variación con el tiempo.
4. Los parámetros, observaciones y datos deben estar dados en un sistema de marea medio.
5. La unidad de longitud debe ser el metro y la de tiempo el segundo(SI)



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



UNIVERSIDAD  
DE SANTIAGO  
DE CHILE

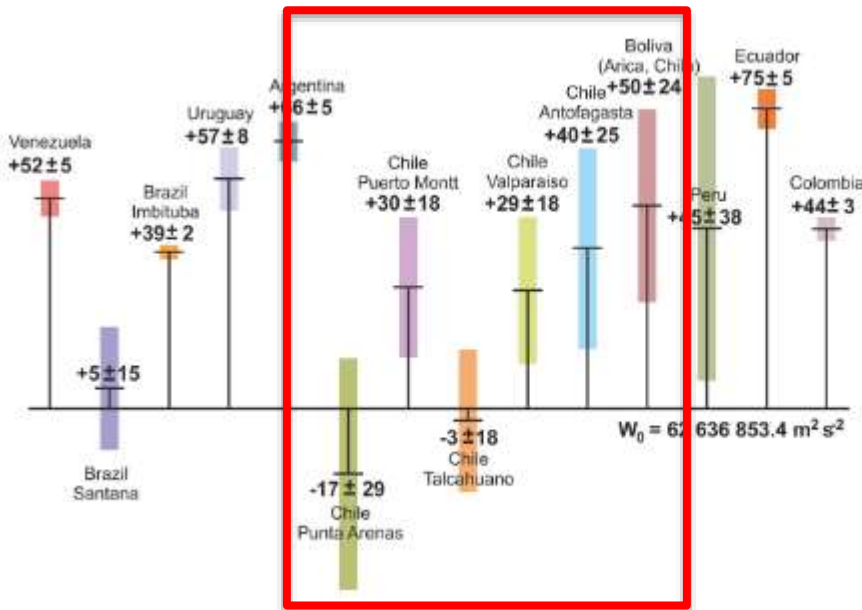


**SIRGAS**  
Sistema de Referencia Geocéntrico  
para las Américas

2019  
Rio de Janeiro,  
Brasil



## Motivación



Sánchez, Laura, and Michael G. Sideris. 2017. "Vertical Datum Unification for the International Height Reference System (IHRF)." *Geophysical Journal International*, ggx025. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx025>.

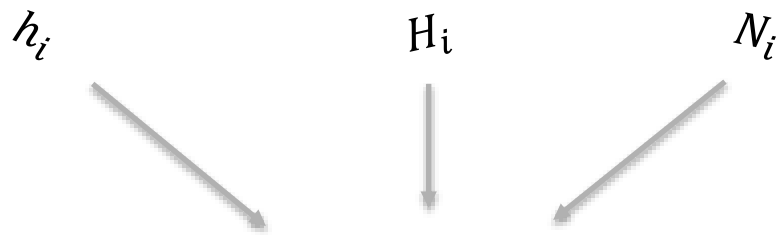
Inde J., Augath W. (2002) The European Vertical Reference System (EVRS), Its relation to a World Height System and to the ITRS. *International Association of Geodesy Symposia*, vol 125. Springer, Berlin, Heidelberg

Implementación IHRF/IHRF es un trabajo a medio plazo....y donde además se debe unificar el datum..... ver Sánchez, L., & Sideris, M. G. (2017). Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHRF).

*Geophysical Journal International*, ggx025. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx025>

¿Hay alguna manera de acceder a los MGG y que sean consistentes con las alturas locales hasta que el IHRF esté operativo?

## Motivación

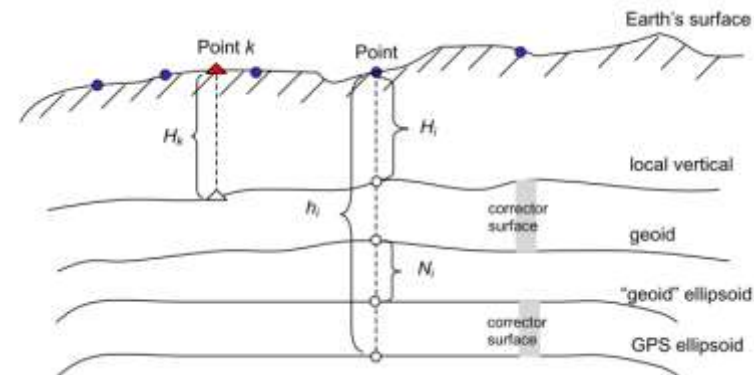


$$h_i - H_i - N_i^{MGG} = a_i^T x + \vartheta_i$$

$$\Delta h_i - \Delta H_i - \Delta N_i^{MGG} = a_i^T x + \vartheta_i$$

$$a_i^T x$$

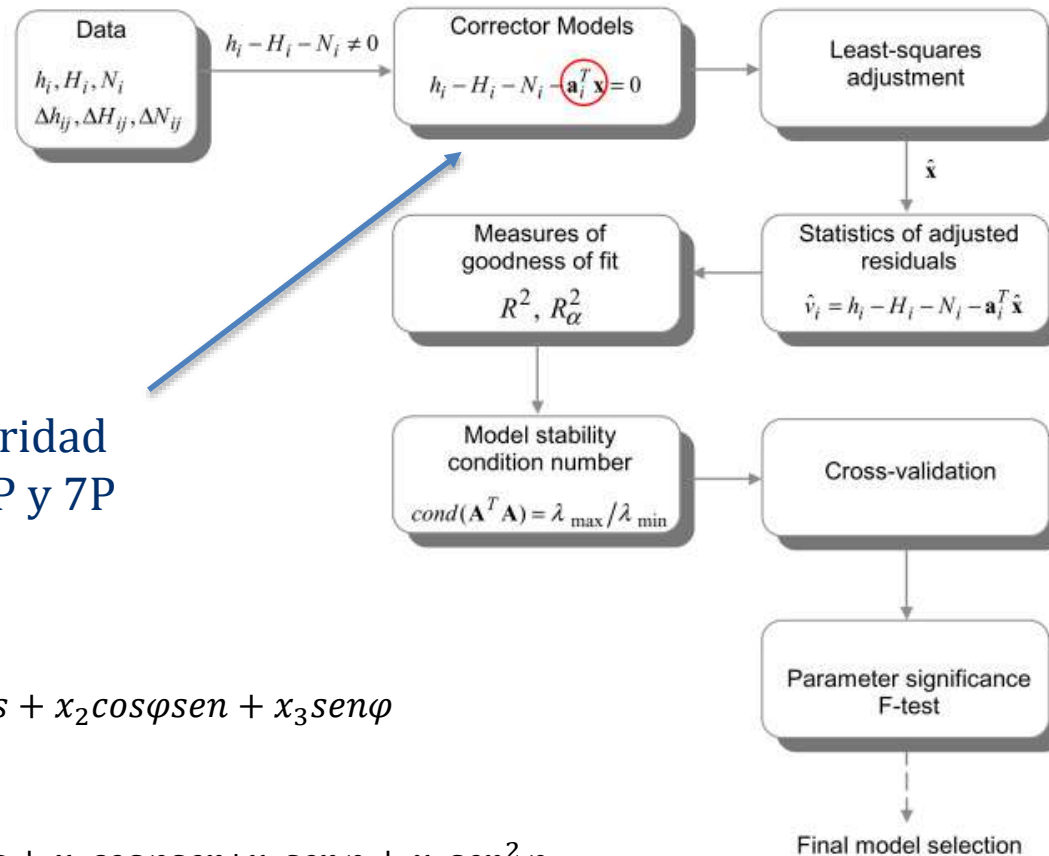
Los términos de la matriz X permiten modelar las inconsistencias de las diferentes alturas para generar lo que se denomina una superficie correctora o geoide híbrido para poder adaptarlo a las alturas oficiales de cada país (RELATIVAS) y obtener altura H



Fotopoulos, G. (2003). An Analysis on the Optimal Combination of Geoid, Orthometric and Ellipsoidal Height Data by. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, (20185), 230. Retrieved from <http://www.geomatics.ucalgary.ca/links/GradTheses.html>



## Metodología



## Modelos de similaridad de datum de 4P, 5P y 7P

$$f_4(\varphi, D) = x_0 + x_1 \cos\varphi \cos + x_2 \cos\varphi \sin + x_3 \sin\varphi$$

$$f_5(\varphi, D) = x_0 + x_1 \cos\varphi \cos + x_2 \cos\varphi \sin + x_3 \sin\varphi + x_4 \sin^2\varphi$$

$$f_7(\varphi, D) = x_1 \cos\varphi \cos + x_2 \cos\varphi \sin + x_3 \sin\varphi + x_4 \frac{\sin\varphi \cos\varphi \sin}{k} + x_5 \frac{\sin\varphi \cos\varphi \cos}{k} + x_6 \frac{1 - f^2 \sin^2\varphi}{k} + x_7 \frac{\sin^2\varphi}{k}$$

$$k = \sqrt{1 - e^2 \sin^2\varphi}$$

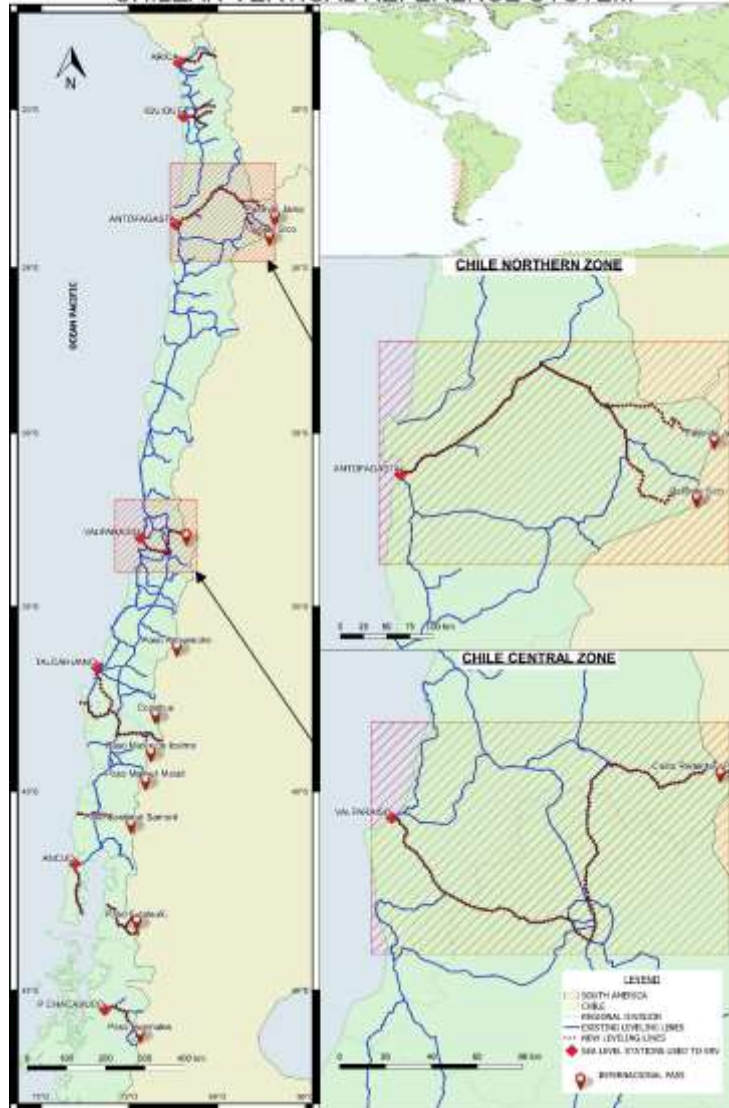
Fotopoulos, G. (2003). An Analysis on the Optimal Combination of Geoid, Orthometric and Ellipsoidal Height Data by. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, (20185), 230. Retrieved from <http://www.geomatics.ucalgary.ca/links/GradTheses.html>



# Datos Empleados



## CHILEAN VERTICAL REFERENCE SYSTEM



### North Chile

- , □(-26°, -71.0°)
- , □(-21.5°, -66.9°)
- alto: 425 km aprox.
- ancho: 498 km aprox.

- 122 ptos(H) del SRV iniciales
- Sistema mareas mean tide
- Época H(2014)
- Época h(2019) a partir de estaciones SIRGAS

### Central Chile:

- , □(-32.8°, -70.0°)
- , □(-33.7°, -71.7°)
- alto: 100 km aprox.
- ancho: 160 km aprox

- 217 ptos(H) del SRV iniciales
- Sistema mareas mean tide
- Época H(2016)
- Época h(2012,2014,2017, 2019) a partir de estaciones SIRGAS

Modelo	Año	Datos (ICGEM)	Grado
EGM2008	2008	A, G, S(GRACE)	2190
EIGEN-6C4	2014	A, G, S(GOCE), S(GRACE), S(LAGEOS)	2190
SGG-UGM-1	2018	EGM2008, S(GOCE)	2159
GOCO-05c	2016	A, G, S	720
XGM2016	2017	A, G, S(GOCO05s)	719

[http://icgem.gfz-potsdam.de/tom\\_longtime](http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime)

S is for satellite  
A is for altimetry  
G for ground data





# Datos Empleados



**North Spain**  
 □, □(43.8°, -6.5°)  
 □, □(41.8°, -9.5°)  
 alto: 222 km aprox.  
 ancho: 240 km aprox

- 111 ptos(H) del SRV iniciales
- Sistema mareas mean tide
- Época H(2008)
- Época h(2010) a partir estaciones EUREF

- ESTACIÓN GNSS EROGSS
- ★ ESTACIÓN GNSS GALNET
- ★ ESTACIÓN GNSS ITACVL
- ▲ RED REGENTE
- ▲ RED REGENTE OBSERVADA
- REDNAP OBSERVADO

Modelo	Año	Datos	Grado
EGM2008	2008	A, G, S(GRACE)	2190
EIGEN-6C4	2014	A, G, S(GOCE), S(GRACE), S(LAGEOS)	2190
SGG-UGM-1	2018	EGM2008, S(GOCE)	2159
GOCO-05c	2016	A, G, S	720
XGM2016	2017	A, G, S(GOCO05s)	719

**20 LÍNEAS Y 3 RAMALES; SUMANDO APROXIMADAMENTE 1400 CLAVOS DE NIVELACIÓN CON H PRECISA PERO h NO PRECISA**



## Datos Empleados

### DATOS INICIALES. ONDULACIONES LOCALES Y GLOBALES

North Spain (n=111)

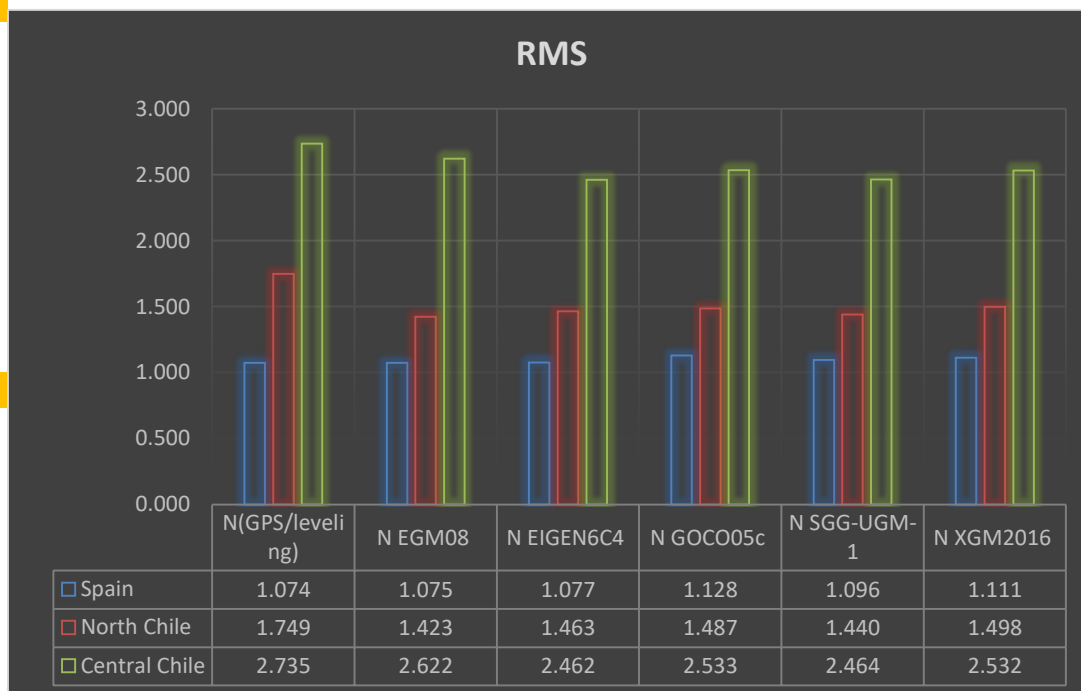
Type of height	Mean	RMS	Min	Max	Range
<b>N(GPS/leveling)</b>	<b>55.571</b>	<b>1.074</b>	<b>53.209</b>	<b>57.690</b>	<b>4.482</b>
N EGM08 TF	56.589	1.075	54.153	58.702	4.549
N EIGEN6C4 TF	56.612	1.077	54.196	58.740	4.543
N GOCO05c TF	56.631	1.128	53.975	58.681	4.706
N SGG-UGM-1 TF	56.607	1.096	54.126	58.730	4.604
N XGM2016 TF	56.638	1.111	54.010	58.680	4.670

North Chile (n=122)

Type of height	Mean	RMS	Min	Max	Range
<b>N(GPS/leveling)</b>	<b>36.411</b>	<b>1.749</b>	<b>33.774</b>	<b>38.837</b>	<b>5.063</b>
N EGM08 TF	35.911	1.423	33.802	37.906	4.104
N EIGEN6C4 TF	36.065	1.463	33.894	38.099	4.205
N GOCO05c TF	36.198	1.487	33.966	38.200	4.235
N SGG-UGM-1 TF	36.080	1.440	33.916	38.081	4.165
N XGM2016 TF	36.157	1.498	33.854	38.173	4.318

Central Chile (n=217)

Type of height	Mean	RMS	Min	Max	Range
<b>N(GPS/leveling)</b>	<b>27.610</b>	<b>2.735</b>	<b>21.704</b>	<b>33.981</b>	<b>12.277</b>
N EGM08 TF	27.603	2.622	21.867	33.631	11.764
N EIGEN6C4 TF	27.861	2.462	22.127	33.397	11.270
N GOCO05c TF	27.756	2.533	21.994	33.055	11.061
N SGG-UGM-1 TF	27.730	2.464	22.067	33.353	11.285
N XGM2016 TF	27.944	2.532	22.006	33.139	11.134





## Datos Empleados. Depuración de datos

### Proceso de depuración

1. Los MGG se obtienen del ICGEM con la misma resolución nativa
2. La h de Chile se modela a época 2019 con modelos propios del centro USC (presentación centro USC)
3. Se pasan las H al mismo sistema de mareas que el ITRF (Tide free)
4. Se evalúa tendencia de  $N_{local}$  vs  $N_{GGM}$  para descartar errores groseros.
5. Se realiza un primer ajuste y se eliminan los puntos  $\geq 3\sigma$

Señalizada:	01 de julio de 2004		
Nivelada:			
— Datos Geodésicos: —			
Altitud ortométrica:	486,3024 m.		
Geopotencial:	478,66438 u.g.p.		
Gravedad en superficie:	980241,5 mgals.	Observada	
Cálculo:	01 de mayo de 2008		
— Coordenadas Geográficas ETRS89: —			
Longitud:	- 6° 56' 05,15693"		
Latitud:	42° 26' 59,58934"		
Altitud elipsoidal:	545,2551 m.		
Precisión:	Observado GPS estático rápido		
— Reseña: —			
Clavo metálico semiesférico incrustado aproximadamente en el Km. 446,075 de la margen Sur de la Carretera N-120, sobre la solera de hormigón en la que se asienta una canalización vierteaguas de un paso elevado sobre la carretera, según croquis.			



### HORIZONTE GPS DEFICIENTE

Señal:	Secundaria	En posición:	Vertical
Señalizada:	20 de junio de 2005		
Nivelada:			
— Datos Geodésicos: —			
Altitud ortométrica:	557,0518 m.		
Geopotencial:	546,06242 u.g.p.		
Gravedad en superficie:	980248,65 mgals.	Observada	
Cálculo:	01 de mayo de 2008		
— Coordenadas Geográficas ETRS89: —			
Longitud:	- 8° 13' 37,36960"		
Latitud:	42° 14' 42,11940"		
Altitud elipsoidal:	620,379 m.		
Precisión:	Observado GPS <u>estático</u> rápido		
— Reseña: —			
Clavo metálico semiesférico incrustado aproximadamente en el Km. 608,500 de la margen W de la Carretera N-120, en la base de sustentación de la columna situada más al S de la intersección con la A-52.			





UNIVERSIDAD  
DE SANTIAGO  
DE CHILE



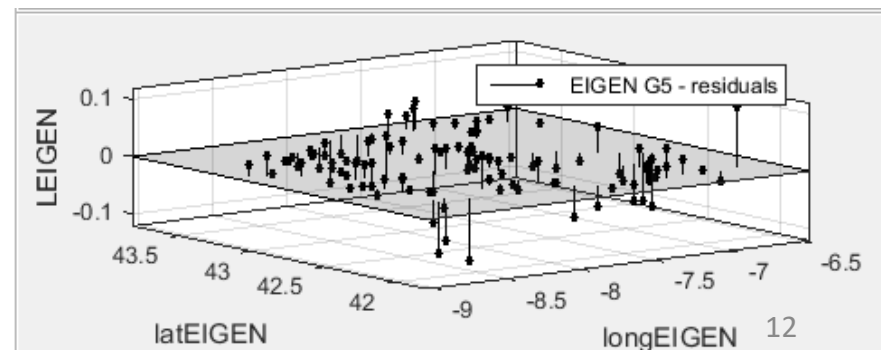
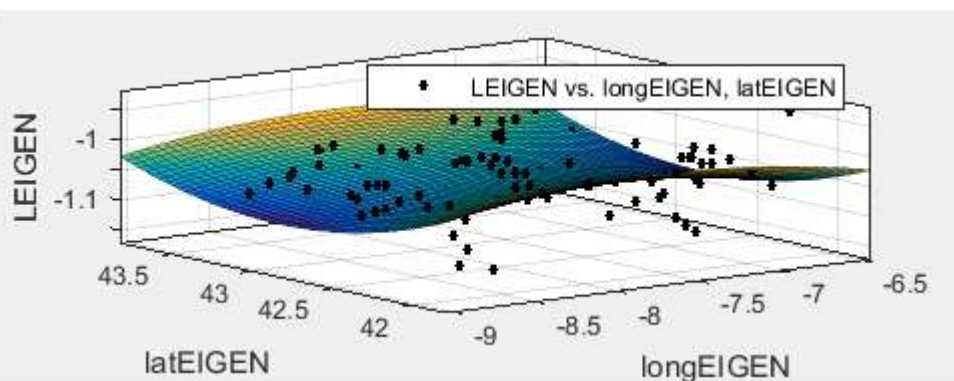
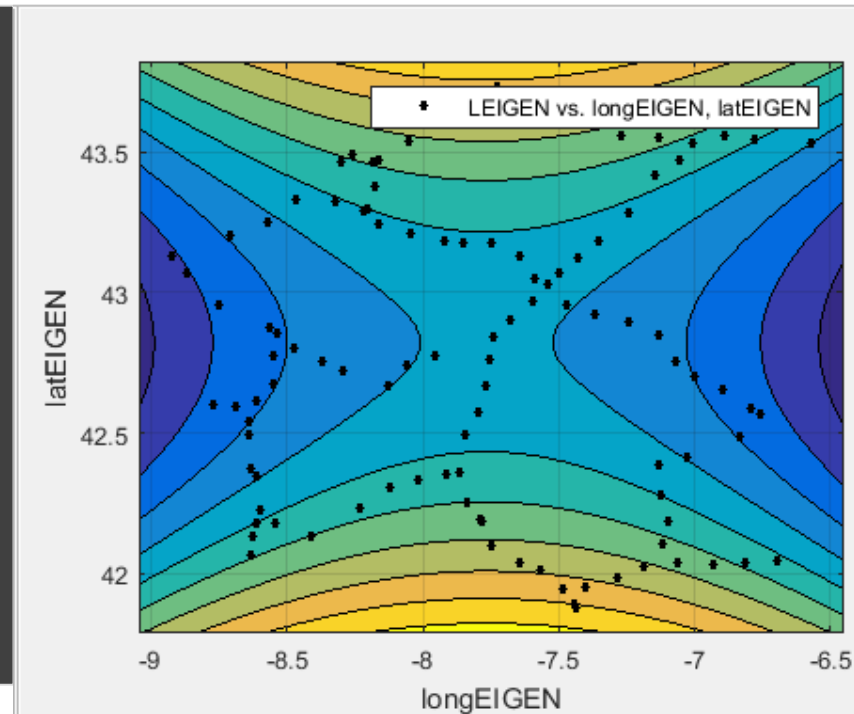
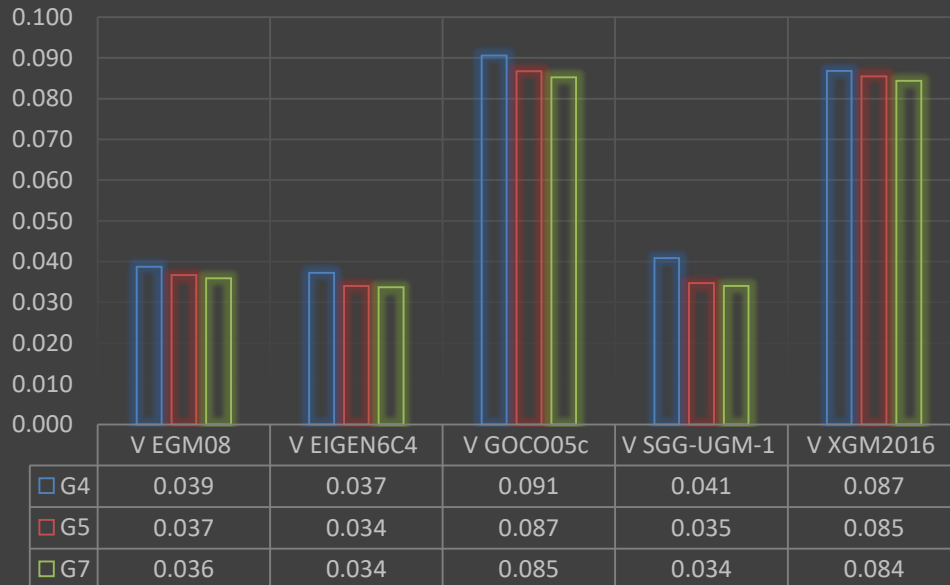
**SIRGAS**  
Sistema de Referencia Geocéntrico  
para las Américas

2019  
Rio de Janeiro,  
Brasil



## Resultados y discusión. Modelamiento

North Spain. Residuos (m)





UNIVERSIDAD  
DE SANTIAGO  
DE CHILE



**SIRGAS**

Sistema de Referencia Geocéntrico  
para las Américas

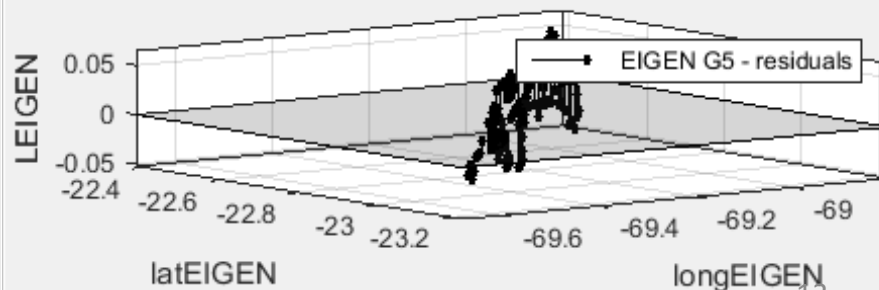
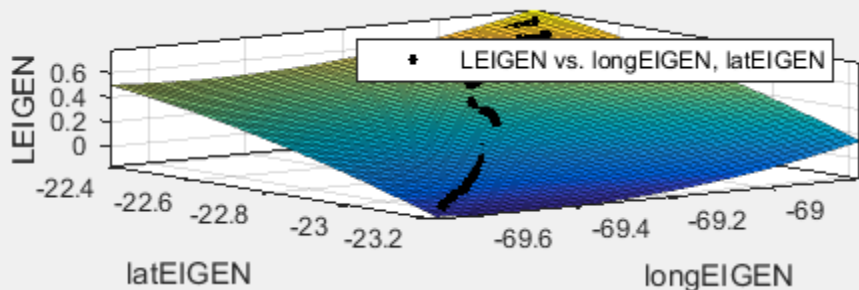
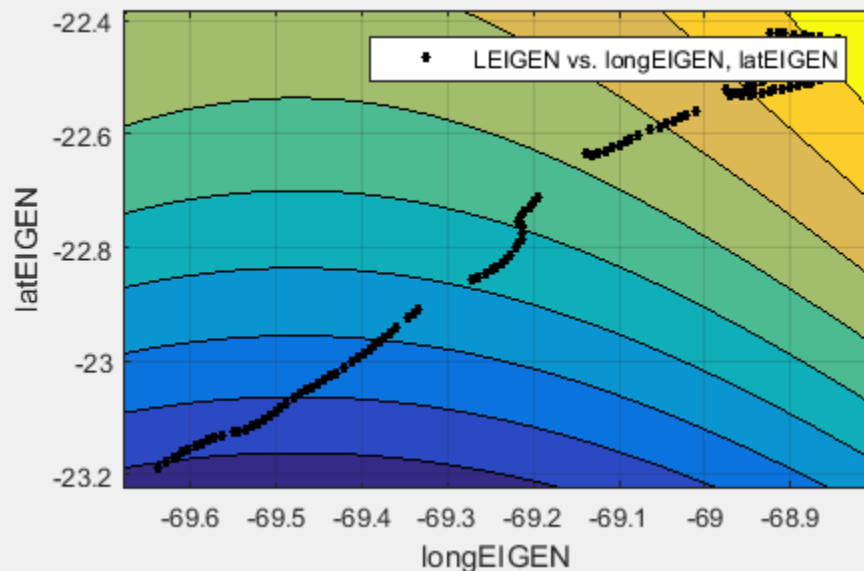
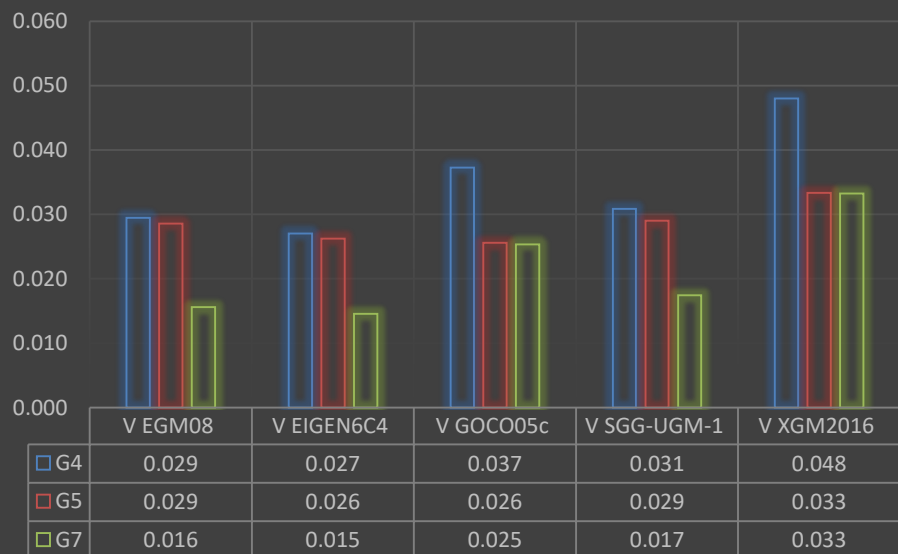
2019

Rio de Janeiro,  
Brasil



## Resultados y discusión. Modelamiento

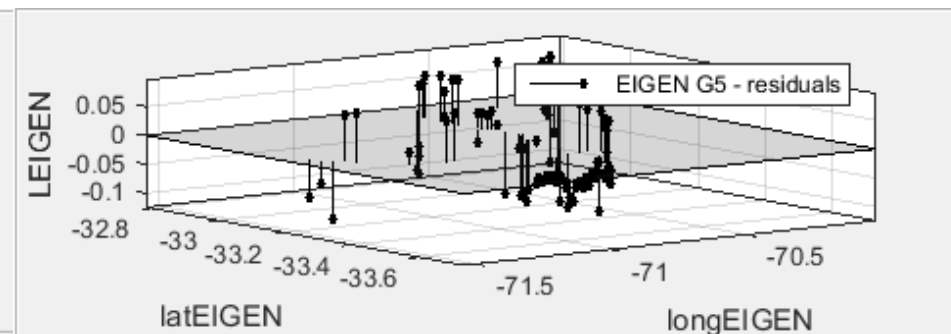
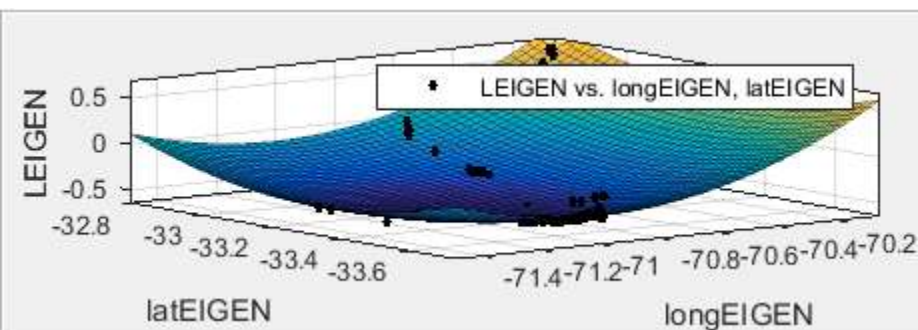
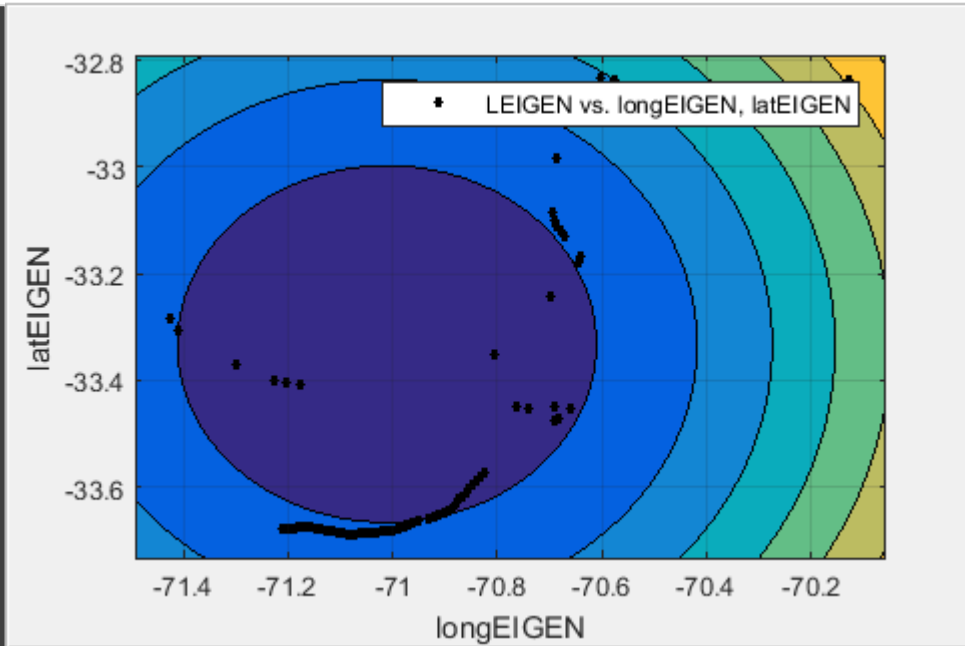
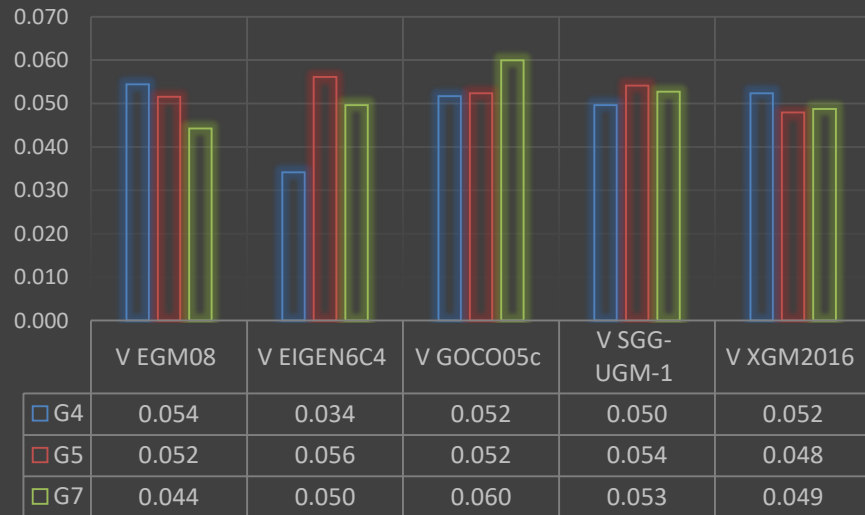
North Chile. Residuos (m)





## Resultados y discusión. Modelamiento

Central Chile. Residuos (m)





UNIVERSIDAD  
DE SANTIAGO  
DE CHILE



**SIRGAS**  
Sistema de Referencia Geocéntrico  
para las Américas

2019

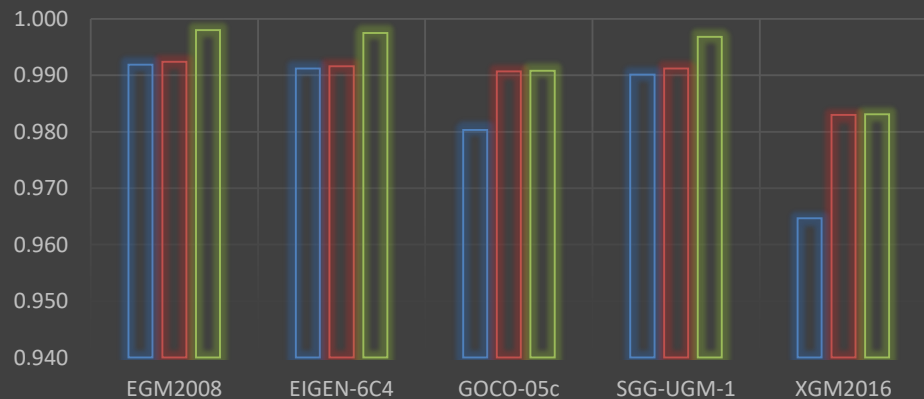
Rio de Janeiro,  
Brasil



## Resultados y discusión. Evaluación

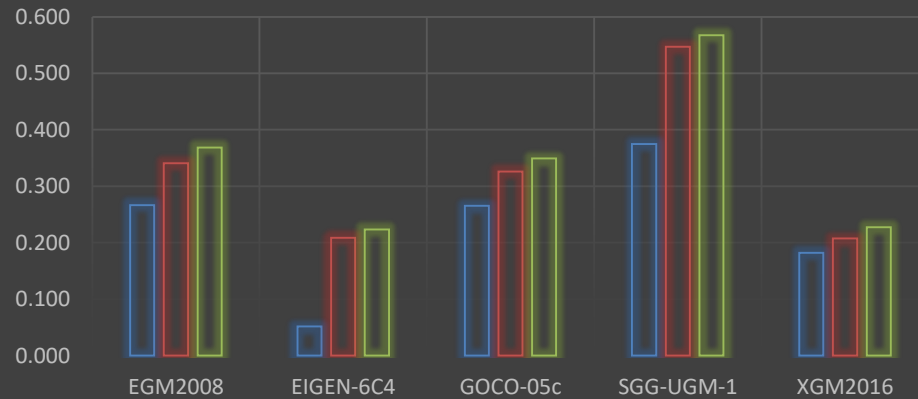
Valores de R- Central Chile

■ G4 ■ G5 ■ G7



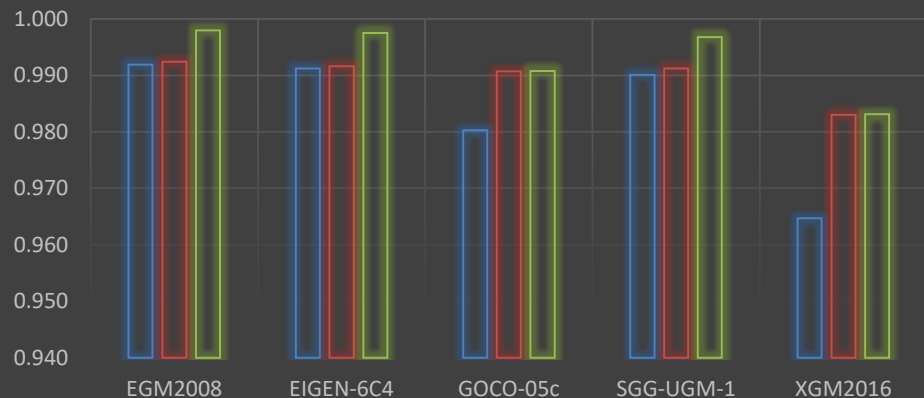
Valores de R- Spain

■ G4 ■ G5 ■ G7

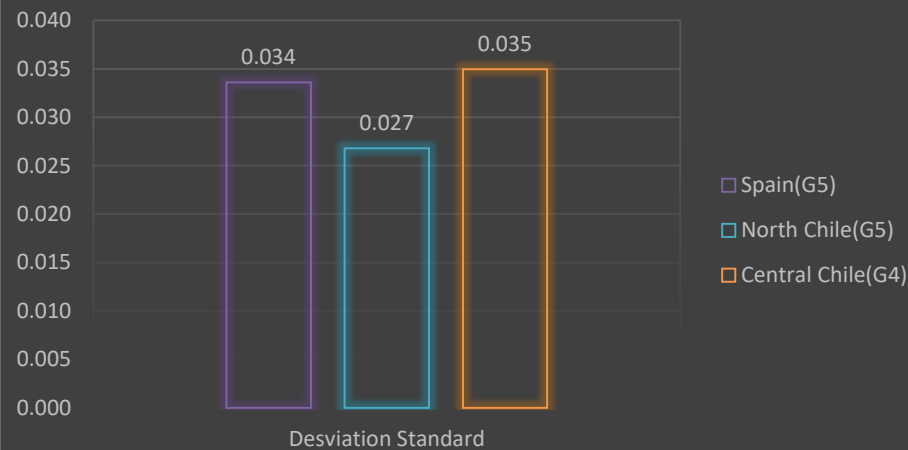


Valores de R- North Chile

■ G4 ■ G5 ■ G7



Cross Validation. RMS(m)





UNIVERSIDAD  
DE SANTIAGO  
DE CHILE



**SIRGAS**  
Sistema de Referencia Geocéntrico  
para las Américas

2019  
Rio de Janeiro,  
Brasil



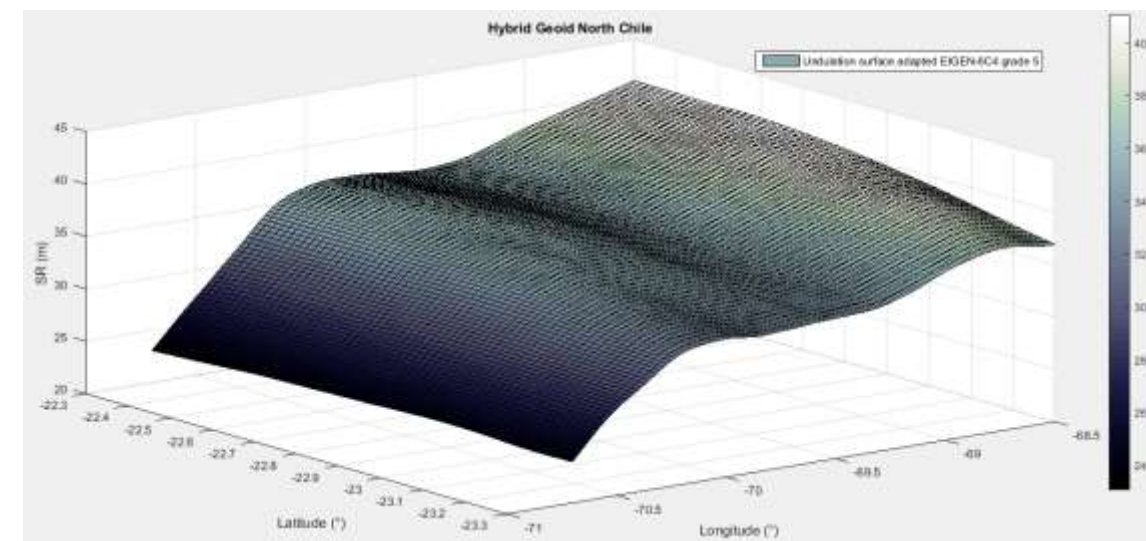
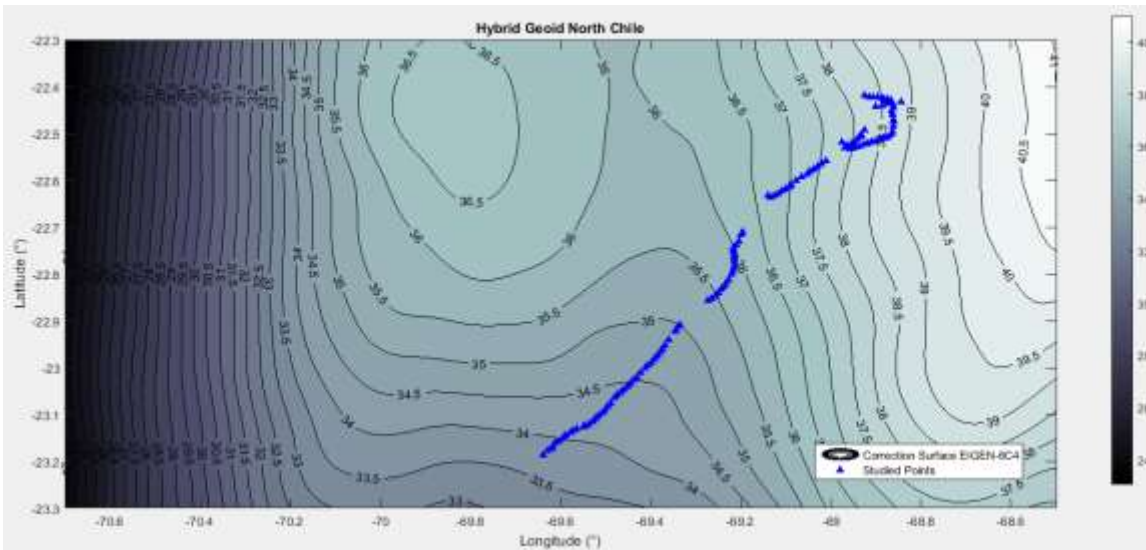
## Resultados y discusión. Producto Final

$$H_i = h_i - N_i^{MGG} - a_i^T x$$

Se generan 3 superficies de referencia con valores:

ID   N(adaptada)

En formato de texto plano y  
formato binario para software  
GNSS



ID	Longitude (°)	Latitude (°)	Height (m)
1	-70.61670000	-22.30000000	23.520146513875
2	-70.60000000	-22.30000000	23.919618364224
3	-70.58330000	-22.30000000	24.316309078692
4	-70.56670000	-22.30000000	24.707906197045
5	-70.55000000	-22.30000000	25.092482605491
6	-70.53330000	-22.30000000	25.469168302162
7	-70.51670000	-22.30000000	25.838579154334
8	-70.50000000	-22.30000000	26.202835615531
9	-70.48330000	-22.30000000	26.565120654856
10	-70.46670000	-22.30000000	26.928870167748
11	-70.45000000	-22.30000000	27.296817128747
12	-70.43330000	-22.30000000	27.670180154660
13	-70.41670000	-22.30000000	28.048270265692
14	-70.40000000	-22.30000000	28.428683694873
15	-70.38330000	-22.30000000	28.808078766266
16	-70.36670000	-22.30000000	29.183348591811
17	-70.35000000	-22.30000000	29.552855238577
18	-70.33330000	-22.30000000	29.917333945239
19	-70.31670000	-22.30000000	30.280133402889
20	-70.30000000	-22.30000000	30.646622768148
21	-70.28330000	-22.30000000	31.022827796026





UNIVERSIDAD  
DE SANTIAGO  
DE CHILE



**SIRGAS**  
Sistema de Referencia Geocéntrico  
para las Américas

2019  
Rio de Janeiro,  
Brasil



## Conclusiones

1. No disponer de los estadísticos finales por puntos en las redes de nivelación condiona el resultado final.
2. La cantidad y distribución de los datos de nivelación es vital para el modelamiento final.
3. En los datos de Chile, despreciar la corrección de la época genera un error que incide directamente en la matriz de residuos(no lineal)
4. Se hace muy necesario avanzar en la implantación de IHRF sobre todo en países como Chile geodinámicamente activos, esta solución es una transición para poder emplear lo local combinado con lo global.
5. Tener varios sistemas de altura no permite generalizar el procedimiento en Chile, no así en España, donde ya se emplea.



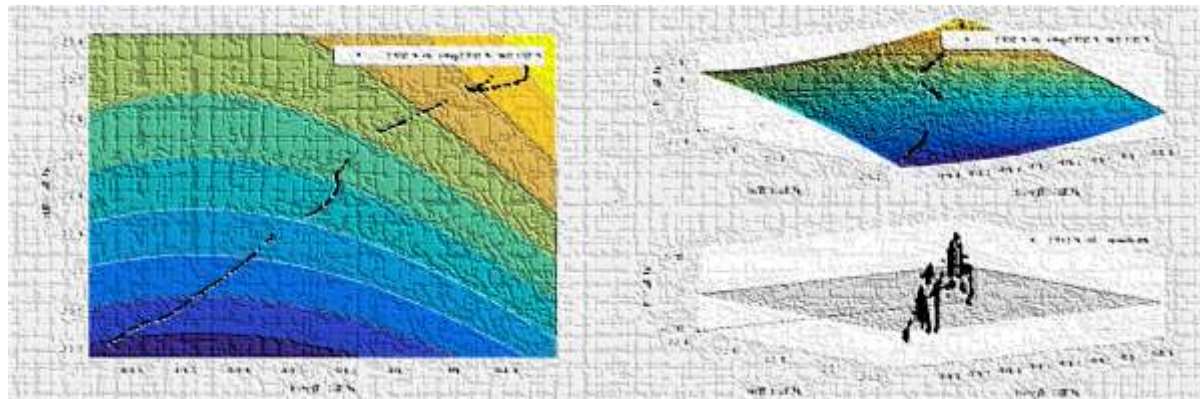
UNIVERSIDAD  
DE SANTIAGO  
DE CHILE



Muchas gracias

Muito obrigado

[jose.tarrío@usach.cl](mailto:jose.tarrío@usach.cl)



Dr. José Antonio Tarrío Mosquera<sup>1</sup>, Ing. Ángela Ortega<sup>1</sup>, Ing. Bernardo Barraza<sup>1</sup>, TCL Carlos Prado<sup>2</sup>, Dr. Alfonso Núñez García del Pozo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Santiago de Chile

<sup>2</sup>Instituto Geográfico Militar de Chile

<sup>3</sup>Universidad de Salamanca



UNIVERSIDAD  
DE SANTIAGO  
DE CHILE



Muchas gracias

Centro de Procesamiento y Análisis Geodésico  
asociado a SIRGAS:

*USC*



Dr. José Antonio Tarrío Mosquera<sup>1</sup>, Dr. Marcelo Caverlotti Silva<sup>1</sup>, Dr. José Luis Borcosque<sup>1</sup>  
Ing. Ángela Ortega<sup>1</sup>, Ing. Bernardo Barraza<sup>1</sup>, Ing. Richard Quiroga<sup>1</sup>, Ing. Karina Salinas<sup>1</sup>, Ing. Gonzalo Lira<sup>1</sup>, Ing. Jesarella Inzunza<sup>1</sup>,  
Ing. Patricio Cepeda<sup>1</sup>, Func. Fernando Isla<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Santiago de Chile