



# Análisis de modelos de geoide globales y locales en la zona de El Shincal de Quimivil (Londres, Catamarca)

Analysis of global and local geoid models in the area of El Shincal de Quimivil (Londres, Catamarca)

Daniel DEL COGLIANO<sup>1,2</sup>, Maria Eugenia GOMEZ\*<sup>1,2</sup>, José ROMANO<sup>3</sup>, Reinaldo A. MORALEJO<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

\* Email de contacto: <megomez@fcaglp.unlp.edu.ar>

## RESUMEN

El Shincal de Quimivil es un sitio arqueológico de origen incaico, ubicado en la localidad de Londres (Catamarca, Argentina) y cuya preservación se halla comprometida por la extensión de cárcavas. Con el fin de controlar la degradación del sitio, además de otros estudios, se elaboró un modelo digital de terreno (MDT) basado en LIDAR aéreo, que permitió representar la superficie con precisión próxima a 10 cm. Las alturas del MDT, originalmente elipsoidales, deben ser referidas a una superficie física con el fin de estudiar el comportamiento del agua, para lo cual es necesario contar con un modelo de geoide de calidad similar. En este trabajo presentamos los avances realizados en este sentido, sobre diferentes modelos geopotenciales globales y uno regional, a partir de información altimétrica existente y de un nuevo tramo de nivelación que corre entre la ruta nacional 40 y El Shincal de Quimivil.

**Palabras clave** — Geoide, nivelación, Shincal de Quimivil, sitio arqueológico.

## ABSTRACT

Analysis of global and local geoid models in the area of El Shincal de Quimivil (Londres, Catamarca). El Shincal de Quimivil is an archaeological Inca site, located in

► Ref. bibliográfica: Del Cogliano, D.; Gomez, M. E.; Romano, J.; Moralejo, R. A. 2023. "Análisis de modelos de geoide globales y locales en la zona de El Shincal de Quimivil (Londres, Catamarca)". *Acta Geológica Lilloana* 34 (1): 35-48. doi: <https://doi.org/10.30550/j.agl/2023.34.1/2023-03-09>

► Recibido: 2 de febrero 2023 – Aceptado: 9 de marzo 2023



► URL de la revista: <http://actageologica.lillo.org.ar>

► Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

the city of Londres (Catamarca, Argentina) and whose preservation is compromised by the extension of gullies. In order to control the degradation of the site, in addition to other studies, a digital terrain model (DTM) was developed based on aerial LIDAR, which allowed to represent the surface with precision close to 10 cm. The originally ellipsoidal heights of the DTM must be referred to a physical surface to study the water behavior, for which a geoid model of similar quality is mandatory. In this paper we present the progress made in this sense, on different global geopotential models and a regional one, based on existing altimetric information and a new leveling track that runs between National Route 40 and El Shincalde Quimivil.

**Keywords** — Geoid, levelling, Shincal de Quimivil, archeological site.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo el estudio del geoide en el entorno de la localidad de Londres, en la provincia de Catamarca, Argentina. En particular, el interés se focaliza en el sector suroeste de la sierra de Belén y en el piedemonte nororiental de la sierra de Zapata, donde se encuentra el sitio arqueológico inca conocido como “El Shincal de Quimivil”.

Las sierras de Belén y Zapata pertenecen al cordón montañoso de las Sierras Pampeanas Noroccidentales y se caracterizan por presentar valles longitudinales estrechos y grandes bolsones rodeados por montañas (Morlans, 1995). Fitogeográficamente, se identifica por la presencia de la provincia del Monte donde se destacan la comunidad vegetal del Monte Espinoso y el Jarillal (Cabrera, 1951). Específicamente, El Shincal de Quimivil se localiza en la ciudad de Londres dentro del piedemonte de la serranía del Shincal entre las sierras mencionadas. Este sitio abarca una superficie superior a 30 ha y representa uno de los grandes centros de poder instalados por los incas a lo largo del Tawantinsuyu. Este asentamiento se compone de diversas estructuras o recintos pircados que podían funcionar como residencias o templos. Esta forma de ocupación respondía a un patrón ortogonal incaico planeado y construido para sus centros políticos regionales (Raffino, 2004; Raffino *et al.*, 2015)

La preservación de las estructuras incas y otros restos en estudio, se ve comprometida por los efectos de fuertes lluvias entre los meses de noviembre y marzo de cada año. La combinación del agua caída y un suelo afectado por la acción de roedores que lo vuelven excesivamente poroso, provocan grandes hendiduras en el suelo, denominadas cárcavas, que alcanzan profundidades y extensiones de varios metros. Se trata de estructuras activas que progresan destruyendo lo que encuentran a su paso (Niz *et al.*, 2009). Para abordar una solución consistente y eficiente que evite el avance de las cárcavas, es necesario contar con un modelo digital del terreno que permita representar la superficie topográfica sobre las zonas afectadas y en el entorno. De esta manera, se podrá observar en detalle la geomorfología del piedemonte donde se instala El Shincal de Quimivil, y analizar en profundidad el comportamiento de los diferentes cursos de agua para proponer políticas de intervención y preservación del sitio.

Por eso, en el año 2016 se realizó un vuelo con LiDAR y fotogrametría sobre unas 5.600 ha. El relevamiento se apoyó en puntos de tierra de coordenadas geodésicas conocidas en el sistema de referencia oficial de la República Argentina POSGAR07; en los que operaron receptores GNSS durante todo el vuelo (Moralejo *et al.*, 2018). En estas condiciones se obtuvo un modelo digital de terreno (MDT) con un RMS de 7 cm para la componente vertical. Pero estas alturas tienen un sentido puramente geométrico y están referidas al Elipsoide WGS84 del marco de referencia POSGAR07.

Cuando se estudia el comportamiento del agua es necesario contar con alturas vinculadas al campo de la gravedad, como las alturas dinámicas o las alturas ortométricas. Por eso, para realizar el estudio hidráulico en El Shincal de Quimivil es necesario convertir las alturas elipsoidales en alturas referidas al geoide, utilizando un modelo de geoide apropiado.

En Argentina el geoide está materializado a través de una red de puntos altimétricos distribuidos sobre líneas de nivelación que se extienden por todo el territorio nacional, con alturas expresadas en el Sistema de Referencia Vertical Nacional SRVN16 (IGN, 2016).

En este artículo se analizan los resultados de mediciones geodésicas GNSS realizadas sobre puntos altimétricos SRVN16 existentes en la zona. En esas condiciones, en cada uno de ellos se dispone de altura elipsoidal y altura ortométrica tal que es posible calcular en forma discreta la correspondiente ondulación geoidal (“N”) mediante la diferencia entre ambas alturas (Torge y Müller, 2012). Esta información convenientemente distribuida, permite evaluar el comportamiento de diferentes modelos de geoide en la zona de estudio. Uno de ellos es el modelo adoptado en forma oficial a nivel nacional, denominado Geoide-Ar16, y otros son modelos mundiales recientemente actualizados a partir de información satelital de la misión GOCE.

No obstante, la red de puntos altimétricos del Instituto Geográfico Nacional (IGN), que se extiende por la Ruta Nacional N° 40 (RN40), pasa a unos 5 km del sitio arqueológico. Por eso, fue necesario realizar una nueva línea de nivelación geométrica de precisión desde el pilar altimétrico PF27N(352) hasta la entrada de El Shincal de Quimivil. Algunos puntos de la nivelación geométrica fueron materializados y medidos con GNSS para determinar los valores de “N” en ese trayecto.

## INFORMACIÓN DISPONIBLE

### Puntos de la red de nivelación argentina

Desde 2017 Argentina dispone de puntos con alturas ortométricas de Mader referidas a SRVN16. Estas alturas difieren de las de Helmert en el tratamiento del efecto de la topografía sobre la placa de Bouguer. El nuevo ajuste de la red de nivelación argentina parte de un origen geopotencial ubicado en el centro-este del país, en la ciudad costera de Mar del Plata. En consecuencia, la nivelación podría verse degradada hacia zonas remotas y de precordillera, como es la zona de estudio. No obstante, el último ajuste del marco de referencia vertical SRVN16 (2016) realizado por el IGN, asigna una precisión del orden del milímetro a las alturas que son utilizadas.

En nuestro sector, la red altimétrica argentina se extiende sobre la RN40, donde se reconocen los puntos PF24N(352), PF28N(352), PF29N(352) y Nodal 186 (ver Figura 1), que cuentan además con determinaciones geodésicas de GNSS. El punto de la red más cercano al sitio arqueológico es el PF27N(352), a unos 5 km. Como será descrito en detalle más adelante, la altura de este punto fue trasladada a la zona de interés a través de una nivelación geométrica.

### Modelos de geoide utilizados

Junto con el nuevo ajuste de la red de nivelación nacional, el IGN publicó el modelo de geoide argentino, Geoide-Ar16 (Piñón *et al.*, 2017). El mismo se calculó utilizando la técnica remover-cacular-restaurar (Schwarz *et al.*, 1990) y el modelo geopotencial GOCO05S (Mayer-Gürr *et al.*, 2015) hasta su grado y orden máximo, 280.

Geoide-Ar16 incluyó 671.547 valores de gravedad observada en el sistema gravimétrico IGSN71 (Morelli *et al.*, 1972) sobre el territorio continental argentino, sus países limítrofes y el litoral marino. Se trata de un modelo gravimétrico ajustado horizontal y verticalmente mediante 4 parámetros y a partir de 1.904 puntos de GNSS/nivelación. El cálculo arrojó un desvío estándar de 0,05 m sobre los puntos de ajuste y una exactitud estimada de 0,25 m.

La gravedad que da origen a Geoide-Ar16 se extiende incluso sobre la cordillera; en muchos casos ha sido medida sobre los caminos y en otros con aerogravimetría. Al ser un modelo ajustado con GNSS/nivelación, considerando que la nivelación puede verse degradada hacia esta región y teniendo en cuenta que ésta no se extiende más allá de la RN40, es necesario evaluar el modelo a través de puntos de nivelación externos a fin de corroborar que cumple con la calidad requerida.

En cuanto a los modelos geopotenciales, fueron incluidos los más modernos de grado y orden 2190, al mismo tiempo que se ha tomado en cuenta que fueran independientes entre sí.

Los errores de los modelos geopotenciales globales (GGM, por su sigla en inglés) pueden dividirse en dos tipos: de comisión y de omisión (Jekely, 2009). El primero está relacionado con la calidad de la determinación de los coeficientes del desarrollo en armónicos esféricos del potencial, lo cual depende de los datos de entrada. El de omisión, es causado por el truncamiento del desarrollo del potencial en armónicos esféricos, en un cierto grado máximo, y está relacionado con la distribución espacial de los datos utilizados (Torge y Müller, 2012).

Los GGM se examinan de manera global, a través de sus coeficientes y el error formal para cada grado y orden ó mediante la comparación con otro modelo global; si el análisis es a nivel local, se utilizan datos externos como los de GNSS/nivelación (Tsoulis y Patlakis, 2013; Vergos *et al.*, 2006).

Los modelos incluyen información gravimétrica terrestre, de altimetría satelital y de las misiones gravimétricas como CHAMP, GRACE, GOCE, aunque no necesariamente de todas. La Tabla 1 proporciona una lista de los modelos utilizados en este trabajo y sus principales características.

El EGM2008 (Pavlis *et al.*, 2012) puede considerarse un modelo geopotencial clásico y el primer GGM que alcanzó una resolución global de 9 km. Su base de

anomalías gravimétricas suele ser compartida con otros modelos y en particular, de su publicación se desprende que estas cubren la región de estudio. La resolución se completa con anomalías de gravedad de tipo MRT (Modelado Residual del Terreno) obtenidas a partir de un modelo de terreno desarrollado en armónicos esféricos. Incluye información GRACE pero no de las misiones GOCE y CHAMP. Tiene resolución completa para grado y orden 2159 de la expansión en armónicos esféricos y proporciona coeficientes adicionales al grado 2190 y orden 2159 (Hirt *et al.*, 2010; Pavlis *et al.*, 2012).

El EIGEN6C4 (Förste *et al.*, 2014) es el primer modelo estático en alcanzar un desarrollo en armónicos esféricos hasta grado 2190, con información de la misión GOCE. Se trata de un GGM combinado que involucra datos de LAGEOS y 10 años de registros GRACE. También contiene una malla de anomalías de gravedad global DTU10 (Andersen, 2010) sobre el océano, más el EGM2008 a partir del grado 370 en adelante, lo que permite que el modelo alcance su máximo desarrollo.

**Tabla 1.** Listado de los modelos geopotenciales utilizados y el detalle de la información incluida en cada caso. A: altimetría; E: EGM2008; G: gravedad terrestre; T: topografía; S: satelital.

Modelo	Año	Grado máximo	Información incluida
SGG-UGM-2	2020	2190	A, E, S(Grace), S(Goce)
XGM2019e_2159 (XGM)	2019	2190	A, G, S(GOCO06s), T
EIGEN-6C4	2014	2190	A, G, S(Goce), S(Grace), S(Lageos)
EGM2008	2008	2190	A, G, S(Grace)

El XGM2019e\_2159 (XGM, Zingerle *et al.*, 2020) incluye información satelital del modelo GOCO06s en la larga longitud de onda hasta grado y orden 300, combinado con anomalías de gravedad sobre el mar y la tierra provistas por la NGA (National Geospatial-Intelligence Agency). La información de corta longitud de onda de este modelo es aumentada a partir de anomalías topográficas sobre la tierra y del DTU13 (Andersen *et al.*, 2014) sobre los océanos.

Finalmente, el modelo SGG-UGM-2 (Liang *et al.*, 2020) incorpora información de las últimas misiones GOCE y GRACE, presenta una base actualizada de anomalías de gravedad marinas y se completa con el EGM2008.

## TRABAJO REALIZADO

### Puntos nivelados para este trabajo

Con el objetivo de trasladar alturas IGN a la zona de mayor interés, donde se requiere el MDT, se realizó una nivelación geométrica de ida y vuelta desde el PF27N(352) ubicado a la vera de la RN40, en la localidad de Londres, hasta una marca fija en el acceso al sitio arqueológico. Recorriendo el camino vehicular la distancia entre los puntos mencionados es de 5,5 km, a lo largo de los cuales se materializaron 4 puntos fijos (PF1,2,3,4) y otros intermedios. En la Figura 1 se muestran los pilares existentes, una marca auxiliar BASE y los puntos nivelados para este trabajo (zoom

de la figura). En BASE operó un receptor GNSS en forma cuasi permanente para facilitar el posicionamiento de las nuevas marcas. El punto altimétrico PF27N(352) está a pocos metros de PF1.

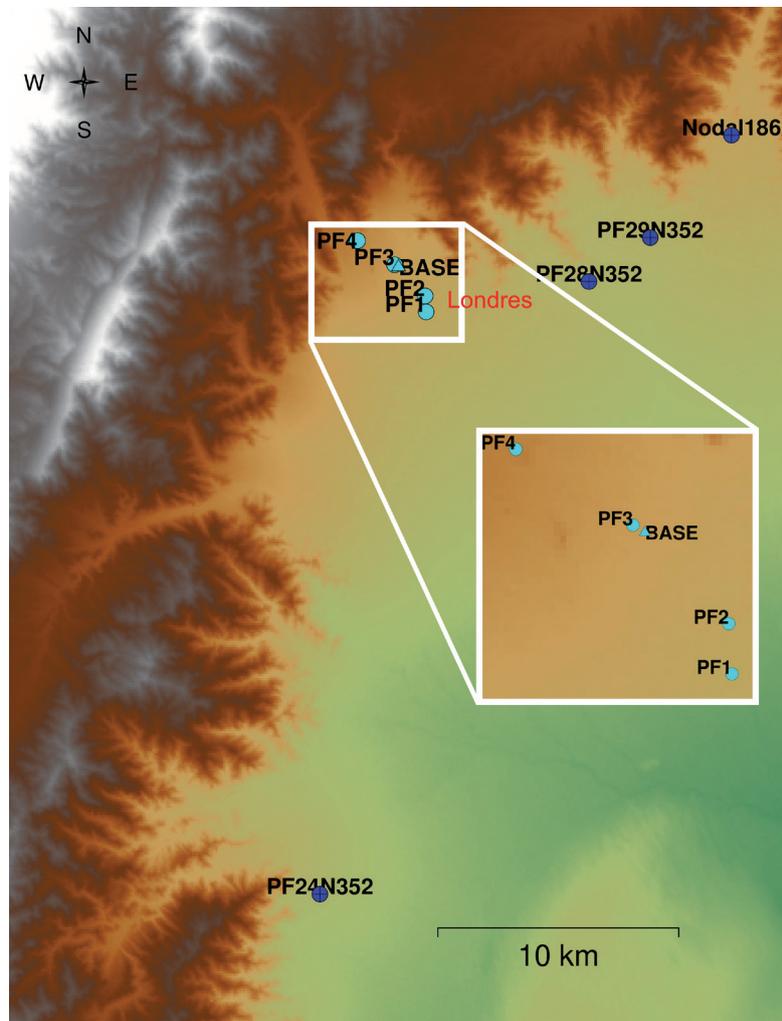


Figura 1. Distribución de los puntos con altura nivelada (PF1 a 4, círculos cian) con zoom incluido, punto auxiliar BASE (triángulo cian) y puntos con alturas SRVN16 (círculos azules).

La nivelación se realizó con un nivel óptico de la marca comercial Pentax modelo AL 320, que cuenta con un aumento de 32X. Se utilizó una mira topográfica con graduación de un centímetro, un trípode de aluminio y bases de apoyo para mira “sapo” (Figura 2).

Previo a la campaña de medición se verificó el estado del instrumento, realizando los procedimientos establecidos en la norma ISO 17123-2:2001. Este ensayo fue realizado por el Grupo de Metrología del Departamento de Agrimensura de la Facultad de Ingeniería de la UNLP. Las pruebas efectuadas demostraron que el equipo era apto para realizar las labores requeridas. Luego de la campaña de medición, se repitió el mismo procedimiento para verificar que el equipo no se había descorregido. Nuevamente se verificó el correcto estado del nivel.



Figura 2. Instrumental utilizado para realizar la nivelación.

Con el objetivo de tener un control de cierre alimétrico, la nivelación se realizó en ida y vuelta, por lo que la longitud del tramo nivelado fue de 11,2 km (de acuerdo a las distancias determinadas por estadimetría).

La medición comenzó en el punto fijo alimétrico PF27N(352), cuya altura SRVN16 es de 1.233,313 m. Esta altura se trasladó hasta una marca fija situada en el ingreso del sitio arqueológico, denominada PF4 (Figura 3); para luego realizar el recorrido inverso.

Bajo la hipótesis utilizada en Topografía de que la suma de los desniveles geométricos debe ser igual a cero en un circuito cerrado, se realizó un control de cierre y la posterior compensación de las cotas deducidas.

Además del punto fijo PF4, también se nivelaron los puntos fijos PF1, PF2 y PF3. Los cuatro fueron medidos posteriormente con GNSS de doble frecuencia y en modo diferencial con el objetivo de determinar la ondulación geoidal.

Dadas las características de este trabajo de nivelación, se requirieron 144 estaciones de nivel, 11 puntos de control nivelados en la ida y la vuelta y 115 puntos de paso.

La compensación de las alturas se realizó en función de la distancia acumulada a cada punto. Al compensar las alturas se atenúa la influencia del “*error de horizontalidad*” y del “*error de puntería*”, ambos de tipo accidental, sobre las lecturas de mira.



Figura 3. Punto PF4 materializado por una estaca en el acceso al sitio arqueológico.

### Resultados de la nivelación

Siguiendo la metodología descrita, el error de cierre de la nivelación geométrica fue de 12 mm. Esta calidad altimétrica es muy adecuada para ser utilizada en combinación con las determinaciones GNSS.

En la Tabla 2 se muestran los desniveles determinados respecto al PF27N(352) y las alturas de los puntos PF1, PF2, PF3 y PF4, utilizadas más tarde en el análisis del geode.

En función del error de cierre obtenido, y según los criterios utilizados por el IGN (IGN, 2017), el circuito nivelado equivale a una línea de nivelación del tipo “Topográfica”, utilizadas para densificar redes altimétricas.

**Tabla 2.** Desniveles y alturas obtenidas mediante nivelación geométrica.

Designación	Desnivel respecto a PF27N(352) [m]	Altura [m]
PF27N(352)	-	1.233,313
PF1	-0,832	1.232,481
PF2	10,799	1.244,112
PF3	65,200	1.298,513
PF4	136,509	1.369,822

La nivelación permitió trasladar las cotas hacia la zona de El Shincal de Quimivil manteniendo la precisión deseada. La Tabla 3 lista todos los puntos con sus coordenadas geodésicas, las alturas ortométricas y niveladas, las ondulaciones del geoide y los gradientes de la ondulación geoide. Fueron ordenados en dos sentidos; Noreste hacia el Sur (NE a S) y desde el Sur al Noroeste (S a NO).

**Tabla 3.** Puntos de GNSS/nivelación ordenados según los sentidos preponderantes junto con sus coordenadas geodésicas, sus alturas SRVN16 y los gradientes de ondulación del geoide.

Punto	$\phi$ [°]	$\lambda$ [°]	h [°]	HSRVN16 [m]	dist. [km]	DN / km	
Nodal186	-27,65011322	-67,02697664	1.286,466	1.254,807			NE
PF29N(352)	-27,68891314	-67,06126347	1.205,747	1.174,439	5,43	-0,065	a
PF28N(352)	-27,70552558	-67,08713125	1.192,092	1.160,801	3,13	-0,005	S
PF24N(352)	-27,93723446	-67,20054205	1.164,501	1.134,166			
PF1	-27,71705198	-67,15575585	1.264,141	1.232,481 *	25,03	0,053	S
PF2	-27,71101769	-67,15617759	1.275,851	1.244,112 *	0,67	0,118	a
PF3	-27,69918376	-67,16899348	1.330,508	1.298,513 *	1,92	0,133	NO
PF4	-27,6900663	-67,18467862	1.402,093	1.369,822 *	1,84	0,150	

El gradiente de la ondulación geoidal GDN, en m/km, se calcula como:

$$GDN = (N2-N1) / d$$

donde N es la ondulación geoidal en los puntos involucrados, expresada en metros, y d es la distancia elipsoidal en kilómetros.

Como es de esperar, los gradientes (m/km) en valor absoluto aumentan sensiblemente hacia las zonas más altas; manteniéndose en el mismo orden sobre la RN40.

En la Tabla 3 hemos incluido un asterisco en las alturas de los puntos nivelados, ya que en su determinación no fueron incluidas mediciones de gravedad. En consecuencia, no son alturas ortométricas y las denominamos “alturas niveladas”. Está previsto sumar mediciones de gravedad en la zona y extender la nivelación geométrica hacia el Oeste, donde el comportamiento del Campo de la Gravedad es de particular interés. En esas condiciones podremos calcular rigurosamente nuevas alturas ortométricas y las correspondientes ondulaciones geoidales. No obstante, el tramo que no incluye gravedad es de tan solo 5 km, por lo que consideramos que los valores calculados son una buena aproximación para el análisis de los modelos de geoide existentes.

## Evaluación regional del geoide

En cada punto se calcula la diferencia entre la ondulación geoidal determinada observacionalmente (Nobs) y la calculada con cada modelo de geoide analizado (Nmod).

$$FD(P) = Nobs(P) - Nmod(P)$$

A excepción del Geoide-Ar16, la evaluación de los modelos geopotenciales globales (Tabla 4), contiene una corrección de sesgo, aplicada con el fin de evitar discrepancias debidas a diferencias entre el datum global de cada modelo y el local (Sansò y Sideris, 2013).

**Tabla 4.** Estadística de FD para los modelos geopotenciales globales y el modelo regional Geoide-Ar16 sobre el total de puntos (Figura 1).

Est. / modelo (2190)	Egm2008	EIGEN6C4	XGM	SGG-UGM-2	Geoide-Ar16
$\sigma$ [m]	0,039	0,028	0,052	0,027	0,037
max [m]	0,059	0,042	0,085	0,038	-0,002
min [m]	-0,066	-0,035	-0,096	-0,039	-0,1
promedio [m]	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,062

Los resultados de la Tabla 4 indican una calidad similar para todos los modelos analizados, destacándose el promedio de las diferencias para el Geoide-Ar16.

Sin embargo, de acuerdo con Gruber y Willberg (2019) este tipo de análisis debe realizarse teniendo en cuenta que la información de GNSS/nivelación contiene todo el espectro de frecuencia; mientras que los modelos, tienen un límite en grado 2190. Por lo tanto, el error de omisión debe estudiarse removiendo previamente la alta frecuencia. Siguiendo lo propuesto por los mencionados autores, hemos realizado el estudio sobre grado y orden 360, 720 y 1080. El orden 360 responde al grado mínimo de un modelo combinado; 720 se corresponde con la máxima longitud de onda, antes que, como en EGM2008 y XGM, se incluyan datos de relleno utilizando anomalías de tipo RTM. El 1080 es un grado intermedio frente al 2190 tal como se utilizó en Gomez *et al.* (2017).

La alta frecuencia fue removida con el EGM2008 ya que es un modelo que cuenta con una muy buena base de anomalías gravimétricas.

**Tabla 5.** Desvío estándar de FD (metros) para igual grado y orden de los distintos modelos, evaluado sobre los mismos puntos de la Tabla 3.

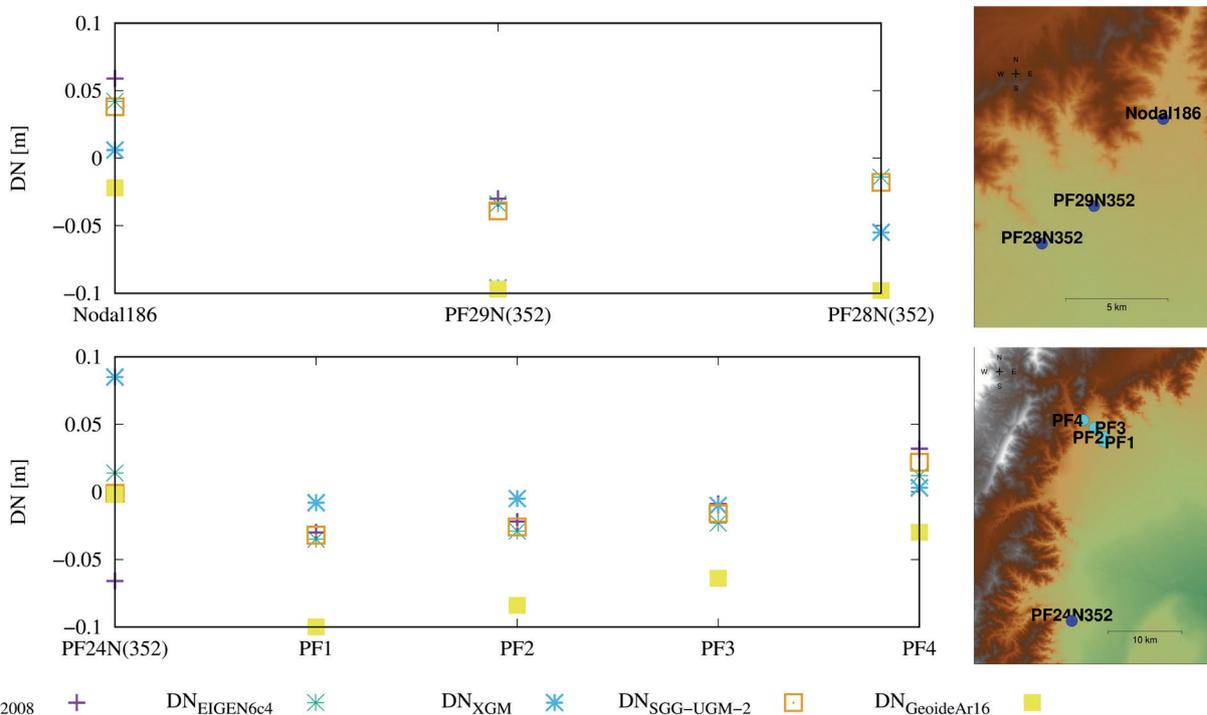
Modelo	360	720	1080
EIGEN6C64	0,037	0,048	0,036
XGM	0,037	0,047	0,046
SGG-UGM-2	0,039	0,038	0,037

La Tabla 5 muestra la convergencia de los modelos hacia valores similares a los de la Tabla 4. Estos resultados sugieren la posibilidad de que, en la zona de estudio, todos los modelos analizados estén incluyendo la misma base gravimétrica.

En la Tabla 6 se realiza un análisis sobre las diferencias de ondulaciones geoidales en dos direcciones; NE-S y S-NO. Esta Tabla se complementa con la Figura 4 tal que en ambas se advierte que las mismas no muestran correlación con la ubicación de los puntos.

**Tabla 6.** Diferencias en metros entre la ondulación geoidal observada y la modelada según la ubicación de los puntos en sentidos NE a S y S a NO.

Puntos / modelos	Alineación	DN EGM2008	DN EIGEN6C4	DN XGM	DN SGG-UGM-2	DN Geoide Ar16
Nodal186	NE a S	0,059	0,042	0,006	0,038	-0,022
PF29N(352)		-0,030	-0,034	-0,096	-0,039	-0,097
PF28N(352)		-0,013	-0,014	-0,055	-0,018	-0,098
PF24N(352)	S a NO	-0,066	0,014	0,085	-0,001	-0,002
PF1		-0,030	-0,035	-0,008	-0,032	-0,100
PF2		-0,022	-0,029	-0,005	-0,026	-0,084
PF3		-0,009	-0,023	-0,010	-0,016	-0,064
PF4		0,032	0,012	0,003	0,022	-0,030



**Figura 4.** Distribución de las diferencias entre la ondulación geoidal observada y la ondulación geoidal modelada, según la ubicación de los puntos en sentido NE-S (arriba) y S-NO (abajo) acompañadas por las imágenes correspondientes.

El modelo Geoide-Ar16 arroja la mayor diferencia (-0,10 m) con respecto a los valores observados en la localidad de Londres, sobre la RN40. Curiosamente, vuelve a disminuir hacia el Oeste y en el acceso al sitio arqueológico es de -0,03 m.

La máxima diferencia ocurre en el punto PF1, que se encuentra a pocos metros del PF27N(352). El último no fue ocupado con GNSS por hallarse en una zona muy arbolada.

Es oportuno considerar que el Geoide-Ar16 es un modelo gravimétrico ajustado con GNSS/nivelación. Por eso, si puntos como PF24N(352) y Nodal 186 hubieran sido utilizados como condición en el ajuste, es de esperar que en los mismos las diferencias sean mínimas. En cambio, otros como el PF27N(352) podrían haber quedado libres en el mismo ajuste y mostrar ahora un apartamiento decimétrico.

## CONCLUSIONES

Con el objetivo de convertir en alturas ortométricas las alturas elipsoidales de un MDT obtenido a partir de LiDAR aéreo, fueron analizados distintos modelos de geoide en plena zona cordillerana del norte argentino. La calidad de las alturas originales es de 7 cm (RMS), por lo cual es deseable contar con un modelo geoidal de calidad similar.

La información altimétrica de la zona se distribuye sobre la Ruta Nacional N° 40 (RN40); por eso fue necesario realizar una nivelación geométrica para llevar alturas físicas al sector de mayor interés (sitio arqueológico inca El Shincal de Quimivil). Esta nivelación permitió transportar alturas SRVN16 en un tramo de 5 km con una calidad del orden de 1 cm.

A partir de mediciones geodésicas GNSS sobre todos los puntos altimétricos disponibles, fueron analizados tres modelos geopotenciales modernos y el modelo de geoide oficial de la Argentina, Geoide-Ar16. Los valores estadísticos muestran comportamientos similares, pero el modelo EIGEN6C4 arroja los mejores resultados, con un RMS de 3,6 cm y diferencias máximas de 7 cm.

En consecuencia, considerando las mayores diferencias del EIGEN6C4, el MDT en alturas ortométricas podría ser obtenido con un RMS de 10 cm en altura.

No obstante, es evidente la necesidad de ampliar la cobertura de información del campo de la gravedad, por ejemplo, extendiendo la nivelación geométrica unos 7 km más hacia el Oeste y sumando mediciones de gravedad.

Por otra parte, el modelo Geoide-Ar16 se ajusta muy bien en Belén, a 13 km al noreste de Londres y en otro punto a 25 km al sur de la misma localidad, pero alcanza una diferencia de 10 cm entre ambos puntos, justamente en Londres.

En consecuencia, sería deseable que las ondulaciones geoidales determinadas en este trabajo con GNSS y nivelación geométrica, entre la RN40 y El Shincal de Quimivil, sean incorporadas cuando se realice una actualización del Geoide-AR16.

## REFERENCIAS

- Andersen, O. B. 2010. The DTU10 Gravity field and Mean sea surface. *Second international symposium of the gravity field of the Earth (IGFS2)*. Fairbanks, Alaska. AK, USA.
- Andersen, O. B., Knudsen, P., Kenyon, S. C. y Holmes, S. 2014. Global and arctic marine gravity field from recent satellite altimetry (DTU13). En: *76th EAGE Conference and Exhibition 2014*. Resumen extendido. Disponible en: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20140897>.
- Cabrera, A. 1951. Territorios Fitogeográficos de la República Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 4 (1-2): 21-65.
- Förste, Ch., Bruinsma, S. L., Abrikosov, O., Lemoine, J. M., Schaller, T., Götze, J., Ebbing, J., Marty, J. C., Flechtner, F., Balmino, G. y Biancale, R. 2014. EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. *5th GOCE User Workshop*. Paris. Disponible en: [http://icgem.gfz-potsdam.de/tom\\_longtime](http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime) [Consultado 01-02-2023]
- Gruber, T. y Willberg, M. 2019. Signal and error assessment of GOCE-based high resolution gravity field models. *Journal of Geodetic Sciences* 9 (1): 71-86. Disponible es: <https://doi.org/10.1515/jogs-2019-0008>
- Gomez, M. E., Perdomo, R. y Del Cogliano, D. 2017. Validation of recent geopotential models in Tierra del Fuego. *Acta Geophysica*. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11600-017-0085-y>
- Hirt, C., Featherstone, W. E. y Marti, U. 2010. Combining EGM2008 and SRTM/DTM2006.0 residual terrain model data to improve quasigeoid computations in mountainous areas devoid of gravity data. *Journal of Geodesy* 84: 557-567. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0395-1>
- IGN. 2016. *Red Altimétrica de la República Argentina*. Presentación Oficial. Disponible en: [https://ramsac.ign.gob.ar/posgar07\\_pg\\_web/documentos/Red\\_Altimetrica\\_de\\_la\\_Republica\\_Argentina.pdf](https://ramsac.ign.gob.ar/posgar07_pg_web/documentos/Red_Altimetrica_de_la_Republica_Argentina.pdf)
- IGN. 2017. *Dirección de Geodesia, Red de Nivelación de la República Argentina*. Disponible en: [https://ramsac.ign.gob.ar/posgar07\\_pg\\_web/documentos/Informe\\_Red\\_de\\_Nivelacion\\_de\\_la\\_Republica\\_Argentina.pdf](https://ramsac.ign.gob.ar/posgar07_pg_web/documentos/Informe_Red_de_Nivelacion_de_la_Republica_Argentina.pdf) [Consultado 14-07-2022]
- Jekely, C. 2009. Omission error, data requirements, and the fractal dimension of the geoid. En: Sneew, et al. Eds. *VII Hotine- Marussi Symposium on Mathematical Geodesy*. Proceedings of the symposium in Rome 137: 6-10. Springer, Berlin. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22078-4>
- Liang, W., Li, J., Xu, X., Zhang, S. y Zhao Y. 2020. A High-Resolution Earth's Gravity Field Model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, Satellite Altimetry, and EGM2008. *Engineering* 6 (8): 860-878. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.05.008>
- Mayer-Gürr, T. y The GOCO Team. 2015. The combined satellite gravity field model GOCO05s. *EGU2015-12364*, EGU general assembly, Vienna, Austria. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/277325861\\_The\\_new\\_combined\\_satellite\\_only\\_model\\_GOCO05s](https://www.researchgate.net/publication/277325861_The_new_combined_satellite_only_model_GOCO05s). [Consultado 25-05-2022]

- Moralejo, R. A., Gobbo, D., Del Cogliano, D. y Pinto, L. 2018. Aplicación de tecnología LIDAR en El Shincal de Quimivil, Londres, Catamarca. *Arqueología* 24 (3): 165-184.
- Morelli, C., Gantar, C., McConnell, R. K., Szabo, B. y Uotila, U. 1972. The international gravity standardization net 1971 (IGSN 71). *DTIC Document*.
- Morlans, M. C. 1995. Regiones naturales de Catamarca. Provincias geológicas y provincias fitogeográficas. *Revista de Ciencia y Técnica II* (2): 1-41.
- Niz, A. E., Toledo, J. C. y Oviedo J. A. 2009. *Impacto de la erosión hídrica en el sitio arqueológico Shincal de Quimivil – Londres – Belén*. Instituto de Monitoreo y Control de la Degradación Geoambiental (IMCoDeG), Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca. Informe presentado a la Dirección de Antropología de la Provincia de Catamarca. San Fernando del Valle de Catamarca.
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C. y Factor, J. K. 2012. The development and evaluation of the Earth gravitational model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research* 117 (B04406): 1-38. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>
- Piñón, D.A., Zhang, K., Wu, S. y Cimbaro, S.R. 2017. A new Argentinean Gravimetric Geoid Model: GEOIDEAR. *International Association of Geodesy Symposia*, Springer International Publishing AG. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/1345\\_2017\\_267](https://doi.org/10.1007/1345_2017_267)
- Raffino, R. A. (Ed.). 2004. *El Shincal de Quimivil*. Editorial Sarquís.
- Raffino, R. A., Iácona, L. A., Moralejo, R. A., Gobbo, D. y Couso, G. (Eds.). 2015. *Una capital inka al sur del Kollasuyu: El Shincal de Quimivil*. Fundación de Historia Natural Félix de Azara, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Sansò, F. y Sideris, M. (Eds.). 2013. *Geoid determination. Theory and Methods. Lecture notes in earth system sciences*. Springer, Berlin.
- Schwarz, K. P., Sideris, M. G. y Forsberg, R. 1990. The use of FFT techniques in physical geodesy. *Geophysical Journal International* 100: 485-514.
- Torge, W. y Müller, J. 2012. *Geodesy*. 4th Edition. Walter de Gruyter, Berlin. ISBN 978-3-11-20718-7.
- Tsoulis, D. y Patlakis, K. 2013. A spectral assessment review of current satellite only and combined Earth gravity models. *Reviews of Geophysics* 51: 186-243
- Vergos, G. S., Tziavos, I. N. y Sideris, M. G. 2006. On the validation of CHAMP- and GRACE- type EGMs and the construction of a combined model. *Geodesy and Cartography* 55 (3): 115–131
- Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T. y Oikonomidou, X. 2020. The combined global gravity field model XGM2019e. *Journal of Geodesy* 94 (7). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01398-0>