



**ANÁLISIS Y AJUSTE DE MODELOS DIGITALES  
DE ELEVACIONES EN LA REGIÓN CENTRAL DE  
LA ARGENTINA. INTEGRACIÓN DE MODELOS  
GEOPOTENCIALES E INFORMACIÓN  
ALTIMÉTRICA LOCAL.**

**Tesis de Maestría presentada por**

**LUCRECIA GALVAN**

**ante la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísica de la  
Universidad Nacional de La Plata para optar el grado  
académico de**

**MAGISTER EN GEOMATICA**

**Director de Tesis: Dr. Daniel Del Cogliano  
Codirector de Tesis: Dra. Claudia Tocho**

**Jurado de Tesis: Lic. Raúl Perdomo, Dra. María Cristina  
Pacino y Dra. María Eugenia Gómez.**

**La Plata. Provincia de Buenos Aires. Argentina.  
16 de Octubre de 2014**

*A mi esposo Daniel, a mis hijas Viviana y Mariana.*

*A la memoria de mi padre, a mi madre.*

## AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer:

- al Dr. Daniel Del Cogliano (UNLP<sup>1</sup>) quien como director definió desde el principio los principales objetivos de esta Tesis, por su asesoramiento y por generar en mí, mediante el aliento permanente, un constante esfuerzo de continuar en este camino. Agradezco su comprensión y paciencia ante cada duda que se presentó y las respuestas claramente orientadoras ante cada requerimiento.

- a la Dra. Claudia Tocho (UNLP) que como codirectora de este Tesis mostró una permanente predisposición y calidez a la evacuación de mis inquietudes, así como su apoyo y aliento para la finalización de este trabajo.

- al Dr. Ing. Ftal. Hugo Zerda (UNSE<sup>2</sup>) por proporcionarme generosamente su visión de la Teledetección y evacuar las consultas realizadas en numerosas oportunidades.

- a la Dra. Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos (Universidad de São Paulo) por su cálida respuesta a mis requerimientos.

- a la Dra. Claudia Carabajal (NASA<sup>3</sup>) por atender mis inquietudes y proporcionarme material enriquecedor para esta Tesis.

- a mi amiga y colega Ing. Agrim. Claudia Infante (UNSE) por ser parte de este camino compartido que quedará en nosotras para siempre.

- a mi amigo y colega Ing. Agrim. Iber Hugo Goitea (UNSE).

- a la Maestría en Geomática de la FCAG<sup>4</sup> y la FI de la UNLP y a sus profesores y a todos los que de una u otra forma hicieron posible que esta Maestría, de innegable calidad científica, se dictara en nuestro país.

- a mi hermano Luis y flia, a Lia y Cachi.

- a mis amigas y amigos.

- a mis amigas del colegio.

- Muchas Gracias!

---

<sup>1</sup> Universidad Nacional de La Plata.

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Santiago del Estero.

<sup>3</sup> National Aeronautics and Space Administration.

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas.

## INDICE DE CONTENIDOS

<b>Capítulo 1 Introducción.</b>	<b>8</b>
1.1 Introducción.....	8
1.2 Objetivos.....	8
1.3 Estructura de la Tesis.....	8
<b>Capítulo 2 Los modelos digitales de elevación. La misión SRTM</b>	<b>10</b>
2.1 El Modelo Digital de Elevaciones.....	10
2.2 La misión topográfica de radar del transbordador.....	12
<b>Capítulo 3 Análisis de los datos disponibles para la zona de trabajo.</b>	<b>23</b>
3.1 Zona de Estudio.....	23
3.2 Redes Geodésicas Nacionales.....	23
3.3 Redes Geodésicas Provinciales.....	28
3.4 Red Altimétrica Nacional.....	30
3.5 Red Gravimétrica Nacional.....	31
<b>Capítulo 4 Comparación del modelo digital de elevaciones en puntos discretos.</b>	<b>33</b>
4.1 Detección de errores en los DEMs.....	33
4.2 Evaluación del SRTM DEM en la región de estudio.....	34
4.3 Definición de zonas con características topográficas similares.....	41
4.4 Evaluación del modelo SRTM en puntos POSGAR07.....	43
<b>Capítulo 5 Integración de información local.</b>	<b>57</b>
5.1 Antecedentes sobre la evaluación del SRTM.....	57
5.2 Criterios para el filtrado de los datos POSGAR07.....	58
5.3 Integración de datos POSGAR07 al SRTM DEM.....	61
<b>Capítulo 6 Modelo digital de alturas elipsoidales.</b>	<b>71</b>
6.1 Obtención del modelo digital de alturas elipsoidales.....	71
6.2 Los Modelos del Campo de Gravedad Global.....	71
<b>Capítulo 7 Nuevo modelo digital de elevaciones.</b>	<b>75</b>
7.1 Descripción general del modelo EGM2008.....	75
7.2 Cálculo del modelo EGM2008.....	76
7.3 Cálculo de la diferencia de los modelos EGM96 y EGM2008.....	77
7.4 Cálculo de un nuevo modelo digital de elevaciones.....	78
7.5 Determinación de la calidad de los modelos EGM96 y EGM2008.....	79
<b>Capítulo 8 Conclusiones.</b>	<b>81</b>
8.1 Futuras actividades propuestas.....	82
<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>84</b>
<b>Anexo 1</b> .....	<b>88</b>
<b>Anexo 2</b> .....	<b>89</b>
<b>Anexo 3</b> .....	<b>90</b>

## RESUMEN

El objetivo general del trabajo es evaluar el comportamiento del modelo de elevaciones SRTM<sup>5</sup> 90m DEM<sup>6</sup> (Modelo Digital de Elevaciones de la Misión Topográfica de Radar del Transbordador) sobre una zona extendida y de topografía muy variada de la República Argentina e incorporar información local al mismo.

La técnica de interferometría de radar se ha analizado y utilizado para explicar el comportamiento del modelo en algunos puntos singulares de la zona de aplicación de esta tesis.

La zona de trabajo incluyó parte de las provincias de Buenos Aires, La Pampa, Mendoza, Río Negro y Neuquén.

Como información de referencia terrestre, se utilizaron puntos pertenecientes a la Red altimétrica del IGN<sup>7</sup> y a la Red POSGAR<sup>8</sup>07.

En particular la Red GEOBA98<sup>9</sup> y su densificación, con puntos altimétricos GPS<sup>10</sup> sobre todo el territorio de la provincia de Buenos Aires, representó la información de referencia que permitió: generar el DEM mejorado, mediante la integración de sus puntos, y la evaluación de su precisión externa.

El DEM mejorado ( $H^{SRTM\ DEMMEJ}$ ) obtenido en este trabajo, para la zona de estudio, representa un avance con respecto al modelo original SRTM 90m DEM v4.1 CGIAR-CSI<sup>11</sup>.

El modelo gravitacional terrestre EGM<sup>12</sup>96 asociado al SRTM 90 m fue analizado y utilizado como indicador del comportamiento de las alturas elipsoidales del geode en la zona de estudio. Este análisis permitió expresar el nuevo DEM mejorado en coordenadas elipsoidales para facilitar su aplicación en relación a las determinaciones GNSS<sup>13</sup> e independizarlo del modelo geopotencial utilizado.

Los nuevos modelos geopotenciales, como el EGM<sup>14</sup>2008, han significado una sensible mejora en la representación del geode en gran parte de nuestro país. Por ello, finalmente se obtiene un modelo de elevaciones cuyas alturas se encuentran referidas al modelo gravitacional terrestre EGM2008 ( $H^{SRTM\ Nuevo}$ ). Las mejoras obtenidas son estimadas poniendo en consideración las características topográficas de las regiones estudiadas. Este nuevo modelo proporciona precisiones de una decena de centímetros.

---

<sup>5</sup> Shuttle Radar Topography Mission.

<sup>6</sup> Digital Elevation Model.

<sup>7</sup> Instituto Geográfico Nacional.

<sup>8</sup> Posiciones Geodésicas Argentinas.

<sup>9</sup> Red Geodésica de Buenos Aires 1998.

<sup>10</sup> Global Positioning System.

<sup>11</sup> Consultative Group on International Agricultural Research-Consortium for Spatial Information.

<sup>12</sup> Earth Gravitational Model 1996.

<sup>13</sup> Global Navigation Satellite System.

<sup>14</sup> Earth Gravitational Model 2008.

## NOMENCLATURA UTILIZADA

AODA Attitude and Orbit Determination Avionics  
ASI Agenzia Spaziale Italiana  
ASP AODA Support Panel  
ATT ASTROS Target Tracker  
BACARA Base de Calibración de la República Argentina  
CI69 Campo Inchauspe 69  
CGIAR Consultative Group on International Agricultural Research-Consortium for Spatial Information.  
DEM Digital Elevation Model  
DESV EST Desviación Estándar  
DTM Digital Terrain Model  
DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
DORIS Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite  
ECM Error cuadrático medio  
EDM Electronic Distance Meters  
EGM96 Earth Gravitational Model 1996  
EGM2008 Earth Gravitational Model 2008  
FCAG Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas  
GCP Ground Control Point  
GE Google Earth  
GEOBA98 Red Geodésica de Buenos Aires 1998  
GFZ GeoForschungsZentrum  
GNSS Global Navigation Satellite System  
GOCE Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer  
GPS Global Positioning System  
GRACE Gravity Recovery and Climate Experiment  
GSFC Goddard Space Flight Center  
IAG International Association of Geodesy  
ICGEM International Centre for Global Earth Models  
IGM Instituto Geográfico Militar  
IGN Instituto Geográfico Nacional  
IGSN71 International Gravity Standardization Net 1971  
INSAR Interferometric Synthetic Aperture Radar  
ITRF International Terrestrial Reference Frame  
JPL Jet Propulsion Laboratory  
KGPS Kinematic Global Positioning System  
KSC Kennedy Space Center  
LED Light Emitting Diode  
LIDAR Light Detection and Ranging  
MRGN Marco de Referencia Geodésico Nacional  
MOP-BA Ministerio de Obras Públicas. Buenos Aires.  
NASA National Aeronautics and Space Administration  
NGA National Geospatial-Intelligence Agency  
NGS National Geodetic Survey  
NSRS National Spatial Reference System  
NIMA National Imagery and Mapping Agency  
NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration  
OASYS Outboard Antenna System  
OSU Ohio State University

PASMA Proyecto Apoyo al Sector Minero Argentino  
PFA Punto Fijo Altimétrico  
POSGAR Posiciones Geodésicas Argentinas  
RAMSAC Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo  
RNAP Red de Nivelación de Alta Precisión  
ScanSAR Scanner Synthetic Aperture Radar  
SIR Shuttle Imaging Radar  
SIRGAS Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas  
SLR Satellite Laser Ranging  
SNR Signal Noise Ratio  
SRTM Shuttle Radar Topography Mission  
TIN Triangulated Irregular Network  
TOPSAR Topographic Synthetic Aperture Radar  
UNLP Universidad Nacional de La Plata  
UNSE Universidad Nacional de Santiago del Estero  
USA United State of America  
USGG 2003 United State Gravimetric Geoid 2003  
WGS84 World Geodetic System 1984

## ***Capítulo 1. Introducción y Objetivos***

### **1.1. Introducción**

El conocimiento de las alturas es fundamental en diversas aplicaciones de las Ciencias de La Tierra y en particular de la Geomática. Desde el análisis de relieves para obras de ingeniería a correcciones gravimétricas con interés geofísico, la necesidad de contar con alturas confiables representa una condición básica.

No obstante, el problema es conceptualmente profundo y es necesario distinguir entre diferentes tipos de alturas de carácter geométrico y físico. Por ejemplo, la información altimétrica inducida de los sistemas de satélites GNSS no es suficiente para la mayoría de las aplicaciones que comprometen el escurrimiento de fluidos y otras magnitudes de la física terrestre. Pero si esa información se combina con un modelo de geoide compatible, es posible obtener alturas físicamente significativas.

Los modelos de elevaciones mundiales basados en interferometría desde satélite, como el SRTM 90, representan una fuente accesible y relevante para disponer de alturas sobre el nivel medio del mar. Pero las precisiones son realmente variables sobre diferentes regiones del planeta. Por ello, en este trabajo se propone avanzar en el manejo de estos modelos y en el análisis de su comportamiento en una región de nuestro país.

Una variante de interés es incorporar información local a estos modelos para ajustarlos de la mejor manera posible a las mediciones sobre el terreno. También en este sentido, se propone realizar un aporte concreto en esta tesis.

Finalmente, el modelo SRTM 90 está referido al elipsoide WGS84<sup>1</sup> y al modelo geopotencial EGM96 (Lemoine et al., 1998). Este último ya ha sido superado claramente por nuevos modelos como el EGM2008 (Pavlis et al., 2012). Por eso, se propone integrar esta información para expresar el modelo de elevaciones ajustado localmente en términos de alturas elipsoidales y de elevaciones referidas a EGM2008.

### **1.2 Objetivos**

El objetivo general del trabajo es evaluar el modelo SRTM 90, introducir mejoras en el mismo, y expresarlo en términos de alturas elipsoidales para ser tratado a posteriori con cualquier modelo de geoide en la zona de interés.

Los objetivos particulares planteados para su logro en la presente tesis son:

- Analizar el modelo digital de elevación, la misión SRTM y modelos geopotenciales provistos por organismos internacionales.
- Determinar el comportamiento de las últimas versiones del modelo SRTM.
- Integrar información altimétrica propia para mejorar el modelo de elevaciones localmente.
- Expresar el modelo en términos de alturas elipsoidales, de modo, que pueda ser utilizado para relacionar determinaciones GNSS y nuevos modelos geoidales.
- Incorporar el modelo EGM2008 en la determinación de un nuevo modelo de elevaciones.

### **1.3 Estructura de la tesis**

Con el propósito de presentar la estructura general de la tesis, en esta Sección se realiza una breve descripción de los contenidos. En el Capítulo 2 se presenta la

---

<sup>1</sup> World Geodetic System 1984.

definición de un Modelo Digital de Elevación, la estructura y captura de datos para la construcción de un DEM. A continuación se presenta el desarrollo histórico del SRTM, la técnica de interferometría de radar, el diseño de la misión y el sistema SRTM. El área de estudio, los sistemas de referencia y las características constructivas de las marcas de las redes geodésicas nacionales, la red gravimétrica y la red de nivelación nacional se presenta en el Capítulo 3. Este análisis permite identificar las marcas con alturas que serán deducidas y reducidas al terreno natural. En el Capítulo 4 se desarrolla una breve introducción teórica sobre la detección de errores en los DEM, se accede a los datos SRTM y se confecciona un mapa de curvas de nivel para la zona de estudio. A continuación se compara el DEM en puntos POSGAR 07 y en puntos de la red de nivelación de alta precisión. Con la finalidad de evaluar el DEM en zonas de características topográficas similares, se calcula un mapa de pendientes para realizar una nueva comparación entre el DEM y las alturas POSGAR07. Se analiza el DEM en los puntos que presentan errores elevados. En el Capítulo 5 se filtran los datos POSGAR07 cuyos errores exceden a los errores obtenidos por evaluaciones externas. Se calcula el modelo SRTM adaptado a una extensa superficie de la provincia de Buenos Aires. A continuación se obtiene un primer modelo mejorado a partir de la información de puntos POSGAR07 y su calidad es evaluada mediante el método de validación cruzada. El uso masivo de la tecnología GNSS produce alturas elipsoidales que no son directamente comparables con los modelos de elevaciones, como el SRTM. En el Capítulo 6 se obtiene un modelo de alturas elipsoidales a partir del SRTM DEM mejorado. La liberación del modelo EGM2008 representa una mejora importante en el modelo global de campo de gravedad EGM96, que puede satisfacer las necesidades de una amplia gama de aplicaciones. Es por ello que en el Capítulo 7 se obtiene un nuevo modelo de elevaciones referido al modelo EGM2008. Se evalúa la calidad de los modelos geopotenciales EGM96 y EGM2008. En el Capítulo 8 se enumeran las conclusiones y se plantean algunas actividades a futuro basadas en los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis.

## Capítulo 2. Los modelos digitales de elevación. La misión SRTM.

En este capítulo se desarrollarán conceptos relativos a los modelos digitales de elevación, se analizará la técnica de interferometría de radar y aspectos relacionados al programa y diseño de la misión SRTM.

### 2.1 El Modelo Digital de Elevaciones

Un modelo digital de elevaciones (DEM) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Un terreno real puede describirse de forma genérica como una función bivariable continua  $z = \zeta(x, y)$  donde  $z$  representa la altitud del terreno en el punto de coordenadas  $(x, y)$  y  $\zeta$  es una función que relaciona la variable con su localización geográfica. En un modelo digital de elevaciones se aplica la función anterior sobre un dominio espacial concreto,  $D$ . En consecuencia, un DEM puede escribirse genéricamente como (Felicísimo, 1999; El-Sheimy et al., 2005):

$$\text{DEM} = (D, \zeta) \quad (2.1)$$

En un DEM la palabra elevación hace hincapié en la medición de la altura por encima de un datum de referencia o la elevación de los puntos en el modelo. DEM se refiere, en general, a la creación de una matriz regular de elevaciones, normalmente cuadrados o un patrón hexagonal sobre el terreno. (El-Sheimy et al., 2005).

Un DTM<sup>1</sup> incluye datos obtenidos sobre el terreno tales como pendiente, aspecto y visibilidad. En un sentido estricto, un DTM representa el relieve del terreno.

Estos términos a menudo se utilizan como sinónimos. Por lo general, el acrónimo DTM se refiere a la altura del terreno en sí. Por el contrario, un DEM incluye la altitud máxima (incluyendo techos de los edificios y las copas de los árboles). Por lo tanto, los modelos generados a partir de la digitalización de la cartografía topográfica producen un DTM, mientras que los derivados de imágenes de satélite serán un DEM o DSM. Por otro lado, los datos de elevación derivados de los sensores como LIDAR<sup>2</sup> se pueden procesar para producir DEM o un DTM. (El-Sheimy et al., 2005; Maune et al., 2007)).

#### 2.1.1 Estructura de datos en el DEM

Los datos elementales de un DEM, esto es la terna  $x, y, z$ , se organizan en modelos que representan las relaciones espaciales y topológicas. Estos modelos de datos se dividen en función de la forma de representación de los datos: vectorial y raster:

Los modelos de datos vectoriales están basados en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices y los modelos de datos raster están basados en localizaciones espaciales, a cada una de las cuales se les asigna el valor de la variable para la unidad elemental de superficie.

Cada modelo de datos puede expresarse mediante diferentes estructuras de datos.

- Contornos:

---

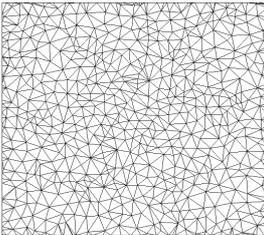
<sup>1</sup> Digital Terrain Model.

<sup>2</sup> Light Detection And Ranging

La estructura básica de los contornos es la polilínea que describe la trayectoria de las curvas de nivel. El DEM está constituido por el conjunto de curvas de nivel de la zona representada, separadas por intervalos constantes de altitud (equidistancia), más un conjunto de puntos acotados que definen lugares singulares como cimas, depresiones, etc. Se usan habitualmente en los mapas impresos. Poco útil para el manejo por medios informáticos. Se usan normalmente mediante transformaciones a otras estructuras (TIN y matrices). Es importante tener en cuenta que la elección de la equidistancia de las curvas está en función de la precisión vertical de las alturas de un DEM. Por ejemplo si la precisión de las alturas es de 18.2 cm la equidistancia entre las curvas no debe ser menor a 30.48 cm. (Maune et al., 2007, pág 458).

- TIN<sup>3</sup>: red de triángulos irregulares:

Esta estructura de datos se compone de un conjunto de triángulos irregulares adosados (Fig. 2.1). Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales y se adosan sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve. El método de triangulación más utilizado es la triangulación de Delaunay.



**Fig. 2.1:** vista geométrica de un TIN. Los puntos de muestra del terreno están conectados en un conjunto de triángulos que no se superponen (Maune et al., 2007).

- Matrices regulares: malla de celdas cuadradas.

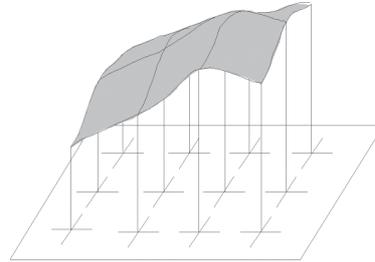
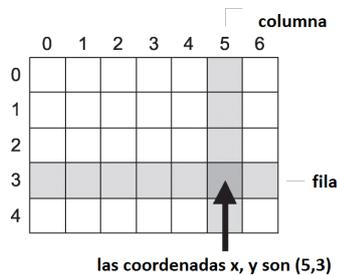
Una cuadrícula es un arreglo rectangular de celdas, cada una de las cuales almacena un valor. En el caso de un DEM, espaciado uniformemente, cada celda almacena el valor de la elevación para el centroide de la misma. Para la mayoría de los modelos, las cuadrículas son generalmente cuadradas, tienen la misma resolución en la dirección E-O y N-S y están organizadas en filas y columnas de datos (Fig. 2.2). Cuando se utiliza la red para representar superficies, el valor de la celda de la red representa el valor de la superficie en el centroide de cada celda. Por otro lado se supone que el área entre centros de las celdas es un valor entre aquellos valores de las celdas adyacentes (Fig. 2.3). Una celda de la cuadrícula representa un área, la celda tiene el mismo valor y los cambios en el valor sólo se producen en la frontera de las mismas. Los elementos de una cuadrícula de 2 dimensiones se llaman "píxeles" (Fig. 2.2). (Felicísimo, 1999, El-Sheimy et al., 2005, Maune et al., 2007).

- Quadrees: matrices imbricadas en una estructura jerárquica.

Se basa en una subdivisión recursiva del espacio del plano/mapa a representar, es decir una división en cuadrantes y subcuadrantes uniformes. El proceso de subdivisión continúa hasta que se alcance la uniformidad

<sup>3</sup> Triangulated Irregular Network.

temática en cada cuadrante o hasta que se consiga un nivel prefijado de resolución espacial. Las matrices jerárquicas permiten solucionar el principal problema de las matrices regulares: su resolución espacial constante. (Bosque Sendra, 2000, El-Sheimy et al., 2005)



**Figura 2.2:** estructura básica de una cuadrícula (Maune et al., 2007).

**Figura 2.3:** interpretación de la superficie de una cuadrícula (Maune et al., 2007).

### 2.1.2 La captura de datos para la construcción del DEM

La captura de datos constituye el paso inicial en el proceso de construcción del DEM, e incluye la fase de transformación de la realidad geográfica a la estructura digital de datos. La calidad de los datos es el principal factor limitante para los tratamientos que se realicen posteriormente. Tras la obtención de los datos, estos deben ser estructurados para formar el DEM de alguna de las formas presentadas.

Los métodos básicos para la obtención de los datos de altitudes se basan en:

Métodos directos: cuando las medidas se realizan directamente sobre el terreno. Altimetría (altímetros radar o láser transportados por plataformas aéreas o satélites). GPS. Levantamiento topográfico.

Métodos indirectos, cuando se utilizan documentos analógicos o digitales elaborados previamente. Restitución: Estéreo-imágenes digitales (imágenes desde satélite). Estéreo-imágenes analógicas (fotografía aérea). Interferometría de radar. Digitalización de mapas topográficos: Automática (escáner y vectorización). Manual (tableta digitalizadora). (Felicísimo, 1999, El-Sheimy et al., 2005)

La temática a abordar se encuentra entre los métodos indirectos de restitución a partir de pares de imágenes por interferometría de radar.

### 2.2 La misión topográfica de radar del transbordador

La misión SRTM produjo el primer DEM de alta resolución de la Tierra y el más completo hasta el momento. El proyecto fue una iniciativa conjunta de la NASA, la NGA<sup>4</sup> del Departamento de Defensa de Estados Unidos, el DLR<sup>5</sup> y la ASI<sup>6</sup>. El vuelo se llevó a cabo en el mes de febrero del año 2000. Se utilizaron dos antenas de radar para obtener datos de interferometría de radar y luego fueron procesados a datos topográficos digitales con resolución de un segundo de arco.

<sup>4</sup> National Geospatial-Intelligence Agency.

<sup>5</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

<sup>6</sup> Agenzia Spaziale Italiana.

### 2.2.1 La necesidad de la topografía global

El conocimiento de la forma de la superficie de la Tierra es la base de las geociencias modernas. Entre las aplicaciones de un DEM de calidad se pueden mencionar desde el modelado hidrológico de inundaciones y escorrentía, la elaboración de teorías de fricción de la capa límite atmosférica hasta los sistemas de navegación aérea y resultan de interés para una amplia gama de actividades de campo tanto en los sectores civiles como militares.

Los países han obtenido y aún mantienen bases de datos cartográficos mediante el uso de técnicas convencionales. Esto ha generado desigualdad en la calidad de los mapas e inconsistencia a lo largo de las fronteras nacionales, ya que, a menudo, están referenciados a datums locales. En muchas partes del mundo se carecían de datos topográficos de calidad.

Los esfuerzos realizados para la obtención de DEMs de escala y resolución consistente por medios convencionales demostraron ser extremadamente difíciles, costosos e inaccesibles desde el punto de vista de los límites políticos. Las exigencias del control terrestre, las zonas de bajo contraste y la cobertura de nubes de los sistemas de mapeo estéreo-ópticos, imponían la necesidad de implementar nuevas tecnologías.

La aparición, en la década de 1990, de la interferometría de radar de apertura sintética (InSAR<sup>7</sup>) permitió a las naciones que tenían un buen desarrollo espacial la posibilidad de crear un DEM mundial de manera eficiente y asequible. En tal sentido la misión SRTM demostró el poder de la nueva técnica.

La técnica InSAR, usa las mediciones de diferencia de fase derivada a partir de dos imágenes de radar adquiridas con una base muy pequeña en relación a la altura (por lo general  $0.0002 = 60 \text{ m} / 225000 \text{ m}$ ) para medir los datos de elevación. La precisión se obtiene mediante una cuidadosa medición de la base y la orientación y la ubicación de la plataforma en relación con un sistema de coordenadas de referencia.

### 2.2.2 Desarrollo del SRTM: El programa de radar de imagen del transbordador.

El transbordador espacial entró en funcionamiento en el año 1981, marcando el comienzo de una nueva era de misiones de sensores remotos de órbita baja respecto de la Tierra, montado en una nave espacial reutilizable, que tenía tripulación a bordo. Los instrumentos a bordo se denominaron SIR<sup>8</sup> – A hasta el SIR – C. El desarrollo histórico del programa se muestra sintéticamente en la tabla 2.1.

Año Misión	Radar	Banda	Frec. (Ghz)	Long. Onda (cm)	Polarización	Angulo de Visión (Grados) desde Nadir	Ancho Cobertura (km)	Resol (m)	Altura de Vuelo (km)
1981	SIR-A	L	1.275	23.5	HH	45° (Fijo)			
1984	SIR-B	L	1.275	23.5	HH	15° a 60°			
1994	SIR-C/	L	1.275	23.5	Polarización completa VV	17° a 63°	15-90	90x90	225
	X-SAR	X	9.68	3.1			(L y C) 30x30	15-40 (X)	
2000	Radar C	L	1.275	23.5	Polarización completa VV	30° a 60° 54.5°	15-90	90x90	225
	Radar X	X	9.68	3.1			15-90 15-40	30x30	

**Tabla 2.1:** Historia del SRTM. (Farr et al., 2007; Massonnet et al., 2008).

<sup>7</sup> Interferometric Synthetic Aperture Radar.

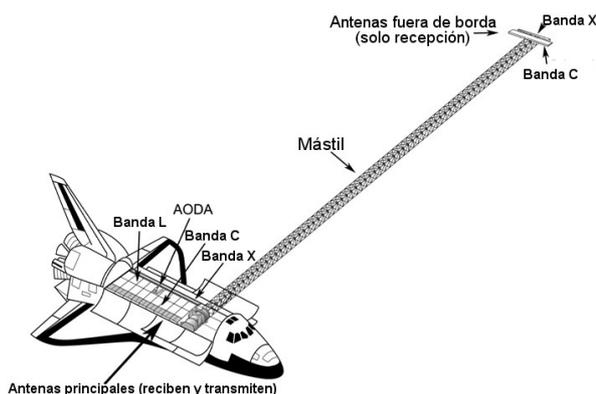
<sup>8</sup> Shuttle Imaging Radar.

### 2.2.3 Objetivos y requisitos de desempeño del SRTM

El objetivo de la misión SRTM fue adquirir un DEM para toda la Tierra entre los 60° de latitud norte y 56° de latitud sur, casi el 80 por ciento de la superficie terrestre. El producto cartográfico consiste de una cuadrícula de 1 x 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m por 30 m), con un error de altura absoluta vertical lineal menor que 16 m, un error de altura relativa vertical lineal menor que 10 m, el error de posición absoluta circular menor que 20 m y el error de posición relativa circular menor que 15 m. El error de la altura relativa de los datos del SRTM en la banda X se estimó menor que 6 m. Todos los errores citados están en el nivel de confianza del 90%.

### 2.2.4 Presentación de la Misión

El SRTM utilizó dos radares de apertura sintética, un sistema en la banda C (JPL<sup>9</sup>) y un sistema en la banda X (DLR). El objetivo operacional del radar C era generar cobertura de mapas contiguos de acuerdo a los objetivos de la misión. El objetivo del radar X era generar datos a lo largo de franjas discretas de 50 km de ancho (Fig. 2.5). El radar X no se empleó como ScanSAR<sup>10</sup>, tenía mejor resolución y mejor relación señal-ruido (SNR<sup>11</sup>) que el sistema de la banda C, es por ello que, se lo utilizó como un conjunto de datos independientes que ayudó a resolver los problemas en el procesamiento del radar C y como control de calidad.



**Figura 2.4:** En el transbordador están las antenas principal C, X (la banda L no se utiliza) y la Determinación de la Orientación y la Órbita Aviónica (AODA<sup>12</sup>). Al final del mástil de 60 m de largo están las antenas secundarias de solo recepción C y X.

Hasta la aparición del SRTM, no se había podido producir un DEM mundial aceptable usando la técnica de interferometría de repetir pasos. Las dificultades que ofrecía esa técnica eran los cambios atmosféricos temporales entre pasada y pasada, la incertidumbre en la órbita del satélite que requería la estimación de la geometría de interferometría a partir de sus propios datos y la reorganización de los dispersores en la superficie. Los radares SRTM fueron diseñados para operar como interferómetros de “una sola pasada”, utilizando las capacidades de las bandas C y X. Es por ello que cada uno de los dos radares SRTM estaba equipado con una antena adicional de sólo recepción, además de las principales antenas de transmisión/recepción situadas en el transbordador. Las antenas adicionales fueron colocadas en el extremo de un mástil retráctil de 60 m (Fig. 2.4).

El transbordador Endeavour fue lanzado con una tripulación de seis personas desde el Centro Espacial Kennedy (KSC<sup>13</sup>) el 11 de febrero de 2000. La altura nominal

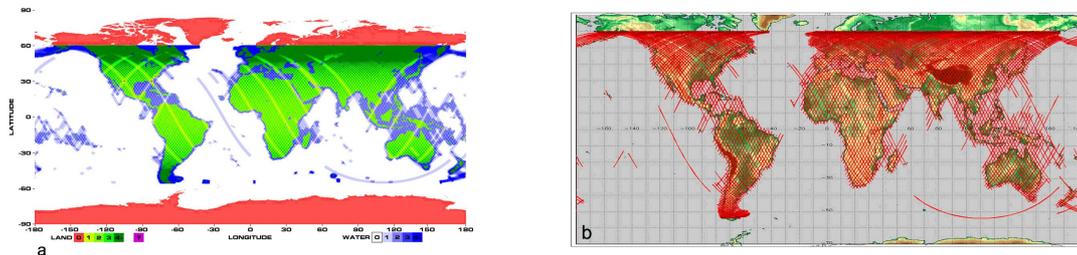
<sup>9</sup> Jet Propulsion Laboratory.

<sup>10</sup> Scanner Synthetic Aperture Radar.

<sup>11</sup> Signal Noise Ratio.

<sup>12</sup> Attitude and Orbit Determination Avionics.

fue de 233 km, con una inclinación orbital de 57°. Con esta geometría, el transbordador comenzó a repetir las 159 órbitas, en unos 10 días. Las órbitas se separaron 218 km en el ecuador y el ancho de la franja de imagen ScanSAR fue de 225 km (Fig. 2.7). Endeavour aterrizó el 22 de febrero de 2000. El volumen total de los datos brutos SRTM ascendió a 12,3 terabytes. En las figuras 2.5a y 2.5b se muestra la cobertura de los datos.



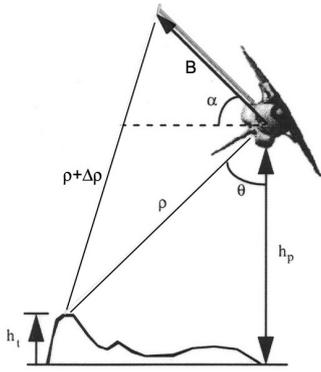
**Figura 2.5:** La banda C (a) recogió en imágenes el 99,96% de la superficie una vez, el 94,59% dos veces y un 50% tres o más veces. Las pequeñas áreas rojas en los Estados Unidos indican las zonas perdidas, así como las zonas polares, que no pudieron ser localizadas por la órbita del transbordador. El sistema de banda X (b) recogió franjas de 50 km con espacios entre ellos. Estas brechas se cerraron con un alza en las latitudes altas.

### 2.2.5 Técnicas

Los radares miden la distancia del radar a un objetivo. Para obtener mediciones en dos dimensiones de una ubicación, un instrumento de radar montado en una plataforma en movimiento, explota el cambio de frecuencia Doppler de un objetivo determinado. Esta técnica (SAR) produce imágenes en dos dimensiones. Por lo general, esto lleva a obtener imágenes desde el espacio con 5 m a 10 m de resolución cuando el radar opera en este modo de mapeo por franjas.

Para acceder a la tercera dimensión, es necesario obtener la diferencia de distancia entre las dos imágenes de radar, esto se realiza con mayor precisión y eficacia usando los principios de la interferometría (InSAR) (Fig. 2.6). Cada antena del radar toma una imagen de la superficie desde un punto de vista ligeramente diferente. La fase ( $\phi$ ) de la señal de radar codifica la distancia de la trayectoria a la superficie. Si las imágenes de las dos antenas se adquieren simultáneamente y desde puntos de vista lo suficiente cercanos, la fase de retrodispersión observada en las dos imágenes de cada punto en la tierra será el mismo. La diferencia de fase ( $\Delta\phi$ ) entre cada punto de la imagen será simplemente la diferencia de camino ( $\Delta\rho$ ) entre las dos mediciones del punto. Si se asume que la posición de las dos antenas (la base interferométrica “B”) es conocida, las dimensiones del triángulo de interferometría puede determinarse con precisión, como así también la altura de un punto dado (Fig. 2.6), ecuación 2.2.

<sup>13</sup> Kennedy Space Center.

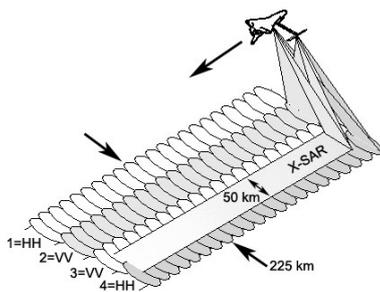


**Figura 2.6:** geometría del interferómetro SRTM (no está en escala). El mástil forma la base  $B$ , las mediciones de  $\Delta\rho$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $B$ , y  $h_p$  conducen a la solución para la altura del terreno, altura  $h_t$ .

$$h_t = h_p - \rho \cos \left[ \text{sen}^{-1} \left( \frac{\lambda \phi}{2\pi B} \right) + \alpha \right] \quad (2.2)$$

En la que,  $h_t$  es la altura del objetivo,  $h_p$  es la altura de la plataforma (altura de la antena con respecto al elipsoide de referencia WGS84),  $\rho$  es la distancia entre el sensor y el punto objetivo,  $\phi$  es la fase interferométrica medida,  $\alpha$  es el ángulo de referencia (inclinación de la base),  $\lambda$  la longitud de onda,  $B$  es la longitud de la base y  $\theta$  es el ángulo de incidencia del haz o de visión.

Para cumplir con los requisitos de cobertura completa y un mapa del mundo en 10 días, se emplearon dos técnicas: (1) El ScanSAR utilizó la práctica de duplicación de la extensión del haz y (2) para duplicar la cobertura una vez más, fueron transmitidas las señales con polarizaciones ortogonales de forma simultánea, cada uno con un ángulo de dirección de elevación diferente. El radar C pudo transmitir la polarización horizontal y vertical al mismo tiempo y por vía electrónica dirigir el haz de polarización horizontal, independientemente del haz de polarización vertical. (Fig. 2.7).



**Figura 2.7:** disposición de las hileras SRTM. El radar C iluminaba una franja de 225 km para recoger alternativamente pares de sub-franjas con ScanSAR. Se iluminan las sub-franjas 1 y 3, luego la 2 y la 4, etc. El radar X no era capaz de escanear, por lo que su franja de 50 km se fijó entre los sub-franjas 3 y 4.

### 2.2.6 Diseño de la Misión

El diseño de la misión estuvo condicionado por el conocimiento de los errores involucrados en la ecuación 2.2. El instrumento de radar proporcionó los datos  $\rho$  y  $\phi$ , mientras que AODA, midió  $\alpha$ ,  $B$ , y  $h_p$ . Tabla 2.2.

Medidos por:	Parámetros
Radar	$\phi$ y $\rho$
AODA	$\alpha$ , $B$ , $h_p$

**Tabla 2.2:** observables misión SRTM.

La asignación del error vertical de los diversos componentes del SRTM se muestra en la Tabla 2.3.

Error vertical	Error (m)
Ruido de fase ( $\phi$ )	8
Distancia ( $\rho$ )	1
Angulo de referencia ( $\alpha$ )	7
Longitud de la base ( $B$ )	1
Posición de la plataforma.	1

**Tabla 2.3:** error vertical por componente SRTM.

El ruido de la fase del sistema está condicionado por la ecuación del radar (Ec. 4.20, § 4.4.1). La precisión de la altura del sistema puede ser controlado por el diseño del resto del interferómetro. Si se deriva la ecuación 2.2 se obtiene la variación de la altura relativa a la fase mediante la ecuación 2.3:

$$\frac{\partial h}{\partial \phi} = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\rho \cdot \sin \theta}{B \cos(\theta - \alpha)} \quad (2.3)$$

La elección de la longitud de onda de la banda C, se debió a que una antena en esta banda, tendría menos masa y volumen (fuera de borda) para un vehículo que estaba en los límites de capacidad de carga. La órbita del transbordador fue la más alta posible (233 km con 57° de inclinación) para un transporte completamente cargado. La maximización de la altitud también maximiza la huella de la antena en la superficie terrestre, contribuyendo a lograr la cobertura completa en 10 días. Para minimizar los efectos de escala, se eligieron ángulos de visión entre 30° y 60°. Estos ángulos, junto con la altitud, establecen la medida de distancia de la pasada. Así, en la (2.3), los únicos parámetros libres eran la base interferométrica  $B$  y el ángulo de referencia  $\alpha$ .

Si la base se agranda, la variación de la altura respecto del ruido de la fase se reduce parcialmente (2.3). Se eligió la longitud de la base más conveniente teniendo en cuenta el peor de los casos de retrodispersión de la banda C.

El ángulo de referencia  $\alpha$  de la base fue elegido de 45°. Este ángulo reduce al mínimo la sensibilidad de la observación a los errores en la base. Dadas estas limitaciones,  $B$  fue elegido tan grande como fuera necesario para cumplir con el requisito de ruido de altura (2.3). Se determinó que una base de 60 m, produciendo un ruido de altura estadístico en el peor de los casos de 12 m, era aceptable y que tendría que tener cabida en el diseño de la carga del transbordador.

Con el fin de cumplir con el requisito de ruido de fase de 8 m, una característica clave de la misión era que debía tener una doble cobertura de cada punto de la Tierra. Así, el ruido de altura en el peor de los casos de 12 m pudo ser reducido a unos 8 m. La doble cobertura se logró mediante la observación de cada punto en la porción de ascenso y descenso de la órbita.

Otro posible error de la fase podía surgir de las diferencias de fase relativa entre los receptores, ya que, no eran idénticos ni mecánica ni térmicamente. En lugar de intentar forzar que las fases de los receptores fueran idénticas, se distribuyó una señal de tono de calibración con referencia común a las antenas a través de un cable de fibra óptica con la antena desplegada. Las señales fueron inyectadas en los caminos de recepción de las antenas y detectadas en el procesamiento de datos. Las diferencias de fase, efectivamente, variaron, a lo largo de la misión, por muchos grados y han sido una fuente importante de error de no haber sido compensadas en el procesamiento de los datos. Después de la compensación, el error fue inferior a 1 m.

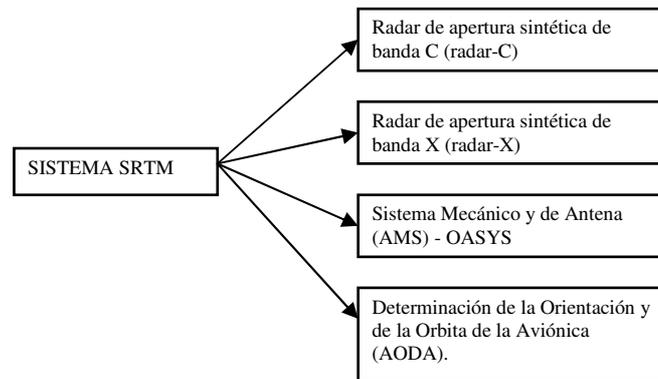
La siguiente fuente de error mayor en el interferómetro fue el ángulo de referencia,  $\alpha$  (2.4).

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha} = \rho \cdot \text{sen } \theta \quad (2.4)$$

Para cumplir con una asignación de error en el ángulo de referencia de 7 m (2.3) (Tabla 2.3), se debía conocer  $\alpha$  con una precisión de 6 segundos de arco. El mástil resonaba y oscilaba debido a que los propulsores disparaban periódicamente para mantener la orientación del transbordador. Esto dio lugar a un desplazamiento de hasta 0.10 m del extremo del mástil, por la deriva del mismo y un cambio de varias décimas de grados en la orientación del transbordador. AODA midió continuamente la posición y la orientación del transbordador y de las antenas externas con la precisión requerida.

### 2.2.7 Sistema SRTM.

El hardware del sistema SRTM se esquematiza en la Figura 2.10. El sistema SRTM se presenta en la Figura 2.8.



**Figura 2.8:** Sistema SRTM.

El sistema del radar de la banda C está basado en el SIR-C (Tabla 2.1). Los astronautas (Fig. 2.9) se encargaron de la carga y descarga de los datos del radar C a las cintas que tenían una duración de 20 minutos (350 cintas).



**Figura 2.9.** Gerhard Thiele y Kavandi Janet en la cabina del transbordador. El ordenador portátil en la parte superior izquierda es la interfaz de controlador de la grabadora.

Los paneles de las antenas principales de transmisión y recepción de las bandas C y X se encuentran a bordo de la nave. Ver detalle parte superior de la Fig. 2.10. Los paneles de las antenas de sólo recepción fuera de borda se pueden observar en la parte inferior izquierda de la Fig. 2.10. Este último sistema de antena fuera de borda (OASYS<sup>14</sup>) y su sistema de despliegue fue el hardware adicional más significativo de esta misión. El OASYS consistió de los paneles (banda C y X) y los LED<sup>15</sup>.

<sup>14</sup> Outboard Antenna System.

<sup>15</sup> Light Emitting Diode.

La función principal del sistema AODA fue proporcionar un historial de tiempo de la base interferométrica para el post procesamiento de la reconstrucción topográfica. Las precisiones impuestas, durante la misión, se muestran en la tabla 2.4. AODA asumió el requisito adicional de apoyar las operaciones de corrección y verificación de la puntería del mástil durante el vuelo, la alineación de la antena y la optimización del control de orientación del transbordador.

Medición (AODA)	Precisión
Longitud de la base (B)	0.002 m
Orientación	9"
Posición	1 m

Tabla 2.4: Precisiones medición AODA.

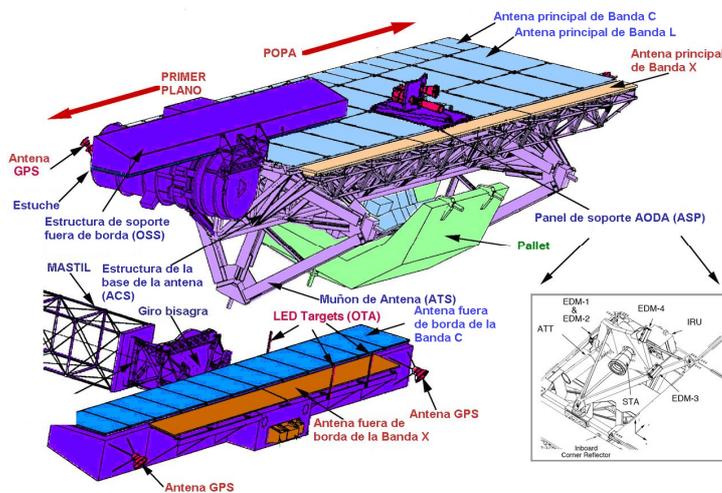


Figura 2.10. Hardware del SRTM sobre el transbordador (arriba). Abajo a la izquierda es el OASYS desplegado. Abajo a la derecha muestra los detalles del Grupo de Apoyo AODA.

El sistema AODA consistió de un segmento de vuelo y un segmento terrestre.

La parte central del segmento de vuelo fue el ASP<sup>16</sup> (Fig. 2.10 superior) que proporcionó un soporte isotérmico que albergó varios sensores AODA (Ver detalle en Fig. 2.10 inferior derecha) entre los que se destacaron: el sensor óptico de referencia estelar avanzado (ATT<sup>17</sup>) para la determinación de la base, el alineamiento de la antena y la corrección y verificación de la puntería del mástil. Se usó el centroide de tres LED rojos ubicados en las antenas exteriores para la orientación y posición relativa de la misma (Fig. 2.10 abajo izquierda) y cuatro electro-distanciómetros (EDM<sup>18</sup>) para la medición precisa de la base. La determinación de la órbita (posición de la plataforma y la velocidad) se resolvió con el sistema GPS que constaba de dos receptores de código P. Para obtener la solución de posición en el entorno de 1 m, los observables de pseudodistancia y fase fueron combinados con los provenientes simultáneamente desde la red global en tierra.

El segmento terrestre de AODA consistió en la red global de receptores GPS en tierra que fue utilizado durante la misión para apoyar la alineación de la antena, la identificación modal del mástil y la reconstrucción de la altura.

Una de las características distintivas de la misión SRTM en relación con otros esfuerzos de cartografía a gran escala es que el conjunto de datos es intrínsecamente

<sup>16</sup> AODA Support Panel

<sup>17</sup> ASTROS Target Tracker.

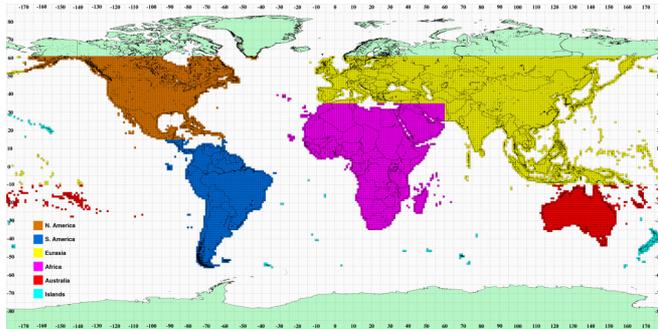
<sup>18</sup> Electronic Distance Meters.

tridimensional y consistente geométricamente en el mundo. El error de la altura se caracterizó con un modelo simple (2.5):

$$\partial h = \frac{\partial h}{\partial \phi} \Delta \phi + \frac{\partial h}{\partial B} \Delta B + \frac{\partial h}{\partial s} \Delta s + \Delta H \quad (2.5)$$

Donde  $\partial h$  es el error de altura  $\Delta \phi$ ,  $\Delta B$ ,  $\Delta s$  y  $\Delta H$  son los errores en la fase, la longitud de la base, la posición a lo largo de la pista, y la altura de la plataforma, respectivamente. Asumiendo que estos errores fuesen funciones cuadráticas solamente de  $s$  queda la ecuación 2.6, en la que, es posible estimar un conjunto de coeficientes para la corrección de estos errores para cada franja de vinculación basado en un continente. La Tierra se dividió en cinco "continentes" y 5 grupos de islas (Fig. 2.11). Los parámetros fueron estimados en masa para todo un continente o grupo de islas (2.6).

$$\Delta H = H_0 + H_1 s + H_2 s^2 \quad (2.6)$$



**Figura 2.11.** "Continentes", definido para el procesamiento de SRTM y ajustes de conjunto, así como para la distribución de datos.

Una vez que se calcularon las correcciones para cada continente, los datos pudieron ser montados en un modelo final de elevación digital.

Todos los datos de alturas elipsoidales se combinaron con ponderación del error de acuerdo a la ecuación 2.7 en la que  $w_i$  es una ponderación de variables en el espacio que permite una transición suave en las regiones de superposición y  $\sigma_{hi}^2$  es la varianza del error de la altura determinada a partir de la correlación de interferometría. Las alturas elipsoidales obtenidas fueron convertidas a alturas ortométricas utilizando como superficie de referencia el geoide EGM96 (Lemoine et al., 1998).

$$\hat{h} = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} \frac{h_i w_i}{\sigma_{h_i}^2}}{\sum_{i=1}^{N_h} \frac{w_i}{\sigma_{h_i}^2}} \quad (2.7)$$

La Tabla 2.5 muestra las especificaciones técnicas del SRTM.

RADAR C	
Proyección espaciamento horizontal	(“geográfica”) lat/lon 1x1 seg-arco (~30x30 m) o 3x3 seg-arco (~90x90 m)
Cuantificación vertical	1 m
Referencia horizontal	WGS84
Referencia vertical	Geoide EGM96
Formato de datos	16-bit, orden de byte IEEE
Valores sin datos	-32768
Longitud de onda	5.66 cm
Ancho de banda	10 MHz
Angulo de visión aproximado	30-58°

**Tabla 2.5:** Especificaciones del Producto SRTM DEM (Farr et al., 2007).

Finalmente es importante destacar que los huecos o zonas sin datos (-32768) fueron causadas por pendientes de espaldas al radar (sombra) o hacia el radar (acortamiento), el agua (zona lisa) o la arena que dispersan poca energía al sensor. Como muchas aplicaciones requieren un DEM continuo sin huecos, varios algoritmos de interpolación se han desarrollado para el relleno de los mismos (Reuter et al., 2007).

La altura SRTM está influenciada por la estructura y la densidad de la vegetación existente en la superficie. Si la vegetación es densa hay escasa o nula señal de retorno desde el suelo. Existen estudios científicos (Carabajal et al., 2006) tendientes a la obtención de la altura de los árboles por sustracción del DEM respecto del suelo, como así también, se han propuesto esquemas de corrección por la penetración de la banda del radar C en la vegetación.

Una capa de nieve importante se produjo en las latitudes septentrionales para la fecha de vuelo del SRTM. Las ondas de radar C penetran la nieve, el hielo o el suelo muy seco (metros). En las zonas secas del desierto del Sahara, se observó, que la arena fue penetrada por la banda L (25 cm), como así también, por la banda C.

La presencia de objetos artificiales (edificios, carreteras, torres, puentes, etc.) producen reflejos y sombras. Las superficies lisas en zonas construidas pueden conducir a graves inversiones de relieve, sombras y artefactos de trayectorias múltiples.

El SRTM marcó un hito en el campo de la teledetección. Durante 7 años, el proyecto evolucionó desde el concepto hasta el producto final, con 4 años de desarrollo del segmento de vuelo, 10 días de observaciones y un año adicional de desarrollo del proceso en tierra.

A partir de los requisitos del producto y del hardware existente, los diseñadores generaron una asignación rigurosa de los errores en el sistema. Se evaluó cada contribución al error de tres dimensiones en el producto de la altura, a partir del ruido y la estabilidad de la fase en el radar y en sus subsistemas, a la posición y la orientación del transbordador y las estructuras interferométricas asociadas. Se llevaron a cabo durante la fase de desarrollo, revisiones periódicas del rendimiento del subsistema en relación con la asignación de error. El propósito era asegurar que las necesidades globales podían ser cumplidas por el proyecto. Los productos de los datos superaron las especificaciones, como se comprueba a nivel mundial.

Gran parte de la comprensión teórica del funcionamiento del sistema de interferometría y las mejoras de hardware, se verifican por medio de TOPSAR (predecesor AIRSAR JPL/TOPSAR<sup>19</sup> el primer sistema de mapeo topográfico de

<sup>19</sup> Topographic Synthetic Aperture Radar.

interferometría en vuelo) a finales de 1980 y principios de 1990. Los algoritmos y las especificaciones del sistema de SRTM tienen una herencia directa de TOPSAR. El procesador de SRTM se verificó utilizando datos TOPSAR configurado para formatos SRTM.

La interferometría de radar representa una nueva técnica y clase de misiones de detección remota. SRTM se constituyó como la primera aplicación de interferometría de un solo paso. En diez días, SRTM mapeo algunas de las regiones menos accesibles del mundo. La misión logró lo que la cartografía convencional no había podido alcanzar en tres siglos de su existencia para generar un DEM global de resolución uniforme. SRTM se puede caracterizar como un éxito rotundo. En reconocimiento a ese éxito, el mástil y los sistemas de motor fuera de borda (OASYS) se muestran en el Centro Udvar-Hazy del Museo Smithsonian del Aire y del Espacio.

### **Capítulo 3. Análisis de los datos disponibles para la zona de trabajo.**

En este capítulo se analizarán los datos disponibles en el área de estudio. Se describen brevemente las redes de nivelación de alta precisión, la red gravimétrica y la red POSGAR07 del IGN. En particular la red POSGAR07 incluye otras redes, las que se analizan con la finalidad de conocer aspectos de diseño de las mismas, sistemas de referencias, como así también las características constructivas de las marcas.

#### **3.1. Zona de estudio**

La zona de estudio propuesta para el desarrollo del presente trabajo se encuentra comprendida entre las latitudes 36° S y 39° S y las longitudes 58° O y 71° O, abarca las provincias de Buenos Aires, La Pampa, Mendoza, Neuquén y Río Negro de la República Argentina. En la Figura 3.1 se muestra la región delimitada por el polígono en Google Earth (GE).



**Figura 3.1:** Zona de estudio en Google Earth.

#### **3.2 Redes Geodésicas Nacionales**

##### **3.2.1 Red CAMPO INCHAUSPE 69.**

El Marco de Referencia Geodésico Nacional<sup>1</sup> de la República Argentina se denominó CI69<sup>2</sup> hasta el año 1997. El mismo adoptó el Elipsoide Internacional de 1924, con datum en la localidad de Campo Inchauspe. Su desarrollo demandó más de 100 años de labor del IGN en las que se emplearon técnicas clásicas de medición de triangulación y

<sup>1</sup> MRGN

<sup>2</sup> Campo Inchauspe 69.

poligonación y se determinaron más de 18000 puntos de alta precisión geodésica (Fig. 3.2). (IGM, 1979, 1983).

### 3.2.2 Red POSGAR 94. (POSGAR94)

En el año 1997 el IGN adoptó el marco POSGAR94 que materializa el Sistema de Referencia WGS84 en Argentina. La medición de la red POSGAR94 (Fig. 3.3) se realizó en los años 1993 y 1994, en las que se determinaron 127 puntos. Estos puntos cubren todo el territorio nacional con distancias promedio de 150 km entre ellos. El 50% de estos puntos, aproximadamente, coinciden con los del marco CI69. Esta dualidad de valores es lo que permitió determinar los parámetros de transformación entre ambos marcos de referencia. (NIMA, 2000; IGN, 2009).

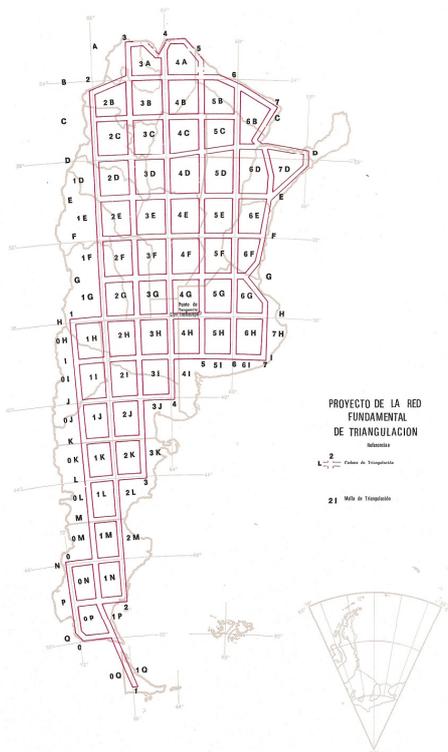


Figura 3.2: Red Geodésica CI69.

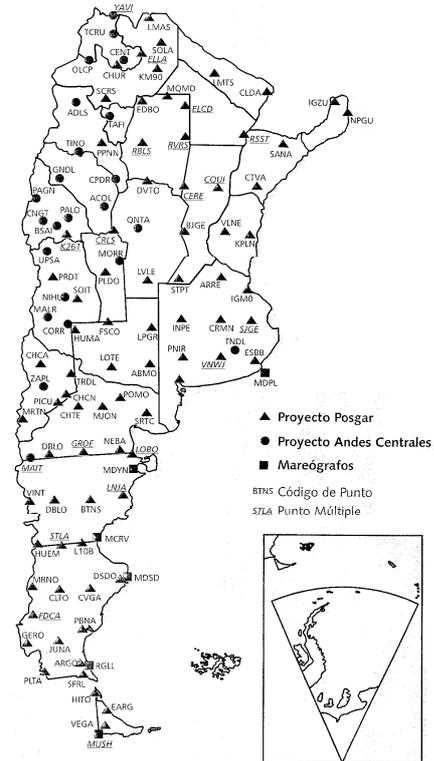


Figura 3.3: Red Geodésica POSGAR 94.

Para la materialización de los puntos de la red POSGAR94 se utilizaron las estaciones de la red CI69 (Fig. 3.2) que tuvieran un acceso fácil y su estabilidad fuera confiable. Esta posibilidad la brindaban las estaciones astronómicas (puntos Laplace) y los extremos de bases invar. (Mackern, 2003).

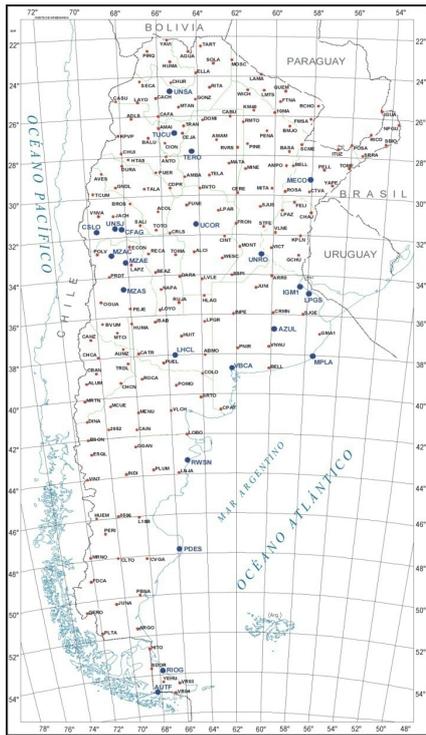


Figura 3.4: Red POSGAR 2007.



Figura 3.5: Red RAMSAC.

### 3.2.3 Red POSGAR 2007 (POSGAR07)

El marco POSGAR07 (Fig. 3.4) está materializado por puntos de las redes geodésicas provinciales, la red PASMA<sup>3</sup> y la red de estaciones GNSS permanentes de Argentina RAMSAC<sup>4</sup> (Fig. 3.5). De esta manera se logró la unificación de 4500 puntos. (IGN, 2009). Las mediciones se vincularon al ITRF<sup>5</sup>05 a través de la solución DFG08P01 de SIRGAS<sup>6</sup>. (IGN, 2009).

Los puntos POSGAR07 para la zona de estudio se muestran en la Figura 3.6.

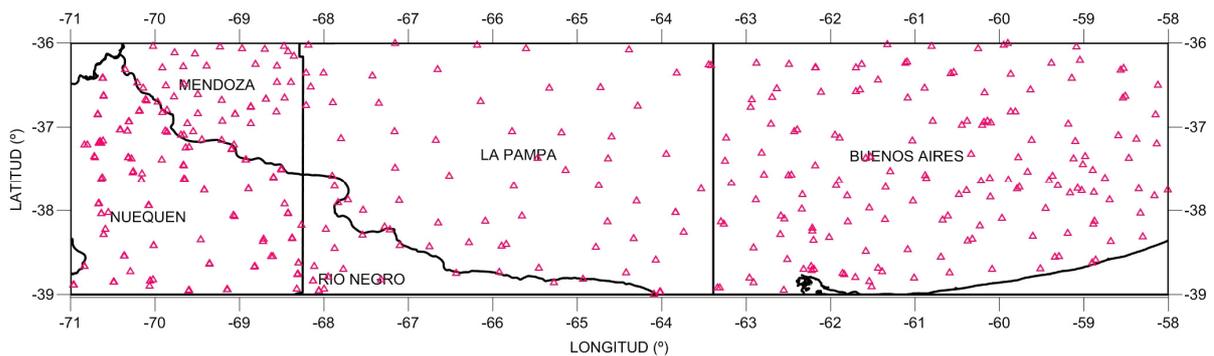


Figura 3.6: Puntos POSGAR07 ( $\Delta$ ) para la zona de estudio.

La Tabla 3.1 enumera la cantidad de puntos POSGAR07 por provincia y para la zona de estudio.

<sup>3</sup> Proyecto Apoyo al Sector Minero Argentino.

<sup>4</sup> Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo.

<sup>5</sup> International Terrestrial Reference Frame.

<sup>6</sup> Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas.

PROVINCIA	NUMERO DE PUNTOS
Buenos Aires	187
La Pampa	57
Mendoza	48
Neuquén	114
Río Negro	16
<b>TOTAL</b>	<b>422</b>

**Tabla 3.1:** Total de Puntos POSGAR07 para la zona de estudio.

El diseño constructivo de los puntos de la red POSGAR94 que sirvieron de apoyo para la red POSGAR07 (IGN, 2009) se analizan a continuación con la finalidad de evaluar su integración al modelo SRTM 90 m.

### 3.2.3.1 Marcas Geodésicas

Las marcas geodésicas y el detalle de su construcción se muestran en la Figura 3.7. Se indica la altura de cada una de las marcas. (IGM, 1979).

Pilar Astronómico de Laplace. Alturas (m)	Pilar extremo de base. Alturas (m)	Pilar trigonom. de 1° y 2° orden Alturas (m)	Pilar de acimut. Alturas (m)
1.50	0.60	0.25	0.25

**Figura 3.7:** Marcas Geodésicas.

La Tabla 3.2 muestra las marcas geodésicas de los puntos de la red POSGAR07 ordenados por provincias para la zona de estudio.

RED GEODESICA			MARCAS GEODESICAS			
PASMA	PROV	POSGAR	Pilar Astronómico	Pilar Extremo de Base	Pilar Punto Trigonométrico	Pilar de Acimut
BUENOS AIRES						
	ABMO	ABMO	4-I- 72			
	BHBL		5-I-0200			
	PNIR	PNIR	5-I-0215			
	VINI		INIBIBB			
ESBB				S 7-I-0213		
	SALA				5-I-0255	
		VNWJ			6-I-0214	
	SAL1					5-I-0255
LA PAMPA						

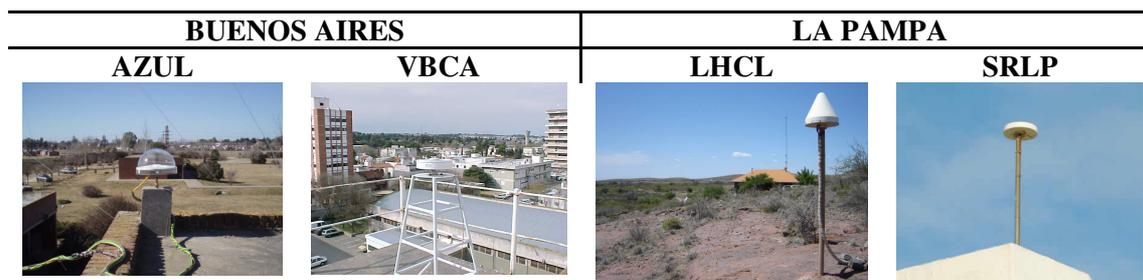
17-007			3-I-0263	
17-013		LPGR	4-I-0186	
17-040		ABMO	4-I-0172	
17-043				3-I-0235
17-012		HUMA		2-I-0262
NEUQUEN				
19-003	TRDL	TRDL	2-I-0235	
	CHCA	CHCA	NE 1-I-0237	
	BBLA			1-I-0259
	BOPA			1-I-0013
	CHIH			1-I-0007
	COLO			2-I-0231
	FMIGM			1H-II-0562
	HERN			1H-I-0021
	LOMA			2-I-0240
	MEDI			1I-II-0577
	MOLL			1-I-0010
	PAMP			1-I-0222
	PLOT			2-I-0229
	ZAPL			1I-I-0001
RIO NEGRO				
	14-01	TRDL	2-I-0235	

**Tabla 3.2:** Marcas geodésicas de la red POSGAR 07 por provincia.

Se considerarán los puntos descritos en la Tabla 3.2 para evaluar el modelo SRTM debido a que la altura de las marcas es conocida (Fig.3.7).

### 3.2.3.2 Red RAMSAC

En el año 1998 el IGN aprueba la ejecución del proyecto de Estaciones GPS Permanentes RAMSAC y el centro de procesamiento de datos de las estaciones GNSS permanentes de Argentina que actualiza y mantiene el MRGN. (Fig. 3.5). La Figura 3.8 muestra las Estaciones GPS permanente para la zona de estudio.



**Figura 3.8:** Estaciones GPS permanente para la zona de estudio.

Como puede apreciarse, en general, las estaciones GPS se encuentran en puntos altos sobre edificaciones, donde el SRTM no es operativo. Por eso, la única estación permanente que será utilizada para evaluar el SRTM será LHCL (LIHUE CALEL, La Pampa), previa consideración de la altura del mástil (Figura 3.8).

### 3.2.3.3 Red PASMA

La red PASMA tuvo como objetivo principal la organización y modernización de las instituciones públicas mineras y su marco técnico-legal, definiendo el Sistema Nacional de Catastro y Registro Minero. El proyecto se desarrolló entre los años 1997 y 2001.



**Figura 3.9:** Red PASMA para las provincias de Buenos Aires, La Pampa, Mendoza, Neuquén y Río Negro.

La distancia entre vértices de la red PASMA son menores a 50 km. Para la materialización de esta red se han usado puntos de nivelación, puntos de triangulación del IGN y mojones construidos para este proyecto (Mackern, 2003) (Fig. 3.10). Se observa en la figura 3.9 los puntos con la nomenclatura PASMA para la zona de estudio.



**Figura 3.10:** Mojones construidos para la red PASMA.

Debido a las características constructivas de las marcas empleadas para la materialización de la red PASMA se considera conveniente evaluar al modelo SRTM sobre las mismas.

### 3.3 Redes Geodésicas Provinciales

#### 3.3.1 Red GEOBA (Provincia de Buenos Aires)

La red de alta precisión de la provincia de Buenos Aires GEOBA98 está materializada en un 100% por puntos altimétricos. Esta red fue diseñada, medida y calculada por la FCAG de la UNLP en el año 1998 en convenio con el MOP-BA<sup>7</sup>.

Constaba inicialmente de unos 120 puntos dobles distribuidos sobre todo el territorio provincial con distancias típicas de 50 km entre los más próximos. Cada punto doble comprendía de dos pilares separados por unos 3 km (Fig. 3.11).

El conjunto de coordenadas obtenido estaba referido al marco de referencia ITRF96, época 1998.3, pero el requerimiento era expresar las posiciones en el marco definido por la red POSGAR94.

Las coordenadas resultantes GEOBA98 pudieron considerarse expresadas en POSGAR94 pero con una precisión superior. Para toda la red pudieron resumirse errores estimados (RMS<sup>8</sup>) de 0.01-0.02 m en latitud y longitud, y de 0.02-0.03 m en altura. Estas coordenadas se pueden convertir a un ITRF<sup>9</sup> a través de un conjunto mínimo de parámetros de transformación. (Del Cogliano, 2006).

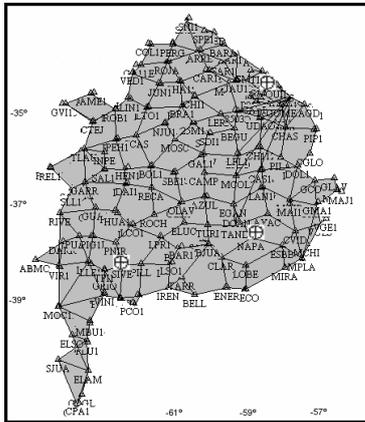
Entre 2001 y 2005 se densificó la red original con la misma metodología agregando unos 100 puntos adicionales distribuidos de forma tal que el conjunto resultante es una malla más uniforme con distancias típicas entre puntos de 30 km. Se dispone actualmente de una red homogénea con unos 400 puntos con coordenadas de alta precisión vinculada a la red geodésica nacional.

<sup>7</sup> Ministerio de Obras Públicas. Buenos Aires.

<sup>8</sup> Root Mean Square.

<sup>9</sup> International Terrestrial Reference Frame.

La densificación permitió determinar la precisión real de la red GPS original en sus tres componentes (mejor que 0.02 m en latitud y longitud y mejor que 0.03 m en altura elipsoidal  $h$  en la casi totalidad de los casos). Permitió una evaluación total (abarca toda la superficie provincial), del modelo de transformación de cotas elaborado solo con los datos de 1998 (en el 84% de los casos el valor calculado no difiere en más de 0.15 m del valor observado). La incorporación de los nuevos puntos mejora drásticamente la distribución general. Se construyó un nuevo modelo de transformación de cotas. (Perdomo et al., 2000).



**Figura 3.11:** Red Geodésica de la Provincia de Buenos Aires (GEOBA). Los segmentos representan los vectores GPS procesados. Los círculos cruzados indican los 3 puntos SAGA. (Del Cogliano, 2006).

### 3.3.2 Red Provincia de Neuquén.

La Provincia de Neuquén cuenta con una Red Geodésica Provincial y Poligonales de Apoyo Urbanas en 13 de las principales localidades. La distancia promedio entre puntos es de 60 km aproximadamente, con una precisión de 1 ppm. En la Figura 3.12 se muestran los puntos para las provincias de Neuquén y Buenos Aires en GE.



**Figura 3.12:** Redes Provinciales.

En la Tabla 3.3 se muestran los puntos PASMA, PROV y POSGAR ordenados por provincia y para la zona de estudio.

Red	PASMA	PROV	POSGAR	TOTAL
BUENOS AIRES				
Cantidad puntos	11	177	4	189
LA PAMPA				
Cantidad puntos	56	0	9	57
MENDOZA				
Cantidad puntos	45	2	6	48
NEUQUEN				
Cantidad puntos	10	110	5	116
RIO NEGRO				
Cantidad puntos	8	8	1	16

**Tabla 3.3:** Puntos POSGAR07 para las provincias de Buenos Aires, La Pampa, Mendoza, Neuquén y Río Negro.

De acuerdo al análisis realizado de las redes geodésicas se evaluará el modelo SRTM en los puntos de la red POSGAR07; en las redes Provinciales, en particular de la red GEOBA, en los puntos de la red PASMA y en los puntos medidos en pilares trigonométricos de 1° y 2° orden. En lo referente a las marcas de los pilares astronómicos de Puntos de Laplace, pilares de acimut y extremos de base, se calcularán las alturas sobre el terreno natural por substracción de la altura de la marca. En la red RAMSAC se considerará solo la estación que se encuentre sobre el terreno natural (LHCL) previa substracción de la altura del mástil de la antena receptora. Los puntos de nivelación de alta precisión, precisión y topográfica se aplicarán para la evaluación del DEM.

### 3.4 Red Altimétrica Nacional

La red de nivelación de alta precisión (RNAP) está referida al nivel medio del mar, materializado por el mareógrafo de Mar del Plata y está conformada por 87529 km de nivelación (Fig. 3.13). El error admisible  $e$  para esta red fue de  $e(3mm\sqrt{L(km)})$ , en la que  $L$  es la distancia en kilómetros entre los puntos conectados. La red de nivelación topográfica tiene un desarrollo de 72805 km y 3250 km de nivelación auxiliar para apoyo fotogramétrico. (IGN, 2009). La RNAP está materializada por pilares de primera categoría (nodales) y pilares de segunda categoría. Las líneas de nivelación de alta precisión dividen el territorio de la República Argentina en polígonos cerrados o mallas y en polígonos abiertos o periféricos, sobre el litoral marítimo o límites internacionales (Fig. 3.15). Las líneas de nivelación de alta precisión arrancan y cierran en nodales (IGN, 2009). Las líneas de nivelación de precisión se desarrollan en el interior de las mallas y dividen a cada una de ellas en 6 a 8 polígonos. El trazado de los polígonos presenta formas irregulares, ya que, las tres redes se desarrollan a lo largo de caminos. (IGN, 2009).

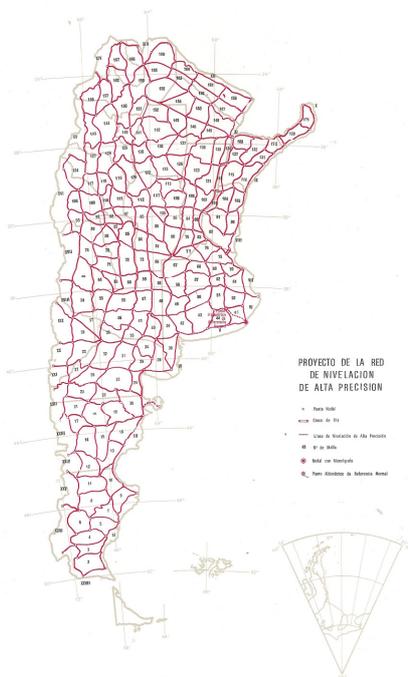


Figura 3.13: Red de Nivelación Nacional.

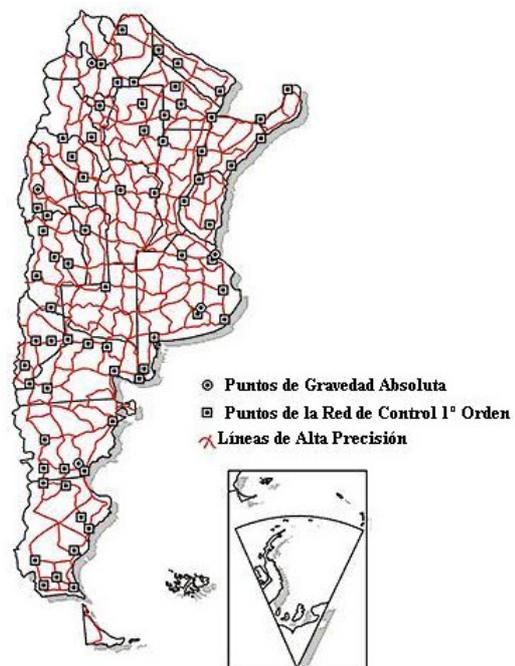
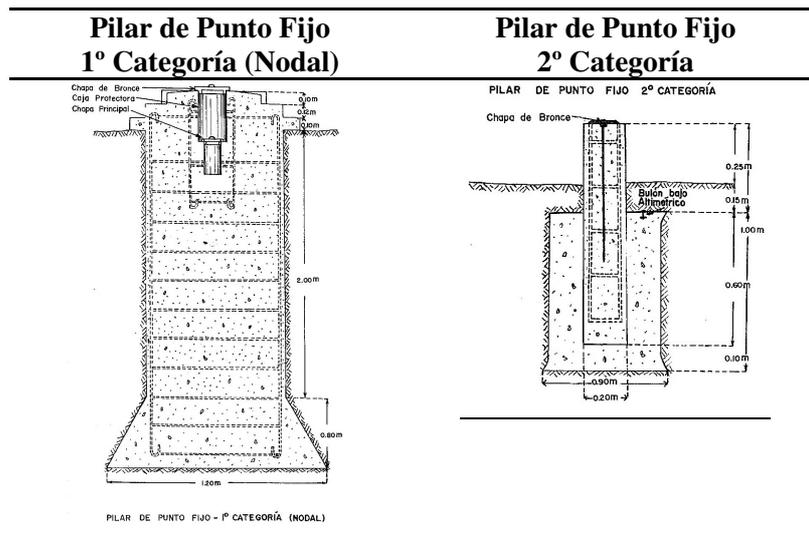


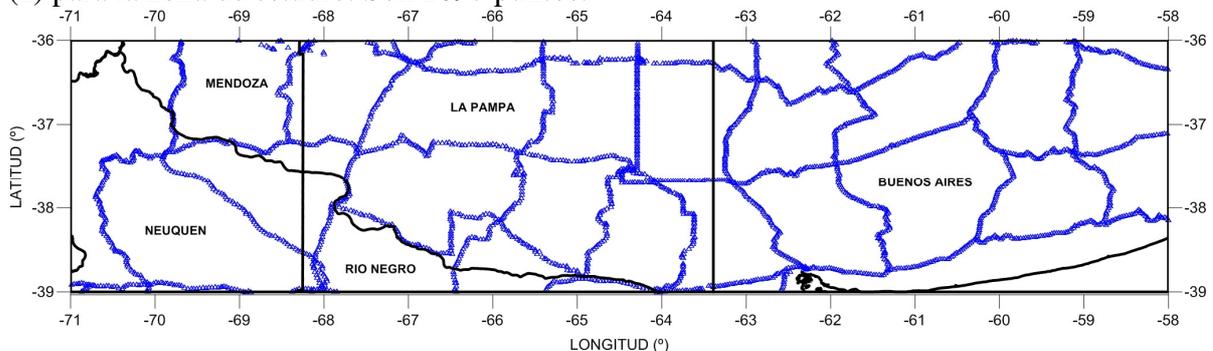
Figura 3.14: Red Gravimétrica Nacional

La Figura 3.15 muestra el aspecto constructivo de las marcas geodésicas altimétricas.



**Figura 3.15:** marcas geodésicas altimétricas.

La Figura 3.16 muestra los puntos de la red de nivelación de Alta Precisión del IGN ( $\Delta$ ) para la zona de estudio. Son 2697 puntos.



**Figura 3.16:** puntos de la red de nivelación de Alta Precisión del IGN ( $\Delta$ ).

Los puntos fijos altimétricos de las redes de nivelación de alta precisión, de precisión y topográficos poseen buenas alturas niveladas. La posición de las marcas de la RNAP están expresadas en el sistema CI69 (§ 3.3.1). Se evaluará el modelo con estos puntos.

### 3.5 Red Gravimétrica Nacional

La red gravimétrica nacional (Fig. 3.14) articula subredes de diversos órdenes: La Red de Orden Cero (medida en 1989 y 1991), está compuesta por 5 puntos de gravedad absoluta: Miguelete y Tandil (Buenos Aires), San Lorenzo (Salta), Comodoro Rivadavia (Chubut) y San Juan (San Juan). La Red de Primer Orden (medida en 1968) está compuesta por 86 puntos localizados en aeródromos que integran la denominada red BACARA<sup>10</sup>. La Red de Segundo Orden es coincidente con la red de nivelación de alta precisión. En 1998 se completó la medición gravimétrica de los 15905 puntos que integran la citada red. La Red de Tercer Orden está constituida por parte de la red de nivelación topográfica. Se midieron 2175 puntos hasta 2009. El total de puntos gravimétricos medidos por el IGN hasta 2001 es de 18248. La información gravimétrica está referida al sistema IGSN71<sup>11</sup> (IGN, 2009).

<sup>10</sup> Base de Calibración de la República Argentina.

<sup>11</sup> International Gravity Standardization Net 1971

La información gravimétrica disponible para las líneas de nivelación de alta precisión permitirían calcular “a priori” alturas físicas, sin embargo, para la evaluación del modelo SRTM se consideran suficientes las alturas niveladas, al menos en esta instancia de trabajo.

## **Capítulo 4. Comparación del modelo digital de elevaciones en puntos discretos**

En este capítulo se presenta la comparación entre las alturas del modelo digital de elevaciones SRTM con alturas POSGAR07 y de la red de nivelación de alta precisión.

La comparación entre las alturas del modelo digital de elevaciones SRTM con las alturas de puntos discretos de la superficie terrestre proporciona una medida de los errores de representación del SRTM.

### 4.1 Detección de errores en los DEMs.

Los errores en los DEMs pueden ser posicionales y atributivos. Los errores posicionales implican una deficiente localización geográfica de la altitud o de la trayectoria de la curva de nivel y los errores atributivos suponen una asignación imprecisa de la altitud del punto o de la curva. Los errores posicionales afectan sólo a los modelos vectoriales (contornos, TIN). Los errores atributivos afectan tanto a modelos vectoriales como raster. En el primer caso suelen tratarse de errores groseros y locales en la asignación de la altitud. En el caso de las matrices regulares, el origen del error, radica en las múltiples operaciones geométricas implicadas en la construcción del DEM. En este caso el error es de naturaleza estadística y global, pudiendo considerarse un atributo que define y caracteriza al DEM.

#### 4.1.1 La medida del error atributivo en los DEM matriciales.

En el caso de los modelos matriciales, el error puede considerarse de tres tipos posibles. Los errores groseros, cuya magnitud excede el máximo error permitido, son de naturaleza local y se deben eliminar completamente. Los errores sistemáticos, que presentan un patrón de distribución concreto e introducen un sesgo en el DEM. En caso de existir, son predecibles y pueden ser eliminados o reducidos. Los errores aleatorios, que permanecen tras la eliminación de los anteriores y que suelen presentar una distribución de Gauss. Este error es global y se origina en las imprecisiones de los datos originales y en los múltiples procesos de generalización, interpolación, etc., que se ejecutan en su construcción.

#### 4.1.2 Análisis del error aleatorio.

El error local en un punto  $i$ ,  $e_i$ , se define como la diferencia entre la altitud en el DEM ( $\hat{z}$ ) y la altitud del punto de control ( $z$ ):

$$e_i = \hat{z} - z \quad (4.1)$$

Dado un conjunto de  $n$  puntos de control, el promedio de las diferencias  $\bar{e}$  para este conjunto de datos se define como:

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n e_i \quad (4.2)$$

El promedio para un conjunto dado de puntos de control tiene interés para comprobar si las desviaciones del modelo son aleatorias o no. En el primer caso, el promedio no será significativamente diferente de cero.

Se utiliza el  $ECM^1$  (ec. 4.3) como una medida de la exactitud vertical. (Maune et al., 2007).

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (4.3)$$

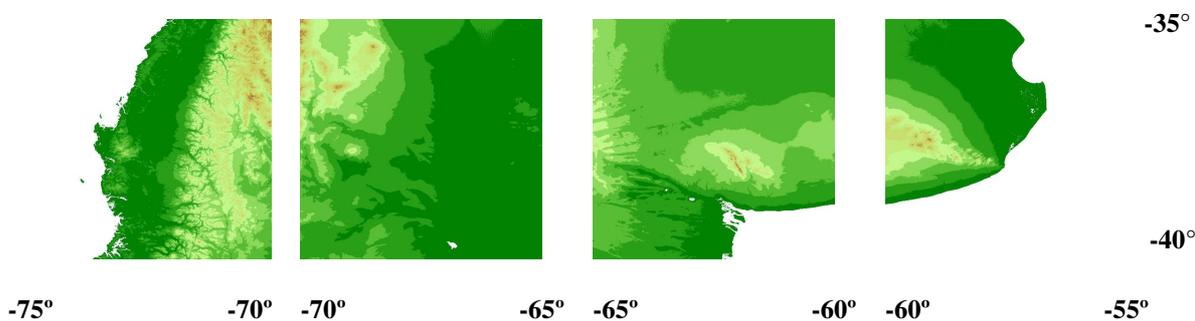
El uso de estos estadísticos permite una evaluación objetiva de la calidad de los DEMs si se asume que los grandes errores han sido corregidos, así como los posibles errores sistemáticos y solo resta la componente aleatoria. (Felicísimo, 1999).

También se aplica la DESV  $EST^2$  ( $\sigma$ ) (4.4) como un indicador de la precisión vertical del modelo (Rodríguez et al., 2005; Cassiraga, 2005, Reuter et al., 2007; Maune et al., 2007; Hirt et al., 2010).

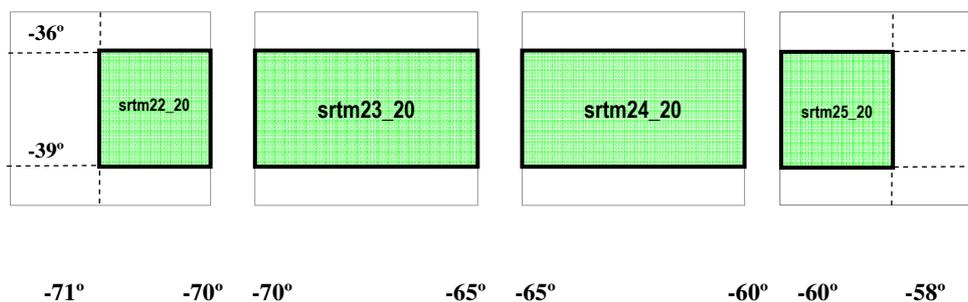
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2} \quad (4.4)$$

#### 4.2 Evaluación del SRTM DEM en la región de estudio.

EL DEM que evaluaremos en esta Tesis es el SRTM 90 m. La resolución espacial del modelo es de 3" de arco. La región de estudio se encuentra localizada entre las latitudes de  $-36^\circ$  a  $-39^\circ$  y las longitudes de  $-58^\circ$  a  $-71^\circ$ . Se ha trabajado con 4 mosaicos SRTM 90 m vs. 4.1 de tamaño de  $5^\circ \times 5^\circ$ . Estos mosaicos se obtuvieron en formato GeoTiff (Figura 4.1). La denominación de cada mosaico es *srtm\_22\_20*, *srtm\_23\_20*, *srtm\_24\_20*, *srtm\_25\_20*. En la Figura 4.2 se muestra un esquema del corte realizado a los mosaicos.



**Figura 4.1:** Los 4 mosaicos SRTM para la región de estudio.



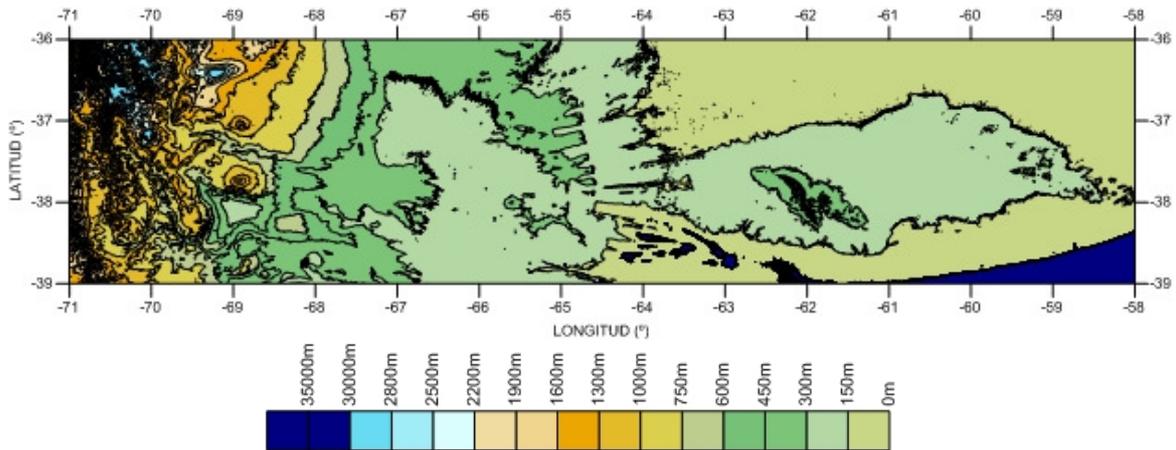
**Figura 4.2:** Corte de los 4 mosaicos SRTM para la región de estudio.

A continuación se procede a la obtención de las curvas de nivel con los archivos SRTM (Figura 4.3). El color azul oscuro, en particular, indica la presencia de agua. La

<sup>1</sup> Error Cuadrático Medio.

<sup>2</sup> Desviación Estándar.

equidistancia de las curvas es de 150 m para las zonas comprendidas entre 0 m y 1000 m de altura y de 300 m para las zonas con alturas mayores a los 1000 m.

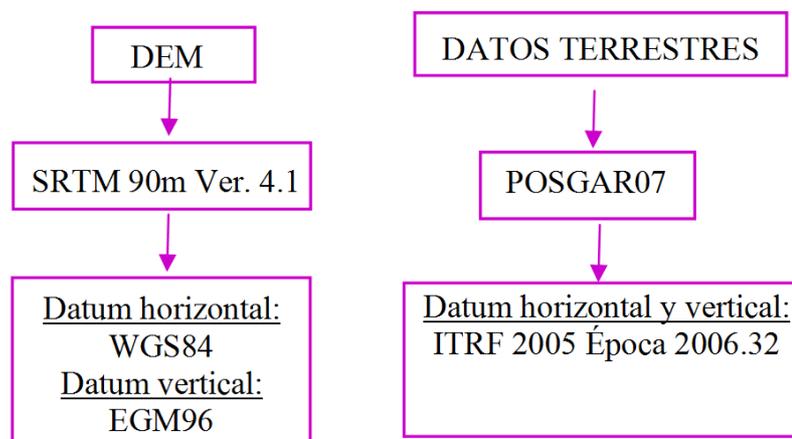


**Figura 4.3:** Modelo SRTM en la región de estudio.

#### 4.2.1 Comparación del modelo SRTM en los puntos POSGAR07 para la zona de estudio.

Las coordenadas geodésicas del SRTM están expresadas en el sistema WGS84 y las alturas están referidas al modelo EGM96 (Lemoine et al., 1998) (Figura 4.4), por lo que se trata de alturas asimilables a alturas ortométricas. Las coordenadas horizontales de SRTM y POSGAR07 son prácticamente consistentes, entonces es necesario, para realizar la comparación, transformar las alturas elipsoidales POSGAR07 en “alturas ortométricas” usando el modelo EGM96. Esta transformación hace compatible las superficies de referencia vertical (Hirt et al., 2010). En la Figura 4.4 se muestran de manera esquemática los sistemas y superficies de referencias involucrados en la comparación.

Las diferencias entre el sistema WGS84 utilizado por SRTM y el marco de referencia ITRF 2005, época 2006.32, están muy por debajo de las tolerancias admitidas en la presente comparación, ya que el modelo de elevaciones tiene una resolución de decenas de metros. Por ello, las coordenadas horizontales se consideran equivalentes.

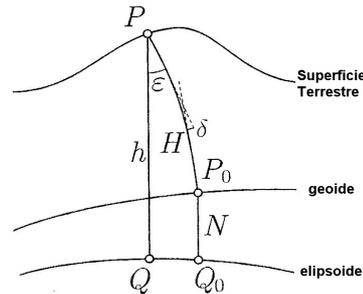


**Figura 4.4:** Sistemas de referencias para el SRTM DEM y los datos POSGAR07.

Es importante destacar que para la transformación de alturas elipsoidales a alturas ortométricas, en rigor, se debe tener en cuenta que:

Si se establece la posición de un punto P por medio de las coordenadas naturales o astronómicas  $\Phi$ ,  $\Lambda$  y  $H$ , se puede proyectar sobre el geoide a lo largo de la línea

(ligeramente curvada) de la plomada, la altura ortométrica  $H$  (Figura 4.5). La altura ortométrica es la distancia entre el punto  $P$  sobre la superficie terrestre y su proyección  $P_0$  sobre el geode, medida a lo largo de la línea de la plomada. Aunque este modo de proyección es completamente natural, el geode no es adecuado para realizar cálculos directamente en él, por lo tanto, el punto  $P_0$ , se proyecta sobre el elipsoide de referencia, por medio de la normal al elipsoide, obteniendo así un punto  $Q_0$ . De esta manera, el punto de la superficie terrestre  $P$  y el punto  $Q_0$  correspondiente en el elipsoide están conectados por una proyección doble, es decir, por dos proyecciones que se desempeñan una a continuación de la otra y que son la altura ortométrica  $H = PP_0$  y la altura del geode sobre el elipsoide  $N = P_0Q_0$ . Esta doble proyección se llama *proyección de Pizzetti*.



**Figura 4.5:** La proyección de Helmert y de Pizzeti. (Hofman-Wellenhof & Moritz, 2006).

Es más sencillo proyectar el punto  $P$  de la superficie topográfica directamente sobre el elipsoide a través de la normal elipsoidal, obteniendo así un punto  $Q$ . La distancia  $PQ = h$  es la altura sobre el elipsoide. El punto  $P$  sobre la superficie terrestre es determinado por la altura elipsoidal  $h$  y las coordenadas elipsoidales de  $Q$  sobre el elipsoide, de modo que, las *coordenadas elipsoidales*  $\varphi$ ,  $\lambda$  y  $h$  toman el lugar de las *coordenadas naturales*  $\Phi$ ,  $\Lambda$  y  $H$ . Esta es la *proyección de Helmert*. La diferencia práctica entre las proyecciones de Pizzeti y de Helmert es pequeña (Hofman-Wellenhof & Moritz, 2006). La ecuación 4.5 es una aproximación en la que se desprecia el efecto de la desviación de la vertical y relaciona la altura elipsoidal  $h$  con la altura ortométrica  $H$ , a través de la altura geoidal  $N$  (Hofman-Wellenhof & Moritz, 2006).

$$h = H + N \quad (4.5)$$

La altura ortométrica  $H^{POSGAR07}$  de un punto discreto sobre la superficie terrestre respecto del modelo EGM96 resulta:

$$H^{POSGAR07} = h^{POSGAR07} - N^{EGM96} \quad (4.6)$$

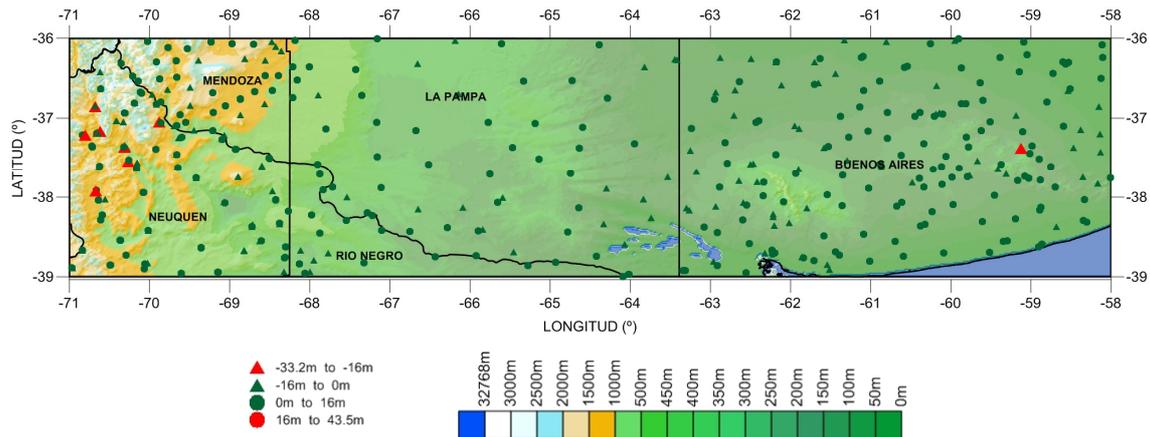
Donde  $h^{POSGAR07}$  es la altura elipsoidal POSGAR07 y  $N^{EGM96}$  altura geoidal del modelo EGM96 sobre el elipsoide WGS84.

A continuación se calculan las diferencias de alturas, aplicando la ecuación 4.1.y adecuando la nomenclatura, en los puntos discretos POSGAR07, se obtiene:

$$H^{DIF} = H^{SRTM90m} - H^{POSGAR07} \quad (4.7)$$

Donde  $H^{DIF}$  es la diferencia de alturas,  $H^{SRTM90m}$  es la altura del modelo SRTM respecto del modelo EGM96 y  $H^{POSGAR07}$  es la altura ortométrica de los puntos POSGAR07 respecto del modelo EGM96.

En la Figura 4.6 se muestra un mapa clasificado de las diferencias obtenidas para los puntos POSGAR07 de la zona de estudio.



**Figura 4.6:** Mapa de  $H^{DIF}$ .

La Tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos de los  $H^{DIF}$ . El 97.6 % de las diferencias se encuentran por debajo de los 16 m, esto es, 412 puntos sobre un total de 422.

Diferencias Mínimo (m)	Diferencias Máximo (m)	Porcentaje (%)	Cantidad de puntos POSGAR07	Símbolo
-33.2	-16	2.1	9	▲
-16	0	32.7	138	▲
0	16	64.9	274	●
16	43.6	0.2	1	●
		100	422	

**Tabla 4.1:** Estadísticas de las diferencias.

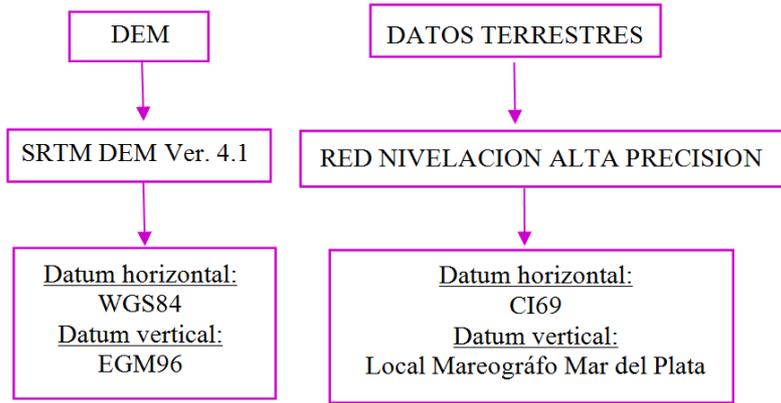
Las estadísticas de las diferencias (Tabla 4.2) muestran un promedio de 0.2 m. La desviación estándar es 1.1 m más que la esperada para Sudamérica (Tabla 5.1, Rodríguez et al., 2005). Los valores máximos y mínimos superan a los errores esperados para el modelo. El ECM calculado presenta el mismo valor a la DESV EST.

ESTADISTICOS (m)	
Promedio	0
Máximo	44
Mínimo	-33
DESV EST	5
ECM	5
Total de Puntos	422

**Tabla 4.2:** Estadísticos de los  $H^{DIF}$ .

#### 4.2.2 Comparación del modelo SRTM en los puntos de la red de nivelación de alta precisión para la zona de estudio.

Las coordenadas horizontales de los puntos de la red de nivelación de alta precisión están referidas al sistema CI69, de modo que, no son consistentes con las coordenadas WGS84 del SRTM DEM. Las alturas de la RNAP están referidas al nivel medio del mar, materializado por el mareógrafo de Mar del Plata, las alturas del SRTM DEM están referidas al modelo EGM96. Las alturas se consideran consistentes para la comparación. En la Figura 4.7 se muestran los sistemas y superficies de referencias relacionados en esta comparación.



**Figura 4.7:** Sistemas de referencias para el SRTM DEM y la RNAP IGN.

Antes de efectuar la evaluación del DEM es necesario realizar una transformación de coordenadas CI69 a coordenadas WGS84. Esta transformación se puede realizar en coordenadas geodésicas (NIMA TR8350.2, 2000).

$$\phi_{WGS84} = \phi_{Local} + \Delta\phi \quad (4.8)$$

$$\lambda_{WGS84} = \lambda_{Local} + \Delta\lambda \quad (4.9)$$

$$h_{WGS84} = h_{Local} + \Delta h \quad (4.10)$$

donde  $\Delta\phi$ ,  $\Delta\lambda$ ,  $\Delta h$  están provistas por las fórmulas de transformación de Molodensky Estándar (Ec. 4.11; 4.12 y 4.13).

$$\Delta\phi = \{-\Delta X \sen \phi \cos \lambda - \Delta Y \sen \phi \sen \lambda + \Delta Z \cos \phi + \Delta a (R_N e^2 \sen \phi \cos \phi)/a + \Delta f [R_M (a/b) + R_N (b/a)] \sen \phi \cos \phi\} \cdot [(R_M + h) \sen 1 \gamma]^{-1} \quad (4.11)$$

$$\Delta\lambda = [-\Delta X \sen \lambda + \Delta Y \cos \lambda] \cdot [(R_N + h) \cos \phi \sen 1 \gamma]^{-1} \quad (4.12)$$

$$\Delta h = \Delta X \cos \phi \cos \lambda + \Delta Y \cos \phi \sen \lambda + \Delta Z \sen \phi - \Delta a (a/R_N) + \Delta f (b/a) R_N \sen^2 \phi \quad (4.13)$$

En las que  $\Delta\phi$ ,  $\Delta\lambda$  y  $\Delta h$  son las correcciones para transformar las coordenadas geodésicas locales a valores  $\phi_{WGS84}$ ,  $\lambda_{WGS84}$ ,  $h_{WGS84}$ . Las unidades de  $\Delta\phi$  y  $\Delta\lambda$  se expresan en segundos de arco; las unidades de  $\Delta h$  en metros;  $\phi_{Local}$ ,  $\lambda_{Local}$ ,  $h_{Local}$  son las coordenadas geodésicas (datum local).

En la ecuación 4.5, la altura elipsoidal  $h$  no está disponible para el datum geodésico local, en consecuencia, la corrección  $\Delta h$  no se aplica a la transformación WGS84.

Asimismo  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  son los desplazamientos entre los centros del datum geodésico local y el datum WGS84; correcciones para transformar coordenadas rectangulares (X, Y, Z) relativas al sistema geodésico local a los valores X, Y, Z relacionadas con el sistema WGS84. (Ver Tabla 4.3). Además  $a$  es el semi-eje mayor del elipsoide del datum geodésico local;  $b$  es el semi-eje menor del elipsoide del datum geodésico local;  $b/a = 1 - f$ ,  $f$  es el aplastamiento del elipsoide del datum geodésico local;  $\Delta a$ ,  $\Delta f$  son las diferencias entre el semieje mayor y el aplastamiento del elipsoide del datum geodésico local y el elipsoide WGS84, respectivamente (WGS84 menos local);  $e$  es la primera excentricidad;  $e^2 = 2f - f^2$ ,  $R_N$  es el radio de curvatura del primer

vertical;  $R_N = a/(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{1/2}$ ;  $R_M$  es el radio de curvatura en el meridiano y  $R_M = a(1 - e^2)/(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{3/2}$ .

Todas las cantidades  $\Delta$  se forman al restar valores del elipsoide de referencia del datum geodésico local desde los valores de elipsoide WGS84.

Los parámetros de transformación para calcular las ecuaciones (4.11: 4.12 y 4.13) se muestran en la Tabla 4.3.

Datum Geodésico Local	Diferencias de los elipsoides de referencia y parámetros			Parámetros de transformación			
Nombre	Elipsoide	$\Delta a$ (m)	$\Delta f \times 10^4$	Año	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	$\Delta Z$ (m)
Campo Inchauspe 1969	Internacional 1924	-251	-0.14192702	1987	-148 ±5	136 ±5	90 ±5

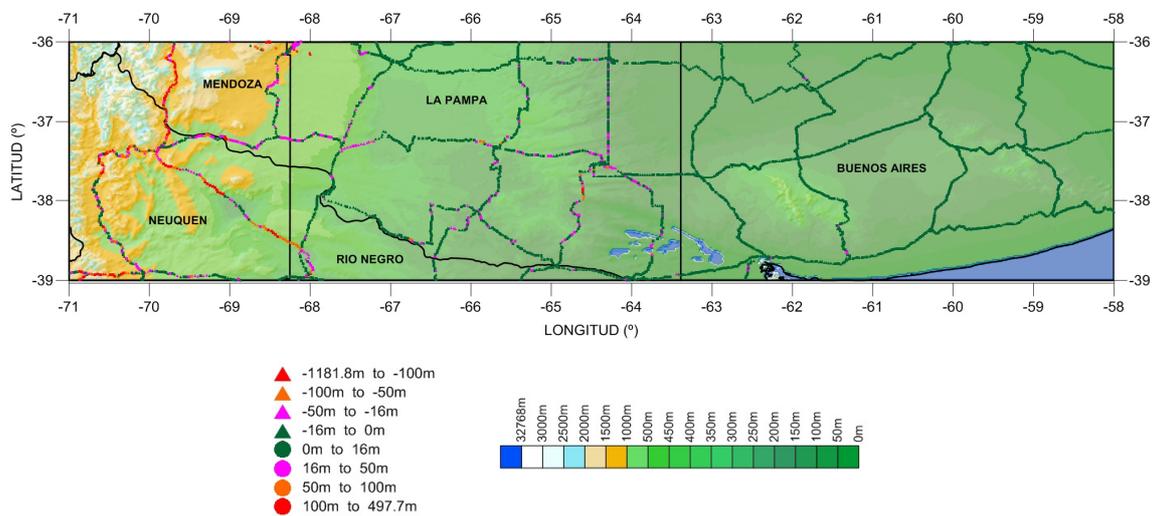
**Tabla 4.3:** Parámetros de transformación del Datum geodésico local (CI69) al WGS84 (NIMA TR8350.2, 2000).

Una vez realizada la transformación entre los sistemas horizontales se procede al cálculo de las diferencias de alturas en los puntos discretos de la RNAP aplicando la ecuación 4.14 y en base a la (4.1).

$$H^{DIF} = H^{SRTM90m} - H^{NIVIGN} \quad (4.14)$$

Donde  $H^{DIF}$  es la diferencia de alturas o errores,  $H^{SRTM90m}$  es la altura del modelo SRTM respecto del modelo EGM96 y  $H^{NIVIGN}$  es la altura nivelada respecto del nivel medio del mar.

En la Figura 4.8 se muestra un mapa clasificado de diferencias obtenidas para todos los puntos de la RNAP de la zona de estudio, como fondo de la figura el modelo SRTM. Son 2697 puntos.



**Figura 4.8:** Mapa clasificado de diferencias.

El 81.4 % de los puntos de la RNAP tiene diferencias menores a los 16 m módulo (Tabla 4.4), el 18.6 % tiene diferencias groseras. Las diferencias más grandes aumentan hacia el oeste de la región.

Diferencias Mínimo (m)	Diferencias Máximo (m)	Porcentaje (%)	Cantidad de puntos RNAP	Símbolo
-1181.8	-100	2.3	62	▲
-100	-50	1.0	27	▲
-50	-16	4.0	109	▲
-16	0	22.2	599	▲
0	16	59.2	1596	●
16	50	6.8	184	●
50	100	2.3	62	●
100	497.7	2.2	58	●
		100	2697	

**Tabla 4.4:** Estadísticas de las diferencias.

En la Tabla 4.5 se han eliminado 22 puntos por considerar excesivos los errores, en coincidencia con espejos de agua o en los que se observaron grandes inexactitudes posicionales comprobando las coordenadas de los mismos en Google Earth. No obstante ello, los resultados de la comparación de los puntos de nivelación con el modelo SRTM, muestran un valor de desviación estándar muy elevado, es 19 veces peor que el esperado para Sudamérica (Tabla 5.1; Rodríguez et al., 2005). Los errores son muy elevados.

ESTADÍSTICOS (m)	
Promedio	0
Máximo	498
Mínimo	-1182
DESV EST	78
ECM	78
Total de Puntos	2697

**Tabla 4.5:** Estadísticos de los errores entre el SRTM y los RNAP IGN.

La Figura 4.9 muestra, como ejemplo, la inexactitud de las coordenadas de los puntos fijos altimétricos indicados como PF62, PF63, etc. de la Línea 149 que se desarrolla de norte-este a sur-oeste a lo largo de la Ruta Nacional 40, al oeste de la región de estudio.



**Figura 4.9:** PFA de la Línea 149 de la RNAP IGN.

Teniendo en cuenta que los itinerarios de nivelación se desarrollaron a lo largo de caminos, las distancias de los PFA<sup>3</sup> a la Ruta son considerables (Tabla 4.6). Algunas de las marcas se posicionan sobre el lecho del río.

Línea 149	Distancia (m)	Obs.	Línea 149	Distancia (m)	Obs.
PFA	Ruta Nac. 40		PFA	Ruta Nac. 40	
58	123	Lecho del río	63	653	
59	883		64	3470	
60	1005		65	2380	
61	2331		66	398	
62	630				

**Tabla 4.6:** Distancias PFA de la Línea 149 a la Ruta Nacional 40 al oeste de la región de estudio.

De acuerdo a la comparación del modelo en puntos de la red de nivelación de alta precisión se puede concluir que:

En el apartado 4.2.2 se considera a los puntos de control o terrestres, independientes al modelo y suficientemente precisos. Las coordenadas horizontales de los PFA no están exentas de error.

Las coordenadas horizontales de los puntos altimétricos tienen errores groseros en su posición que alcanzan los 3 km.

Esos errores exceden las diferencias que pudieran existir entre los sistemas de referencias en los que están definidos.

La inexactitud en la posición de los puntos invalida cualquier análisis ya que la resolución del modelo SRTM es de 90 m.

Con la finalidad de profundizar el análisis de los errores obtenidos en esta primera evaluación, se incorpora a continuación el cálculo del modelo de pendientes.

#### 4.3 Definición de zonas con características topográficas similares.

En este apartado se calculará un modelo de pendientes con la finalidad de definir zonas de características topográficas similares en relación a su relieve. De esta manera se clasificará la región de estudio en dos zonas que se denominarán llanas y abruptas.

Los DEM contienen información explícita que es almacenada en el atributo del modelo (la altitud) e implícita que es relativa a las relaciones espaciales entre los datos, como la distancia o la vecindad. Ambos tipos de información permiten obtener información sobre la morfología del relieve. La pendiente es una de las variables más importantes que se deben tener en cuenta en la descripción numérica de las formas topográficas del relieve. La pendiente, como la orientación y la curvatura pueden ser representadas como *modelos digitales derivados* con igual resolución que el DEM original. (Felicísimo, 1999, Maune et al., 2007)

En un DEM, la altitud en el entorno inmediato de un punto puede describirse de forma aproximada mediante un plano de ajuste, cuya expresión está dada por la ec. 4.15.

$$z = a_{00} + a_{10} \cdot x + a_{01} \cdot y \quad (4.15)$$

<sup>3</sup> Punto Fijo Altimétrico.

Los coeficientes  $a_{10}$  y  $a_{01}$  son las derivadas primeras de la altitud con respecto a los ejes  $X$  e  $Y$ , es decir son las componentes de la pendiente sobre dichos ejes. El par de valores ( $a_{10}$  y  $a_{01}$ ) se denomina *gradiente* de  $z$  en el punto  $(x, y)$  (ec. 4.16).

$$a_{10} = \frac{\partial z}{\partial x} ; a_{01} = \frac{\partial z}{\partial y} \quad (4.16)$$

Las estimaciones de los coeficientes del gradiente, en los DEM matriciales, se ejecutan mediante operadores que se aplican sobre un entorno definido del punto problema. Para un punto situado en la fila  $i$ , columna  $j$ , donde  $d$  es la distancia entre filas y columnas, los valores del gradiente se calculan a partir de los cambios de altitud entre puntos vecinos (ec. 4.17). (Felicísimo, 1999).

$$a_{10} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2.d} \quad a_{01} = \frac{z_{i-1,j} - z_{i+1,j}}{2.d} \quad (4.17)$$

La pendiente en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector gradiente en ese punto y el eje  $Z$  (vertical). La pendiente  $\gamma$  puede calcularse a partir de los componentes del gradiente mediante la ecuación (4.18):

$$\gamma = \tan^{-1} \sqrt{a_{10}^2 + a_{01}^2} \quad (4.18)$$

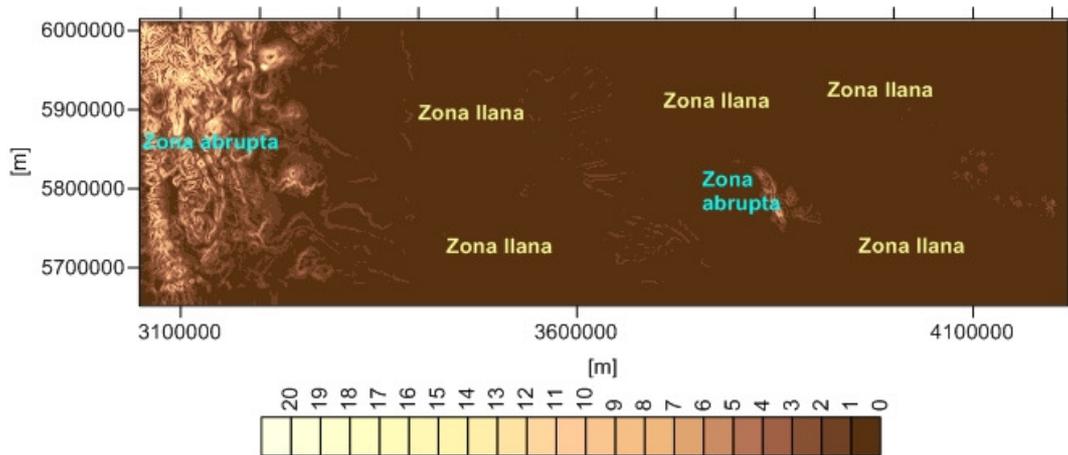
Dada la expresión del gradiente, el valor de  $\gamma$  refleja la pendiente media en el entorno utilizado para calcular los componentes  $a_{10}$  y  $a_{01}$ . Para el cálculo de la pendiente existe un buen número de alternativas cuyas ventajas y problemas deben evaluarse en cada caso y para cada aplicación. Los métodos más habituales se clasifican en función del número de puntos que intervienen en el cálculo: con dos, tres, cuatro u ocho puntos entre los vecinos seleccionados por su proximidad, peso, ubicación respecto del punto problema. (Felicísimo, 1999).

Se usa para el cálculo de las pendientes la ecuación de cuatro puntos (Moore, 1993 (4.19) porque se considera adecuada y suficiente a los fines de caracterizar diferentes zonas en el Mapa de Pendientes (Figura 4.10) para la zona de estudio.

$$S_T \approx \frac{360}{2\pi} \cdot \arctan \cdot \left[ \sqrt{\left( \frac{z_E - z_W}{2 \Delta x} \right)^2 + \left( \frac{z_N - z_S}{2 \Delta y} \right)^2} \right] \quad (4.19)$$

En la que  $S_T$  es el ángulo expresado en grados. La variación es de 0 grados (horizontal) y de 90 grados (vertical),  $z_E$ ,  $z_W$ ,  $z_N$  y  $z_S$  son las alturas del nodo próximo hacia el este, oeste, norte y sur del nodo de la grilla, cuya pendiente, se desea calcular,  $\Delta x$  es la distancia entre el nodo de la grilla y el vecino en el sentido este – oeste y  $\Delta y$  es la distancia entre el nodo de la grilla y el vecino en el sentido norte - sur.

Las coordenadas geodésicas del SRTM DEM se han transformado a coordenadas planas, ya que, en la ecuación 4.19 las alturas y las coordenadas horizontales están expresadas como tridimensionales cartesianas.



**Figura 4.10:** Mapa de pendientes para la zona de estudio.

En el mapa de pendientes obtenido para la zona de estudio (Figura 4.10) se destacan dos zonas de fuertes pendientes ( $12^\circ$  a  $20^\circ$ ) en colores claros, lo que indica la presencia de “topografía abrupta” o terrenos empinados. Se adopta la denominación “zona abrupta”. Estas zonas se encuentran al oeste de la región de estudio y la Sierra de la Ventana en la provincia de Buenos Aires. El resto de la región se caracteriza por pendientes suaves que llevan la denominación en el mapa de “zona llana”.

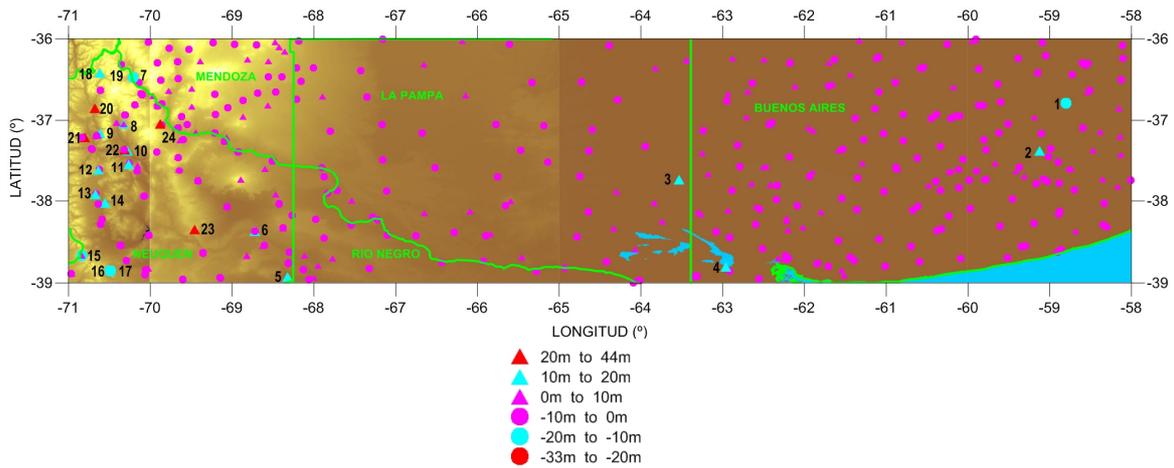
#### 4.4 Evaluación del modelo SRTM en puntos POSGAR07.

Se aplica la ecuación 4.7 para la zona llana y para la zona abrupta definidas mediante el mapa de pendientes de la Figura 4.10. Los resultados obtenidos para estos puntos se muestran en la Tabla 4.7. La desviación estándar para la zona abrupta es 3 veces peor que la zona llana, lo que es completamente lógico. Los estadísticos obtenidos para la zona llana presentan un buen ajuste.

ESTADISTICOS (m)	ZONA ABRUPTA	ZONA LLANA
Promedio	-0.4	0.5
Máximo	43.5	12.4
Mínimo	-33.2	-16.1
DESV EST	7.5	2.3
ECM	7.5	2.3
Número Puntos	177	245
Total de Puntos	422 (100%)	

**Tabla 4.7:** Estadísticos de diferencias de alturas para la zona de estudio.

La Figura 4.11 muestra un mapa clasificado de diferencias cada 10 m para la zona de estudio. La clasificación se efectúa en función de los resultados obtenidos por la Tabla 4.7. En color magenta se representan los errores que en módulo están comprendidos entre 0 m a 10 m; en celeste para los módulos de diferencias entre 10 m a 20 m y en rojo para módulos de diferencias mayores a 20 m. Todos los puntos POSGAR07 con errores en módulos mayores a 10 m se etiquetan en negro desde el número 1 al 24 desde el este hacia el oeste de la región, con la finalidad de ser analizados mediante principios generales de interpretación de imágenes radar.



**Figura 4.11:** Mapa de diferencias clasificado cada 10 m.

#### 4.4.1 Análisis de los puntos POSGAR07 con errores mayores a 10 m en módulo.

La Tabla 4.8 identifica y describe las características de los puntos POSGAR07, cuyos errores exceden en módulo los 10 m, representados en color celeste y rojo, numerados en color negro en la Figura 4.11. Asimismo muestra el valor y el signo de los errores y las provincias en los que se encuentran.

No.	CARACTERÍSTICAS $H^{\text{POSGAR07}}$ (m)	PUNTOS POSGAR07	Error (m)	PROVINCIA
1	Masa arbórea. (69.596)	p20cas	12.4	Buenos Aires
2	Sierras de Tandil. (381.583)	SITI	-16.1	Buenos Aires
3	Laguna de Guatraché. (138.042)	17-PR05	-10.1	La Pampa
4	Salinas Grandes. (61.089)	16-PR01	-10.2	Buenos Aires
5	Río Neuquén. Río Limay. (379.580)	PLOT	-12.3	Neuquén
6	Embalse Los Barreales. Embalse Meri Menuco. (521.424)	ANEL	-10.2	Neuquén
7	Río Barrancas. (1460.617)	18-132	11.4	Mendoza
8	Tricao Malal. (1355.499)	TRIZ	-11.9	Neuquén
9	Huinganco. (1275.23)	GUIN	-16.1	Neuquén
10	Chos Malal. (854.026)	CHML	-10.8	Neuquén
11	Taquimilán. (1003.859)	TAQI	-19.2	Neuquén
12	Localidad cercana El Huecú. (1776.249)	HUEC	-12.0	Neuquén
13	Localidad cercana Hualcupén. (1345.320)	BACZ	-18.0	Neuquén
14	Localidad cercana Loncopué. (1291.731)	19-PR05	-14.6	Neuquén
15	Localidad cercana Pino Hachado. (1529.648)	PIHZ	11.5	Neuquén
16	Ruta 13. (1263.692)	LLAM	12.2	Neuquén
17	Ruta 13. (1271.263)	LLAZ	10.7	Neuquén
18	Laguna Varvarco Campos. (1969.753)	CERR	-10.1	Neuquén
19	Laguna Varvarco Campos. (1950.286)	CERZ	43.6	Neuquén
20	Varvarco. (1253.613)	VARV	-28.4	Neuquén
21	Los Miches. (1321.585)	MICS	-22.8	Neuquén
22	Localidad cercana Chos Malal. (854.615)	CHOS	-22.0	Neuquén
23	Cerro Chihuido Sur. (1295.005)	CHIH	-33.2	Neuquén
24	Buta Ranquil (1221.354)	BUTA	21.3	Neuquén

**Tabla 4.8:** Descripción de las características de los puntos POSGAR07 cuyos errores exceden los 10 m en módulo.

A continuación se analizan las imágenes SRTM y las correspondientes en GE de cada punto detallado en la Tabla 4.8 y la Figura 4.11.

Con la finalidad de analizar las imágenes SRTM se consideran algunos principios generales de interpretación:

Cuando se emite un haz de micro-ondas desde un radar a la superficie terrestre, la mayor parte de ese haz es dispersado al contacto con ellas. Según la naturaleza del sustrato, el haz principalmente se dispersa al exterior (caso del suelo), se dispersa dentro del propio objeto (caso de la vegetación), o se refleja especularmente (caso del agua). En función de esos tres comportamientos el radar registrará una señal de retorno muy distinta. (Chuvieco, 2002; Farr et al., 2006; Reigber, 2001; Harding et al., 2005; Carabajal et al., 2006).

Otros factores influyen en la señal finalmente detectada por el sensor, entre ellas, las más importantes son la rugosidad y la geometría del terreno, el ángulo de incidencia del flujo y su polarización. Estos factores introducen una cierta variabilidad en torno al coeficiente promedio de cada tipo de cubierta, principalmente afectado por su conductividad o constante dieléctrica. Con estos elementos se puede abordar la ecuación fundamental del radar ecuación 4.20. (Chuvieco, 2002).

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \quad (4.20)$$

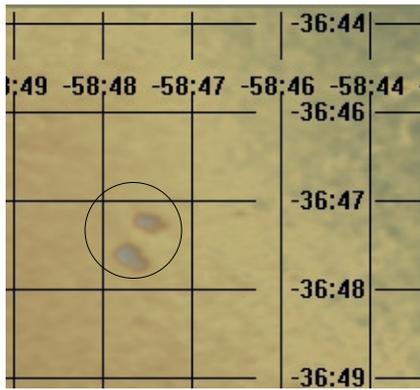
En la que  $P_r$  es la potencia retro-dispersada,  $P_t$  es la potencia emitida por el radar,  $G$  es el factor de ganancia de la antena,  $\lambda$  la longitud de onda,  $\sigma$  la sección eficaz de retro-dispersión y  $r$  la distancia entre el sensor y la cubierta.

El factor  $\sigma$  es el que ofrece mayor complejidad puesto que depende de la rugosidad del material, sus condiciones dieléctricas y orientación frente al flujo emitido. A mayor rugosidad mayor señal de retorno. El concepto de rugosidad no sólo depende de la estructura de la superficie, sino también de la longitud de onda de la observación. Esta relación se concreta gracias al criterio de Rayleigh (4.21), que considera una cubierta como rugosa si:

$$s_h \geq \frac{\lambda}{8} \cdot \cos \theta \quad (4.21)$$

Donde  $s_h$  es la desviación típica de la altura de la superficie;  $\lambda$ : longitud de onda de observación y  $\theta$  el ángulo de incidencia. En una superficie rugosa la dispersión de retorno se dirige en todas las direcciones y el sensor capta una fuerte señal (tonos brillantes) si es especular como las aguas en calma, tonos oscuros. (Chuvieco, 2002; Farr et al., 2006; Reigber, 2001)

**1.- Masa Arbórea:** se observan en la zona, masas arbóreas aisladas, un bosque en galería a lo largo de un arroyo que cruza la zona desde el noreste al suroeste de la misma. La diferencia de signo positivo, para esta región, surge de la comparación del punto *p20cas* (69.596 m) que se encuentra muy cercano a la masa arbórea señalada. (Figura 4.12 a y b). La presencia de árboles implica que la señal del radar se dispersa influenciada por la altura, estructura y densidad arbórea con penetración como es el caso de la banda C del SRTM (Farr et al., 2006; Carabajal, 2005), en consecuencia la altura SRTM es mayor que la altura POSGAR, presentando un resultado positivo. La diferencia en el punto *p20cas* es de 12.4 m.



(a)



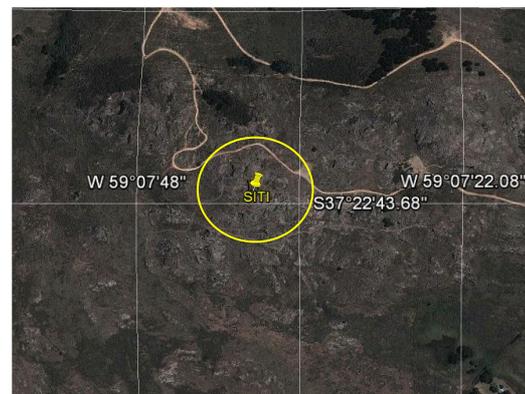
(b)

**Figura 4.12:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**2.- Sierras de Tandil. Buenos Aires:** el punto *SITI* (381.583 m) se encuentra sobre las Sierras de Tandil (Figura 4.13 a y b). En la geometría de adquisición de imágenes radar tiene una gran influencia el relieve, que modifica el ángulo local de incidencia, además de transformar la superficie real en superficie proyectada sobre la imagen. También depende de la pendiente (Chuvieco, 2002). El lugar donde se ubica el punto *SITI* tiene una tonalidad menos brillante que sus alrededores (Figura 4.13 a), lo que implica menor señal de retorno, con un gran ángulo de incidencia local. La altura SRTM es menor que la altura POSGAR, para el punto *SITI*. La diferencia es de -16.1 m.



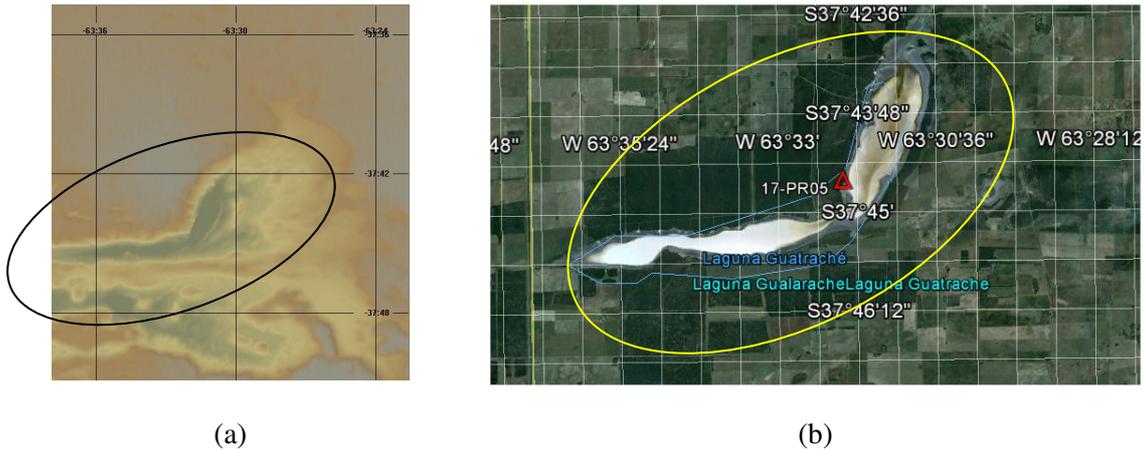
(a)



(b)

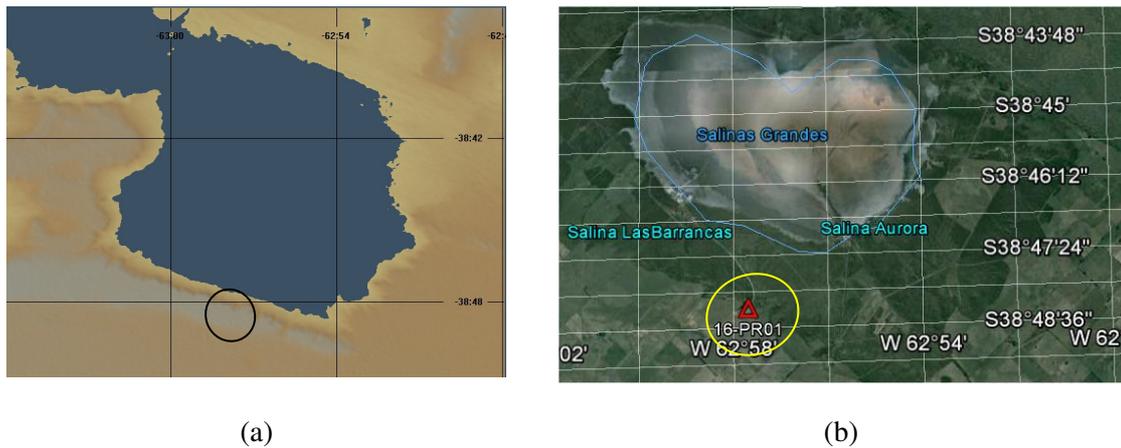
**Figura 4.13:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**3.- Laguna Guatraché. La Pampa:** la zona se caracteriza por la presencia de lagunas, en particular la Laguna Guatraché. El punto *PASMA 17-PR05* (138.042 m) se encuentra ubicado contiguo a la laguna (Figura 4.14 b). La presencia de agua tranquila tiende a reflejar especularmente la energía microonda. En la imagen 4.14 (a) de radar se observa a la laguna con una coloración oscura con un fuerte contraste entre su límite con la tierra y otros cuerpos, lo que, produce un retorno débil de la señal, lo que impacta en la reducción de altura en el punto. La diferencia de alturas es de -10.1 m.



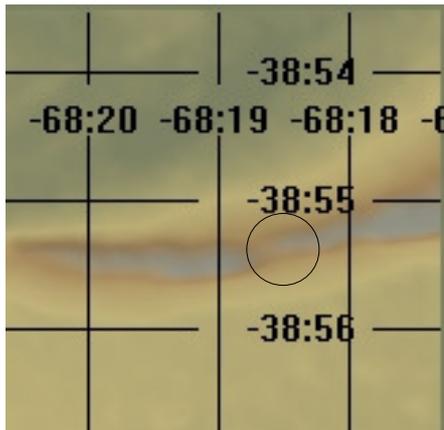
**Figura 4.14:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**4.- Salinas Grandes. Buenos Aires:** la presencia de las Salinas Grandes produce una notoria reducción de la altura del modelo. La Salinas Grandes (Figura 4.15 a) representada mediante un tono oscuro, presenta un comportamiento idéntico a las aguas tranquilas, en la que es notable el límite con la tierra. La Figura 4.15 (b) muestra la posición del punto PASMA 16-PR01 (61.089 m) en GE. La diferencia de alturas es de -10.20 m para el punto, producto de las zonas bajas que lo circundan.



**Figura 4.15:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**5.- Río Neuquén. Río Limay:** el punto *PLOT* (379.580 m) se encuentra en la cima de un promontorio a la vera de un camino de doble sentido con acceso a una infraestructura del tipo explotación minera (Figura 4.16 b). En la Figura 4.16 (a) se observa en color oscuro azulado el sitio de *PLOT*, hacia el norte una zona escasamente brillante coincidente con el promontorio citado y posiblemente de espaldas a la señal. Si se avanza más hacia el norte es coincidente con una zona baja con presencia de efluentes que en la imagen de GE es brillante y en la imagen radar es azul oscura (Figura 4.16 a). El punto *PLOT* se sitúa en la franja azulada que es en general más baja que el punto cima del promontorio, lo que conlleva una disminución de la altura SRTM. La diferencia es de -12.3 m.



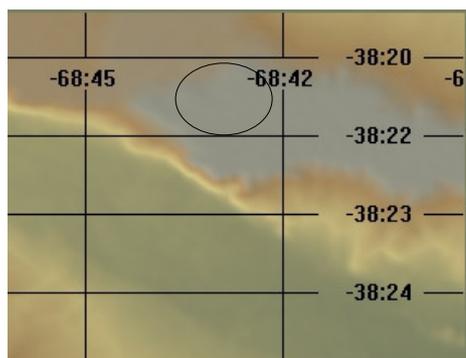
(a)



(b)

**Figura 4.16:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**6.- Embalse Los Barreales. Embalse Meri Menuco. Neuquén:** el punto *ANEL* (521.424 m) se encuentra en la cima de un promontorio cercano a la Ruta 7, con posibles episodios de deslizamientos sobre la misma. Se observa la presencia de infraestructura a nivel del sitio del punto, como así también, obras de protección sobre la margen del Río Neuquén. Escasa vegetación, rala y baja (Figura 4.17 b). En la Figura 4.17 a se observa la zona con una coloración azulada, lo que evidencia retorno débil de la señal radar, también se observa hacia el sur de la figura con tonalidades oscuras la zona de infraestructuras: el camino y la protección de márgenes. Entre ambas zonas se advierte una zona brillante posiblemente, la ladera, captada en dirección de la señal del radar. Como es de esperar, en las circunstancias descriptas, la altura SRTM es menor que la altura POSGAR, para el punto *ANEL*. La diferencia es de -10.2 m. Las alturas predominantes son de 521 m en la cima del promontorio, de 400 m a nivel del camino y de 391 m en el Río Neuquén.



(a)

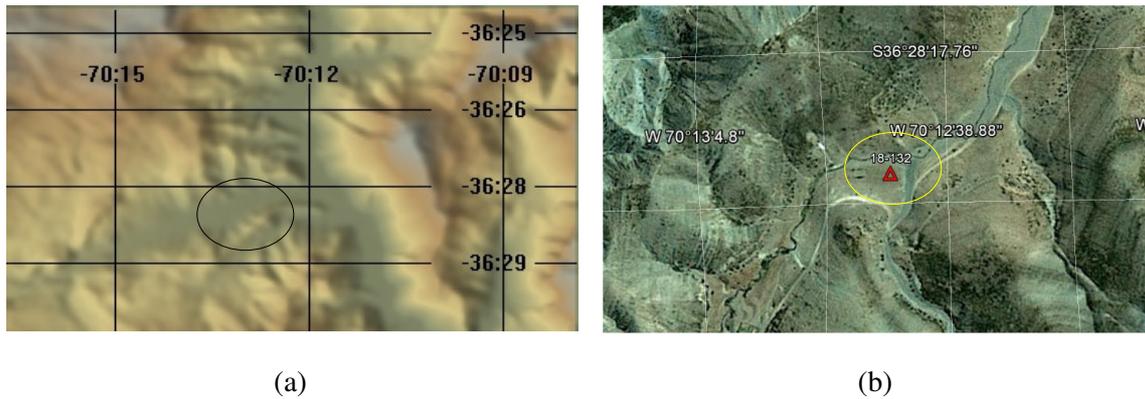


(b)

**Figura 4.17:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

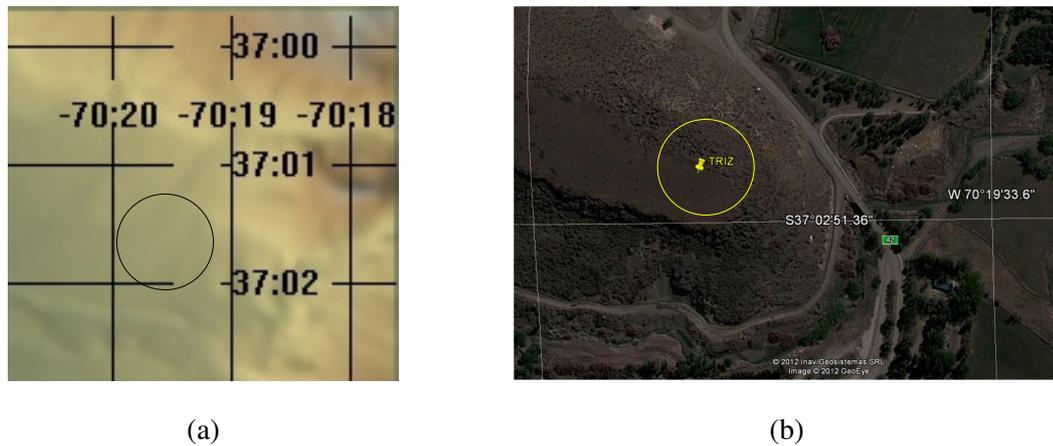
**7.- Río Barrancas. Mendoza:** el punto *PASMA 18-132* (1460.617 m) se encuentra al sur de un cono de deyección. El punto se encuentra en un lugar muy bajo (1427 m) en proximidad de un tributario del Río Barrancas rodeado de montañas de gran altura, en torno a los 2000 m. Es claro que las alturas SRTM son elevadas en la zona por efecto del relieve. En la Figura 4.18 (a) y (b) se muestra el área de estudio. En la Figura 4.18 (a) se observa en color oscuro el sitio del punto *18-132* y en colores

brillantes su entorno inmediato. En este caso la diferencia de alturas es positiva, con un valor de 11.4 m.



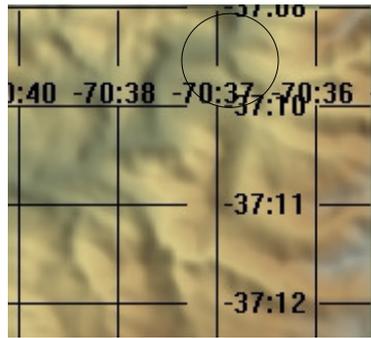
**Figura 4.18:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**8.- Tricao Malal. Neuquén:** el punto *TRIZ* (1355.499 m) se encuentra en la cima de un promontorio hacia el sudoeste de la localidad de Tricao Malal. La Ruta 42 rodea al cerro. Se observa una zona oscura (Figura 4.19 a) en el sitio, retorno débil de la señal. La altura SRTM del punto es menor que la altura del punto POSGAR. Resultado coherente ya que el SRTM integra la información del píxel de 90 m x 90 m con información predominante más baja que la del punto POSGAR. La diferencia es de -11.9 m.

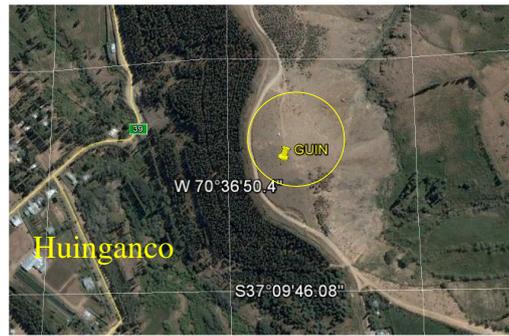


**Figura 4.19:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**9.- Huinganco. Neuquén:** el punto *GUIN* (1275.23 m) se encuentra hacia el este de la localidad de Huinganco y de un tributario del Río Neuquén. La Cordillera del Viento se ubica al este del punto *GUIN* (Figura 4.20 b). La Figura 4.20 (a) muestra tonalidades oscuras para el sitio. Es una situación similar al punto 8. La diferencia de alturas es de -16.1 m.



(a)



(b)

**Figura 4.20:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**10.- Chos Malal. Neuquén:** el punto *CHML* (854.026 m) se encuentra al oeste de la localidad de Chos Malal, en un valle, hacia el este del Río Neuquén (Figura 4.21 b). La Figura 4.21 (a) muestra tonos oscuros para el punto, en consecuencia la altura SRTM es menor que la altura del punto POSGAR. La diferencia es de -10.8 m.



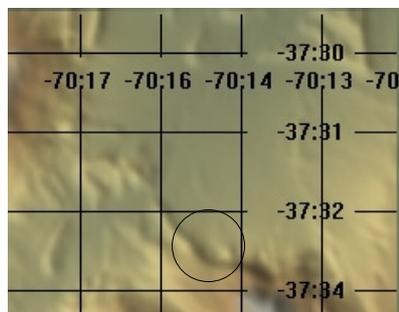
(a)



(b)

**Figura 4.21:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**11.- Taquimilán. Neuquén:** el punto *TAQI* (1003.859 m) se encuentra al sudoeste de la localidad de Taquimilán y al sudeste de la Ruta 29 (Figura 4.22 b). La Figura 4.22 a muestra la respuesta radar con escaso brillo para el sitio del punto, por ende, la altura SRTM es menor que la altura del punto POSGAR. La diferencia es de -19.2 m.



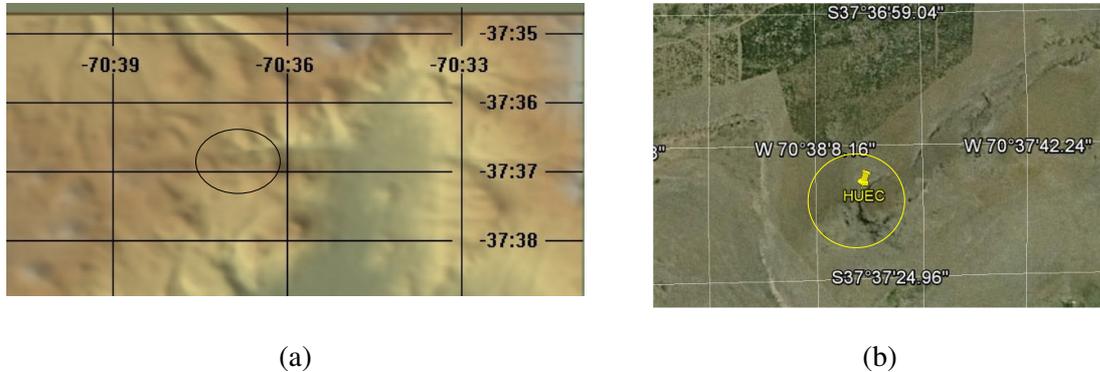
(a)



(b)

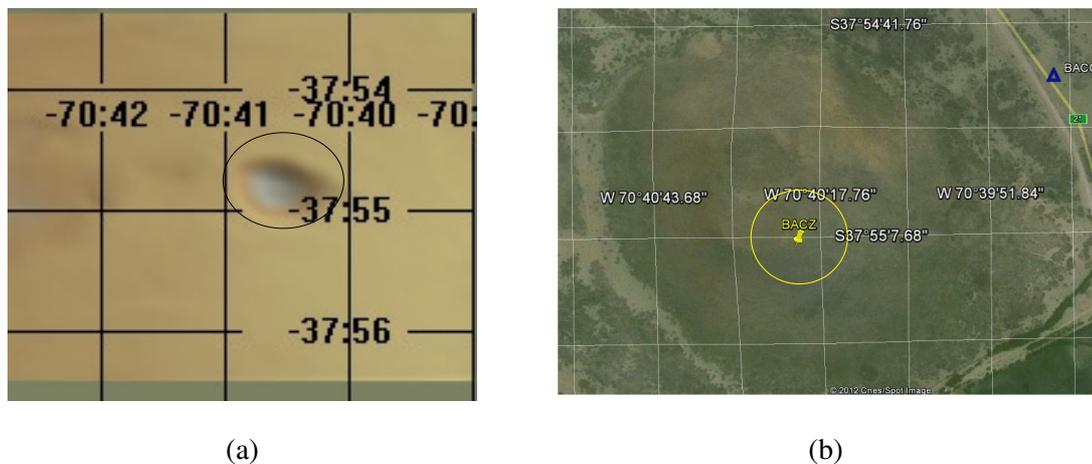
**Figura 4.22:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**12.- Localidad cercana El Huecú. Ruta 21. Neuquén.** El punto *HUEC* (1776.249 m) se encuentra al oeste de la localidad de El Huecú y al oeste de la Ruta 21 (Figura 4.23 b). La Figura 4.23 (a) muestra zonas con poco brillo para el punto, por consiguiente, la altura SRTM es menor que la altura del punto POSGAR. La diferencia de alturas es de -12.0 m.



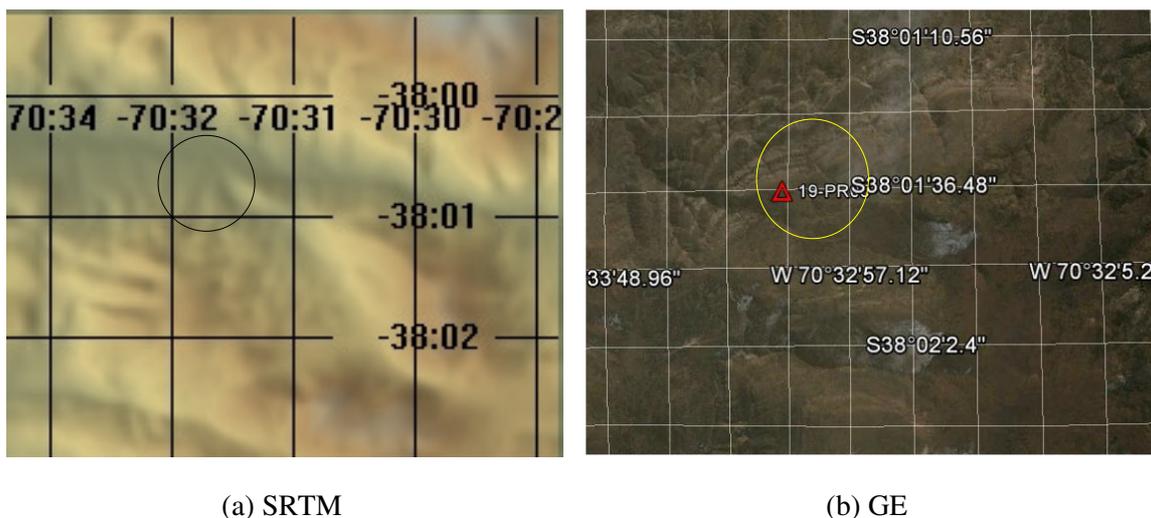
**Figura 4.23:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**13.- Localidad cercana Hualcupén. Ruta 21. Neuquén:** el punto *BACZ* (1345.320 m) se encuentra en un promontorio, hacia el noroeste de la localidad de Hualcupén y hacia el oeste de la Ruta 21 (Figura 4.24 b). Se observa en la Figura 4.24 a una zona oscura azulada, así que, la altura SRTM es menor que la altura del punto POSGAR. La diferencia es de -18.0 m.



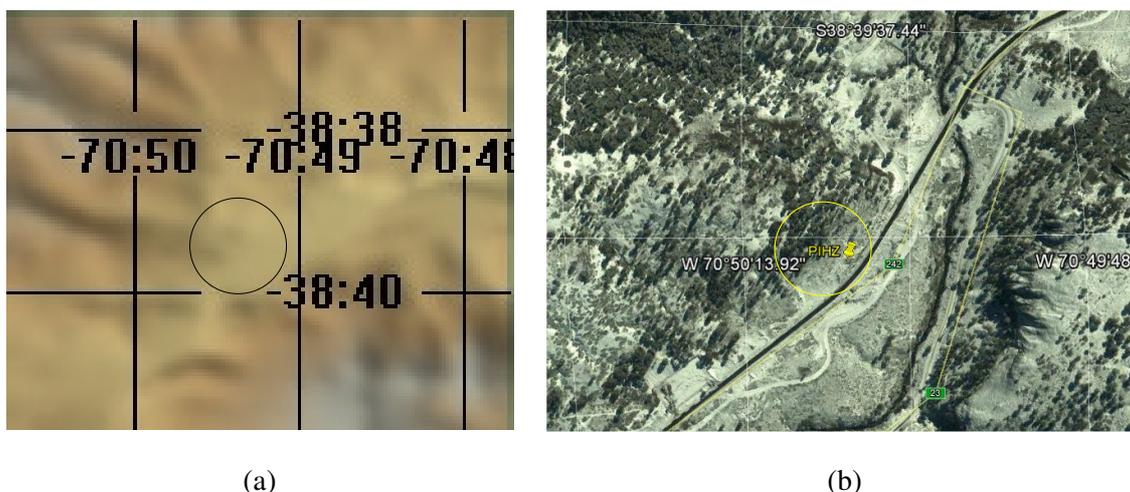
**Figura 4.24:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**14.- Localidad cercana Loncopué. Ruta 21. Neuquén:** el punto *PASMA 19-PR05* (1291.731 m) se encuentra hacia el noreste de la localidad de Loncopué y de la Ruta 21 que pasa por dicha localidad (Fig. 4.25 b). La Figura 4.25 (a) muestra tonalidades oscuras en inmediaciones del punto, por ello, la altura SRTM es menor que la altura del punto POSGAR. La diferencia es de -14.5 m.



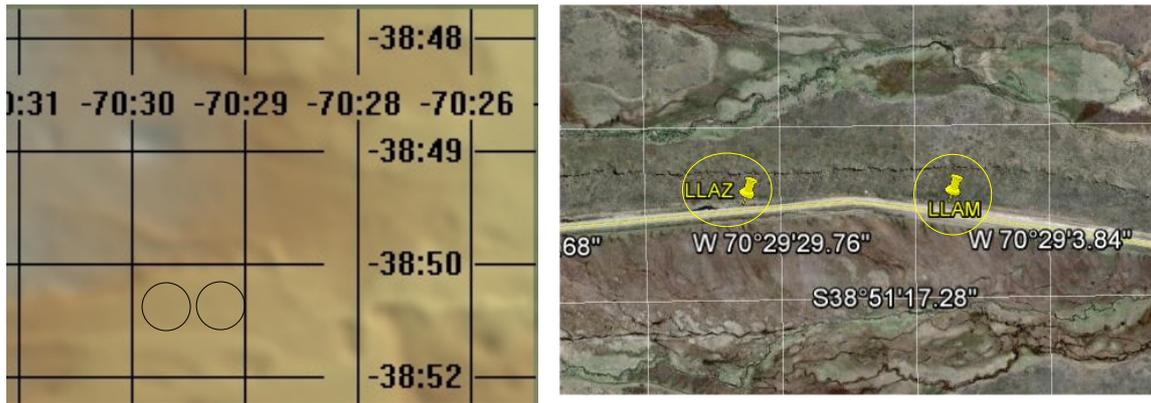
**Figura 4.25:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**15.- Localidad cercana Pino Hachado. Ruta 242 y Ruta 23. Neuquén:** el punto *PIHZ* (1529.648 m) se encuentra hacia el este de la localidad de Pino Hachado, sobre la Ruta 242 y cerca del empalme con la Ruta 23. Zona de alturas. Bosque de coníferas con sombra (Figura 4.26 b). La Figura 4.26 (a) muestra una zona brillante en las coordenadas del punto, lo que indica alturas SRTM mayores a la altura del sitio *PIHZ*. La diferencia es de 11.5 m.



**Figura 4.26:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**16 y 17.- RUTA 13. Neuquén:** los puntos *LLAM* (1263.692 m) y *LLAZ* (1271.263 m) se encuentran hacia el norte y cercanos a la Ruta 13. La Ruta 13 tiene recorrido de este a oeste en la zona (Fig. 4.27 b). La Figura 4.27 (a) muestra zonas brillantes para el sitio de los puntos, lo que indica alturas SRTM mayores a la altura *POSGAR PIHZ*. La diferencias son de 12.2 m y 10.7 m, respectivamente.

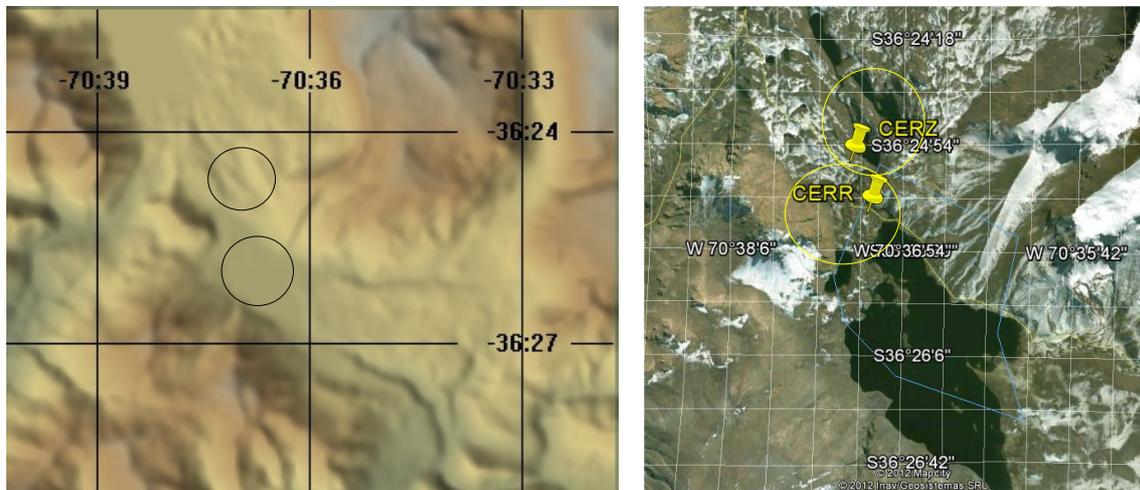


(a)

(b)

**Figura 4.27:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**18 y 19.- Laguna Varvarco Campos. Ruta 54. Neuquén:** los puntos *CERR* (1969.753 m) y *CERZ* (1950.286 m) se encuentran sobre la Ruta 54 y al sur de la Laguna Varvarco Campos. El punto *CERZ* se encuentra en una zona rodeado de montañas de gran altura. La altura SRTM es mayor que la altura POSGAR, por el relieve circundante. La diferencia es de 43.5 m. El punto *CERR* se encuentra en el borde norte de una laguna de aguas tranquilas con una superficie importante, lo que produce una reflexión especular de la onda de radar. La diferencia de altura para el punto *CERR* es de -11 m (Figura 4.28 b). En la Figura 4.28 (a) se observan las diferentes tonalidades para los puntos estudiados.

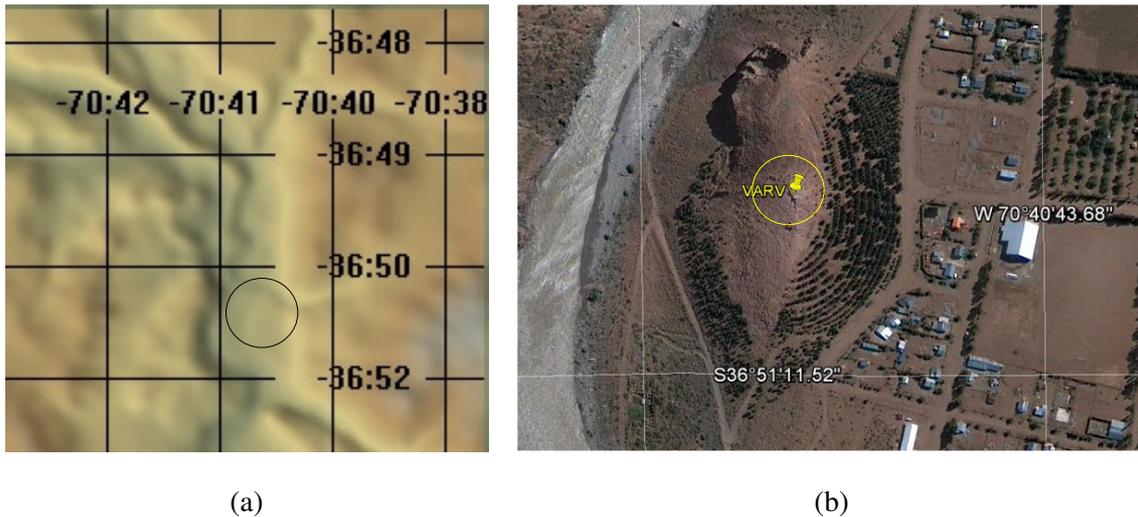


(a)

(b)

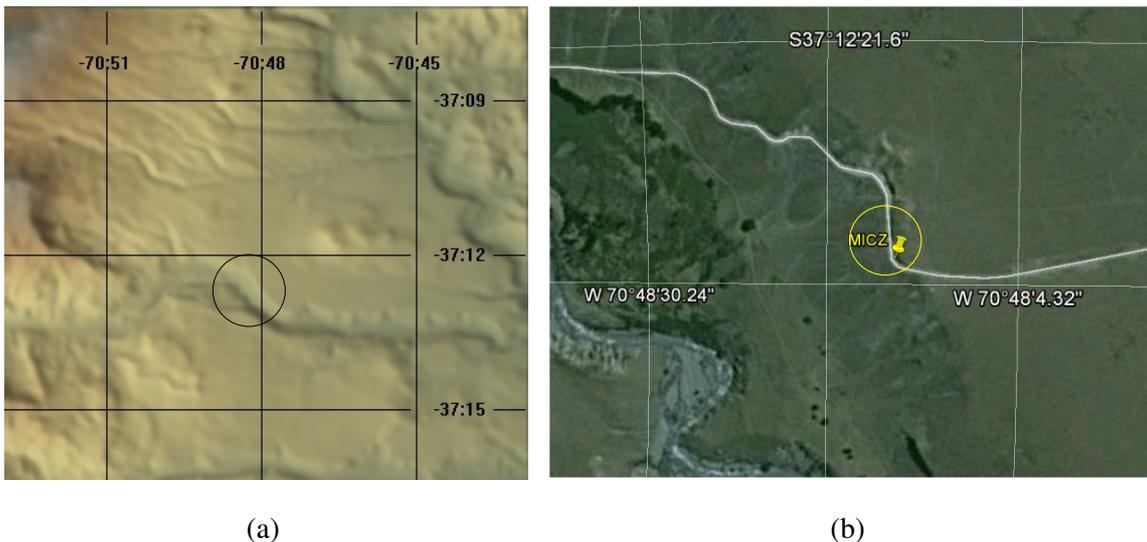
**Figura 4.28:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**20.- Varvarco. Ruta 43. Neuquén:** el punto *VARV* (1253.613 m) se encuentra hacia el oeste de la localidad de Varvarco y hacia el este del Río Varvarco (Figura 4.29 b). La Figura 4.29 (a) muestra tonalidades oscuras, así, la altura SRTM es menor que la altura POSGAR. La diferencia es de -28.4 m.



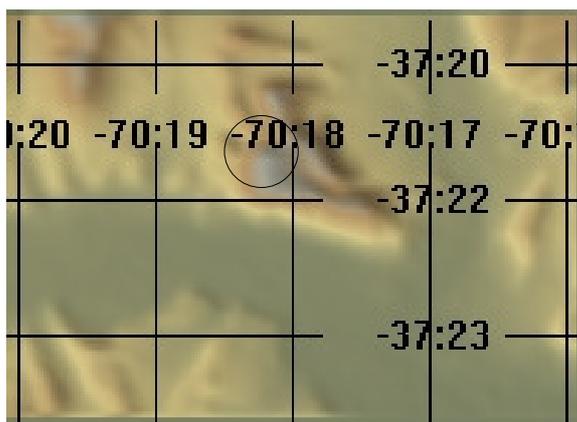
**Figura 4.29:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**21.- Los Miches. Neuquén:** el punto *MICS* (1321.585 m) se encuentra hacia el este de la localidad de Los Miches. El Río Neuquén transita desde el noroeste hacia el sudeste en la zona (Figura 4.30 b). En la Figura 4.30 (a) se observa una tonalidad oscura para el punto *MICZ*, luego, la altura SRTM es menor que la altura POSGAR. La diferencia es de -22.8 m.



**Figura 4.30:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**22.- Localidad cercana Cordillera del Viento. Neuquén:** el punto *CHOS* (854.615 m) se encuentra hacia el oeste de la Cordillera del Viento y al norte del Río Neuquén (Figura 4.31 b). En la Figura 4.31 (a) se observa una tonalidad oscura para el punto *CHOS*, subsiguiente, la altura SRTM es menor que la altura POSGAR. La diferencia es de -22 m.



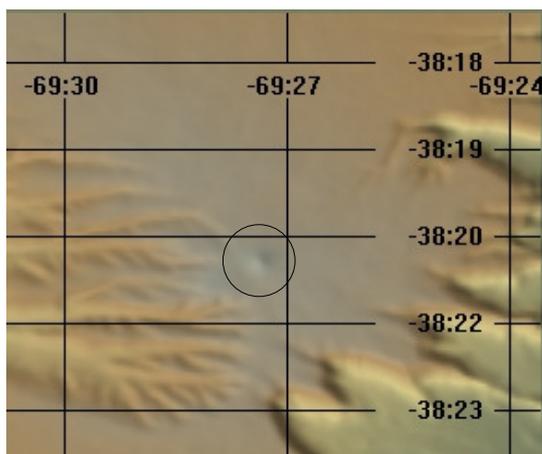
(a)



(b)

**Figura 4.31:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**23.- Cerro Chihuido Sur. Ruta 1. Neuquén:** el punto *CHIH* (1295.005 m) se encuentra al este de la Ruta 1, sobre el Cerro Chihuido Sur (Figura 4.32 b). En la Figura 4.30 (a) se observan tonalidades oscuras para el sitio estudiado, así, la altura SRTM es menor que la altura POSGAR. La diferencia es de -33.2 m.



(a)



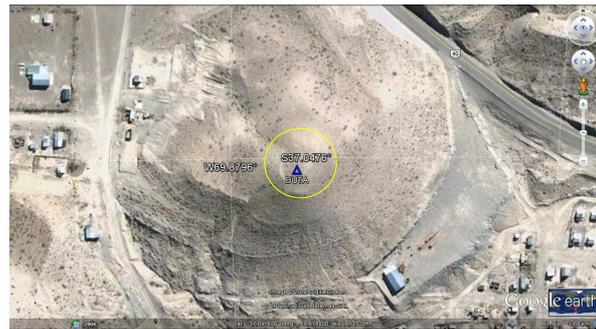
(b)

**Figura 4.32:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

**24.- Buta Ranquil. Neuquén:** el punto *BUTA* (1221.354 m) se encuentra sobre un promontorio hacia el noroeste de la localidad de Buta Ranquil (Fig. 4.33 b), hacia el este la Ruta Nac. 40. En la imagen SRTM (Figura 4.33 a) se observa una depresión brillante, con buena señal de retorno. El error para este punto es de 21.3 m.



(a)



(b)

**Figura 4.33:** La figura (a) muestra la zona de estudio en la imagen SRTM y la figura (b) en GE.

La precisión en la posición de los puntos POSGAR07 garantiza que la comparación sea confiable desde el punto de vista de sus coordenadas horizontales.

Los puntos que presentan errores por encima de los esperados son atribuibles a:

Puntos situados cerca de masa arbórea. La información de radar refleja la altura de la vegetación y no la del terreno.

Puntos cercanos a espejos de agua y salinas. En estas condiciones, la información radar es ruidosa y los resultados son deficientes.

Puntos situados en serranías o sobre promontorios del terreno. La integración de información altimétrica sobre un píxel de 90 m en estas zonas de fuertes gradientes, produce un error de representación.

Puntos situados en zonas bajas en relación a relieves circundantes de gran altura. El origen del error se corresponde con la misma lógica del ítem anterior.

En el próximo capítulo 5 de esta tesis se presentan los estadísticos de los puntos que se aceptan para el análisis. Estos puntos se seleccionan en función de criterios de aceptación y a las conclusiones de este capítulo.

## Capítulo 5. Integración de información local.

En el presente capítulo se filtran los datos POSGAR07 cuyos errores exceden a los errores obtenidos por evaluaciones externas para las zonas llana y abrupta de la región de estudio. Se calcula el modelo SRTM desplazado para una gran extensión de la provincia de Buenos Aires. Se obtiene un primer modelo mejorado. A continuación se calcula un modelo mejorado que se evalúa mediante el método de validación cruzada. Los modelos obtenidos en este capítulo se ajustan con la red GEOBA.

### 5.1 Antecedentes sobre la evaluación del SRTM.

El antecedente más importante que permitió establecer los errores verticales esperados para el SRTM DEM es el desarrollado por Rodríguez et al., 2005 del JPL de la NASA quien informa que como parte de la misión SRTM, se llevó a cabo una campaña de mediciones en tierra a nivel mundial que permitió la evaluación del SRTM.

Se llevaron a cabo transectas mediante el uso del Sistema KGPS<sup>1</sup> para coleccionar un conjunto de puntos de control terrestre (GCP<sup>2</sup>) distribuidos mundialmente. Los datos KGPS fueron recolectados por receptores GPS montados en vehículos que transitaban sobre carreteras, lo que produjo un conjunto de datos que representó un muestreo no uniforme de latitud, longitud y altura a lo largo de las mismas. El terreno muy accidentado no está considerado. Por lo tanto, las estimaciones que se presentan en la Tabla 5.1 pueden ser optimistas para estas regiones. El total de datos recolectados obtenido fue de casi 9,4 millones de muestras que abarcan seis continentes con una precisión general de  $\sim 0.50$  m ( $1\sigma$ ). (Rodríguez et al, 2005, pág. 9).

Los resultados de la comparación de los puntos de control terrestre con el SRTM se muestran en la tabla 5.1 Se resalta en negrita los valores obtenidos para Sudamérica.

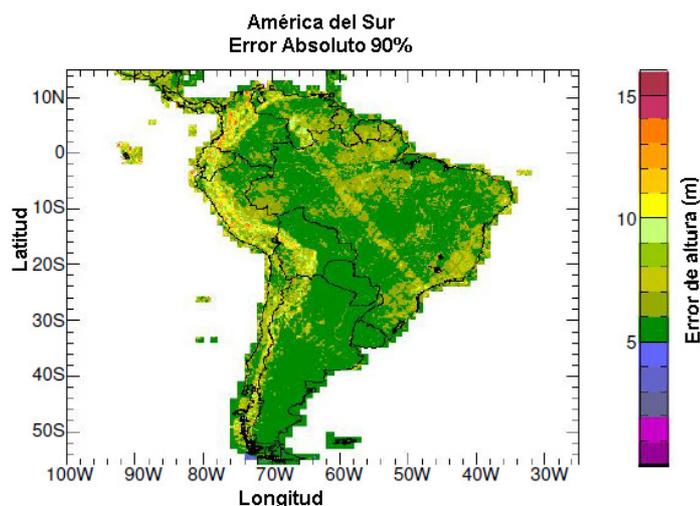
Continente	Media	Desviación Estándar	Error Absoluto en el 90%
África	1.3	3.8	6.0
Australia	1.8	3.5	6.0
Eurasia	-0.7	3.7	6.6
Norte América	0.1	4.0	6.5
Nueva Zelanda	1.4	5.9	10.0
<b>Sudamérica</b>	<b>1.7</b>	<b>4.1</b>	<b>7.5</b>

**Tabla 5.1:** Resumen de los valores medio, desviación estándar y error absoluto resultado de la comparación GCP KGPS con los datos de SRTM. Todas las cantidades están en metros.

Cuando se combinaron los errores aleatorios junto con el error de la larga longitud de onda se obtuvieron las estimaciones formales de error absoluto que se muestran en la Figura 5.1 para América del Sur.

<sup>1</sup> Kinematic Global Positioning System.

<sup>2</sup> Ground Control Point.



**Figura 5.1:** Error vertical absoluto estimado 90% para América del Sur. Los errores son menores que 10 m. Los mayores errores corresponden a las áreas de relieve alto (Himalaya, Andes) y las áreas lisas (Sahara). (Rodríguez, et al., 2005, pág. 82).

### 5.2 Criterios para el filtrado de los datos POSGAR07

El error esperado del SRTM DEM es de 16 m (CGIAR), este valor se adopta como límite para la zona abrupta con la finalidad de contar con la mayor cantidad de puntos que puedan mejorar al DEM. Para la zona llana se adopta el valor de 6 m (Fig. 5.1). La información que se presenta en la Tabla 5.2 resume el criterio adoptado para el filtrado de los datos locales en vista de su posterior integración.

Validación SRTM para Sudamérica (Rodríguez et al., 2005)	
Error altura absoluto vertical (Zona abrupta)	16 m
Error altura absoluto vertical (Zona llana)	6 m

**Tabla 5.2:** Errores esperados para la zona abrupta y la zona llana para América del Sur.

Los datos locales que presentan errores (Ec. 4.8) en módulos menores a 16 m en zona abrupta y 6 m en zona llana se aceptan como puntos candidatos para ser integrados al modelo. Los estadísticos de esos puntos aceptados se muestran en la Tabla 5.3.

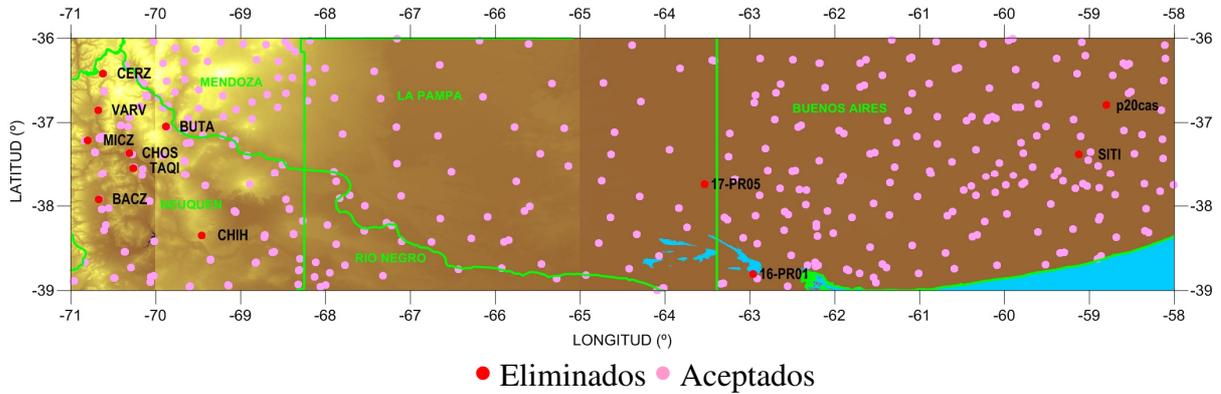
ESTADÍSTICOS (m)	Zona Abrupta	Zona Llana
Promedio	0.3	0.7
Máximo	12.2	5.2
Mínimo	-16.1	-5.9
DESV EST	4.9	1.6
Cantidad	422	
Cantidad Aceptados	169	241
Cantidad Eliminados	8 (2%)	4 (1%)

**Tabla 5.3:** Estadísticas de los diferencias para los puntos aceptados para la zona de estudio.

Se observa en la Tabla 5.3 que la DESV EST es 0.80 m más alta en la zona abrupta que la esperada para Sudamérica (Tabla 5.1), pero en la zona llana es 2.5 veces mejor. Teniendo en cuenta que el valor tomado como referencia (4.1 m) es optimista, se puede estimar, que el valor obtenido para la zona abrupta es razonablemente bueno, una vez aplicado los criterios de aceptación. El valor obtenido para la zona llana muestra un muy buen ajuste del modelo. Los valores máximos y mínimos son menores a los esperados por la CGIAR para ambas zonas (Tabla 5.2).

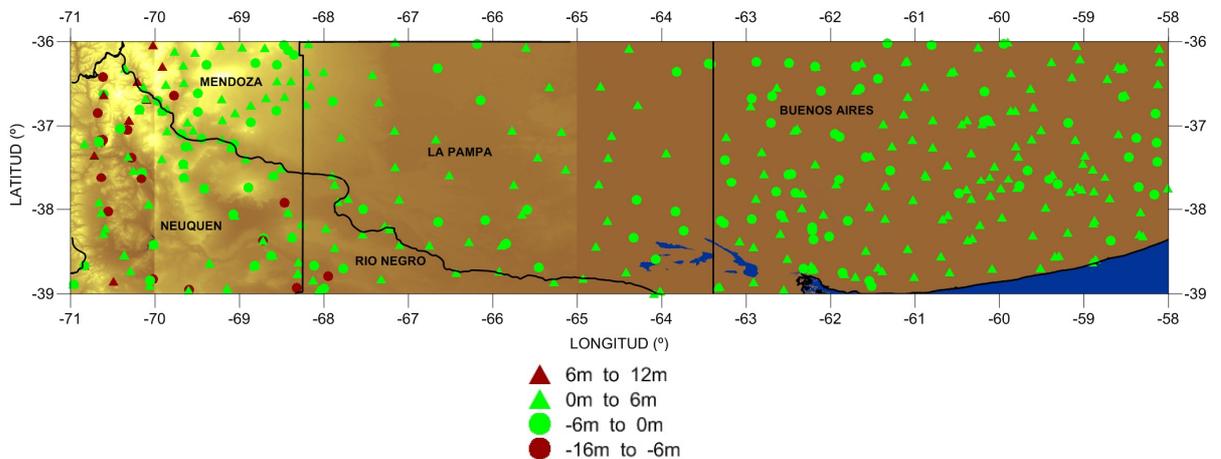
La distribución geográfica de los puntos POSGAR07 aceptados están representados en color rosa (Fig. 5.2), los eliminados en color rojo, estos últimos, con su denominación. Son 12 puntos eliminados en total, cuatro en la zona llana y ocho en la zona abrupta de la región de estudio. Diez de los doce puntos eliminados tienen puntos cercanos aceptados, sólo los puntos CHIH y 17-PR05 no lo tienen.

La magnitud de los errores de los puntos eliminados se muestra en la Figura 4.11 y en los estadísticos en la Tabla 4.8 del Capítulo 4.



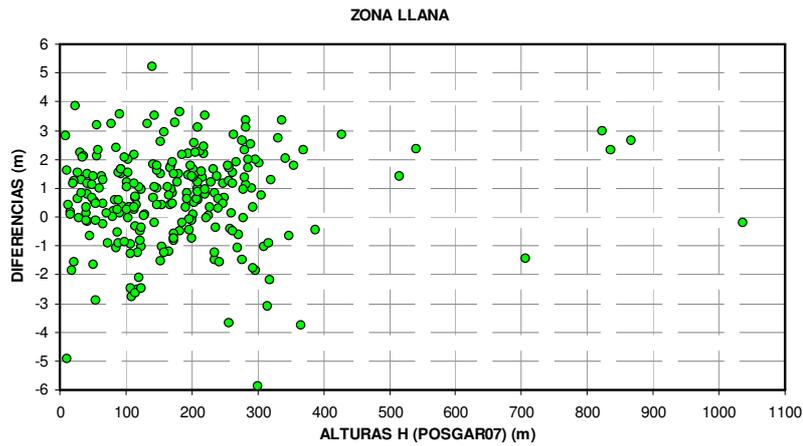
**Figura 5.2:** Mapa de puntos POSGAR07 aceptados y eliminados.

Los puntos POSGAR07 aceptados para la integración se muestran en la Fig. 5.3 mediante un mapa de errores clasificado cada 6 m en módulo. Los puntos que presentan errores mayores a los 6 m en módulo se posicionan hacia el oeste de la región de estudio caracterizada como zona abrupta.



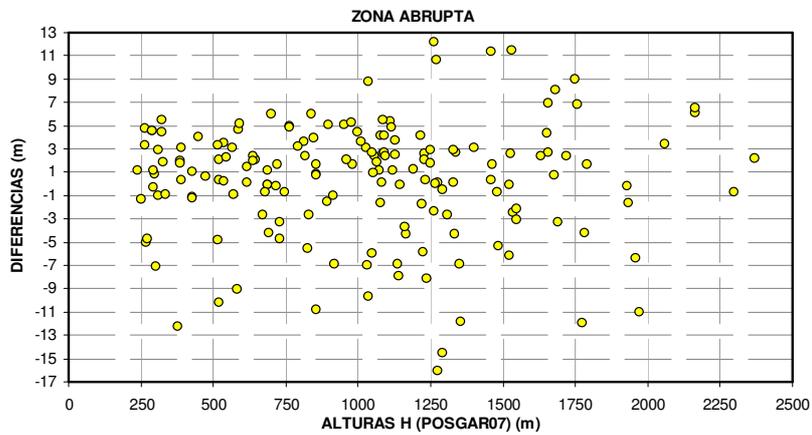
**Figura 5.3:** Mapa de diferencias de los puntos POSGAR07 aceptados para la integración al SRTM DEM.

Se presenta en la Fig. 5.4 un gráfico de diferencias en función de las alturas ortométricas POSGAR07 (4.7), (§ 4.2.1). La dispersión de los puntos varía entre un máximo de 5.2 m y un mínimo de -5,9 m para la zona llana. Se observan que las diferencias no muestran dependencia alguna con la altura.



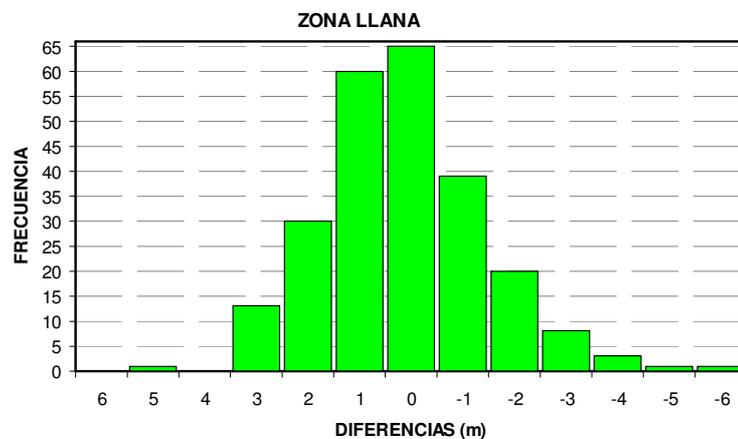
**Figura 5.4:** Gráfico de diferencias para los puntos aceptados. Zona llana.

El gráfico de diferencias para la zona abrupta (Fig. 5.5), muestra que, la dispersión de los puntos varía entre un máximo de 12.2 m y un mínimo de -16.1 m. Se observa, en general una gran dispersión, en la gráfica.



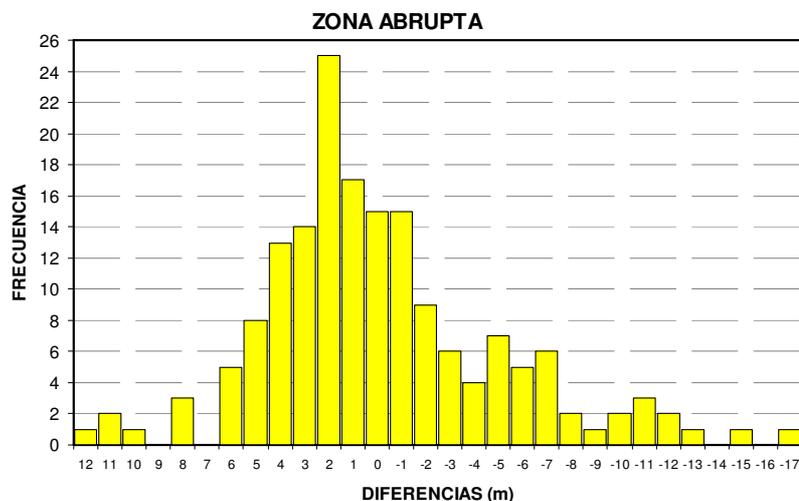
**Figura 5.5:** Gráfico de diferencias de puntos aceptados. Zona abrupta.

La figura 5.6 muestra el diagrama de frecuencia para la zona llana. Hay 241 puntos que presentan errores que en módulo son menores a 6 m. La diferencia que más se repite es entre 0 m y 1 m. La distribución está centrada en cero.



**Figura 5.6:** Diagrama de frecuencia de diferencias de puntos aceptados. Zona llana.

El diagrama de frecuencia (Fig. 5.7) para la zona abrupta muestra que la diferencia que más se repite es entre 2 m y 3 m, la distribución de los errores no es simétrica respecto de 0.



**Figura 5.7:** Diagrama de frecuencia de diferencia de puntos aceptados. Zona abrupta.

Los resultados de la comparación del modelo SRTM con los puntos POSGAR07 resultan muy confiables por el origen de la información altimétrica y horizontal.

El filtrado de los puntos proporciona valores coherentes con los previstos por otras evaluaciones externas del modelo SRTM.

En consecuencia, el conjunto de datos POSGAR07 obtenido, luego de aplicar los criterios de aceptación, se consideran adecuados para ser incorporados como información local al modelo SRTM.

### 5.3 Integración de datos POSGAR07 al SRTM DEM.

Se selecciona para la aplicación de la metodología la zona comprendida entre los paralelos de  $-36^{\circ}$  a  $-39^{\circ}$  y los meridianos de  $-58^{\circ}$  a  $-63,4^{\circ}$  en la provincia de Buenos Aires. La red GEOBA dispone de puntos dobles sobre toda la extensión de este territorio. Cada punto doble está materializado por dos pilares altimétricos separados por unos 3 Km. Para citar un ejemplo el punto SALA (principal) tiene un punto doble que se denomina SAL1 (secundario). Estos puntos dobles permitirán la evaluación de los modelos mejorados que se van obteniendo. Por otro lado la red GEOBA dispone de alturas niveladas que se aplican en el § 7.5 (capítulo 7). Esta zona es predominantemente llana (§ 4.3, Fig. 4.10) con la presencia de zonas abruptas en Sierra de la Ventana y en Tandil. En consecuencia, la zona seleccionada es adecuada para la aplicación de la metodología.

Son 175 puntos locales para la zona de estudio. Los estadísticos de las diferencias de alturas ( $H^{DIFORIG}$ ) entre el DEM original y las alturas ortométricas GEOBA se presentan en la Tabla 5.4.

ESTADISTICOS (m)	$H^{DIFORIG}$
CANTIDAD DE PUNTOS	175
PROMEDIO	0.6
MAXIMO	3.8
MINIMO	-3.7
DESV EST	1.4

**Tabla 5.4:** Estadísticos de las  $H^{DIF}$ .

Con la finalidad de visualizar estas diferencias se presenta un mapa clasificado de errores. (Fig. 5.8). Anexo 1.

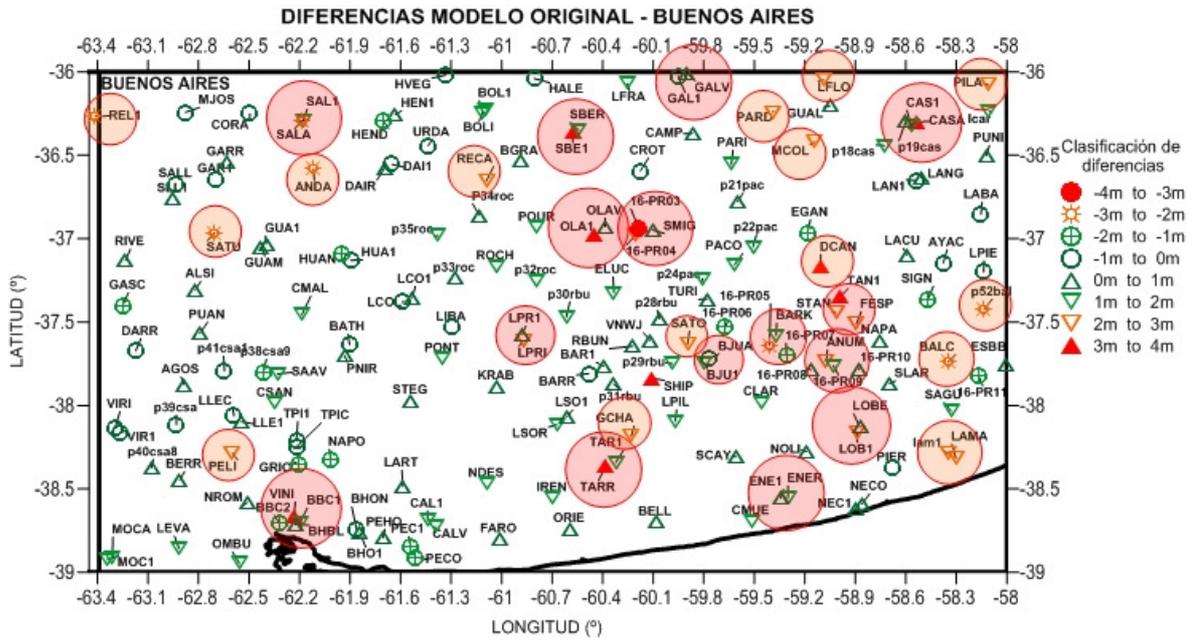


Figura 5.8: Mapa clasificado de  $H^{DIFORIG}$ .

En el mapa de  $H^{DIFORIG}$  se muestran en círculo naranja los puntos que presentan diferencias entre 3 m y 4 m en módulo y las diferencias comprendidas entre 2 m y 3 m en módulo. Por otro lado se muestran en círculos rojos los puntos principales y secundarios que presentan diferencias muy disímiles a pesar de su vecindad. Por ejemplo los puntos SALA y SAL1, SBER y SBE1, GALV y GAL1, CASA, CAS1 y p19cas, OLAV y OLA1, LPRI y LPR1, BJUA y BJU1, 16-PR05, 16-PR05, 16-PR08 y BARK, 16-PR09 y ANUM, LOBE y LOB1, TARR y TAR1, ENER y ENE1, BBC1, BBC2, VINI y BHBL. Es importante tener en cuenta la diferencia en la magnitud de los errores en estos puntos cuando se realice la evaluación de los DEM mejorados que se obtengan. Con la finalidad de profundizar el análisis de estas diferencias se presenta la Fig. 5.9 que exhibe este comportamiento del DEM en los puntos POSGAR07 principales (color magenta) y secundarios (color amarillo).

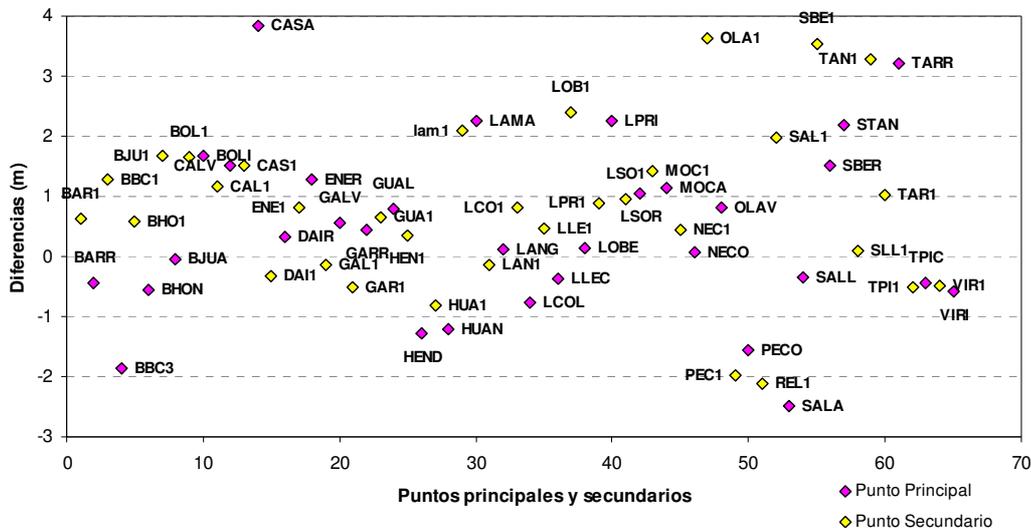


Figura 5.9: Diferencias ( $H^{DIFORIG}$ ) de los puntos principales y secundarios.

En la Fig. 5.9 se observa la presencia de puntos principales y secundarios con diferencias en orden de magnitud variable. Por ejemplo los puntos LANG y LAN1, NECO y NEC1 tienen diferencias disímiles de unos pocos centímetros. Sin embargo los puntos SALA y SAL1 tienen desigualdades de 4 m entre sus respectivas diferencias y presentan diferencias de signo distinto. Los puntos SBER, SBE1 tienen desigualdades de 2 m. Los puntos LOBE y LOB1 con 2 m de desigualdades. Ver Fig. 5.8.

Una vez realizado el análisis de los errores del DEM original y en vista de los resultados obtenidos en la Tabla 5.4, se procede a desplazar al modelo SRTM con el valor promedio de 0.6 m. Este cálculo se realiza para cada nodo de la grilla SRTM de la zona seleccionada. La ecuación 5.1 expresa este cálculo en función de las alturas.

$$H^{SRTM D} = H^{SRTM Orig} - D \quad (5.1)$$

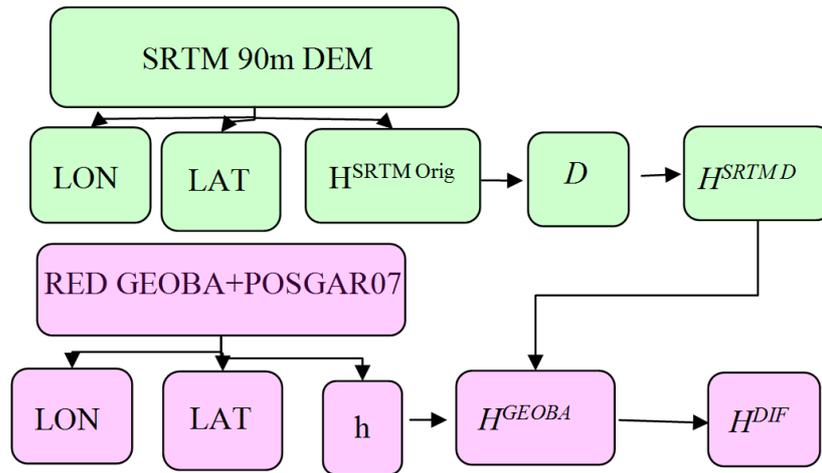
En la que  $H^{SRTM D}$  son las alturas ortométricas SRTM desplazadas;  $H^{SRTM Orig}$  son las alturas ortométricas del SRTM original y  $D$  es la corrección o desplazamiento. De esta manera se obtiene el modelo SRTM desplazado para la zona.

A continuación el software de aplicación impone la necesidad del cambio del formato de los datos del modelo desplazado para el cálculo de las  $H^{DIF}$  (ec. 5.2), es por ello, que se aplica el método de Kriging. El mismo es acorde a la distribución de puntos disponibles. Es importante destacar aquí, que en el método de Kriging, los pesos se determinan a partir de un análisis espacial basado en el semivariograma experimental, el promedio de las diferencias entre los valores obtenidos por Kriging y los reales es cero y la varianza de estas diferencias es mínima. Por otro lado algunos autores (Bosque, 2000; El-Sheimy et al., 2005; Moreno et al., 2006) establecen que la interpolación mediante Kriging proporciona buenos resultados en la generación de un modelo digital de la topografía. A continuación cada vez que sea necesaria la transformación del formato de los datos se adopta este método de interpolación.

A continuación se calculan las diferencias entre las alturas del modelo SRTM desplazado y las alturas de los 175 puntos de la red GEOBA. La ecuación 5.2 está expresada en función de las alturas.

$$H^{DIF} = H^{SRTM D} - H^{GEOBA} \quad (5.2)$$

En la que  $H^{DIF}$  son las diferencias de alturas ortométricas;  $H^{SRTM D}$  son las alturas ortométricas SRTM desplazadas y  $H^{GEOBA}$  son las alturas ortométricas GEOBA. En la Fig. 5.10 se muestra un esquema de la metodología de cálculo aplicada en las ecuaciones 5.1 y 5.2. En color verde se representan los datos SRTM, en color magenta los datos locales. Las magnitudes calculadas se presentan en *itálica*. Las flechas indican el sentido de aplicación de los cálculos.



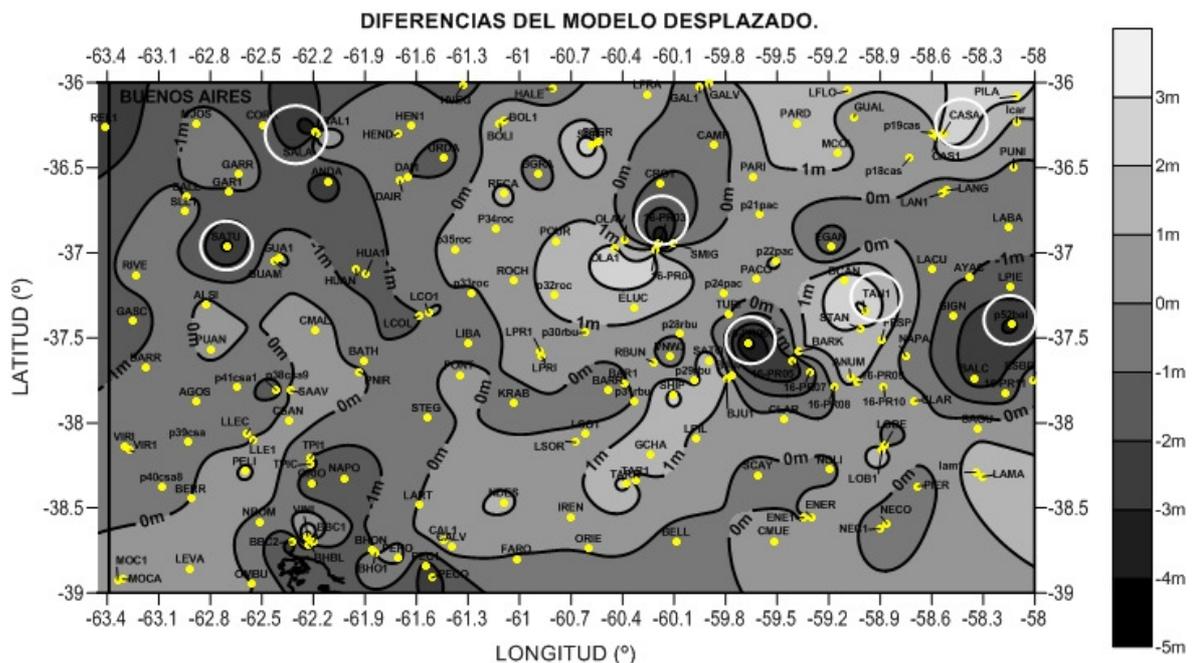
**Figura 5.10:** Diagrama de la metodología de cálculo de las  $H^{SRTM D}$  y las  $H^{DIF}$ .

La tabla 5.5 presenta los estadísticos de los  $H^{DIF}$  calculados (5.2). Se observa en el promedio el efecto del desplazamiento realizado al modelo.

ESTADISTICOS (m)	$H^{DIF D}$
CANTIDAD DE PUNTOS	175
PROMEDIO	0.0
MAXIMO	3.1
MINIMO	-4.8
DESV EST	1.4

**Tabla 5.5:** Estadísticos de las  $H^{DIF}$ .

Con la finalidad de visualizar estos resultados se confecciona la figura 5.11 que muestra isolíneas de los  $H^{DIF D}$  con una equidistancia de 1 m. Los puntos GEOBA están representados en color amarillo. Las isolíneas de 0 m, 1 m, y 2 m en módulo son las predominantes para la zona. En particular se destacan los puntos que presentan los mayores errores en el modelo desplazado: 16-PR03, 16-PR06, SALA, SATU, p52bal, CASA y TAN1 (círculos blancos).



**Figura 5.11:** Mapa de isolíneas de  $H^{DIF D}$  cada 1 m.

### 5.3.1 Evaluación del Modelo SRTM Mejorado con los puntos principales.

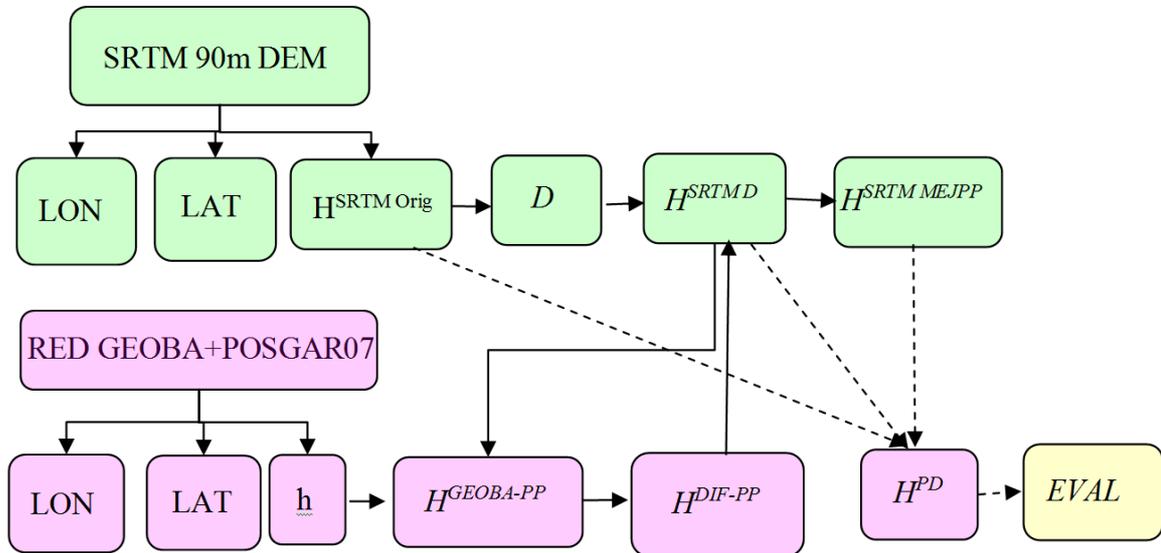
En este apartado se retoman las diferencias calculadas con la (5.2).

La idea es volver a calcular las  $H^{DIF}$  en los puntos principales e interpolar las mismas para todos los puntos de la grilla SRTM.

La grilla de diferencias es aplicada, ahora, sobre las alturas del modelo SRTM solo desplazado. Se obtiene de esta manera un modelo mejorado  $H^{SRTM MEJPP}$ . La ecuación 5.3 expresa el cálculo de las alturas en cada nodo SRTM.

$$H^{SRTM MEJPP} = H^{SRTM D} - H^{DIF PP} \quad (5.3)$$

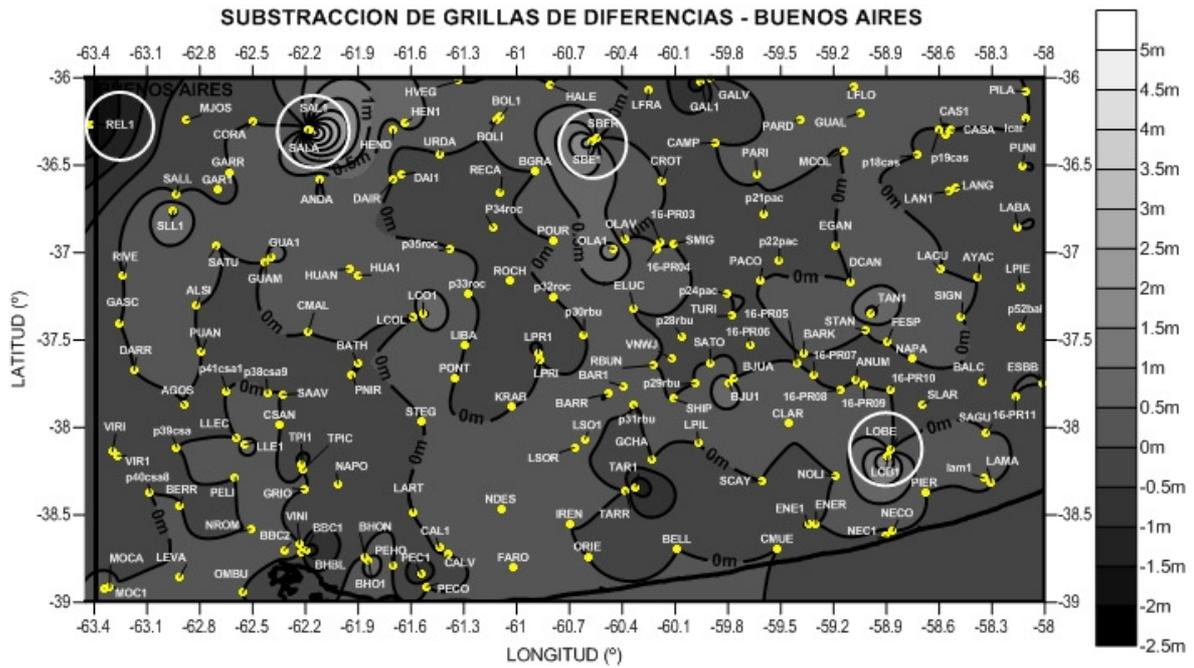
En la que  $H^{SRTM MEJPP}$  son las alturas ortométricas del SRTM Mejorado con los puntos principales,  $H^{SRTM D}$  son las alturas ortométricas SRTM desplazadas y  $H^{DIF PP}$  son las diferencias de alturas ortométricas con los puntos principales. En la Fig. 5.12 se muestra el esquema de la metodología de cálculo aplicada con la ecuación 5.3, en la que  $H^{PD}$  son las alturas ortométricas de los puntos dobles GEOBA. Las diferencias entre las alturas del modelo original, el corregido y el mejorado con puntos principales, con las alturas de los puntos secundarios, se simbolizan con línea de trazo en la Fig. 5.12.



**Figura 5.12:** Diagrama de la metodología de cálculo para la obtención del  $H^{SRTM MEJPP}$  y la evaluación en los  $H^{PD}$ .

Con la finalidad de realizar una evaluación previa se procede al cálculo de la substracción entre la grilla de diferencias que incluye la totalidad de los puntos locales y la grilla de diferencias que contiene los puntos principales. Como resultado de esa operación se obtiene un mapa de isolíneas de diferencias de error cada 0.50 m. Ver Fig. 5.13.

Se revelan en la gráfica cuatro zonas en las que las isolíneas de diferencia crecen notablemente. Los puntos involucrados son REL1 en situación de borde, SALA y SAL 1, SBER y SBE1 y LOBE y LOB1 con marcada contraste de diferencias y en los que los puntos secundarios tienen las mayores diferencias. En consecuencia no se tendrán en cuenta para la evaluación estos puntos secundarios.



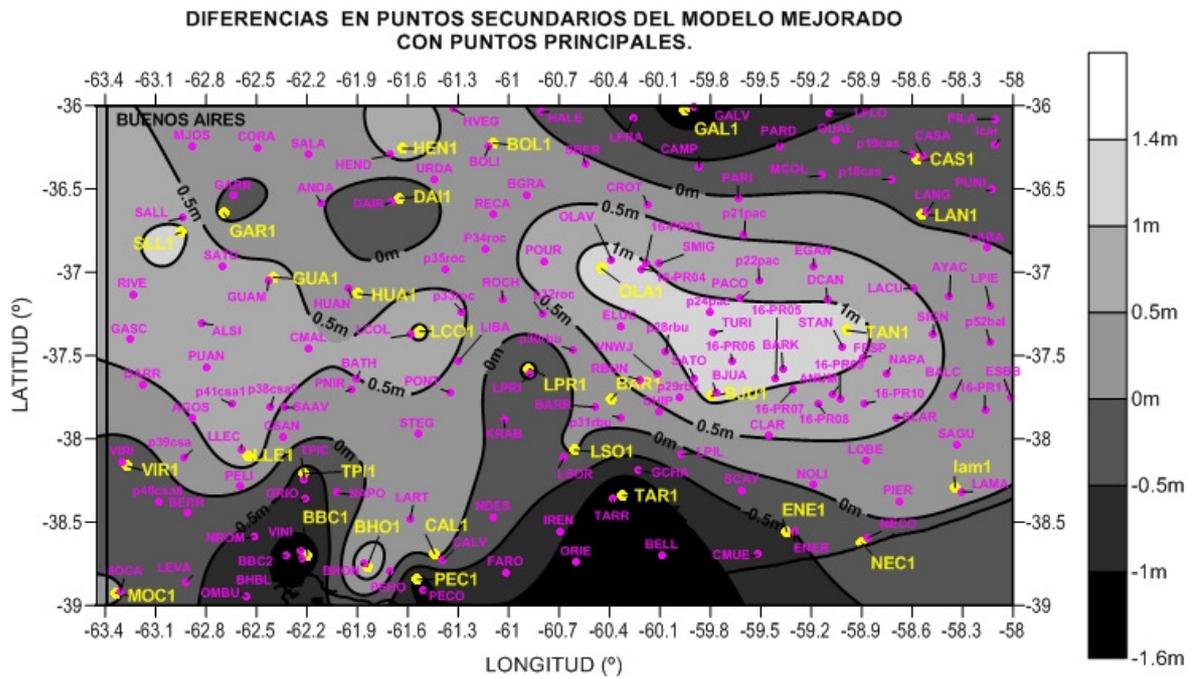
**Figura 5.13:** Mapa de substracción entre grillas de diferencias. Isolíneas cada 0.50 m.

La valoración se realiza sobre 29 puntos dobles que fueron excluidos del cálculo ( $H^{PD}$ ). La estadística correspondiente se presenta en la tabla 5.6, columna 4. Las alturas ortométricas de los 29 puntos secundarios GEOBA, se comparan con el SRTM original y con el SRTM desplazado, segunda y tercera columna de la tabla 5.6 (Fig. 5.12). El DEM desplazado mejora en el promedio lo cual es lógico, porque solo fue transportado. No obstante que la evaluación se realiza sobre puntos que no intervienen en el DEM mejorado, los estadísticos de este último son mejores al original. La desviación estándar del modelo mejorado con los puntos principales es 0.40 m mejor que el modelo original.

ESTADISTICOS (m)	$H^{DIF\ ORIG}$	$H^{DIF\ D}$	$H^{DIF\ MEJ\ PP}$
CANTIDAD DE PUNTOS	29	29	29
PROMEDIO	0.7	0.1	0.1
MAXIMO	3.6	3.1	1.3
MINIMO	-2.0	-2.5	-1.5
DESV EST	1.2	1.2	0.8

**Tabla 5.6:** Estadísticos de  $H^{DIF}$

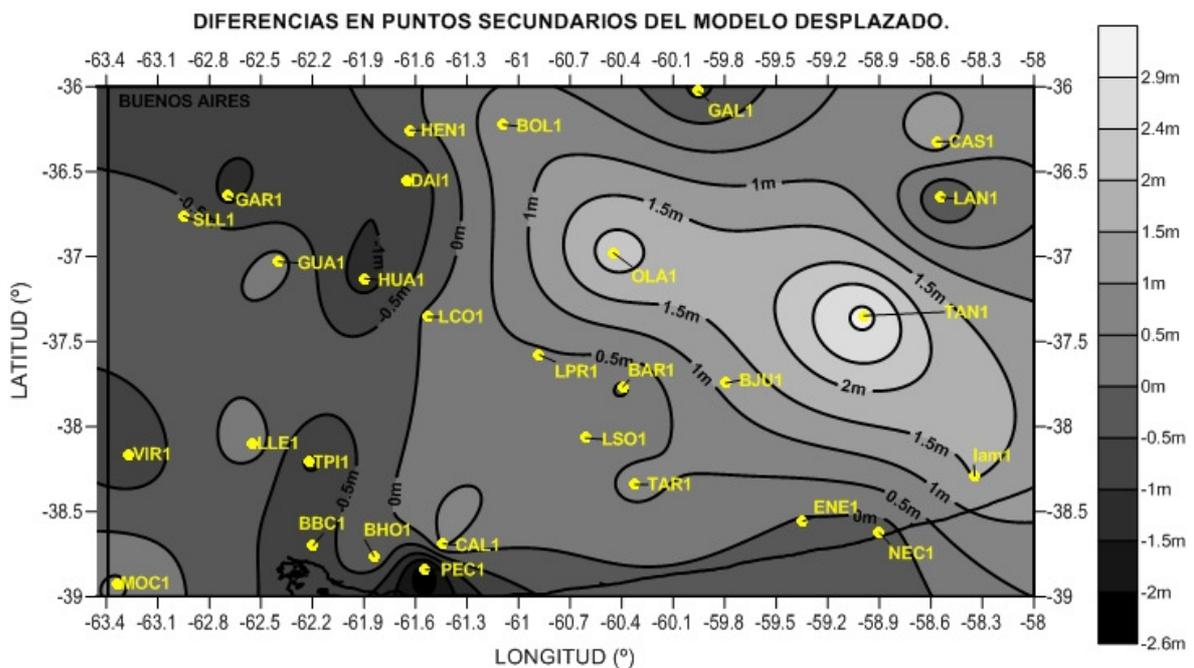
Las diferencias de los puntos secundarios obtenidos se presentan en la figura 5.14, mediante isolíneas cada 0.50 m (ec 5.3, tabla 5.6, columna 4). Se simbolizan los puntos dobles GEOBA en color amarillo y en color magenta los puntos principales. Se observa, en general, la mejora obtenida mediante el cálculo de este primer modelo mejorado. Si bien predominan las isolíneas submétricas, aún subsisten, isolíneas por encima del metro en módulo para la zona debido a las condiciones analizadas en el § 5.4. Esos puntos son BBC1, BHO1, BJU1, GAL1, LCO1, OLA1, PEC1, SLL1, TAN1 y TAR1. Todos estos puntos presentan diferencias disímiles, de magnitud considerable, respecto de sus puntos principales.



**Figura 5.14:** Mapa de diferencias ( $H^{PD}$ ) en los puntos secundarios del SRTM DEM mejorado con los puntos principales GEOBA. Isótopas cada 0.50 m.

Las diferencias en los 29 puntos secundarios GEOBA que surgen al comparar alturas con el DEM desplazado (tabla 5.7, columna 3) se muestran en la Figura 5.15.

Las isótopas de diferencias de la figura 5.15 son cada 0.50 m. Esta gráfica muestra solo el modelo desplazado sin mejoras. El orden de magnitud de las diferencias es comparable a las diferencias con el modelo original.



**Figura 5.15:** Mapa de diferencias en puntos secundarios GEOBA del SRTM desplazado. Isótopas cada 0.50 m.

De la comparación de las gráficas 5.14 y 5.15 se observa que:

Si bien el primer DEM mejorado solo incluye a los puntos principales, los estadísticos y la evaluación de las diferencias en los puntos secundarios muestran una mejora de 0.40 m respecto del DEM original desplazado. En igual sentido, en general los gradientes del primero son menores.

### 5.3.2 Modelo SRTM Mejorado con toda la información POSGAR.

Con el objetivo de obtener el mejor modelo posible, es evidente la conveniencia de incorporar toda la información disponible. Por eso, en esta instancia se integran al nuevo modelo, la grilla de diferencias de todos los puntos GEOBA; principales y secundarios a cada nodo del SRTM desplazado. La ecuación 5.3 está expresada en alturas.

$$H^{SRTM\ MEJ} = H^{SRTM\ D} - H^{DIF} \quad (5.4)$$

En la que  $H^{SRTM\ MEJ}$  son las alturas ortométricas del SRTM mejorado,  $H^{SRTM\ D}$  son las alturas ortométricas SRTM desplazadas y  $H^{DIF}$  son las diferencias de alturas ortométricas de todos los puntos GEOBA.

Con la finalidad de evaluar el modelo SRTM mejorado se utiliza el método de validación cruzada (Fotopoulos, 2003) en el que un punto es excluido en la generación del modelo y en ese mismo punto se calcula la diferencia O-C. Este procedimiento se repite con cada punto y finalmente se obtiene la estadística de las diferencias individuales. Se aplica la ecuación 5.5 para la generación del modelo.

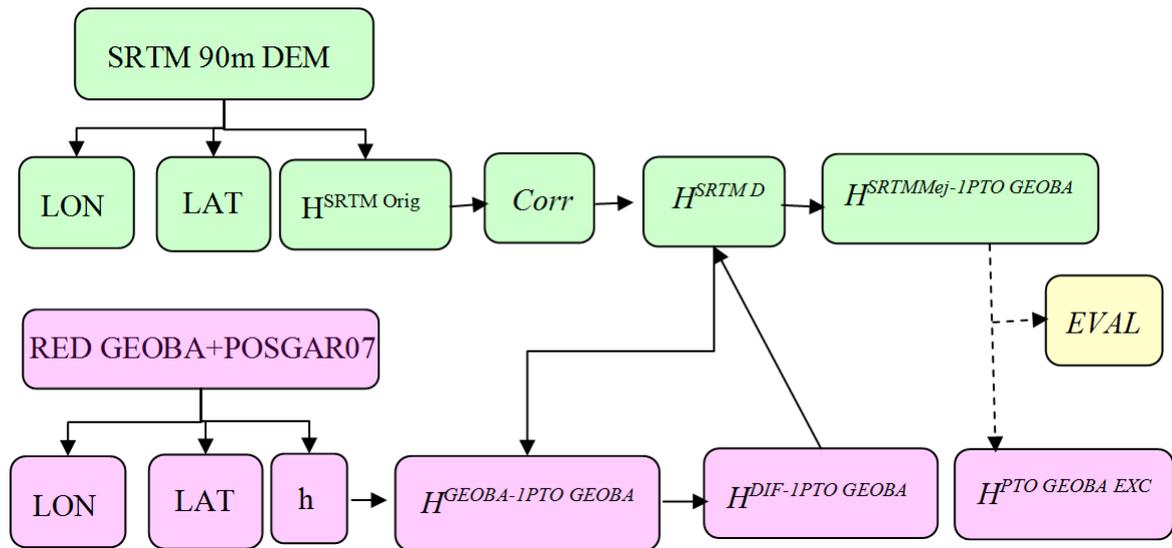
$$H^{SRTM\ MEJ-1\ PTO\ GEOBA} = H^{SRTM\ D} - H^{DIF-1PTO\ GEOBA} \quad (5.5)$$

En la que  $H^{SRTM\ MEJ - 1\ PTO\ GEOBA}$  son las alturas ortométricas SRTM mejorado menos 1 punto GEOBA;  $H^{SRTM\ D}$  son las alturas ortométricas SRTM desplazadas y  $H^{DIF -1 PTO\ GEOBA}$  son las diferencias de alturas ortométricas menos un punto GEOBA. (Fig. 5.16).

Las  $H^{DIF}$  se calculan entre el nuevo modelo mejorado menos un punto GEOBA y el punto excluido, con la aplicación de la ecuación 5.6.

$$H^{DIF} = H^{SRTM\ MEJ-1\ PTO\ GEOBA} - H^{GEOBA\ EXC} \quad (5.6)$$

En la que  $H^{DIF}$  es la diferencia de altura ortométrica en el punto GEOBA excluido;  $H^{SRTM\ MEJ - 1\ PTO\ GEOBA}$  son las alturas ortométricas SRTM mejorado menos 1 punto GEOBA y  $H^{GEOBA\ EXC}$  es la altura ortométrica del punto GEOBA excluido. En la Fig. 5.16 se muestran esquemáticamente los cálculos efectuados con las ecuaciones 5.5 y 5.6.



**Figura 5.16:** Diagrama de la metodología de cálculo para la obtención del  $H^{SRTM Mej-1PTO GEOBA}$  y la evaluación en los  $H^{PTO GEOBA EXC}$ .

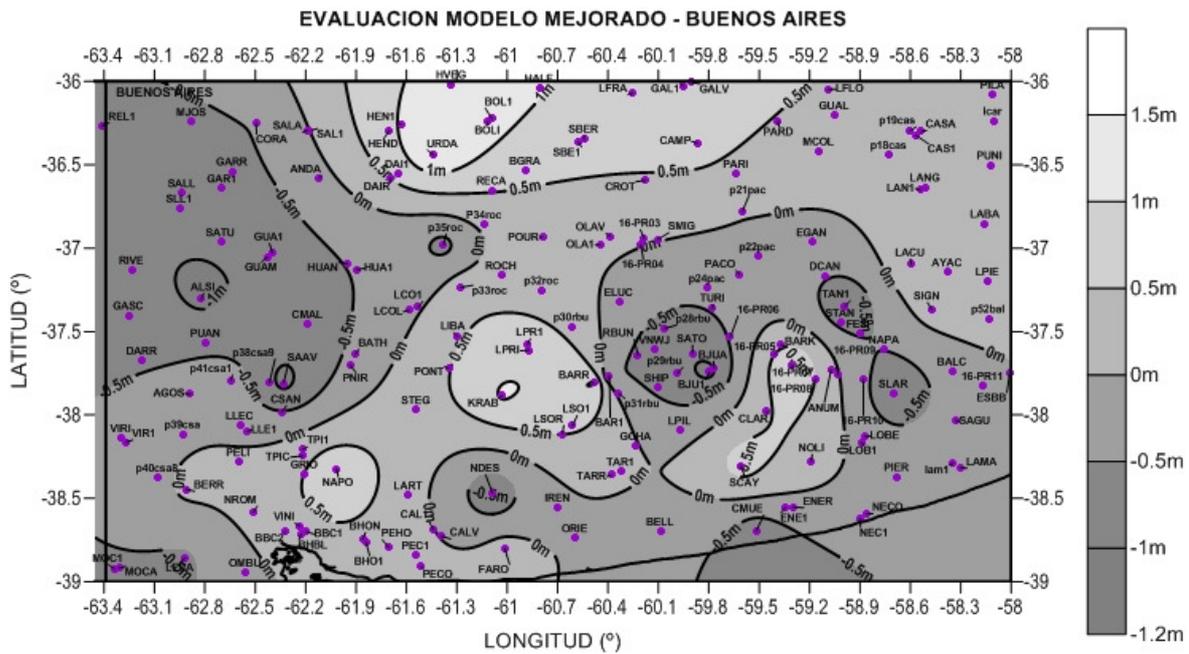
A continuación se procede a la evaluación de los 175 puntos GEOBA. En la Tabla 5.7 se muestran los estadísticos.

PUNTOS GEOBA ESTADISTICOS (m)	MEJORADO (con punto excluido)
Cantidad	175
Promedio	0.0
Máximo	1.5
Mínimo	-1.1
DESVEST	0.7

**Tabla 5.7:** Estadísticos de los errores del modelo SRTM mejorado con punto excluido.

Los resultados estadísticos de los puntos seleccionados para la evaluación del modelo mejorado muestran una desviación estándar de 0.7 m lo que representa una mejora de 0.70 m (50%) respecto del DEM original y del DEM desplazado.

En la Fig. 5.17 se presenta un mapa de diferencias del modelo mejorado mediante isolíneas cada 0.50 m. En general se observa un buen ajuste del DEM mejorado para la zona llana y para la zona abrupta de la región de estudio. Las isolíneas de 0.50 m en módulo son las que predominan en la zona.



**Figura 5.17:** Mapa de diferencias del modelo SRTM mejorado en puntos GEOBA. Isoclinas cada 0.50 m.

La metodología implementada trae consigo una mejora en el modelo de terreno del orden del 50%.

La integración de datos locales que se encuentren cercanos entre ellos debe realizarse de manera criteriosa, evitando incorporar información asociada a puntos ubicados en zonas poco favorables para el SRTM (§ 5.3).

Cada punto integrado aporta información en su área de influencia; por ello, estas mejoras dependerán en gran medida de la distribución de la información incorporada. Las diferencias entre la altura del modelo y la correspondiente a nuevos puntos de coordenadas confiables, contienen información de distinta frecuencia. Las altas frecuencias se consideran menores a algunas decenas de metros y las bajas con pocos kilómetros sobre la superficie terrestre.

Las mismas son producto de los errores orbitales e interferométricos de la misión Shuttle, las características topográficas y el tipo de cobertura del terreno (por ej. vegetación, construcciones y espejos de agua). Los errores orbitales pueden vincularse con bajas frecuencias, pero el resto incluyen en general altas frecuencias.

Por esta razón la inclusión de un mapa de diferencias, convertidos en correcciones, no logra mejorar en forma determinante el modelo original; salvo en las proximidades de cada nuevo punto incorporado.

En consecuencia, la selección de los puntos locales para la integración al DEM debería contar con una distribución homogénea.

Por ello, debe considerarse la colección orgánica de información GNSS, cada vez más abundante en algunos sectores, pues la misma puede incorporarse en forma virtuosa al mejoramiento de los modelos de terreno de la zona, a través del método presentado en esta Tesis. Esta misión debería estar a cargo de organismos nacionales (ej. IGN, Universidades) o provinciales (Direcciones de Geodesia o Catastro).

## Capítulo 6. Modelo digital de alturas elipsoidales.

La posición horizontal del SRTM DEM está expresada en el sistema WGS84 y la posición vertical está referida al modelo EGM96, en consecuencia proporciona alturas ortométricas (§ 4.2.1). El uso masivo de la tecnología GNSS y otros métodos topográficos asociados a la misma referencia geodésica, producen datos de alturas elipsoidales que no son directamente comparables a los modelos de elevaciones, como el SRTM.

Por otra parte, el SRTM tiene origen en mediciones de radar que producen naturalmente alturas elipsoidales (§ 2.2.7, Ec. 2.7). Por ambas razones, es conveniente contar con un modelo similar SRTM mejorado, pero expresado en alturas geodésicas.

En estas condiciones, los nuevos modelos geopotenciales, cada vez más precisos, podrán ser aplicados a un único modelo geodésico SRTM mejorado para generar modelos de elevaciones de mayor calidad.

En este punto se desarrollará una metodología para la obtención del modelo de alturas elipsoidales a partir del SRTM mejorado.

### 6.1 Obtención del modelo digital de alturas elipsoidales.

El modelo SRTM mejorado obtenido en el punto 5 de esta tesis es uno de los datos de partida para la obtención del modelo de alturas elipsoidales. El segundo conjunto de datos son las alturas geoidales referidas al modelo EGM96 para la zona de estudio.

### 6.2 Los Modelos del Campo de Gravedad Global.

Los modelos globales se derivan principalmente de los resultados de la geodesia espacial, mientras que la estimación de campo de gravedad local se basa principalmente en los datos terrestres.

Los modelos globales proporcionan la parte de la larga longitud de onda del campo gravitatorio para la aproximación del campo de gravedad local. Están basados en los desarrollos en serie de los armónicos esféricos. La parte de la baja frecuencia de estos desarrollos en serie se deriva del análisis de órbitas de satélites. Desarrollos en serie de grado superior se obtienen combinando el modelo de bajo grado con los resultados de la gravimetría terrestre y la altimetría por satélite.

La ecuación (6.1) proporciona el desarrollo del potencial de perturbación  $T$  en armónicos esféricos. Un modelo de campo de gravedad por lo tanto está representado por los coeficientes armónicos esféricos. Las relaciones funcionales entre  $T$  y otros observables pertinentes al campo de gravedad, también permiten el desarrollo en armónicos esféricos para la anomalía de altura, la altura del geoide (6.3) y la anomalía de la gravedad. Estos desarrollos, generalmente, emplean armónicos esféricos completamente normalizados.

El potencial de perturbación está dado por (Torge, 2001):

$$T(r, \vartheta, \lambda) = \frac{GM}{r} \sum_{l=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^l \sum_{m=0}^l (\Delta\bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \bar{P}_{lm}(\cos \vartheta) \quad (6.1)$$

Donde  $G$  es la constante de la gravitación universal,  $M$  es la masa de la tierra, incluida la atmósfera,  $a$  es el semieje mayor del elipsoide de referencia,  $r$  es la distancia

geocéntrica,  $r$ ,  $\vartheta$ ,  $\lambda$  son coordenadas esféricas,  $\Delta\overline{C}_{lm}$  y  $\Delta\overline{S}_{lm}$  son los coeficientes armónicos normalizados,  $\overline{P}_{lm}$  son las funciones asociadas de Legendre normalizadas y  $\vartheta = 90 - \varphi$ .

El desarrollo de (6.1) comienza en  $l = 2$  ya que se asume la igualdad de las masas de la Tierra y el elipsoide, como así también, la coincidencia del centro de masas de la Tierra con el centro del elipsoide.

Los desarrollos en armónicos esféricos del potencial de grado  $l$  y orden  $m$  representan una descomposición espectral del campo gravitacional. La longitud de onda asociada con el desarrollo al grado y orden, es  $360^\circ / l$ , que corresponde a una resolución de  $180^\circ / l$ .

La fórmula de Bruns (Heiskanen y Moritz, 1967) relaciona la altura del geoide  $N$ , con el potencial perturbador  $T$  y la gravedad normal  $\gamma$ , mediante la expresión (6.2):

$$N = \frac{T}{\gamma} \quad (6.2)$$

La altura del geoide, se expresa, de acuerdo a las ecuaciones (6.1) y (6.2), como:

$$N(r, \vartheta, \lambda) = \frac{GM}{\gamma \cdot r} \sum_{l=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^l \sum_{m=0}^l (\Delta\overline{C}_{lm} \cos.m\lambda + \Delta\overline{S}_{lm} .sen.m\lambda) \overline{P}_{lm}(\cos \vartheta) \quad (6.3)$$

En particular en este punto se aplicará la ecuación (6.3) en base a los coeficientes de los modelos EGM96 y EGM2008, este último se aplicará en el capítulo 7 de esta tesis.

### 6.2.1 El Modelo Gravitacional Terrestre EGM96.

En la Tabla 6.1 se muestra información del modelo EGM96.

MODELO	AÑO	GRADO	DATOS	REFERENCIA
EGM96	1996	360	S, G, A	Lemoine et al., 1998

(Datos: S = Satélite, G = Datos de Gravedad, A = Datos de Altimetría)

**Tabla 6.1:** Modelo EGM96.

El GSFC<sup>1</sup> de la NASA, la NIMA<sup>2</sup> y la OSU<sup>3</sup> han colaborado para desarrollar un modelo mejorado de armónicos esféricos del potencial gravitatorio de la Tierra de grado 360. El EGM96 incorpora mejores datos de gravedad de superficie respecto de sus predecesores, anomalías derivadas de altímetro del ERS-1 y de la Misión Geodésica GEOSAT, gran cantidad de datos de seguimiento por satélite, incluyendo los nuevos datos desde láser a satélites (SLR<sup>4</sup>), GPS, el sistema de retransmisión de datos por Satélite y de seguimiento de la NASA, el sistema francés DORIS<sup>5</sup> y el sistema de seguimiento Doppler de la Marina de USA<sup>6</sup>, así como los registros de altimetría desde los satélites TOPEX/POSEIDON, (ERS-1, y GEOSAT para las regiones polares). La solución final mezcla un modelo de combinación hasta 70 grados, una solución diagonal de bloque desde grado 71 a 359, y una solución de cuadratura hasta grado 360. La

<sup>1</sup> Goddard Space Flight Center.

<sup>2</sup> National Imagery and Mapping Agency.

<sup>3</sup> Ohio State University.

<sup>4</sup> Satellite Laser Ranging.

<sup>5</sup> Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite.

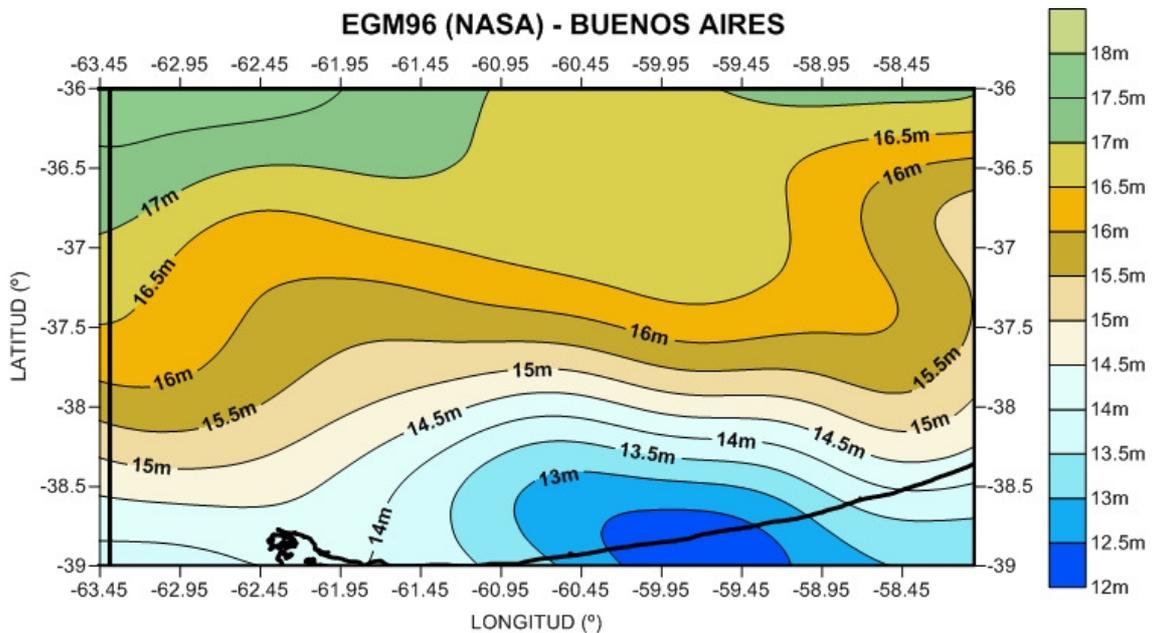
<sup>6</sup> United State of America.

resolución del modelo es de 30' x 30'. El modelo fue utilizado a nivel global para calcular las alturas del geode precisas para mejorar la precisión de un metro (con la excepción de las áreas desprovistas de datos precisos de gravedad de superficie y con la suficiente densidad) y la realización del WGS84 como sistema de referencia real en tres dimensiones.

### 6.2.2 Cálculo del Modelo EGM96 para la zona de estudio.

Se accede al sitio web de la NGA/NASA EGM96, Earth Gravitational Model. (<http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/egm96.html>). Se calculan las alturas geoidales ( $N^{EGM96}$ ) para la región de estudio.

Se presentan las isolíneas de alturas geoidales cada 0.50 m en la figura 6.1 para la zona de estudio y en escala de colores.



**Figura 6.1:** Isolíneas cada 0.50 m de alturas geoidales del modelo EGM96.

Las alturas geoidales descienden desde el noroeste al sudeste de la zona de estudio. La variación es de 6 m

### 6.2.3 Cálculo del modelo de alturas elipsoidales.

De acuerdo a la ecuación (4.6) que relaciona la altura elipsoidal, la altura ortométrica y la altura geoidal de un punto sobre la superficie terrestre y adecuando las denominaciones queda la ecuación 6.4.

$$h^{GEOBA} = H^{SRTM\ MEJ} + N^{EGM96} \quad (6.4)$$

En la que  $h$  es la altura elipsoidal GEOBA sobre el elipsoide WGS84,  $H^{SRTM\ MEJ}$  son las alturas ortométricas del SRTM mejorado respecto del modelo EGM96 y  $N^{EGM96}$  son las alturas elipsoidales del geode del modelo EGM96 sobre el elipsoide WGS84. Este cálculo se efectúa para cada nodo de la grilla SRTM mejorado. El esquema de cálculo se ilustra en la Fig. 6.2.

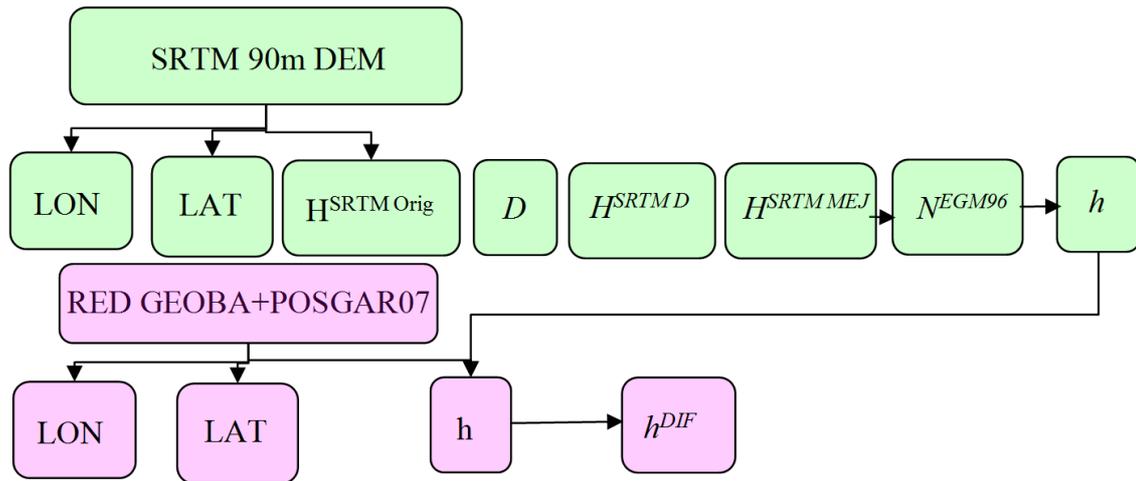


Figura 6.2: Diagrama del cálculo de las alturas elipsoidales.

La estadística de los errores del modelo de alturas elipsoidales es equivalente a la obtenida en las tablas 5.7 del capítulo 5.

En la Fig. 6.3 se muestran las  $h^{DIF}$  del modelo con las alturas elipsoidales de los puntos POSGAR07.

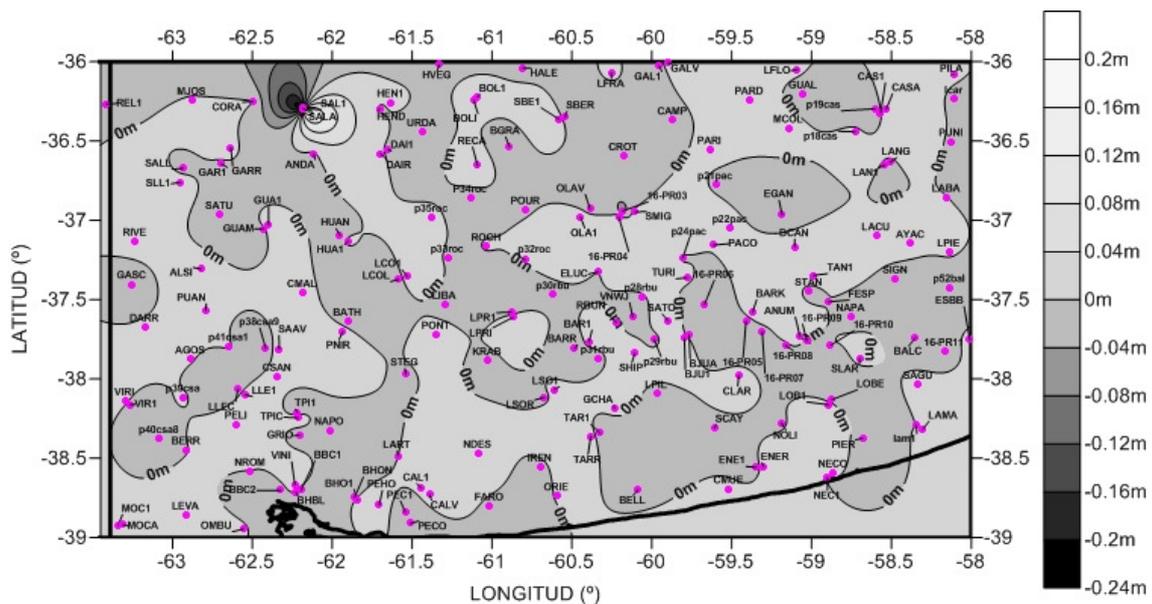


Figura 6.3: Mapa de isóneas de  $h^{DIF}$  cada 0.04 m.

Las alturas del geoide EGM96 sobre el elipsoide WGS84 varían entre 12 m y 17.5 m en sentido noroeste-sudeste para la zona de estudio.

El modelo de alturas elipsoidales obtenido para la zona de estudio es tan confiable como el modelo SRTM mejorado, (§ 5.3.2) del Capítulo 5, a partir del cual se calculó.

La metodología empleada en este punto permite disponer del SRTM DEM expresado en coordenadas y alturas elipsoidales en el sistema WGS84, compatible con POSGAR07.

La utilidad del modelo es fundamentalmente práctica, pues las alturas son compatibles con las determinaciones GNSS apoyadas en POSGAR07.

## Capítulo 7. Nuevo modelo digital de elevaciones.

Las alturas del modelo SRTM están referidas al modelo EGM96. La liberación de los datos relativos al modelo EGM2008 ha representado una mejora en la resolución y en la precisión, respecto de su predecesor el EGM96. Las mejoras dependen en gran medida de la cantidad de información gravitacional incorporada en la zona y de las características topográficas (Pavlis et al., 2012). El modelo EGM2008 representa una mejora importante en el modelo global de campo de gravedad, que puede satisfacer las necesidades de una gama muy amplia de aplicaciones. Es por ello que, a continuación, el nuevo modelo de elevaciones se referirá al modelo EGM2008.

En el punto 6 de esta tesis se obtuvo el modelo de alturas elipsoidales que es uno de los datos de partida para la obtención del nuevo modelo de elevaciones. El segundo conjunto de datos son las alturas geoidales del modelo EGM2008 (para la zona de estudio).

Por otro lado se evaluará la calidad de los modelos EGM96 y EGM2008 por comparación entre las alturas del nuevo modelo de elevaciones y las alturas niveladas. El mismo cálculo se realizará entre las alturas del DEM mejorado y las alturas niveladas.

### 7.1 Descripción general del modelo EGM2008

Los modelos globales fueron tratados en el § 6.3 de esta tesis. En la Tabla 7.1 se muestran las referencias del modelo EGM2008.

MODELO	AÑO	GRADO	DATOS	REFERENCIA
EGM2008	2008	2190	S(Gravity), G, A	Pavlis et al, 2008

(Datos: S = Satélite, G = Datos de Gravedad, A = Datos de Altimetría)

**Tabla 7.1:** Modelo EGM2008.

El modelo EGM2008 (Pavlis et al., 2012) consta de un total de aproximadamente 4.8 millones de coeficientes armónicos esféricos completos de grado y orden 2159, con coeficientes armónicos esféricos adicionales hasta el grado 2190 y orden 2159. El EGM2008 está disponible libre de cargo, además de productos complementarios, tales como, un modelo armónico esférico de la topografía de la Tierra, grillas de errores de comisión estimadas para los diferentes funciones del campo de gravedad y un software de síntesis de alto grado.

EGM2008 se basa:

En el modelo de campo de gravedad ITG-GRACE03S (<http://www.igg.uni-bonn.de/apmg/index.php?id=itg-grace03>) de la misión GRACE<sup>1</sup>, que proporciona una descripción de alta precisión del espectro del campo de gravedad de media y larga longitud de onda hasta el grado y orden 180. Este modelo incorpora casi 6 años de observaciones de la misión GRACE.

El segundo conjunto de datos de entrada es una grilla global de anomalías de gravedad medias de superficie de 5' x 5' (de banda limitada hasta el grado 2160) que fueron construidas a partir de datos topográficos de alta resolución.

Gravedad derivada de la altimetría sobre los océanos y otras fuentes de datos de gravedad, particularmente de mediciones de gravedad sobre puntos.

---

<sup>1</sup> Gravity Recovery and Climate Experiment.

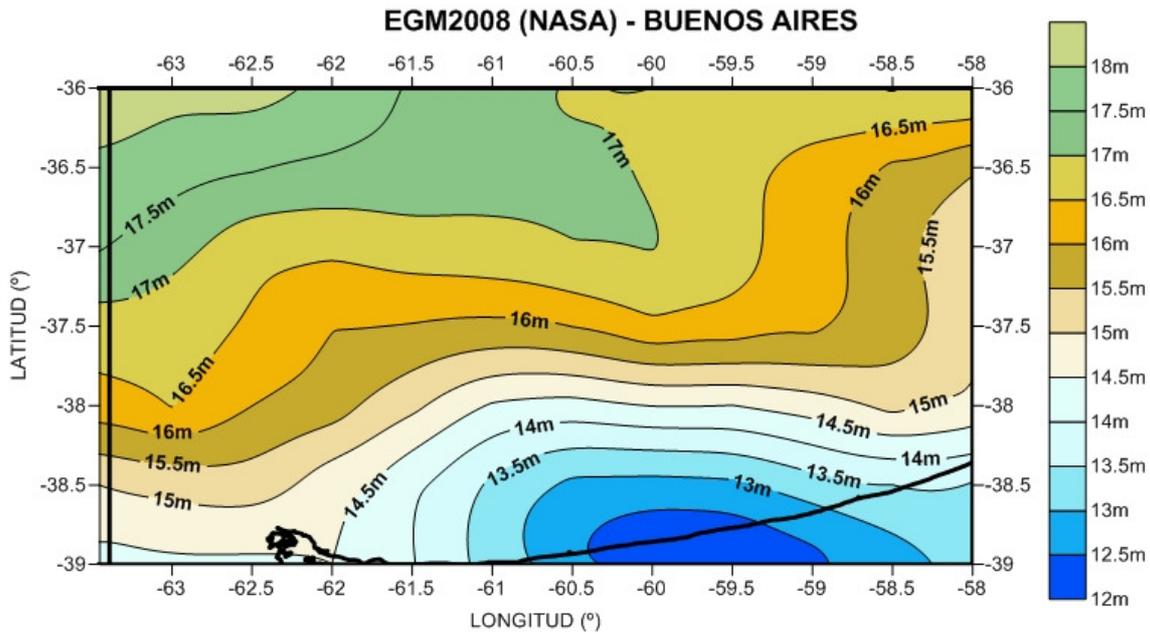
La grilla global de anomalías de la gravedad media de superficie fue analizada armónicamente para obtener un conjunto de coeficientes armónicos elipsoidales. El modelo de gravedad por satélite ITG-GRACE03S se convirtió a partir de armónicos esféricos a armónicos elipsoidales a través de la transformación de Jekeli. Los coeficientes armónicos elipsoidales de los dos conjuntos de datos de entrada se combinaron a continuación a través de un procedimiento de ajuste de mínimos cuadrados (Pavlis et al., 2008). El resultado del espectro de armónicos elipsoidales (completo hasta grado y orden 2159) fueron finalmente convertidos, de nuevo, en armónicos esféricos (algoritmo de Jekeli). Debido a que esta transformación conserva el orden máximo, pero no el grado máximo del desarrollo en serie de los coeficientes armónicos, algunos coeficientes adicionales (hasta grado 2190 y orden 2159) se encuentran en la representación armónica esférica.

La buena calidad del EGM2008 en las medias y largas longitudes de onda se debe principalmente a la utilización de observaciones del campo de gravedad desde satélites GRACE, apoyados en las anomalías de la gravedad terrestre. La banda espectral del EGM2008 entre 181 a 2159 (en términos de armónicos elipsoidales) se origina en las anomalías de la gravedad media de superficie. La base de datos de gravedad media de superficie de 5' x 5' de la NGA es de calidad variable debido a la incompleta y dispar cobertura global de las observaciones de gravedad (Pavlis et al. 2008). Como consecuencia, la exactitud de los funciones del campo de gravedad EGM2008, varía sobre diferentes partes de la Tierra. EGM2008 es más preciso (es decir, errores de comisión más bajos) en regiones con alta calidad de datos de gravedad terrestre (es decir, cobertura densa, precisión suficiente) disponibles para su construcción.

El equipo de desarrollo del EGM2008 ha calculado mapas de errores de comisión para las alturas cuasi / geoide, anomalías de la gravedad y las deflexiones de la vertical utilizando técnicas de propagación de errores. Para las áreas con cobertura de gravedad de superficie más bien escasa (por ejemplo, partes de África, Sudamérica y Asia), los errores de comisión para ondulaciones cuasi / geoide se estima a nivel de ~ 0.15 m con las incertidumbres máximas encontradas en las partes montañosas de Asia y América del Sur (unos ~ 0.30-0.40 m) y la Antártida (~ 1 m). En contraste con esto, los errores de comisiones más bajos se encuentran en la mayor parte de Europa, Oceanía, América del Norte y debido a la utilización de conjuntos densos de gravedad derivada de la altimetría: los océanos. Para aquellas regiones con disponibilidad de datos de gravedad en superficie de alta calidad, los errores de comisión cuasi / geoide son en su mayoría a nivel de ~ 0.05 m. (Kenyon et al., 2007; Hirt, 2010).

## 7.2 Cálculo del modelo EGM2008.

Se accede al sitio de EGM2008 - WGS 84 Version. ([http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08\\_wgs84.html](http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html)). Se presentan (Fig. 7.1) las alturas geoidales del modelo EGM2008 para la zona de estudio con isolíneas cada 0.50 m.



**Figura 7.1:** Alturas geoidales del modelo gravitacional EGM2008.

Las alturas geoidales de este modelo se incrementan desde el sudeste hacia el noroeste de la zona de estudio. La variación es de 6 m.

### 7.3 Cálculo de la diferencia de los modelos EGM96 y EGM2008.

Con la finalidad de evaluar el impacto que tendrá en el nuevo modelo de elevaciones, a continuación, se calculan las diferencias entre los modelos EGM96 y EGM2008. Se aplica la ecuación (7.1).

$$\Delta N = N^{EGM96} - N^{EGM2008} \quad (7.1)$$

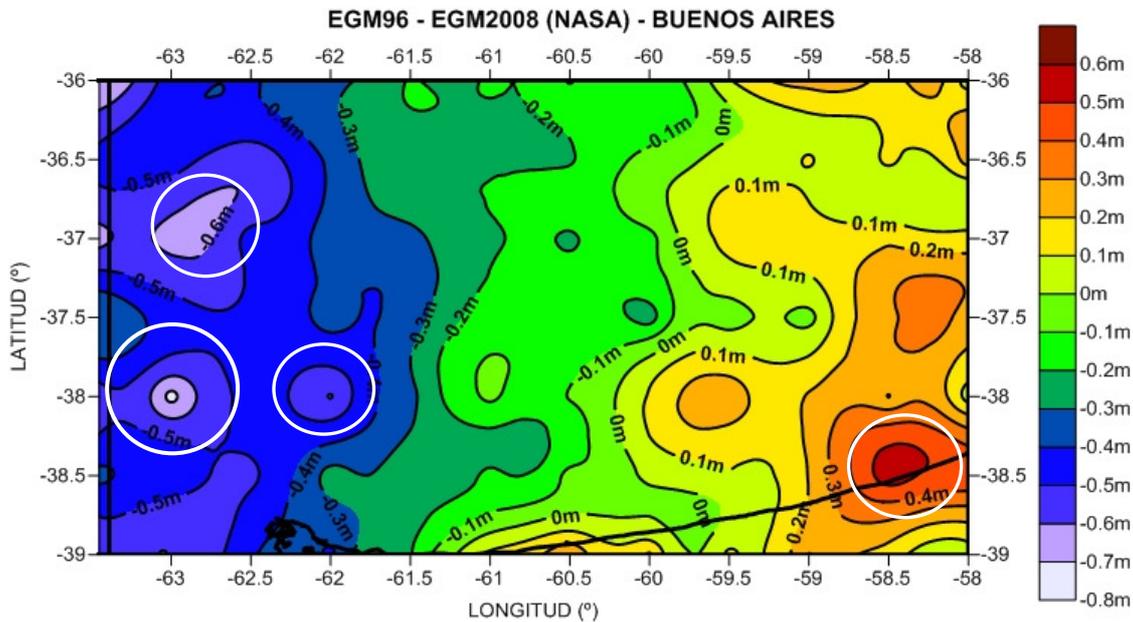
En la que:  $\Delta N$  es la diferencia de alturas del geode de los modelos EGM96 y el EGM2008 sobre el elipsoide WGS84,  $N^{EGM96}$  es la altura del geode del modelo EGM96 sobre el elipsoide WGS84 y  $N^{EGM2008}$  es la altura del geode del modelo EGM2008 sobre el elipsoide WGS84. Los estadísticos se muestran en la Tabla 7.2.

ESTADÍSTICOS (m)	$\Delta N$
PROMEDIO	-0.1
MAXIMO	0.5
MINIMO	-0.7
DESV EST	0.3

**Tabla 7.2:** Estadísticos de  $\Delta N$ .

Las diferencias de alturas geoidales obtenidas entre ambos modelos se muestran en la figura 7.2 mediante isolíneas cada 0.10 m para la zona de estudio. En general se observa que las diferencias que predominan para la región se encuentran en el orden de los 0 m a 0.30 m hacia el Este y entre 0 m y 0.40 m hacia el Oeste, en módulo. En la región Este de la provincia de Buenos Aires, el modelo EGM96 tiene mayores alturas geoidales que el modelo EGM2008. Las diferencias son negativas hacia el Oeste de la región, allí las alturas geoidales del modelo EGM2008 son mayores a las alturas del modelo EGM96. Las variaciones en módulo mayores a los 0.50 m están localizadas y marcadas con círculos blancos, tres círculos al Oeste y uno hacia el Sudeste de la región. En particular se destaca el círculo de mayor tamaño situado al Oeste de la región

que alcanza la mayor diferencia entre los modelos gravitacionales. La desviación estándar es de 30 cm.



**Figura 7.2:** Diferencia  $\Delta N$  entre los modelos EGM96 y EGM2008. Isolíneas cada 0.10 m.

Entre los antecedentes más importantes a nivel mundial respecto de la adopción del modelo EGM2008 se pueden citar:

El NGS<sup>2</sup> es un programa dentro de la NOAA<sup>3</sup>, que es responsable de definir, mantener y proporcionar acceso público al NSRS<sup>4</sup>, esto es, un sistema nacional de coordenadas que proporciona la base para la cartografía; el transporte, las comunicaciones y los sistemas de registros de tierras, como así también, para numerosas aplicaciones científicas y de ingeniería en los Estados Unidos. El NSRS considera que la calidad de los modelos gravitacionales afecta directamente a la calidad del geoide gravimétrico derivado de ella. El geoide gravimétrico USGG2003<sup>5</sup> fue construido usando el modelo EGM96, mientras que el actual geoide gravimétrico USGG2009 fue construido usando EGM2008.

En relación a estudios realizados en Sudamérica se puede citar a Blitzkow, D et al., 2009 quien realizó la evaluación del modelo EGM2008, entre otros, para ello usó un total de 1190 puntos GPS disponible en marcas de nivelación y 85018 anomalías de gravedad de aire libre media en una cuadrícula de 5' en América del Sur. Las conclusiones muestran que el modelo EGM2008 representa una mejora sustancial para la representación de campo gravitatorio para América del Sur. (Oliveira, 2005)

#### 7.4 Cálculo de un nuevo modelo digital de elevaciones.

Para el cálculo del nuevo modelo de elevaciones se usan el modelo de alturas elipsoidales obtenido en el § 6.2.3 de esta tesis y el modelo geopotencial EGM2008 descrito en § 7.1. Se aplica la ecuación (4.5) y adecuando la nomenclatura queda (7.2):

$$H^{SRTM\ Nuevo} = h^{GEOBA} - N^{EGM2008} \quad (7.2)$$

<sup>2</sup> National Geodetic Survey.

<sup>3</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration.

<sup>4</sup> National Spatial Reference System.

<sup>5</sup> United State Gravimetric Geoid 2003.

En la que  $H^{SRTM\ Nuevo}$  es la altura ortométrica del nuevo SRTM DEM respecto del EGM2008,  $h^{GEOBA}$  es la altura elipsoidal sobre el elipsoide WGS84 y  $N^{EGM2008}$  es la altura del geoide obtenida del modelo geopotencial EGM2008 sobre el elipsoide WGS84. El valor de  $N^{EGM2008}$  se calcula en todos los puntos de la grilla del nuevo SRTM DEM mejorado (expresado en alturas elipsoidales “h”).

### 7.5 Determinación de la calidad de los modelos EGM96 y EGM2008.

Las alturas del nuevo modelo obtenido en el § 7.4 se comparan con las alturas niveladas de los puntos POSGAR07. Este cálculo se efectúa mediante la ecuación 7.3.

$$H^{DIFEGM2008} = H^{SRTMNuevo} - H^{NIV-POSGAR07} \quad (7.3)$$

Donde  $H^{DIFEGM2008}$  es la diferencia de alturas entre el nuevo modelo SRTM y las alturas niveladas correspondientes a los puntos POSGAR07,  $H^{SRTMNuevo}$  son las alturas ortométricas del nuevo SRTM DEM referidas al modelo EGM2008 y  $H^{NIV-POSGAR07}$  son las alturas niveladas correspondientes a los puntos POSGAR07. El esquema de cálculo aplicado se muestra en el Anexo 3.

Se calculan, también, las diferencias entre las alturas niveladas ( $H^{NIV-POSGAR07}$ ) con las alturas del modelo mejorado referido al modelo EGM96 con la finalidad de comparar la calidad de los modelos geopotenciales. Se aplica la ecuación (7.4).

$$H^{DIFEGM96} = H^{SRTMmej} - H^{NIV-POSGAR07} \quad (7.4)$$

Los resultados estadísticos obtenidos se muestran en la Tabla 7.3 para la zona de estudio.

ESTADISTICOS (m)	$H^{DIFEGM96}$	$H^{DIFEGM2008}$
CANTIDAD	139	139
PROMEDIO	0.3	0.2
MAXIMO	1.0	0.6
MINIMO	-0.9	-0.2
DESV EST	0.3	0.1

**Tabla 7.3:** Estadísticos de los  $H^{DIF}$ .

La desviación estándar del modelo EGM2008 es 20 cm mejor respecto del modelo EGM96, lo que muestra la buena calidad del mismo. En general los estadísticos correspondientes al modelo EGM2008 son mejores en relación al modelo EGM96.

Las Figuras 7.3 y 7.4 muestran los  $H^{DIF}$  (Ec. 7.3 y 7.4) con isolíneas cada 0.10 m. En las gráficas se advierten comportamientos diferentes entre las isolíneas de diferencias del modelo EGM96 respecto del modelo EGM2008. Las primeras (Fig. 7.3) presentan un desarrollo de mayor a menor en la dirección norte – oeste hacia el sur – este, prevalecen las diferencias positivas, las alturas del  $H^{SRTMmej}$  son mayores a las alturas niveladas. Las diferencias negativas están localizadas en una pequeña zona del Sur - Este. Las mayores diferencias están localizadas en la zona Oeste. En la Fig. 7.4 predominan las diferencias positivas para toda la zona, las alturas niveladas son menores a las alturas del  $H^{SRTMmej}$ . Las diferencias negativas se encuentran localizadas en la zona Sur, Sur – Oeste. Las mayores diferencias están localizadas hacia el Oeste de y centro de la región.

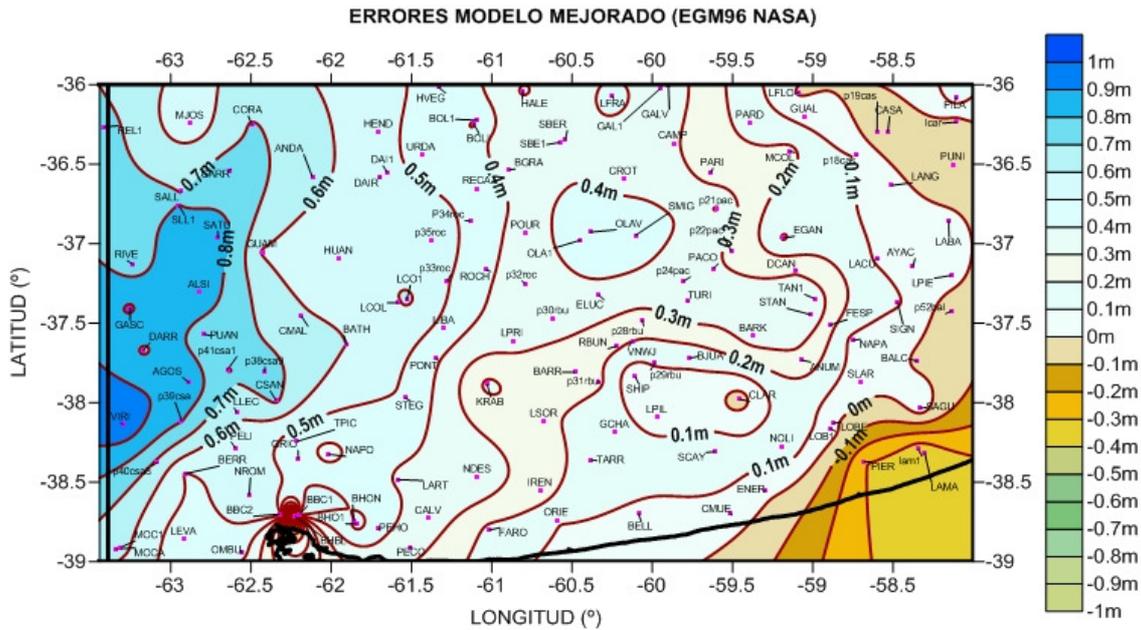


Figura 7.3: Isolneas de  $H^{DIF}$  cada 0.10 m.

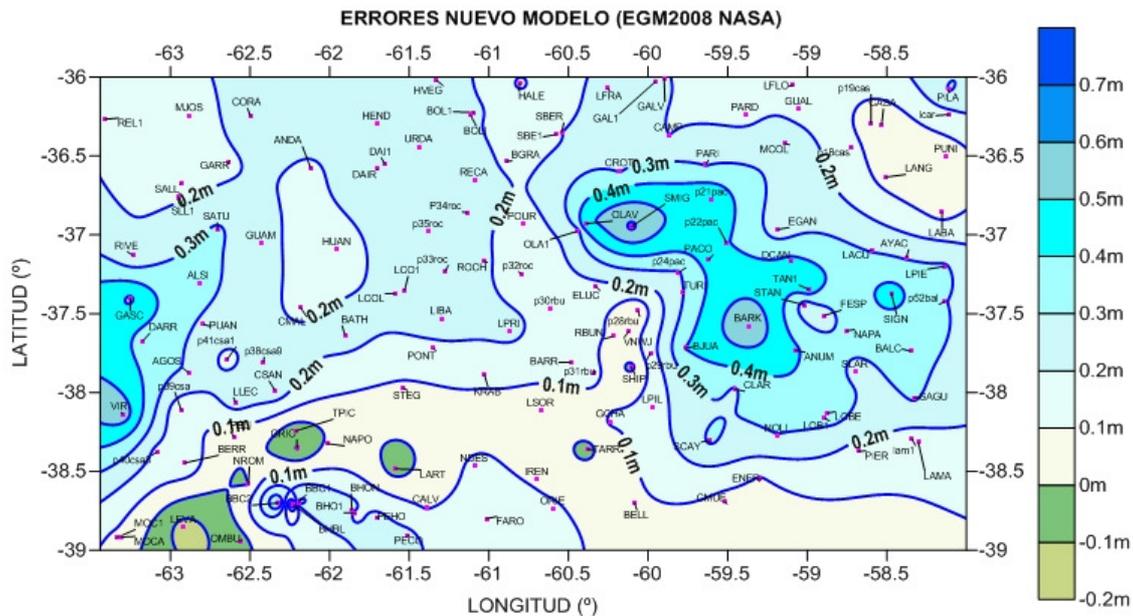


Figura 7.4: Isolneas de  $H^{DIF}$  cada 0.10 m.

Se ha obtenido el nuevo SRTM DEM con sus alturas ortométricas referidas al modelo EGM2008.

El mejor comportamiento del modelo EGM2008 en la región de estudio comprobado en los trabajos citados en el § 7.3 garantiza una mejor representación de las alturas a través del nuevo SRTM (EGM2008). La Figura 7.2 muestra que el cambio de modelo introducirá decenas de centímetros de error en varias zonas.

El modelo geopotencial EGM2008 presenta una desviación estándar de 0.1 m, lo que representa una mejora de 20 cm respecto del modelo geopotencial EGM96, cuya desviación estándar es de 0.30 m para la región de estudio (Buenos Aires).

El nuevo modelo SRTM obtenido en esta tesis refiere sus alturas respecto a un modelo gravitacional moderno como el EGM2008, lo cual facilitará y actualizará su aplicación en diversas actividades de las geociencias.

## **8. Conclusiones**

En esta tesis la performance del modelo digital de elevación SRTM fue evaluada en una amplia zona de la República Argentina, que comprende las provincias de Buenos Aires, La Pampa, Neuquén y Mendoza, e información altimétrica local fue analizada e integrada.

Fueron definidos dos sectores según sus características topográficas. La zona llana, que abarca la mayor parte del área de estudio y la zona abrupta correspondiente a las Sierras de Ventania y el Sistema de Tandilia en la provincia de Buenos Aires y la región montañosa del Oeste en las provincias de Mendoza y Neuquén.

El modelo SRTM presenta una desviación estándar de 2.3 m en las zonas llanas. Eso es casi dos veces mejor que la esperada para Sudamérica (4.1 m) según evaluaciones del JPL (Rodríguez et al., 2005).

La zona abrupta presenta una desviación estándar de 7.5 m, casi dos veces peor que el valor esperado de 4.1 m (Rodríguez et al., 2005).

Una limitación para avanzar en el análisis realizado, fue la inexactitud de las coordenadas planimétricas de los puntos de la RNAP que varían entre cientos de metros y 3 km; luego, la información altimétrica, en esas condiciones, no puede ser utilizada para el análisis de un modelo con resolución de 90 m.

La precisión en la posición espacial de los puntos POSGAR07, en los que se dispone además de altura ortométrica, garantiza una evaluación confiable de los modelos. En particular, la provincia de Buenos Aires dispone de una red geodésica completa con esas características (GEOBA), pues está íntegramente medida sobre puntos de la RNAP. Por ello, la provincia de Buenos Aires fue utilizada para una evaluación más detallada del SRTM y para analizar la integración de nueva información altimétrica al modelo.

Los puntos que presentaron errores por encima de los esperados corresponden a zonas con masa arbórea, espejos de agua y salinas, serranías, picos de promontorios del terreno y zonas bajas en relación a relieves circundantes de gran altura.

La evaluación de los puntos POSGAR07 con el SRTM DEM original para la provincia de Buenos Aires presentó una desviación estándar de 1.4 m, casi tres veces mejor que la esperada, y errores que en módulo alcanzan un máximo de 3.8 m.

Una vez evaluado el modelo original, se procedió a incorporar información local en el modelo SRTM. Los puntos principales pasaron a formar parte del nuevo modelo, mientras que los puntos secundarios sirvieron como control de las eventuales mejoras. Finalmente, toda la información fue integrada al modelo mejorado. Una estimación de la calidad del mismo fue obtenida a través del método de correlación cruzada, arrojando una desviación estándar de 0.70 m, con errores centrados que alcanzan 1.5 m.

Cada punto de altura conocida integrado al modelo, aporta información en su área de influencia; por ello, las mejoras que se obtienen dependerán en gran medida de la distribución y la densidad de la información incorporada. Las diferencias entre el modelo y las mediciones de campo, son producto de errores orbitales e interferométricos de la misión Shuttle, de las características topográficas y del tipo de cobertura del terreno (por ej. vegetación, construcciones y espejos de agua). Los errores orbitales pueden vincularse con las bajas frecuencias (varios kilómetros), mientras que la presencia de sectores urbanos y vegetación alta, la influencia de la topografía y los

errores interferométricos, pueden asociarse a frecuencias medias y altas (pocos Km a ciento de metros).

En consecuencia, las evaluaciones realizadas en esta tesis corresponden únicamente a frecuencias medias y bajas.

Luego, la inclusión de un mapa de desvíos, generado en marcas puntuales, y convertidos en correcciones, no logra mejorar en forma determinante el modelo original; salvo en las proximidades de cada nuevo punto incorporado.

Por otra parte, las alturas sobre el elipsoide WGS84 del geoide EGM96, al que está referido el SRTM original, varían 6 m en sentido noroeste-sudeste para la zona de estudio de la provincia de Buenos Aires.

Con el objetivo de independizar el modelo de terreno del modelo geoidal utilizado, el modelo obtenido fue expresado en alturas elipsoidales compatibles con POSGAR07. En la práctica, este modelo es comparable en forma directa con determinaciones GNSS, sin mediar transformaciones de alturas. El modelo de alturas elipsoidales obtenido para la zona de estudio es tan confiable como el modelo SRTM mejorado (DESVEST de 0.70 m), a partir del cual se calculó.

En estas condiciones, en la medida que se dispone de nuevos y mejores modelos geopotenciales, los mismos pueden ser incorporados al modelo de alturas elipsoidales para obtener una mejor representación de las alturas ortométricas.

Con ese criterio, el nuevo modelo SRTM mejorado fue referido al modelo geopotencial EGM2008. Las alturas del mismo fueron comparadas con las cotas IGN en los puntos POSGAR07, obteniéndose una desviación estándar de 0.1 m, un promedio de 0.2 m en módulo y errores máximos absolutos de 0.6 m. Las mayores diferencias se encuentran en el sudoeste y centro de la provincia de Buenos Aires, donde las alturas niveladas, alcanzan su máxima diferencia con alturas ortométricas referidas al modelo EGM2008.

La misma comparación utilizando el modelo geopotencial EGM96 arrojó una desviación estándar de 0.3 m, un promedio de 0.3 m en módulo y errores máximos absolutos de 0.90 m.

El mejor comportamiento del modelo EGM2008 en relación al EGM96, en la zona de estudio, comprobado en varios trabajos científicos (citados en el § 7.3), garantiza una mejor representación de las alturas a través del nuevo SRTM (EGM2008) a nivel métrico.

Los nuevos modelos obtenidos en esta tesis, con nueva información altimétrica, expresados en alturas ortométricas EGM2008 ó en alturas elipsoidales POSGAR07, facilitarán su aplicación en diversas actividades de las geociencias y la implementación de nuevas mejoras en los mismos.

### 8.1 Futuras Actividades Propuestas

La metodología de evaluación y eventuales mejoras del SRTM DEM propuesta en esta tesis no depende en forma sustancial de la región analizada. Es por ello que se propone como actividad futura continuar con esta línea de investigación, en otras zonas del país, como en Tierra del Fuego, donde se dispone de modelos de geoide locales decimétricos, como los desarrollados en la FCAG-UNLP (Gómez, 2011).

De igual modo, a nivel nacional será conveniente incorporar al modelo elipsoidal, la abundante información GNSS disponible en organismos públicos, como el

IGN, y en varias universidades nacionales. Los nuevos productos podrán capitalizar la calidad de los nuevos modelos geopotenciales, que siguen incorporando información de la misión GOCE<sup>1</sup>, y de los modelos de geoide a nivel nacional y/o provincial que se sean calculados, para obtener un modelo de terreno optimizado.

---

<sup>1</sup> GOCE: Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer.

## Referencias Bibliográficas

1. Blitzkow, D.; O. C. de Matos, A. C. “*EGM2008 and PGM2007A evaluation for South America*”. Laboratory of Topography and Geodesy, Department of Transportation Engineering. University of São Paulo, EPUSP-PTR, Postal Box 61548, Zip Code: 05424-970, São Paulo, São Paulo, Brazil. dblitzko@usp.br. (2009).
2. Bosque Sendra, J. “*Sistemas de Información Geográfica*”. Rialp. 2ª edición. (2000).
3. Cassiraga, E. “*Geoestadística*”. Universidad Politécnica de Valencia. España. (2005).
4. Carabajal, C. and Harding, D. J. “*ICESat validation of SRTM C-band digital elevation models*,” *Geophys. Res. Lett.* 32, L22S01 (2005).
5. Chuvieco Salinero, E. “*Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*”. Ariel Ciencia. (2002).
6. Crippen, R E. NASA. Jet Propulsion Laboratory. “*Global topographical exploration and analysis with the SRTM and ASTER elevation models* “. Elevation Models for Geosciences. Geological Society. Special Publication 345. (2010).
7. Del Cogliano, D. “*Modelado del Geoide con GPS y Gravimetría. Caracterización de la Estructura Geológica de Tandil.*” Tesis Doctoral. (2006).
8. Dermanis A. “*Kriging and collocation. A comparison. Manuscripta geodaetica*”. Vol 9. 159-167. (1984).
9. Drewes, H. y Sánchez, L. “*Sistemas de Referencia en Geodesia*”. (2002).
10. Ecker E. and Mittermayer E. “*Gravity corrections for the influence of the atmosphere*”. *Bulletin of Theoretical and Applied Geophysics*, 70-80. (1969).
11. El-Shaimy, N. Valeo, C. Habib, A. “*Digital Terrain Modeling. Acquisition, Manipulation, and Application*”. Artech House, Inc. 69-157. (2005).
12. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP. Dirección de Geodesia, MOSP, PBA. “*Densificación de la red Geodésica de la Provincia de Buenos Aires. Informe Final*”. Red Geodésica de Alta Precisión de la Provincia de Buenos Aires. (1998).
13. Farr, T. G.; Rosen, P. A.; Caro, E.; Crippen, R.; Duren, R.; Hensley, S.; Kobrick M.; Paller. M.; Rodriguez, E.; Ladislav, R.; Seal, D.; Shaffer, S., Shimada, J.; Umland, J.; Werner; M.; Oskin, M.; Burbank, D. and Alsdorf, D. “*The Shuttle Radar Topography Mission*”. Received 13 September 2005; revised 27 September 2006; accepted 14 November 2006; published 19 May 2007. Farr, T. G. & et al. 1-33. (2007).
14. Felicísimo, A. M. “*Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales*”. (1994).
15. Felicísimo, A. M. “*Modelos Digitales del Terreno*”. 1-84. (1999).
16. Fotopoulos, G. “*An analysis on the optimal combination of geoid, orthometric and ellipsoidal height data*”. A thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Department of Geomatics Engineering Calgary, Alberta. University of Calgary. December, 2003.
17. Gomez, M. E. “*Modelado del geoide en Tierra del Fuego. Integración de técnicas geodésicas y astrométricas*”. Tesis Doctoral. UNLP. 2011.
18. Harding, D. J. and Carabajal, C. C. “*ICESat waveform measurements of within-footprint topographic relief and vegetation vertical structure*”. *Geophys. Res. Lett.* 32, L21S10. (2005).
19. Heiskanen W. and Moritz H. “*Physical Geodesy*”. W.H. Freeman and Company. San Francisco and London. 364 pág. (1967).

20. Hirt, C. “Assessment of EGM2008 over Germany using accurate 1 quasigeoid heights from vertical deflections, GCG05 and 2 GPS/levelling”. 2011.
21. Hirt, C.; Filmer, M.S. and Featherstone, W.E. “Comparison and validation of the recent freely-available ASTER-1 GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital 2 elevation models over Australia”. Western Australian Centre for Geodesy & The Institute for Geoscience Research, Curtin University of Technology, GPO Box U1987, Perth WA 6845, Australia, \* Tel: (08) 9266 2218; Fax: (08) 9266 2703; Email: C.Hirt@curtin.edu.au. 2010.
22. Hirt, C; Featherstone, W. E., Marti, U. “Combining EGM2008 and SRTM/DTM2006.0 residual terrain model data to improve quasigeoid computations in mountainous areas devoid of gravity data”. Received: 21 October 2009 / Accepted: 4 June 2010. © Springer-Verlag. 2010.
23. Hobbs, P.R.N.; Gibson, A.; Jones, L.; Pennington, C.; Jenkins, G.; Pearson, S. & Freeborough, K. “Monitoring coastal change using terrestrial LIDAR.” Elevation Models for Geosciences. Geological Society. Special Publication 345. 2010.
24. Hofman-Wellenhof, B. and Moritz, H. “Physical Geodesy”. Springer Wien New York. 2005.
25. IGM. “1879 – 100 años en el quehacer cartográfico del país – 1979”. 1979.
26. Instituto Geográfico Militar Argentino. “Guía de la República Argentina para investigaciones geográficas”. 1983.
27. IGM. “Atlas Geográfico de la República Argentina”. 2001.
28. IGM 130 años IGN. “1879 – 100 años en el quehacer cartográfico del país – 2009”. 2009.
29. Introcaso, A. “Geodesia Física”. Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología. Volumen especial Número 1, pp1-128. . Rosario. 10-06-2010. ISSN 1666-115X. 2006.
30. Kenyon, S. and Factor, J. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). Pavlis, N. and Holmes, S. SGT Inc. “Towards the Next Earth Gravitational Model”. (2007).
31. Lefsky, M. A.; Harding, D. J., Keller, M; Cohen, W. B; Carabajal, C. C; Del Bom Espirito-Santo, F; Hunter, M. O and de Oliveira Jr, R. "Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat," Geophys. Res. Lett. 32, L22S02. (2005).
32. Mackern Oberti, M. V. “Materialización de un Sistema de Referencia Geocéntrico de alta precisión mediante observaciones GPS”. Tesis Doctoral. (2003).
33. Massonnet, D. & Souyris, Jean-Claude. “Imaging With Synthetic Aperture Radar”. E P F L P r e s s. A Swiss academic publisher distributed by CRC Press. First edition, EPFL Press©. (2008).
34. Maune, David F.; Kopp, Stephen M.; Crawford, Clayton A. and Zervas; Chris E. *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. The American Society for Photogrammetric and Remote Sensing, Bethesda, Maryland. 2nd Edition. (2007).
35. Mohr, P. J., and B. N. Taylor. “The fundamental physical constant: Physics Today”. 54, 6–16. (2001).
36. Moreno Jiménez, A. “Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS”. Alfaomega. Ra-Ma. (2006).
37. Moritz, H. “Geodetic Reference System 1980”. (1980).

38. National Imagery and Mapping Agency (NIMA). “*Technical Report. NIMA TR8350.2. Third Edition. Amendment I. Department of Defense World Geodetic System 1984. Its definition and relationships with Local Geodetic Systems*”. (2000).
39. Nightingale, M. R. A. & Morgan, G. L. K. “*Refinement of ASTER digital elevations models using SRTM data for an environmental study in China.*” .Elevation Models for Geosciences. Geological Society. Special Publication 345. (2010).
40. Oliveira Cancoro de Matos, A. C. “*Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul*”. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Tesis Doctoral. (2005).
41. Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., and Factor, J. K. “*An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008*”. EGU General Assembly 2008 Vienna, Austria, Nikolaos.K.Pavlis@nga.mil . (2008).
42. Pavlis, N. K. National Geospatial-Intelligence Agency, Springfield, Virginia, USA. Holmes, Simon A. SGT, Incorporated, Greenbelt, Maryland, USA. Kenyon, Steve C. National Geospatial-Intelligence Agency, Arnold, Missouri, USA. Factor, John K. National Geospatial-Intelligence Agency, Arnold, Missouri, “*The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)*”. USA. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 117, B04406, 38 PP., doi: 10.1029/2011JB008916. (2012).
43. Perdomo, R.; Amorín, R. & Mendoza, L. “*Discusión de la precisión real del Geoide Bonaerense*”. Actas de la XX Reunión Científica de la Asoc. Arg. de Geof. y Geod., en CD, Mendoza. (2000).
44. Reigber, A. “*Synthetic Aperture Radar -Basic Concepts and Image Formation*”. (2001).
45. Reuter H. I. Nelson A. and Jarvis A. “*An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data*”. Institute for Environment and Sustainability – Land Management and Natural Hazards Unit, European Commission - DG Joint Research Centre, TP 280, Via Fermi 1, I -9 21020 Ispra (VA) Italy. (2007).
46. Rodríguez E., Morris C. S., Belz J.E., Chapin E. C., Martin J. M., Daffer W., Hensley S. “*An Assessment of the SRTM Topographic Products*”. JPL. Jet Propulsion Laboratory D-31639. NASA. \*ernesto.rodriguez@jpl.nasa.gov. NASA. (2005).
47. Roman, D. R.; Wang, Y. M.; Saleh, J.; Li, X. “*Geodesy, Geoids, and Vertical Datums: A Perspective from the U.S. National Geodetic Survey*”. UNITED STATES. FIG Congress 2010. Facing the Challenges – Building the Capacity Sydney, Australia. (2010).
48. Rosen, P. A. et al. “*SRTM C-Band Topographic Data: Quality Assessments and Calibration Activities*”. Jet Propulsion Laboratory. (2004).
49. Torge W. “*Geodesy*”. 3rd Edition. De Gruyter. Berlin – New York.255 pág. (2001).
50. Torge W. *Gravimetry*, Walter de Gruyter Berlin, New York.- 465 pág. ISBN 3-11-010702-3. (1989).
51. Uotila U.A. “*Note to users of International Gravity standardization net 1971*”. Journal of Geodesy, 54, 407-408. (1980)
52. Wenzel H. “*Hochauflösende fur des gravitationspotential der erde*” [1]: Wissenschaftliche arbeiten del Fachrichtung Vermessungswesen der Universitat Hannover, 137. (1985).
53. Yasreby J., Saffari M., Fathi H., Karimian N., moazallahi M. and Gazni R. “*Evaluation and Comparison of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighting Methods for*

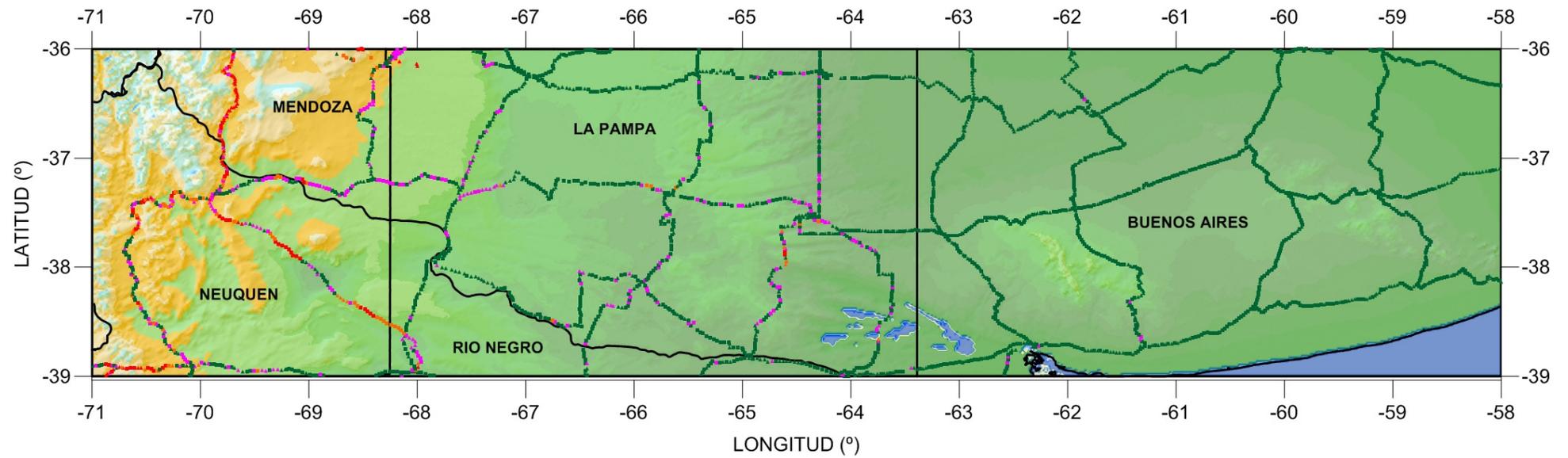
*Prediction of Spatial Variability of Some Soil Chemical Parameters*". Research Journal of Biological Sciences 4 (81): 93-102, 2009. ISSN: 1815-8846. © Medwell Journals, 2009.

### **Links**

[http://cddis.gsfc.nasa.gov/926/egm96/doc/S\\_1.HTML](http://cddis.gsfc.nasa.gov/926/egm96/doc/S_1.HTML)  
<http://www.cgiar-csi.org/data/elevation/item/45-srtm-90m-digital-elevation-database-v41>  
[http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/DIRECCIONES\\_GENERALES/INSTITUTO\\_GEOGRAFICO/Geodesia/gravimetria/historia\\_4.htm](http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geodesia/gravimetria/historia_4.htm)  
<http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/egm96.html>. Google Earth  
<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/>  
<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>  
<http://www.ign.gob.ar/>  
<http://www.ign.gob.ar/AreaProfesional/Ramsac/Historia>  
<http://www.ign.gob.ar/AreaProfesional/posgar07>  
<http://www.ign.gob.ar/AreaProfesional/RedPosgar07>  
[http://www.ign.gob.ar/archivos/ramsac/formulario\\_AZUL.pdf](http://www.ign.gob.ar/archivos/ramsac/formulario_AZUL.pdf)  
[http://www.ign.gob.ar/archivos/ramsac/formulario\\_VBCA.pdf](http://www.ign.gob.ar/archivos/ramsac/formulario_VBCA.pdf)  
[http://www.ign.gob.ar/archivos/ramsac/formulario\\_LHCL.pdf](http://www.ign.gob.ar/archivos/ramsac/formulario_LHCL.pdf)  
<http://southport.jpl.nasa.gov/desc/SIRCdesc.html>  
<http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/12624/1/01-0878.pdf>  
[http://www.mosp.gba.gov.ar/sitios/geodesia/deptos/geo\\_topo/infofinew.pdf](http://www.mosp.gba.gov.ar/sitios/geodesia/deptos/geo_topo/infofinew.pdf)  
<http://www.normativas.org.ar/ZNormativas/DisposicionesDG/2003DensificacionRedGeoba.pdf>  
<http://webapp.ciat.cgiar.org/dtmradar/microondas-suelo-veget-atmosf.htm>  
<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>  
<http://cddis.nasa.gov/926/egm96/contents.html>  
<http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/egm96.html>.  
[http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08\\_wgs84.html](http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html)  
<http://www.freedownloadmanager.org/download/nga-egm-2008-geoid-calculator-750121.html>  
<http://gipsy.jpl.nasa.gov>  
<ftp://space.cv.nctu.edu.tw/PHD%20Thesis/Paper/%E7%9B%B8%E9%97%9C%E5%A0%B1%E5%91%8A/EGM2008.pdf>  
[http://www.mosp.gba.gov.ar/sitios/geodesia/deptos/geo\\_topo/infofinew.pdf](http://www.mosp.gba.gov.ar/sitios/geodesia/deptos/geo_topo/infofinew.pdf)  
<http://cddis.nasa.gov/926/egm96/nasatm.html>, 2006  
<http://www.igg.uni-bonn.de/apmg/index.php?id=itg-grace03>

## ANEXO 1

### DIFERENCIAS EN LA RED DE NIVELACIÓN DE ALTA PRECISION

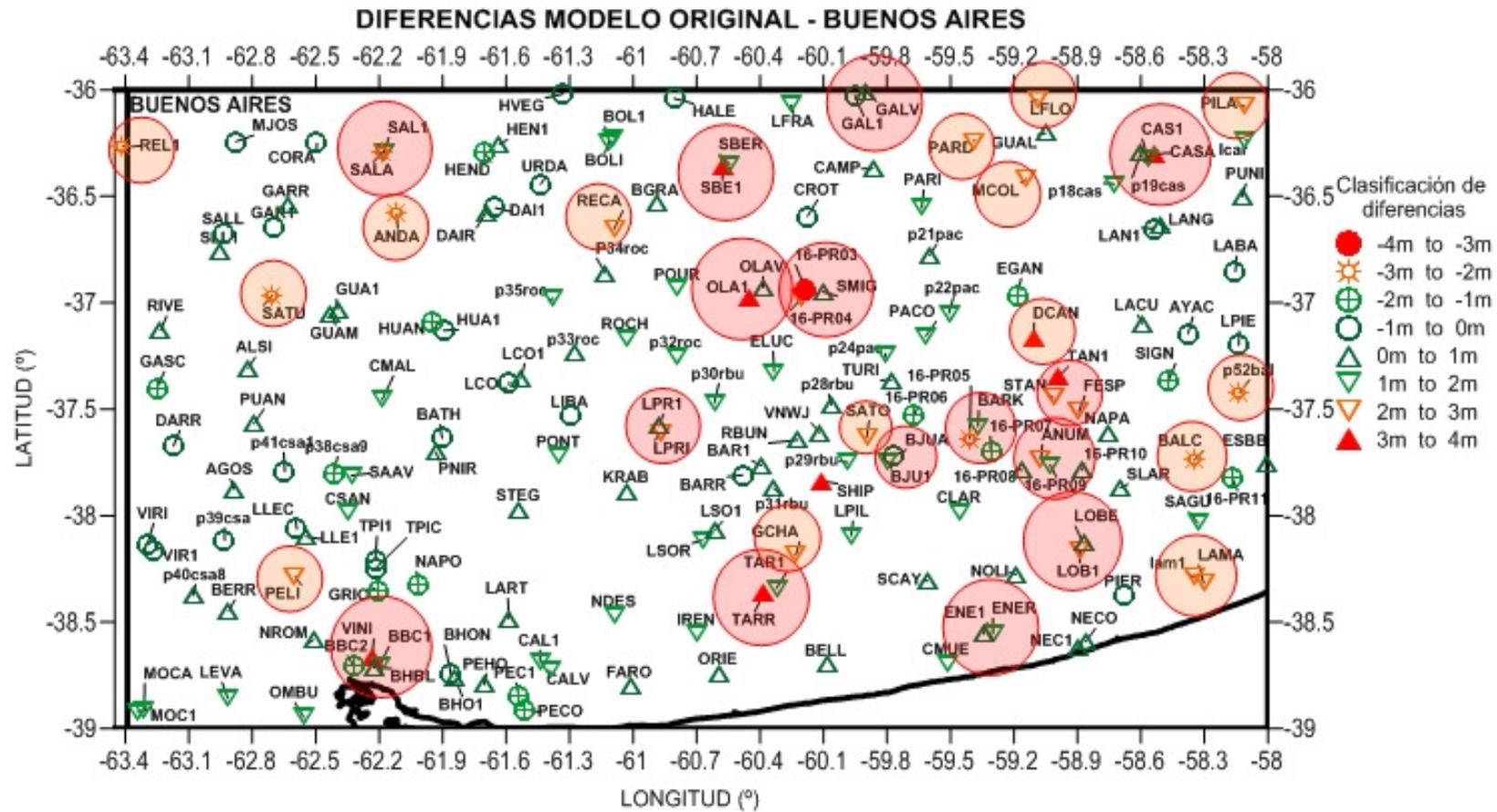


Errores

- ▲ -1181.8m to -100m
- ▲ -100m to -50m
- ▲ -50m to -16m
- ▲ -16m to 0m
- 0m to 16m
- 16m to 50m
- 50m to 100m
- 100m to 497.7m



## ANEXO 2



**ANEXO 3**

**DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS MODELOS EGM96 Y EGM2008.**

