

MODELO DE ELEVACIÓN SRTM

MISIÓN, TÉCNICAS DE ADQUISICIÓN, METODO DE EVALUACIÓN

BREVE INTRODUCCIÓN POR
LIC. MATIAS LESTUSSI

EDITORIAL CIENTÍFICA UNIVERSITARIA
CATAMARCA, 2022

Modelo de elevación SRTM misión, técnicas de adquisición, métodos de evaluación.

Matias Lestussi

Lestussi, Matias

Modelo de elevación SRTM misión, técnicas de adquisición, métodos de evaluación / Matias Lestussi. - 1a ed. - Catamarca : Editorial Científica Universitaria de la Universidad Nacional de Catamarca, 2022.

Libro digital, HTML

Archivo Digital: descarga
ISBN 978-987-661-418-4

1. Geodesia. I. Título.
CDD 526.1

ISBN: 978-987-661-418-4

Queda hecho el depósito que marca la ley 11.723.

E.C.U. 2022

Avda. Belgrano 300 - Pab. Variante I - Planta Alta - Predio Universitario
- San Fernando del Valle de Catamarca - 4700 -
Catamarca - República Argentina

Prohibida la reproducción, por cualquier medio mecánico y/o electrónico, total o parcial de este material, sin autorización del autor.

Todos los derechos de autoría quedan reservados por el autor.

INDICE

Introducción	5
Modelos Digitales de Elevación	6
Conceptos Geodésicos	8
Sistemas de referencia	8
Superficies de referencia	9
Sistemas de proyección	11
Sistemas de coordenadas	12
Altura	12
Datum	14
Red geodésica	15
Red de nivelación	15
Misión SRTM	16
Técnica	16
Repeat/Single pass	21
Ancho del tramo iluminado	21
Órbita	22
Geometría del interferómetro	23
Error	25
Fuentes de error	25
Módulo de metrología	26
Procesamiento de los datos	27
Estimaciones en el error local	28
Comparación SRTM – Red Geodésica IGN	30
Comparación SRTM – Red de Nivelación IGN	31
Contrastes en otras zonas de la provincia	33
Contrastes con mediciones de GPS de mano	35
Tendencias generales	43
Bibliografía	44

INTRODUCCION

En este trabajo se presentan inicialmente los conceptos básicos relacionados a modelos digitales de elevación y geodesia, que permiten la adecuada comprensión de las formas de obtención de la información topográfica producida en la misión SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), a partir de la cual se genera el modelo de elevación digital homónimo. Así también, permitirá entender la metodología aplicada en la estimación del error local expuesta en el último capítulo.

La información está dividida en cuatro capítulos. Un primer capítulo breve en que se define modelos digitales de elevación, otro en que se exponen conceptos geodésicos para entender qué tipo de información contienen las elevaciones en los modelos, otro que habla de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de la Agencia Espacial Estadounidense en particular, y un último en que se expone un caso de estimación de errores localmente, en una zona rural de la provincia de Catamarca.

La información aquí expuesta es parte del trabajo de tesis de grado del autor, disponible en la biblioteca de la Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas de la Universidad Nacional de Catamarca.

MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN

Un modelo es una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades (Joly, 1988). Es un objeto, concepto o conjunto de relaciones que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica (Ríos, 1995). Cuando se construye un modelo, se genera un sistema cuyos componentes se han reducido a una cantidad manejable para simplificar el sistema real. La calidad de un modelo puede valorarse sometiendo una parte de los resultados a una verificación experimental que, aunque sólo puede ser parcial, servirá de orientación sobre la magnitud de los errores derivados del modelo y puede permitir la introducción de correcciones.

Los modelos digitales están codificados en cifras. Son modelos simbólicos (se construyen representando el objeto real mediante algún tipo de codificación, ej. matemática o geométrica). Para visualizarlos es necesario un proceso de decodificación de la información que permita una representación visual.

Un modelo digital de terreno es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. Son modelos simbólicos, ya que las relaciones de correspondencia que establecen con el objeto real tienen la forma de algoritmos matemáticos. El concepto de modelo digital de terreno no hace referencia a la variable representada, que puede ser cualquier variable cuantitativa y continua. Si la variable representada es la elevación, se denominan modelos digitales de elevación. El concepto fue desarrollado por Miller y Laflamme (1958), para apoyo de obras civiles.

Los modelos digitales de elevación se pueden presentar según distintas estructuras de datos vectoriales o ráster. La primera se basa en entidades geométricas definidas por las coordenadas de nodos o vértices y la segunda en unidades elementales de superficie, en arreglo comúnmente regular y de forma generalmente cuadrada, denominadas celdas. Ejemplos de estructuras vectoriales comunes son las curvas de nivel y la red irregular de triángulos; ejemplos de estructuras ráster son las matrices regulares y las matrices jerárquicas. Tanto curvas de nivel, como redes irregulares de triángulos y matrices regulares serán estructuras de datos para un mismo modelo de elevación empleadas en este trabajo.

En las redes de triángulos irregulares (Peucker et al., 1978) se construyen triángulos ajustando un plano a tres puntos cercanos no co-lineales. El terreno queda representado por un conjunto de superficies planas que se ajustan a un conjunto previo de puntos.

El método de triangulación más utilizado se denomina triangulación Delaunay (Deloné, 1934), el cual funciona bajo una serie de argumentos básicos. Dados dos puntos en un plano determinado, la perpendicular al segmento que une los puntos en su punto medio divide el plano en dos regiones. Una de ellas contiene los puntos cuya distancia al punto dentro de esa región es menor que al otro punto, lo mismo es cierto para la otra región, pero respecto al punto y los puntos dentro de esa región.

El concepto se extiende a múltiples puntos, de manera que a cada punto se asocia una región, generándose así un conjunto de polígonos denominados regiones de Voronoi. Si se conectan entre sí los puntos que comparten un borde de una región, se obtiene la triangulación Delaunay (Fig. 2),

que constituye una solución única para un conjunto de puntos dados, exceptuando casos especiales (ej. cuando cuatro puntos pertenecen a una circunferencia, donde existen triangulaciones alternativas). Un punto perteneciente a la red es siempre vértice de un triángulo. Dos triángulos de la red pueden estar conectados por un vértice o un lado común, no existe superposición. Dado un triángulo determinado, no existe otro punto de la triangulación que pase por el triángulo. Dados 4 puntos y el cuadrilátero definido por ellos, la diagonal que lo divide en dos triángulos es aquella que hace máximo el menor de los ángulos internos (esta triangulación tiende a crear los triángulos lo más equiláteros posibles).

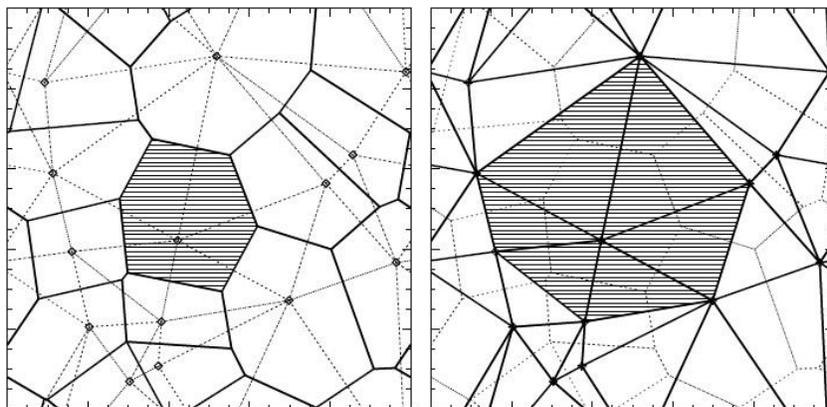


Fig. 1: Izq.: Polígonos de Voronoi. Der.: Triángulos de Delaunay. Fuente: Schaap (2007)

Al construir una red de triángulos irregular a partir de curvas de nivel, como es el caso de este trabajo, se están utilizando los nodos o vértices de todas las curvas de nivel como vértices de la red de triángulos irregulares. El método de Delaunay es un método bidimensional, los triángulos se construyen en un plano de proyección, utilizando coordenadas X e Y, independientemente del valor de altitud.

El paso de estructura vectorial a estructura ráster (matriz regular) se lleva a cabo por interpolación a partir de la red irregular de triángulos. Cada celda de la matriz tendrá un valor de elevación estimado a partir de la red irregular de triángulos. La interpolación puede ser lineal (donde la elevación se estima a partir de la ecuación del plano definido por los tres vértices del triángulo que lo contiene; esto puede provocar cambios bruscos de orientación y pendiente) o responder a funciones polinómicas (considera la superficie definida por la red irregular de triángulos como un continuo, en la que se suavizan zonas de vértices y aristas, utilizando ecuaciones polinómicas). El segundo método de interpolación permite agregar líneas de quiebre, a lo largo de las cuales se realice interpolación lineal. Este método de interpolación tiende a generar concavidades, que comúnmente se denominan artefactos y solo están presentes de forma natural en zonas afectadas por procesos kársticos recientes y glaciario (Band, 1986).

CONCEPTOS GEODÉSICOS

Sistemas de referencia (Furones, 2010):

Los sistemas o marcos de referencia están constituidos por una serie de mediciones que sirven para ubicar las superficies de referencia en el espacio, ej. ubicación del centro de masas terrestre, eje de rotación terrestre (polo geográfico), velocidades de deriva continental. Estos valores se miden de acuerdo a una época determinada. Históricamente, la tendencia en los sistemas de referencia globales es la de unificarse en un sistema de referencia común, utilizado por los sistemas de posicionamiento satelital.

En el sistema de referencia geocéntrico convencional se utilizan ejes cartesianos que acompañan el movimiento de rotación, de manera que las coordenadas de un punto son siempre las mismas. El origen es el centro de masas terrestre o geocentro (incluye atmósfera y océanos), el eje "Z" coincide con el eje de rotación terrestre, el plano ecuador es perpendicular al eje de rotación y pasa por el geocentro, los planos meridianos contienen al eje de rotación; el eje "X" se sitúa en dirección de meridiano de Greenwich y está contenido en el ecuador, el eje "Y" también está contenido en el plano ecuador.

Las superficies de referencia (ej. elipsoides de revolución), como superficies de aproximación a la forma de la tierra, se posicionan en relación al centro de masas terrestre o geocentro y su semieje menor es paralelo al eje de rotación terrestre.

La dirección del eje de rotación terrestre cambia con el tiempo respecto a la superficie terrestre. Describe una trayectoria curva pseudo-circular de radio igual a 6 m. El periodo estimado es de 430 días y está afectado por redistribuciones de la masa terrestre, efectos de rebote post-glaciar, movimientos tectónicos, redistribuciones atmosféricas, etc. Superpuesto a este movimiento, se generan oscilaciones provocadas por la influencia del sol y la luna, de magnitud igual a 60 cm. y periodo considerablemente menor.

Debido a que las superficies de referencia se alinean con el sistema de referencia, cuya definición depende de la posición del eje de rotación terrestre, el movimiento del polo afecta directamente a las coordenadas de los puntos sobre la superficie terrestre. Por este motivo, el eje de rotación que toma el sistema de referencia es el origen o centro de las oscilaciones periódicas que se dan en el verdadero eje de rotación. Al polo de rotación así definido se lo denomina polo convencional y es el más comúnmente utilizado.

El polo convencional fue definido a lo largo de la historia por distintos organismos internacionales, con diferentes grados de precisión:

- Polo CIO: Posición media del polo de rotación entre 1900 y 1905. Precisión de 3 m. Se definió a partir de observaciones astronómicas sobre cinco estaciones en un mismo paralelo.
- Polo BIH: Posición del eje X del sistema de referencia geocéntrico convencional, determinada a partir de longitudes de cincuenta estaciones del Bureau International de

l'Heure (BIH). Las latitudes de estas estaciones generaron el polo BIH, definido a partir de estimaciones medias de 5 días. Su precisión es de 1 m.

- Polo IPMS: En 1962 se crea el International Polar Motion Service, que determina la posición del polo de rotación a partir de determinaciones de latitud en 80 estaciones. Posee una precisión de 1 m.
- TRANSIT: Geodesia por satélite. Posiciones del polo a través de medidas Doppler de satélites de constelación TRANSIT. Su precisión es de 0,2 m.
- VLBI, DORIS, PRARE, GPS: Mediciones laser y de microondas a satélites y a la luna. Aumentan la precisión a 6-8 cm.
- Polo IERS: En 1987 se crea la International Earth Rotation Service (IERS), que reemplaza al Bureau International de l'Heure (BIH). El polo BIH pasa a llamarse polo IERS. A partir de 2003 se determinan las coordenadas instantáneas del polo para cada día, referidas al polo IERS. Estas permiten transformar coordenadas instantáneas en absolutas. Las diferencias generadas por esta corrección rondan los 0,1" de arco (3 m. aproximadamente).

Un sistema de referencia, si bien está soportado en base a mediciones, es una definición conceptual que permite situar ejes cartesianos en el espacio, definiendo origen y orientación. Un marco de referencia es la materialización del sistema de referencia, a través de observaciones, en el terreno; es un conjunto de puntos de coordenadas y velocidades conocidas, en dicho sistema de referencia.

El marco de referencia internacional se denomina International Terrestrial Reference Frame (ITRF) y está constituido por las coordenadas y velocidades de una serie de estaciones distribuidas en todo el planeta en el sistema de referencia de la IERS, encargada del mantenimiento del marco. El elipsoide recomendado para obtener coordenadas geodésicas de este marco es el GRS80. El marco de referencia ITRF está operando desde 1984. Constantemente se hacen nuevas determinaciones más precisas y se agregan estaciones, lo que genera nuevas "soluciones" para el marco. Las correcciones que se deben hacer sobre las determinaciones son a raíz de las mareas terrestres, la carga atmosférica y la oceánica, la tectónica de placas y los movimientos locales y regionales, como el rebote post-glacial en Escandinavia.

El Marco de Referencia Geodésico Nacional POSGAR07 se alinea con el marco de referencia ITRF, época 2005. El sistema WGS84 también mantuvo su propio marco de referencia, que fue finalmente asimilado por ITRF, por ser este último más preciso. Para la última solución de WGS84 (G1150) se trata de marcos virtualmente idénticos.

Superficies de referencia:

- Elipsoide: Cuerpo geométrico simple que se aproxima a la superficie de los océanos si el agua estuviese en un estado no perturbado. Su superficie responde a leyes matemáticas. Pueden realizarse mediciones angulares, de posición y distancia tomando como referencia este cuerpo. Los parámetros que definen un elipsoide son el semieje mayor, el semieje menor, el factor de achatamiento (igual a la diferencia entre la unidad y la relación entre

semieje menor y semieje mayor). Si se extiende el vector normal al elipsoide en un punto hacia su interior, la línea no pasa por el centro del mismo.

- **Geoide:** Superficie gravimétrica equipotencial que se aproxima al nivel medio del mar y su continuación por debajo de los continentes. En su superficie todos los puntos experimentan la misma atracción gravitatoria, equivalente a la presente al nivel del mar. La superficie geoidal está afectada por fuerzas de atracción gravitatoria de la propia tierra, del resto de los astros del sistema solar y por la fuerza centrífuga debida al movimiento de rotación terrestre. El geoide, en consecuencia, no responde a leyes matemáticas, si no a leyes físicas, y se determina por mediciones con gravímetros o por mediciones satelitales. La superficie geoidal en cualquier punto es normal a la fuerza de gravedad en ese punto (línea que sigue una plomada al dejarse caer). Esta línea no coincide con la vertical geodésica (vector normal al elipsoide en cualquier punto).
- **Modelos de geoide:** Los modelos de geoide son una representación de la superficie geoidal mediante la medición de diversos parámetros, entre ellos la fuerza de gravedad o el potencial gravitatorio medidos de forma directa (ej. mediciones gravimétricas in-situ) o indirecta (ej. oscilación de las orbitas satelitales por variación en potencial gravitatorio), por diversos medios y utilizando distintas formulaciones teóricas. Normalmente se presentan en una matriz regular de mediciones de ondulaciones geoidales, siendo esta la separación del geoide en relación al elipsoide. En este trabajo se emplea el Modelo de Geoide Argentino Ar-16 para llevar las alturas elipsoidales de la red geodésica a alturas pseudo-ortométricas. El modelo de elevación SRTM está afectado por las ondulaciones geoidales calculadas en el modelo de geoide EGM96 (Lemoine, 1998). Este modelo de geoide fue elaborado utilizando gran cantidad de datos de gravedad, observaciones láser a satélites (ej. TOPEX/POSEIDON, Stella, etc.), observaciones Doppler a satélites (SEASAT, RADCAI, etc.), altimetría de satélite, observaciones GPS, TDRSS, SST Doppler, etc. Los errores medios cuadráticos reportados son 28 cm. en áreas continentales, 12 cm. en áreas oceánicas.
- **Nivel medio del mar:** Es la superficie por excelencia para medir elevaciones (desde donde empiezan las campañas de nivelación). Depende de las irregularidades del campo gravitatorio terrestre. El agua busca estar en equilibrio y tiende a seguir una superficie gravitatoria equipotencial. El nivel del mar varía decenas de metros de un punto a otro según la distribución interna de las masas en la tierra (composición y densidad locales en el manto y la corteza). En las costas se mide a través de mareógrafos de referencia. El nivel del mar en el espacio oceánico se mide a través de técnicas de altimetría remota (ej. radar) y modelos de geoide.

En relación a dos puntos, uno sobre el geoide y otro sobre el elipsoide, o a un mismo punto si estos se encuentran en una situación de tangencia, se puede definir una serie de líneas y planos:

- **Vertical geodésica:** Dirección normal al elipsoide.
- **Horizonte geodésico:** Plano tangente al elipsoide.

- Vertical astronómica: Dirección normal al geoide. Tangente a la línea de la plomada en el punto.
- Horizonte astronómico: Plano tangente al geoide.

Sistemas de proyección:

Los sistemas de proyección son una forma de proyectar las coordenadas de la superficie de un cuerpo geométrico (ej. elipsoide) sobre un plano. La proyección transforma las coordenadas sobre el cuerpo en coordenadas planas en dos dimensiones. El proceso consiste en proyectar la superficie sobre una figura geométrica (ej. cilindro, cono, plano, etc.) Al desplegar la figura empleada, se tiene una representación de la superficie del cuerpo geométrico en un plano bidimensional (en el caso del plano, la proyección es directa).

El proceso de proyección genera deformaciones, que deben ser minimizadas en la medida de lo posible. Las propiedades de la superficie de referencia que pueden mantenerse son:

- **Conformidad:** Forma. El mapa mantiene el ángulo que forman dos líneas en la superficie terrestre. Meridianos y paralelos se cortan en ángulo recto. Mantiene formas en polígonos pequeños. Fundamental en navegación.
- **Equivalencia:** Superficie. Una superficie en el plano de proyección tiene la misma superficie que en el cuerpo geométrico de referencia. Esto no es posible sin deformar considerablemente los ángulos originales. Las proyecciones no pueden ser equivalentes y conformes a la vez. Fundamental en planos catastrales.
- **Equidistancia:** Distancia. La distancia entre dos puntos en la superficie de referencia y en el plano de proyección se mantiene. Está representada por el arco del círculo máximo que las une.

Las proyecciones se clasifican de acuerdo al foco de la proyección, al objeto geométrico utilizado para proyectar (ej. cilíndricas, cónicas, azimutales, planas) y de acuerdo a si el plano de proyección definido por dicho objeto es tangente o secante. Las deformaciones tienden a ser nulas en el plano de tangencia de la superficie de referencia con el plano de proyección y tienden a aumentar a medida que la proyección se aleja del plano. Utilizar superficies o planos secantes como planos de proyección disminuye las deformaciones.

El sistema de proyección más generalizado globalmente es el UTM (Universal Transversal Mercator), proyección cilíndrica transversa, en la cual la generatriz del cilindro (el cilindro es un cuerpo de revolución engendrado por un rectángulo al girar en torno a uno de sus lados; la generatriz es el radio de la base del cilindro) no es paralela al eje de rotación, sino perpendicular. Divide a la tierra en sesenta husos de 6° de longitud, de manera que están limitados por meridianos. Los cilindros toman una distinta posición respecto a la superficie de referencia en cada huso, pero siempre son secantes respecto a la superficie de referencia, de manera que aparecen dos líneas verticales en las que no hay distorsiones. Entre las dos líneas las distancias y áreas se representan menores de lo que son (escala disminuye). Estas distorsiones aumentan conforme aumenta la latitud, por ello este sistema de proyección no debe usarse en latitudes altas. El

meridiano central del huso tiene un valor X igual a 500.000 metros (valores sobre eje "X" se denominan "easting" en inglés) disminuyendo hacia el oeste (hasta X igual a cero) y aumentando hacia el este (hasta X igual a 100.000 metros). En el ecuador Y es igual a 0 metros (valores sobre eje "Y" se denominan "northing" en inglés). El valor incrementa hacia el norte y hacia el sur. El sistema de proyección descrito fue empleado en la cartografía del trabajo. La zona de trabajo está ubicada en una posición marginal del huso 20S, en las inmediaciones de las líneas secantes de la figura de proyección.

Sistemas de coordenadas:

- Geográficas/Planas: Las coordenadas geográficas son coordenadas angulares, representadas sobre un cuerpo geométrico en el espacio. Comúnmente en geografía se representa sobre una esfera, de manera que la ubicación de un punto en la superficie responde a un vector radial desde el centro (vertical geográfica). Si el cuerpo sobre el que se representa es un elipsoide, las coordenadas angulares se denominan geodésicas, la vertical se denomina vertical geodésica y no coincide con la vertical geográfica. Las coordenadas planas son coordenadas en metros, desde un origen determinado, sobre dos ejes horizontales (x e y), o sea representadas en un plano, a través de un sistema de proyección determinado.
- Geocéntricas/Geodésicas: Las coordenadas geocéntricas tienen origen en el centro de masas terrestre. Una forma común son las cartesianas (x, y, z) para un datum geocéntrico. Aun así, las coordenadas cartesianas están expresadas en metros, desde un origen que puede no coincidir con el centro de masas terrestre; en consecuencia, que las coordenadas sean cartesianas no exige que sean geocéntricas. Las coordenadas cartesianas geocéntricas son las calculadas por GPS de precisión. Las coordenadas geocéntricas pueden también ser angulares. Las coordenadas geodésicas son angulares y toman la vertical geodésica hacia el punto de medición para medir los valores angulares desde los planos de referencia, así como las alturas sobre el elipsoide. La vertical es una línea normal a la recta tangente a la superficie elipsoidal en el punto de interés, que coincide con el vector normal a la superficie elipsoidal. Según una superficie de referencia esférica, tanto latitud como longitud (geodésicas y geocéntricas) coincidirán, debido a que las verticales geodésicas son la continuación de una línea radial desde el centro de la esfera.

Así como pueden transformarse coordenadas geográficas en coordenadas planas mediante una proyección cartográfica, pueden transformarse coordenadas geodésicas en cartesianas a través de fórmulas que involucran parámetros del elipsoide (excentricidad, longitud de los semiejes) y relaciones trigonométricas.

Altura:

- Altura ortométrica (H): Es la altura medida a lo largo de la línea de la plomada, que reúne una serie de segmentos normales a las superficies de nivel (superficies equipotenciales) tomando como referencia la superficie geoidal (superficie equipotencial de referencia), de manera que resulta en una línea ligeramente curva. La línea de la plomada es tangente al vector de gravedad en cada punto que se mide. La altura ortométrica se mide entre la

superficie de referencia (geoide) y la superficie equipotencial que contiene el punto del cual se quiere conocer la altura, a través de la relación entre cotas geopotenciales (diferencia de potencial entre la superficie de referencia y la superficie equipotencial medida) y mediciones gravimétricas (gravedad media a lo largo de la línea de la plomada).

$$H = \frac{C}{\bar{g}}$$

Donde “H” es la altura ortométrica, “C” es el número geopotencial (diferencia entre potencial en el punto y en la superficie de referencia o geoide) y “ \bar{g} ” es la gravedad media a lo largo de la línea de la plomada. La altura ortométrica se calcula mediante aproximaciones teóricas muy conocidas en geodesia (ej. Prey, Helmert, Mader). Las superficies con igual altitud ortométrica no forman superficies equipotenciales; es decir, no tienen el mismo potencial. Si así fuese, la gravedad media a lo largo de las líneas de la plomada en dos puntos con la misma altura ortométrica debería ser idéntica, mientras que si se mide en el terreno no lo es.

- Altura elipsoidal (h): Es la altura sobre la superficie del elipsoide, medida según la vertical geodésica. Es la altura que miden los dispositivos GPS, conociendo distancias desde varios satélites a un receptor en la superficie terrestre y a partir de las posiciones que proporcionan los satélites con respecto al centro de masas de la tierra, punto alrededor del cual orbitan.
- Ondulación del geoide (N): Es la separación entre el elipsoide y el geoide. Se mide a través de un potencial perturbador “T” entre el potencial asociado a un elipsoide de revolución y el potencial asociado a la superficie geoidal (el potencial asociado al elipsoide involucra, a su vez, un potencial gravitatorio y un potencial debido a la fuerza centrífuga generada por la rotación del elipsoide). La ondulación del geoide es igual a la relación entre el potencial perturbador “T” y la gravedad normal “ γ ” (en la dirección normal al elipsoide de referencia). Esta relación se denomina fórmula de Bruns:

$$N = \frac{T}{\gamma}$$

La diferencia de la gravedad normal con el vector gravedad real se denomina anomalía de gravedad “ Δg ”. Esta cantidad permite calcular el potencial perturbador “T” y, en consecuencia, la ondulación del geoide, a través de la fórmula de Stokes, que es la expresión más importante en Geodesia Física, debido a que permite conocer la forma de la tierra a partir de datos gravimétricos. La expresión para obtener la ondulación del geoide según alturas sobre el geoide y sobre el elipsoide es:

$$N = h - H$$

Donde “N” es la ondulación del geoide, “h” es la altura elipsoidal y “H” es la altura ortométrica.

A través de la proyección de Pizzetti (Álvarez y Mielgo, 2001), considerando un punto P sobre el terreno, la cantidad “H” se mide entre el punto “P” sobre el terreno y el punto “PO” sobre el geoide, en dirección perpendicular al geoide, mientras que la cantidad “N” se mide entre el punto “PO” sobre el geoide y el punto “QO” sobre el elipsoide, en dirección perpendicular al elipsoide. El trayecto entre P y QO es igual a la suma de las cantidades “N” y “H”. La proyección de Helmert proyecta P directamente sobre la superficie elipsoidal en un punto P’, según la dirección perpendicular al elipsoide. Estos trayectos (P hasta QO y P hasta P’) tienen una diferencia mínima, que permite el empleo de la ecuación de la ondulación geoidal a través de la diferencia entre las alturas elipsoidal y ortométrica, especialmente en zonas donde no hay grandes variaciones en la ondulación geoidal y, por ende, la superficie del geoide puede tomarse como una superficie aproximadamente paralela a la del elipsoide. Esta suposición se hizo al utilizar alturas elipsoidales medidas en puntos de la red geodésica del Instituto Geográfico Nacional para verificar las alturas pseudo-ortométricas en el modelo de elevación SRTM.

La ondulación geoidal puede ser positiva o negativa, dependiendo si el geoide está por encima o por debajo (hacia el exterior o el interior) del elipsoide. En este aspecto, a fines ilustrativos, se puede considerar que en los modelos de geoide gravimétricos globales (ej. WGS84, EGM96, EGM08) los valores para N son aprox. ± 100 m.

Datum:

El datum es un conjunto de parámetros que definen la posición de una superficie de referencia (elipsoide) respecto a la tierra. Para determinarlo hace falta conocer la geometría del elipsoide (semieje mayor y factor de achatamiento), su posición respecto al geocentro (coordenadas del centro del elipsoide respecto al geocentro), su orientación (orientación de los ejes del elipsoide respecto a los ejes terrestres) y una escala k.

Los datum locales generalmente no son geocéntricos, es decir, el origen de coordenadas del elipsoide de referencia no coincide con el centro de masas terrestre. En estos casos se mide en un punto fundamental (punto de tangencia del elipsoide y el geoide) la desviación angular de la normal al elipsoide del datum local (vertical geodésica) respecto a la de una línea normal al geoide (vertical astronómica). Esto equivale a medir el desplazamiento en los tres ejes del centro de coordenadas del datum local respecto al geocentro, dando un vector que servirá para posicionar la superficie de referencia del datum local (elipsoide) respecto al centro de masas terrestre. Las cantidades angulares que describen esta desviación entre las verticales astronómica y geodésica (componentes de la desviación de la vertical) son η (Eta) y ξ (Xi).

Por lo general, el eje vertical del elipsoide local será paralelo al eje de rotación terrestre. En un datum geocéntrico las longitudes geodésica y geocéntrica coinciden, pero las latitudes no (latitud se mide desde el plano ecuatorial en la dirección de un vector normal al elipsoide, no de la línea desde el centro de masas hasta el punto). A la vez, dos datums pueden tener una superficie de referencia muy similar, pero diferir en el sistema de referencia en el que se posiciona la misma. Este es el caso de GRS80 (Geodetic Reference System, 1980) y WGS84 (World Geodetic System, 1984), cuyos elipsoides tienen parámetros geométricos prácticamente idénticos, pero GRS80 se orienta respecto a los ejes CIO y BIH, mientras que WGS84 se orienta respecto a los ejes IERS. En la actualidad, debido a la evolución de los sistemas de referencia en el tiempo, GRS80 y WGS84 se

pueden considerar idénticos. GRS80 es el datum que emplea el Marco de Referencia Geodésico Nacional POSGAR07 (Posiciones Geodésicas Argentinas 2007). WGS84 es el datum de uso común a escala global (ej. GPS – Global Positioning System) y es el utilizado para el modelo de elevación SRTM.

Red geodésica:

Es una figura formada por una constelación de puntos distribuidos con cierta simetría por el territorio, enlazados entre sí y que se proyectan sobre un elipsoide de revolución empleado como superficie de referencia. La finalidad es localizar esos puntos en el terreno con un alto grado de precisión y de manera fiable, respecto de un sistema de referencia establecido de antemano. Una mayor rigidez geométrica en la red permitirá un control de las posiciones más preciso.

Actualmente se busca que los puntos tengan cielo despejado y sean de fácil acceso. El hecho de que determinar coordenadas sea mucho más accesible y estas sean determinadas con mayor precisión, posibilita que las observaciones se realicen de forma periódica, para observar cambios debidos, ej. a la dinámica interna de la tierra u otros factores (astronómicos, de distribución de densidad atmosférica, etc.) Según la separación de los puntos, las redes serán de orden 0, 1ero, 2do, etc. Según la precisión con que están determinadas sus coordenadas serán de categoría A, B, C, D, etc.

Red de nivelación:

Las redes de nivelación encadenan líneas de nivelación geométrica convencionales, generando una red de puntos de elevaciones conocidas. Las alturas involucradas pueden ser desniveles geométricos o alturas ortométricas. Los niveles de referencia suelen ser mareógrafos, a partir de los cuales se desarrolla la red de nivelación.

MISIÓN SRTM

SRTM es el acrónimo de “Shuttle Radar Topography Mission” (el nombre alude a la naturaleza de la misión – una misión topográfica – y al sistema de radar transportado en el transbordador Endeavour, con que se realizaron las mediciones). La finalidad de la misión fue mapear de forma global la superficie terrestre. Las agencias espaciales involucradas fueron las de Estados Unidos, Alemania e Italia. Fue llevada a cabo durante 10 días de febrero, en el año 2000. El costo total de la misión fue 142.000.000 USD.

La información relacionada a la técnica de interferométrica empleada en la misión se extrajo de Moreira et al. (2013) y Panozzo Zénere (2013). Los aspectos referidos particularmente a la misión SRTM se resumieron de Farr et al. (2007).

Técnica:

El radar de apertura sintética es una técnica de radar en que se simula una antena sintética de mayor longitud a partir de una antena real de menor longitud. La señal emitida son pulsos electromagnéticos modulados en frecuencia en el rango de las microondas (Fig. 3). Este rango de radiación electromagnética ($\lambda = 10$ a 1200 mm. aproximadamente) no se ve afectado por las condiciones atmosféricas. Al ser un sensor activo emite su propia radiación y puede operar 24 hs.

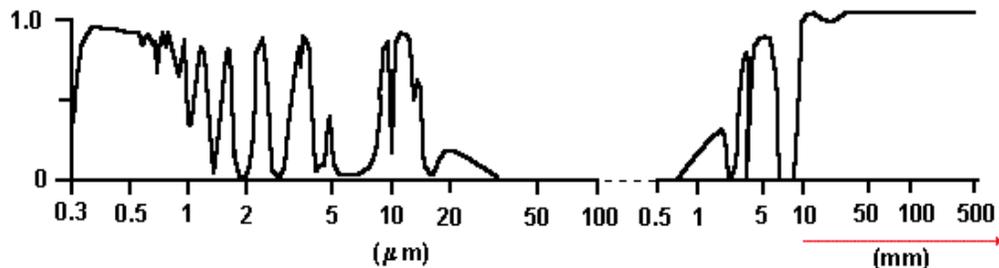


Fig. 2: En ordenadas transmitancia atmosférica. En abscisas longitud de onda (λ). Línea marca el comienzo del rango de las microondas. Fuente: NASA.

La señal se emite perpendicularmente a la línea de vuelo y viaja a la velocidad de la luz. Los pulsos son emitidos en forma secuencial, dejando margen para la recepción de las señales que vuelven al sensor luego de ser dispersadas por el terreno, fenómeno al que denomina retro-dispersión (backscattering). Solo una parte de la radiación emitida llega de vuelta al receptor. La amplitud y la fase de las señales devueltas dependen de las condiciones físicas (ej. geometría, rugosidad) y eléctricas (ej. permitividad) de la superficie.

La potencia recibida por la antena receptora puede ser modelada por la ecuación de radar, que liga la potencia recibida con la potencia transmitida en presencia de un blanco caracterizado por la denominada sección eficaz al radar.

$$P_r = P_e \frac{G^2 \lambda^2 \sigma_0}{(4\pi)^3 R^4 a}$$

Donde "Pr" es la potencia recibida, "Pe" es la potencia emitida, "G" es la ganancia, " λ " es la longitud de onda, "R" es la distancia entre la antena y el blanco, "a" es la pérdida debido a la absorción del medio de propagación y " σ^0 " es una función compleja que depende de las dimensiones del área y constantes dieléctricas del material retro-dispersor.

Las condiciones geométricas para la emisión de los pulsos (Fig. 4) es que sean emitidos de forma perpendicular a la dirección de vuelo y con un ángulo de observación distinto a cero a partir del nadir (para evitar ambigüedades provocadas por arriba simultaneo de la señal de distintos blancos).

La dirección en el sentido de dirección de vuelo de la plataforma se denomina acimut. La dirección perpendicular al acimut se denomina rango. El rango en la dirección del objetivo se denomina rango oblicuo (slant range). La proyección de esta línea sobre la superficie se denomina rango en terreno (ground range). El rango oblicuo que determina la distancia mínima hacia el blanco se denomina rango cercano (closest approach).

La línea entre el centro de masas y la plataforma en un punto cualquiera de su órbita se denomina nadir. La elevación de la plataforma se mide sobre la línea perpendicular a la superficie de referencia.

El ángulo de incidencia de la señal es el ángulo entre la perpendicular a la superficie que pasa por el punto objetivo y la dirección del rango oblicuo. El ángulo de observación es el ángulo entre el nadir y la dirección del rango oblicuo. Estos dos ángulos son diferentes.

El ancho del tramo iluminado se determina sobre la línea del rango en terreno y está dado por la diferencia entre los rangos máximo y mínimo sobre la marca del haz en terreno. Dicha marca se denomina huella (footprint).

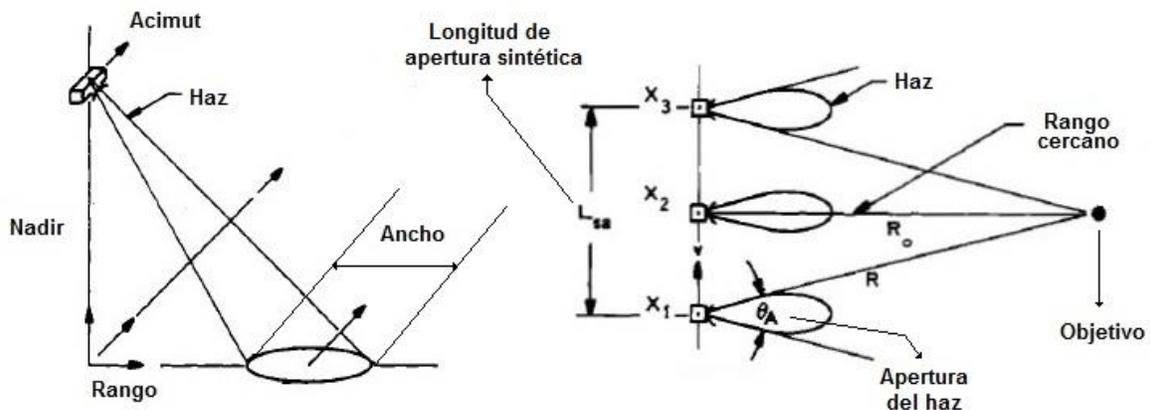


Fig. 3: Geometría de un sistema de radar de apertura sintética. Izq.: Vista isométrica. Der.: Vista en planta. Fuente: Tomiyasu (1978).

La resolución espacial de un radar es la distancia mínima de separación a la que se deben encontrar dos puntos para ser distinguidos como tales. Si el tiempo de llegada de la señal de retorno del objeto más lejano es mayor que el del tiempo de llegada de la señal de retorno del

objeto más cercano, entonces pueden ser distinguidos por el sistema. Cuando menor es el valor numérico de la resolución, la resolución del radar es mayor.

- Resolución acimutal: En un radar común es el producto de la apertura de la antena por la distancia en rango, siendo la apertura igual a la relación entre la longitud de onda emitida y el rango cercano. En los radares de apertura sintética la resolución no depende del rango, ni de la longitud de onda y es igual a la mitad de la longitud acimutal de la antena (una antena más corta da una mejor resolución, a diferencia de los radares convencionales en que una antena más larga da mayor resolución).
- Resolución en rango oblicuo: Es igual a la mitad del producto entre la velocidad de la luz y la duración del pulso. En un radar convencional a menor duración del pulso, mayor resolución. En los radares de apertura sintética a mayor duración del pulso, mayor resolución. Esto se debe a que en los radares convencionales la duración del pulso es inversamente proporcional al ancho de banda y en los radares sintéticos es directamente proporcional (se logra mayor ancho de banda en pulsos más largos). El ancho de banda de la señal está determinado por el rango de frecuencias que abarca el pulso y al estar linealmente modulado en frecuencia el valor es directamente proporcional al tiempo de duración del pulso. La resolución en rango oblicuo también es igual a la relación entre la velocidad de la luz y el doble del ancho de banda.

A modo de ejemplo, una antena en banda X ($\lambda = 3,25$ cm aprox.), de 3 metros en acimut, en sistema de radar convencional tendrá una resolución acimutal de 50 m., mientras que la misma antena operando en un sistema de apertura sintética tendrá una resolución de 1,5 m. (más de 30 veces mayor).

La longitud de apertura sintética de la antena es la distancia en la cual la antena recibe señales devueltas desde un punto. Es igual a la relación entre el producto de la longitud de onda y el rango cercano y la longitud acimutal de la antena. Existe una relación de proporcionalidad inversa entre la longitud de la apertura y la longitud de la antena. A mayor longitud de apertura, mayor resolución acimutal.

El pulso se transmite durante un tiempo " τ ". La amplitud de la señal es constante a través del tiempo. La frecuencia instantánea de la señal varía linealmente según el producto entre una constante y el tiempo. El ancho de banda del pulso es igual a el producto entre la misma constante y el tiempo de duración del pulso. La frecuencia central se da en $\tau/2$. Un intervalo de tiempo para recibir y registrar la señal devuelta al sensor sigue al tiempo de duración del pulso. Este proceso de emisión y espera/registro de señales se repite cada una cantidad constante de tiempo, denominada tiempo inter-pulso (PRI), que es la recíproca de la frecuencia de repetición del pulso (PRF).

Los pulsos devueltos al sensor se registran de forma coherente, preservando la fase de la señal recibida respecto de la emitida y, por lo tanto, la información de la distancia recorrida por el pulso hasta el objetivo y de vuelta al sensor. Un efecto importante sobre el pulso recibido es que regresa a la antena con un cambio de frecuencia debida al efecto Doppler, denominada frecuencia Doppler. Esta es aproximadamente lineal respecto al tiempo, tiene una frecuencia central, tasa de cambio y un ancho de banda. Pueden ser calculados de la velocidad entre el sensor y el blanco, la

distancia entre ambos y la longitud de onda. La frecuencia Doppler es positiva cuando el radar se aproxima al blanco y negativa cuando se aleja del mismo.

La señal recibida es muestreada y dispuesta en una línea de una matriz bidimensional (las dimensiones son rango y acimut). Cada línea de muestreo representa una serie de mediciones en rango. Una serie de líneas de muestreo se disponen en la dirección del acimut, a medida que nuevos pulsos son recibidos y muestreados. Cada muestra representa un valor de amplitud y de fase. La señal recibida y muestreada corresponde a un pulso individual. Se adquiere una línea de rango cada vez que el radar viaja una distancia igual al producto entre la velocidad de la plataforma y el tiempo inter-pulso (o tiempo entre la transmisión un pulso y del siguiente). La velocidad de movimiento de la plataforma es del orden de algunos kilómetros por segundo (ver descripción orbital). La separación de las celdas en las filas está dada por la frecuencia de muestreo de la señal devuelta. La separación entre líneas de muestreo está determinada por el tiempo inter-pulso, el cual se encuentra en el orden de los milisegundos (ms), mientras que el tiempo de muestreo está en el orden de los microsegundos (μ s). Este último se calcula como el recíproco de la frecuencia de muestreo.

Los datos adquiridos deben ser procesados para formar una imagen. El procesamiento se denomina focalización o compresión y consiste, de forma simplificada, en un filtro de compresión sobre cada dimensión de la matriz (acimut y rango) utilizando funciones de referencia. Primero se aplica el filtro sobre cada línea, correlacionando los datos sin procesar con el complejo conjugado del pulso emitido y luego sobre todas las líneas corregidas en dirección acimutal correlacionando los datos procesados en rango con el complejo conjugado del “pulso” Doppler.

La distancia entre el radar y un blanco puntual varía durante el tiempo de apertura sintética. Esta variación puede ser descrita por el teorema de Pitágoras.

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + (v \cdot t)^2}$$

Donde R_0 es el rango cercano, v la velocidad del sensor respecto del objetivo y t una variable de tiempo centrada en 0, con límites entre $-T_i/2$ y $+T_i/2$ (T_i es el tiempo de apertura sintética). El efecto de la variación del rango en el tiempo de apertura sintética es que las señales devueltas por el mismo objetivo tendrán distintas posiciones en la matriz. Luego de la compresión en rango este problema está presente, se denomina migración de celdas en rango. El rango de un mismo objetivo describiría una función parabólica según su posición en la matriz. Esta curva debe ser corregida para que a lo largo del tiempo de apertura sintética la señal proveniente de un objetivo se mantenga sobre una misma columna de rango. La corrección se realiza en el proceso de focalización.

La imagen obtenida luego del proceso de focalización se denomina single look complex (SLC), imagen con valores complejos, que permiten guardar información referente a la amplitud y la fase de la señal recibida.

Un fenómeno común que debe ser corregido en la imagen focalizada se denomina “speckle”. La causa del mismo es la presencia de elementos dispersores con una distribución aleatoria en una misma celda de la imagen. Debido a la distribución aleatoria de los dispersores, se genera ruido en

los píxeles afectados. El efecto es más pronunciado en áreas donde los elementos dispersores tienen dimensiones comparables a la longitud de onda de la señal. La técnica para reducir este efecto se denomina multi-look, la cual degrada la resolución de la imagen, pero mejora su interpretación. El efecto speckle tiende a debilitarse a medida que aumenta la resolución del sistema.

Los radares de apertura sintética permiten realizar mediciones sobre la topografía del terreno, a través de la comparación de las fases medidas en dos imágenes con un ligero desplazamiento entre las mismas, hayan sido adquiridas simultáneamente o en distintos momentos. Esta técnica se denomina interferometría y es la que se empleó en la misión SRTM para obtener el modelo de elevación que se utiliza a lo largo de este trabajo; en particular, en el modo de adquisición simultánea a través de dos antenas receptoras unidas por una línea de base.

Cada píxel en las imágenes formadas por las dos antenas receptoras contiene un valor de fase que encierra a su vez información sobre el camino recorrido por el haz portador de la fase sobre la dirección del rango oblicuo hasta el objetivo y de vuelta al sensor. La diferencia entre las fases medidas en las dos imágenes puede emplearse como un parámetro para medir la elevación, establecida cierta geometría entre el sistema de radar, la dirección de vuelo y el objetivo.

Para distancias objetivo-sensor muy largas y líneas de base entre imágenes muy cortas en relación, la diferencia en rango “ Δr ” desde el objetivo hacia las dos antenas receptoras es proporcional a la diferencia de altura “ Δh ” entre el objetivo y una superficie de referencia. Al ser el sistema de radar coherente (ver más arriba en descripción del pulso), la diferencia en rango “ Δr ” corresponde a la diferencia de fase medida “ $\Delta\phi$ ” según:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta r$$

Donde “ λ ” es la longitud de onda de la onda portadora de la fase.

Para obtener este valor las dos imágenes empleadas deben estar alineadas de tal forma que, al calcular la diferencia de fase, los píxeles involucrados respondan al mismo rasgo sobre el terreno. Este proceso se denomina co-registro (co-registration). Como la información contenida en la imagen con la que se está operando es de naturaleza compleja, la operación no es una simple diferencia, sino una multiplicación de una imagen por el conjugado complejo de la segunda. La imagen así formada se denomina interferograma.

El brillo en el interferograma representa la intensidad de la señal recibida por la antena, mientras que el color representa la fase. El interferograma presenta un patrón de franjas de colores cíclicas, en la dirección aproximada de las curvas de nivel del terreno. Un ciclo de fase completo es una revolución a la rueda de color, de cian a magenta, a amarillo y nuevamente a cian (convencionalmente). Normalmente se puede apreciar una disminución o aumento sistemático en la fase con el incremento del rango y el ángulo de observación, que ocurre incluso en zonas planas. Esta contribución de la “esfericidad” terrestre se remueve substrayendo la fase esperada de una superficie de referencia (i.e. elipsoide), de manera que la fase remanente es debida exclusivamente a la topografía. Los patrones de las franjas de un interferograma así corregido guardan una relación más estrecha con las curvas de nivel del terreno. La exactitud de los valores

de fase obtenidos está limitada por el grado de correlación entre las dos imágenes empleadas. Esta depende de muchos factores, entre ellos el ruido en el sensor (relación señal-ruido) y la decorrelación temporal (cambios temporales en los dispersores, que se reduce al máximo en técnica single pass). Para evitar propagación de errores locales en el interferograma debidos a efectos de ruido suelen corregirse los mismos antes de la extracción del interferograma, promediando varias observaciones (multilooking). A medida que más observaciones se emplean en el promedio, más se disminuye el error. El costo de esta corrección es la pérdida de resolución espacial.

Los valores de fase obtenidos deben ser convertidos a alturas por trigonometría, utilizando la geometría del interferómetro y los valores de diferencia de fase en cada punto. Esto requiere conocimiento suficientemente exacto de la longitud y orientación de la línea de base entre las antenas.

Un último paso para la conformación de un modelo digital de elevación involucra una transformación de la geometría del sistema de radar (rango y acimut desde el sensor) a un sistema de referencia geodésico que se haya elegido.

Repeat/Single pass:

La misión SRTM tuvo como precursoras otras misiones de naturaleza similar (OSTA-1, Challenger 41-G, Space Radar Laboratory) que incluyeron versiones previas de los instrumentos de medición utilizados (SIR-A, SIR-B, versiones anteriores de SIR-C/SAR-X). La principal diferencia es la técnica interferométrica empleada, en la que las posiciones del sensor en orbitas repetidas (repeat-pass) formaban la línea de base interferométrica. En estas misiones se demostró que es posible el mapeo topográfico regional a través de la técnica de orbitas repetidas, pero hay serias limitaciones en la calidad de los datos, entre ellas los cambios atmosféricos temporales, pérdida de correlación entre las señales recibidas entre una pasada y la otra por reordenamiento de las superficies dispersoras en el tiempo, incertidumbres en la estimación de la geometría interferométrica, etc. A raíz de las conclusiones extraídas de misiones anteriores, la misión SRTM se diseñó para operar en una misma órbita (single-pass). El interferómetro consistió en una antena emisora/receptora ubicada en el compartimento de carga de la nave y una antena receptora secundaria ubicada al final de un mástil retráctil de 60 m. El diseño se repite para la banda C y la banda X, lo cual deja un total de dos antenas emisoras y cuatro receptoras.

Ancho del tramo iluminado:

En la misión Space Radar Laboratory se probó satisfactoriamente el sistema de escaneo electrónico que permitió aumentar el ancho del tramo iluminado a 225 km (Fig. 5). La técnica permitió tomar simultáneamente un par de haces en distinto ángulo de observación, polarizados ortogonalmente uno respecto al otro constituyendo un sub-tramo y, a la vez, utilizar la mitad del tiempo de apertura sintética para tomar otro sub-tramo en la misma dirección perpendicular a la dirección de vuelo y con las mismas características, pero desplazado de manera que se complete el tramo total de 225 km., contando la superposición nominal de 7 km. entre los haces. El ancho del tramo, de no emplear este método, hubiese sido de aprox. 60 km. El costo de reducir el tiempo de apertura sintética es una disminución de la resolución acimutal. A modo de ejemplo, en una antena de 12 m., emitiendo en banda C ($\lambda = 5,6$ cm) y moviéndose a 7,5 km/s a una distancia de

300 km., el tiempo de iluminación de un objetivo es de 0,2 segundos aprox. Si se utilizan 0,05 segundos para formar una apertura sintética, la resolución que se puede conseguir disminuye en un factor de 4. En la misión SRTM se requería al menos un 50% de tiempo de apertura sintética para conseguir niveles de ruido adecuados, permitiendo como máximo dos haces, que cubrirían solo 120 km. Como SIR-C tenía además la capacidad de transmitir simultáneamente polarizaciones verticales y horizontales, dirigiendo electrónicamente unas y otras de forma independiente (en distinto ángulo de observación), cada uno de estos haces cubriría un sub-tramo de aproximadamente 60 km. en 0,1 segundos (considerando tiempo de apertura sintética igual a 0,2 segundos), de manera que el ancho del tramo total conseguido sería de 225 km.

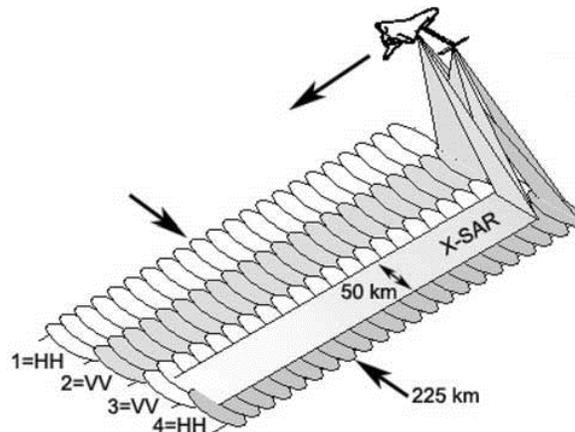


Fig. 4: Geometría del tramo iluminado. Nótese las polarizaciones ortogonales en haces 2 y 4 (en sub-tramo gris). La nomenclatura es "V" para vertical, "H" para horizontal. La primera letra indica emisión y la segunda recepción. Fuente: Farr et al. (2000)

El total de datos sin procesar sumó 12,3 Tb (terabytes, de los cuales 8,6 fueron del radar "C" y 3,7 del radar "X"). El 99,6 % de la superficie continental seleccionada (entre 60°N y 56°S) fue mapeada en banda "C" ($\lambda = 5,6$ cm aprox.) y un 40% en banda "X" ($\lambda = 3,1$ cm aprox.) El tiempo total de la fase de mapeo de la misión fueron 222,4 hs. El radar "C" operó 99,2 hs y el radar "X" 90,6 hs.

Las tomas de datos (765 en total, 674 sobre tierra, 30 de calibración sobre el océano, 61 dedicadas a pruebas del equipamiento a bordo) se realizaban de costa a costa en franjas 225 km. a través de la línea orbital de la nave. El diseño de la misión estipuló que los datos se empiecen a tomar en el océano (superficie dispersora uniforme) y se terminen de tomar en el océano para controlar la deriva a largo plazo de la línea de base (ésta resultó ser muy baja).

Órbita:

La altura nominal escogida para la nave fue de 233 km. y la inclinación orbital de 57° (Fig. 6). Esto se refiere al ángulo que forma el plano orbital con el plano ecuatorial. Una inclinación de 0° significa que el plano orbital coincide con el plano ecuatorial y el objeto orbita en el sentido de rotación del planeta; 90° que el plano orbital coincide con el eje de rotación terrestre y 180° que el

plano orbital coincide con el plano ecuatorial pero el sentido de orbita es contrario al sentido de rotación terrestre.

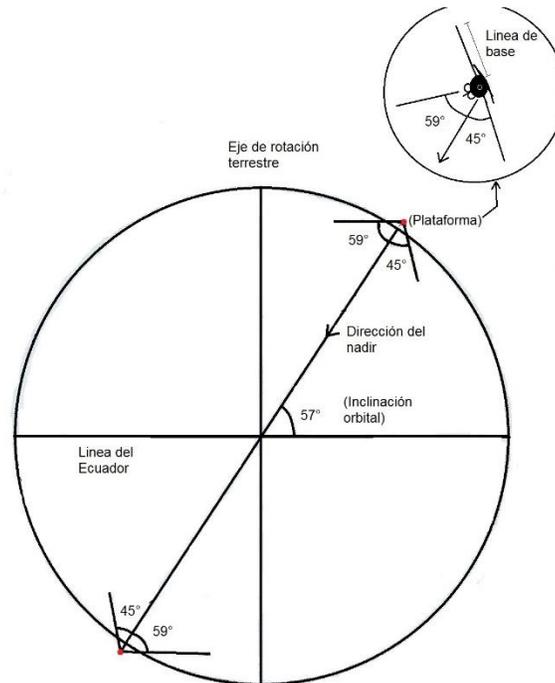


Fig. 5: Esquema de posicionamiento orbital de la nave.

La nave repetiría su trayectoria en 159 orbitas (10 días aproximadamente) En ese tiempo, mapeó la superficie desde la culminación sur de Groenlandia hasta Tierra del Fuego. Durante la fase de mapeo la nave volaba con la parte trasera en la dirección del vector velocidad. Simulaciones anteriores a la misión previeron una deriva orbital debida a rozamiento atmosférico de unos 1,5 km/día en el ecuador. El efecto de perturbaciones del rozamiento en el mástil era difícil de cuantificar; aun así, de no ser compensado, el decaimiento orbital causaría pérdida de superposición en el tramo iluminado en 24 hs. (el tramo estaba compuesto por 4 haces, la superposición nominal era de 7 km. entre cada par). Debido a un fallo en el sistema de propulsión secundaria, el mantenimiento orbital requirió una maniobra adicional por día. Además, se debía recurrir a maniobras especiales para minimizar la tensión sobre la antena ocasionada por el movimiento de la nave. El consumo de material propulsor era en consecuencia mucho mayor. A pesar de esto, la misión se pudo completar sin impactos en los resultados finales.

Geometría del interferómetro:

Para medir alturas sobre un nivel de referencia se requiere conocer la diferencia de rango entre dos imágenes de radar, medida por el tiempo de retardo de la señal devuelta por el terreno en la dirección del rango hacia cada sensor. La fase de la señal devuelta lleva consigo información de la distancia recorrida desde la antena hasta la superficie y de vuelta hacia la antena. A la fase recibida se le suman efectos de fase añadidos por fenómenos de reflexión sobre la propia superficie dispersora, que pueden generar errores y deben ser corregidos a menudo con cierta

pérdida de resolución. El efecto es particularmente acentuado cuando los dispersores tienen distribución aleatoria y son del tamaño de la longitud de onda de la señal. En imágenes de dos antenas obtenidas simultáneamente y desde puntos suficientemente cercanos, la diferencia de fase en cada punto en las dos imágenes será un parámetro de la diferencia de distancia real en rango oblicuo entre las mediciones del mismo punto, desde el sensor hasta el punto. Asumiendo que la posición de las dos antenas (en línea de base interferométrica) se conoce, las dimensiones del triángulo interferométrico pueden determinarse, como así también la altura del objetivo (Fig. 7).

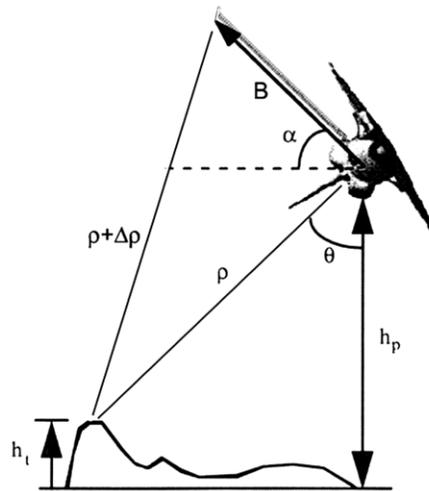


Fig. 6: Geometría del interferómetro. B: Línea de base. $\rho+\Delta\rho$: Rango objetivo-antena secundaria. ρ : Rango de punto a antena principal. α : Ángulo de línea de base. θ : Ángulo de visión. h_t : Elevación del punto. h_p : Elevación de plataforma.

La diferencia de fase entre las mediciones de las dos antenas es un valor angular. Este se vuelve ambiguo luego de un ciclo completo de 2π radianes (360°), lo que hace necesario encontrar la diferencia de fase real. El método para conseguir el valor angular real de la diferencia de fase se denomina *phase unwrapping* (desenvolvimiento de fase). Existen varios algoritmos para este proceso, de los cuales el más difundido y empleado se debe a Goldstein et al. (1988).

La geometría del interferómetro está conformada por la línea de base entre las dos antenas receptoras, las distancias en rango y la altura de la plataforma sobre el nivel de referencia. Una expresión simplificada para la altura de un objetivo sería:

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

Donde " h_p " es la altura de la plataforma (en relación a la superficie de referencia), " ρ " es la distancia desde la antena receptora hasta el punto observado, " ϕ " la fase medida, " α " el ángulo de orientación de la línea de base (ángulo en que la línea de base está girada alrededor del eje longitudinal de la nave); " λ " la longitud de onda y " B " la longitud de la línea de base. A través de

las antenas receptoras principal (en plataforma de carga) y secundaria (en punta del mástil) se miden los valores angulares de fase “ ϕ ”, mientras un módulo de metrología denominado Attitude and Orbit Determination Avionics (AODA) mide los parámetros restantes, “ α ”, “ B ” y “ hP ”.

Error:

Los datos fueron muestreados en una grilla de 30 m. aprox. (un segundo de arco), con un error absoluto medio de altura esperado menor a 16 m. para todo el mundo, a nivel de confianza de 90%. Estas especificaciones eran comparables a las del set de datos de elevaciones de (NED) producido por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) a través de restitución fotogramétrica de fotografías aéreas. El grado de error varía de acuerdo a la superficie en que se dispersa la señal del radar (mantos de arena, agua calma, vegetación densa, darán mediciones más erróneas, debido a baja intensidad en la señal devuelta al sensor o baja penetración de la onda hacia la superficie) y de acuerdo a la topografía (la distorsión geométrica es menor en relieve de poca expresión), de manera que localmente puede aumentar o disminuir. El grado de confianza de 90% asegura que, si se reprodujese la muestra, sería posible que un 90% de los valores tengan un error no superior a los 16 m.

Fuentes de error:

Los componentes en la ecuación de radar (apertura del radar, poder irradiado, ruido en el receptor, distancia al blanco, características del dispersor) son los parámetros que establecen el ruido de fase estadístico del interferómetro. Dado este ruido de fase, la exactitud en la percepción de la elevación del sistema puede ser controlado por el diseño del interferómetro. La sensibilidad de la altura respecto al ruido de fase está dada por la derivada de la ecuación de más arriba.

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

En lo respectivo a la longitud de onda “ λ ”, la selección de la antena está relacionada a su masa, su volumen (debido a capacidad de carga y altura de vuelo de la nave) y la longitud del haz generado. Los ángulos de observación “ θ ” se eligieron entre 30° y 60° para minimizar los efectos de inversión de relieve. Este parámetro, junto a la altitud de la plataforma (que depende a su vez del peso transportado), determinan la extensión en rango del tramo iluminado.

Un ángulo de orientación de la línea de base “ α ” de 45° reduce la sensibilidad de las observaciones a errores en la medición de la longitud de la línea de base. Para conseguir el grado de error esperado, se debía conocer “ α ” con una precisión de 3×10^{-5} radianes (seis segundos de arco aprox.)

A medida que la longitud de la línea de base aumenta, la sensibilidad de la altura respecto al ruido de fase se reduce. El ruido de fase depende de las propiedades dispersoras de la superficie (superficies poco retro-dispersoras generan relaciones señal/ruido más bajas). Por este motivo era necesario caracterizar el peor caso en retro-dispersión y elegir una longitud de línea de base acorde. Fijados el resto de los parámetros, una longitud de línea de base de 60 m. introduciría un ruido estadístico de 8 m. en el peor caso.

Otra fuente de error en la medición de fase podía surgir de la distinta naturaleza de los canales receptores, debido a que estos no eran idénticos. A la vez, la distancia recorrida por la señal hasta el sistema de entrada tampoco era la misma. Esto se solucionó con un tono de calibración que fue distribuido a las antenas a través de un cable de fibra óptica. Luego de la compensación (utilizando lecturas del tono inyectado en el camino de la señal), el error aportado era menor a 1 m. Las diferencias de fase debidas a los canales receptores oscilaban en varios grados y hubiesen sido una fuente de error significativa de no haber sido compensadas.

Para mantener la altitud nominal (233 km.) la nave debía utilizar propulsión. Esto hacía resonar y oscilar al mástil, resultando en un desplazamiento máximo de 10 cm. para la punta del mismo y un cambio de algunas décimas de grado en “ α ” (Fig. 8). El módulo de metrología medía constantemente la longitud y orientación de la línea de base, de las antenas y posición de la nave.

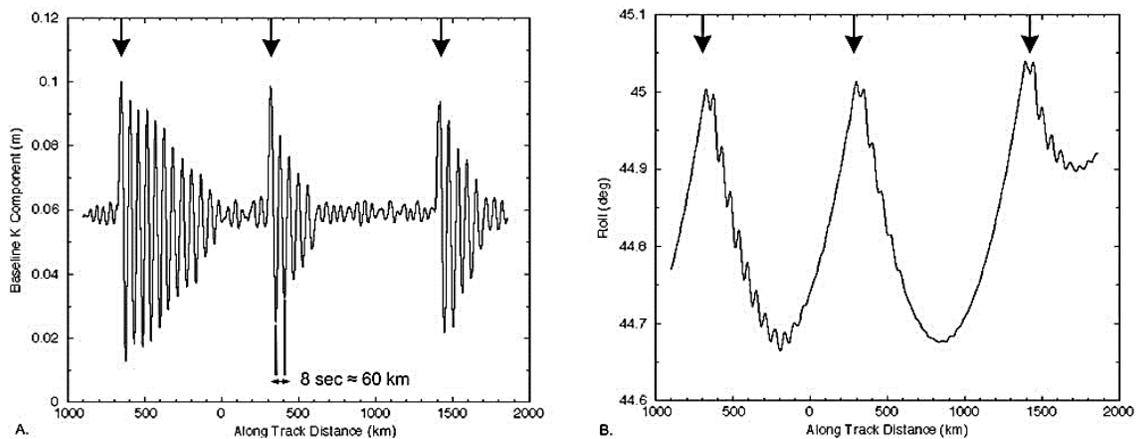


Fig. 7: Izq. Cambio en la longitud de línea de base a lo largo de la órbita. Der. Cambio en el ángulo “ α ” a lo largo de la órbita (oscilación de $0,3^\circ$ aprox.).

El mástil debía tener una orientación de 45° relativo al vector nadir en la fase de mapeo, mientras que la orientación de la nave debía ser 59° respecto a la posición en que la plataforma de carga apuntase hacia el nadir. La orientación de la nave y el mástil generaban un torque gravitacional cuya compensación fue anticipada con un sistema individual de propulsión en el mástil. Este sistema reduciría la frecuencia de disparo de los propulsores de la nave, conservando material propulsor, pero no funcionó debido al fallo de un componente. En consecuencia, se tuvieron que disparar más propulsiones en el propulsor principal, lo cual generó respuestas dinámicas en el mástil y mayor uso de material propulsor. Esto, sumado a la descarga gravitacional, desplazamientos de la carga durante el lanzamiento y errores de alineación generó una desviación cuasi-estática en la orientación del mástil. La deformación térmica sobre el mismo y en la estructura de las antenas generaba errores de alineación con constantes de tiempo de algunos minutos. Los errores de alineación del mástil debían ser medidos por el módulo de metrología y compensados constantemente por los instrumentos y los sistemas de procesamiento de datos en tierra.

Módulo de metrología:

El módulo de metrología debía estimar la longitud de la línea de base con una exactitud de 2 mm., su orientación en 9" y su posición en 1 m.; a un nivel de confianza de 90%, a lo largo de toda la misión. El módulo permitía alinear las antenas y optimizar el control de orientación de la nave (los haces de las antenas tenían que tener la máxima superposición).

Los parámetros de orientación que más afectaban a la alineación de las antenas eran el alabeo (giro alrededor de eje vertical de la nave) y el cabeceo (giro alrededor del eje transversal de la nave), cuyos errores no podían ser superiores a 0,06° (había mayor tolerancia hacia errores de alineación por movimientos alrededor del eje longitudinal de la nave, debido a que el ancho del haz en ese sentido era más largo). El módulo de metrología permitía hacer correcciones de alineación entre antenas por efectos de alabeo y cabeceo de la nave a través de un mecanismo de ajuste en el mástil.

El equipo del módulo de metrología consistía básicamente en un sensor de inercia, constituido por un giroscopio y un acelerómetro, rastreadores de estrellas, telémetros láser, sensores ópticos y antenas GPS. Los blancos para los sensores ópticos y los telémetros eran LEDs y reflectores esquineros. Las mediciones del sensor de inercia fueron útiles para refinar estimaciones de orientación durante el procesamiento de los datos en tierra post-vuelo. El sensor de estrellas y el sensor óptico fueron útiles para determinar la alineación de las antenas, el mástil y su frecuencia de oscilación. Los telémetros láser sirvieron para medir la longitud del mástil. El GPS utilizó una red de estaciones fijas en tierra como apoyo para sus mediciones, en una técnica similar al GPS diferencial. El sistema se controlaba a través de dos laptops a bordo previo a la fase de mapeo; posteriormente operaba y registraba de forma automatizada. En tierra, se desplegaron reflectores esquineros para controlar la alineación de las antenas y medir los patrones de los haces iluminados en el terreno, con resultados satisfactorios.

Procesamiento de los datos:

Los datos orbitales y de telemetría se combinaron con los datos de radar de cada toma de datos en una grilla uniforme de 20 m. y en bandas latitudinales. Los datos se procesaban para obtener elevaciones en un sistema de coordenadas esférico local, haciendo la suposición de que la superficie de un elipsoide y de una esfera en dichas bandas latitudinales no tendrían grandes diferencias. Las bandas latitudinales estaban definidas por una latitud, una longitud y un rumbo, formando un punto a partir del cual se podía hacer la transformación de coordenadas esféricas al sistema de coordenadas elipsoidal en toda la banda latitudinal (Madsen and Zebker, 1998). Las alturas elipsoidales eran llevadas a alturas pseudo-ortométricas a través del modelo de geoide gravimétrico EGM96 (Lemoine, 1998).

La calidad de los datos de elevación se controlaba con bases de datos topográficas generadas durante el desarrollo de los instrumentos por la NGA (National Geospatial Agency) con el apoyo de otros organismos internacionales. El proceso continuaba hasta conformar un modelo de todo un continente con el conjunto de tomas de datos procesado; lo mismo era válido para cada continente. El modelo se ataba a las costas mediante alturas oceánicas promedio, corregidas por efectos de mareas, derivadas de la misión TOPEX/Poseidon, que mapeo la superficie de los océanos, desde 1992 hasta 2006, con una exactitud de 3,3 cm. a través de mediciones de radar en banda "C" y en banda "Ku". Los datos continentales eran validados, se generaban estadísticas de error y se segmentaban en celdas de 1°x1° (aprox. 108 km.) para distribución.

ESTIMACIÓN DEL ERROR LOCAL

A continuación, se exhibirá un ejemplo de estimación en el error local en la elevación proporcionada por el modelo SRTM, utilizando como valores de referencia mediciones del Instituto Geográfico Nacional.

A fin de obtener una idea general de la precisión y exactitud del modelo de elevación en la zona, se compararon sus elevaciones con otras pertenecientes a las redes geodésica y de nivelación del IGN, asumiendo que el geode no tiene grandes perturbaciones localmente, al ser una zona de relieve de baja expresión y planicies.

Las elevaciones en el modelo SRTM se obtienen a través de técnicas interferométricas, que involucran mediciones GPS (altura de la plataforma de vuelo en relación a una superficie de referencia). Las superficies de referencia son bandas latitudinales esféricas locales, que no tienen diferencias significativas con el elipsoide (Madsen and Zebker, 1998). Las alturas así obtenidas son llevadas a alturas pseudo-ortométricas a través de las ondulaciones geoidales en el modelo de geode gravimétrico EGM96 (Lemoine, 1998).

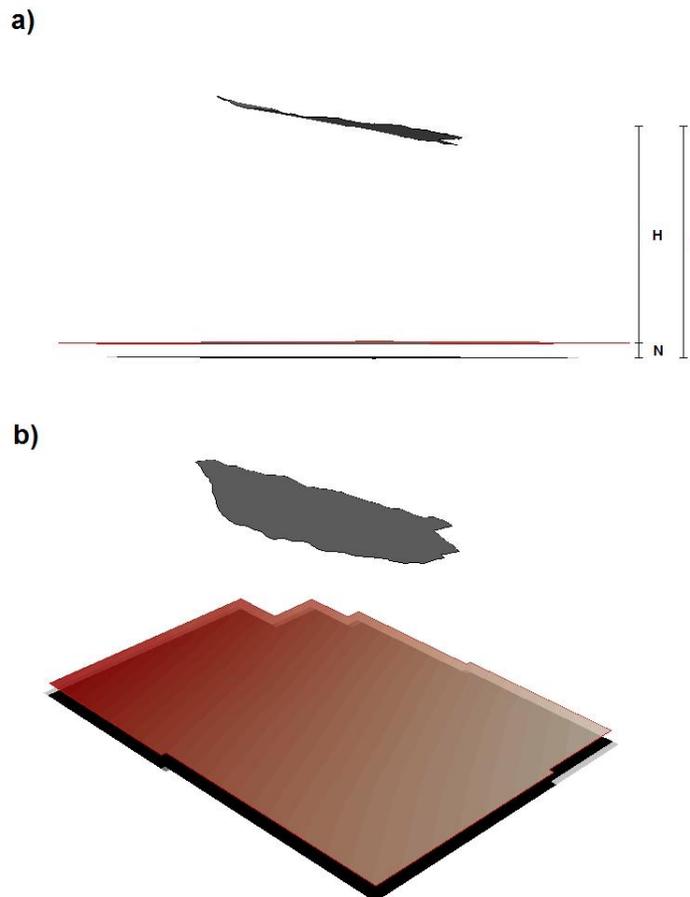


Fig. 8: Vistas de las superficies de referencia geoidal (rojo) y elipsoidal (negro) en el área de estudio (gris). Escala vertical exagerada en un factor de 15. a) Vista lateral. "h": alt. elipsoidal. "H": alt. ortométrica. "N": Ondulación del geode.

b) Vista inclinada respecto a plano horizontal.

La red geodésica IGN provee alturas elipsoidales (h), que en este trabajo fueron convertidas en alturas pseudo-ortométricas (H) utilizando las ondulaciones geoidales (N) en el modelo de geoide gravimétrico Ar-16, desarrollado por el IGN.

La red de nivelación IGN provee alturas ortométricas medidas in-situ con métodos convencionales, que fueron comparadas *directamente* con las alturas pseudo-ortométricas en el modelo de elevación SRTM.

En la zona, el modelo de geoide Ar-16 (Fig. 48) presenta un *valor central* en la ondulación geoidal de 28,65 m. y valores extremos con una desviación menor a $\pm 0,5$ m. respecto a este valor. Un desnivel de un metro en un área aprox. de 125 km^2 resulta en una inclinación extremadamente leve.

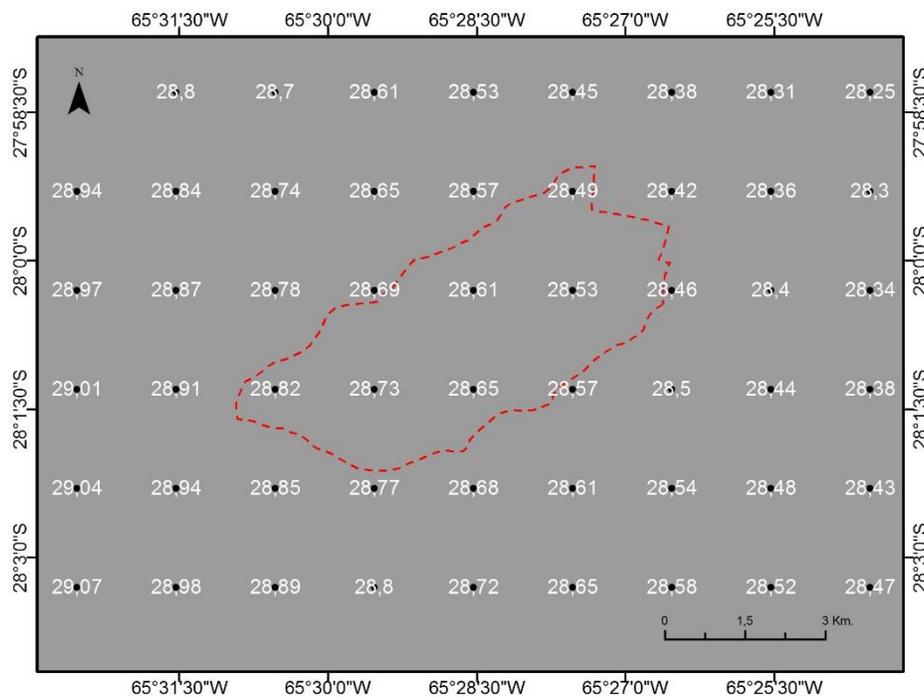


Fig. 9: Mapa de las ondulaciones geoidales (N) en el área de interés (en rojo) y alrededores. Los valores de N (en blanco) corresponden a las posiciones de la matriz de puntos negros.

La precisión de modelo de geoide Ar-16 fue evaluada por el IGN mediante 1900 puntos de control a lo largo del territorio nacional. La exactitud estimada del modelo es de 0,25 m.

A pesar de que la Fig. 47 no considera la curvatura de la superficie elipsoidal, se puede notar el paralelismo evidente entre las dos superficies de referencia; hecho acentuado por la exageración vertical en la escala. Esto implica que los trayectos correspondientes a la altura elipsoidal (h) y a la suma de la altura ortométrica (H) más la ondulación geoidal (N) son muy similares y las mediciones de alturas elipsoidales de alta precisión realizadas por el IGN pueden ser procesadas con las

ondulaciones geoidales en el modelo de geoida Ar-16 para compararse con el modelo de elevación SRTM. Lo mismo es válido para las elevaciones SRTM, que pueden ser comparadas directamente con las alturas ortométricas de la red de nivelación.

Comparación entre SRTM y red geodésica IGN:

Los puntos de control de la red geodésica IGN están uniformemente distribuidos en los alrededores de la zona de estudio (Fig. 49).

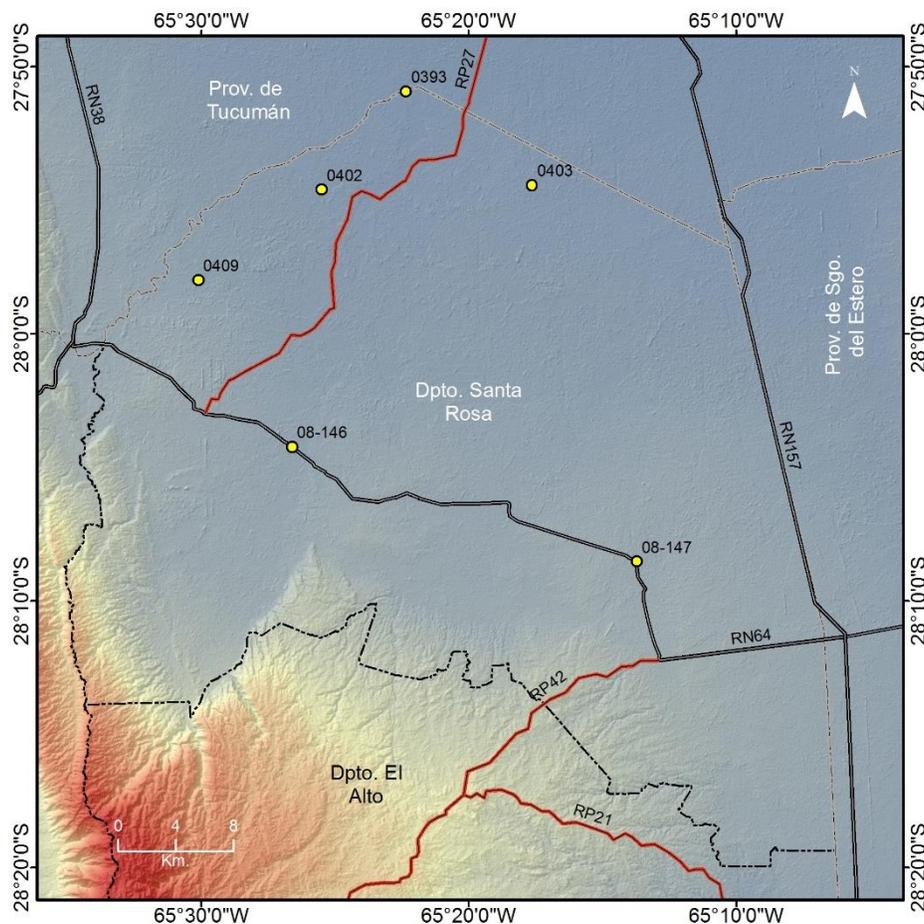


Fig. 10: Puntos de control de la red geodésica IGN (en amarillo) en Dpto. Santa Rosa.

La desviación entre las alturas pseudo-ortométricas (ΔH) fue calculada tomando el valor de los puntos IGN como verdadero. El promedio en la desviación de las alturas pseudo-ortométricas es de -4,1 m. El valor central es -4 m. Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 2,2$ m. respecto al mismo. Las desviaciones en las alturas son negativas en todos los casos (Tabla 7). El valor mínimo es de -5,2 m. y el valor máximo de -3,1 m. Los puntos de control están medidos en distintos momentos, por distintos organismos y con distintos grados de precisión (Tabla 8).

El promedio en la desviación de la ondulación geoidal (ΔN) de EGM96 respecto al Ar-16 es de -1,5 m. El valor central es de -1,6 m. Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 0,9$ m. El valor mínimo es -2,4 m. El valor máximo es de -0,7 m. (Tabla 7)

ID	IGN (Ar-16)			SRTM (EGM96)			Desviación IGN-DEM		
	H	h	N	H	h	N	ΔH	Δh	ΔN
08-147	506,9	535,2	28,251	511,0	540,0	28,95	-4,1	-4,8	-0,7
08-146	457,9	486,6	28,618	461,0	490,5	29,50	-3,1	-3,9	-0,9
393	349,1	376,9	27,797	353,0	383,2	30,17	-3,9	-6,3	-2,4
402	387,8	416,0	28,162	392,0	422,1	30,06	-4,2	-6,1	-1,9
403	384,6	412,4	27,734	389,0	418,8	29,77	-4,4	-6,4	-2,0
409	445,8	474,4	28,667	451,0	481,0	30,01	-5,2	-6,6	-1,3

Tabla 1 (cont.): Comparación puntos de control IGN en Dpto. Sta. Rosa y modelo SRTM.

ID	Precisión (IGN)			Información	
	h \pm	$\varphi\pm$	$\lambda\pm$	Red	Año
08-147	0,062 m.	0,052 m.	0,045 m.	PASMA	1997 - 2001
08-146					
393	0,052 m.	0,013 m.	0,014 m.	Catastro - Tucumán (RECAT 2000)	2000
402					
403					
409					

Tabla 2: Información de puntos de control IGN en Dpto. Sta. Rosa. "h" es altura elipsoidal, " φ " latitud y " λ " longitud geodésicas.

Comparación entre SRTM y Red de Nivelación IGN:

Se emplearon valores de alturas ortométricas pertenecientes al tramo N°189 de la red de nivelación nacional del IGN (Fig. 50).

El promedio en la desviación de las alturas (ΔH) es de -2,5 m. El valor central es de -2,2 m. Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 2,7$ m. respecto al mismo.

El valor mínimo es de -4,9 m. y el máximo de -0,8 m. Todos los valores son negativos, lo que indica que los valores en SRTM están sobre-estimados (Tabla 9). Esto concuerda con las desviaciones obtenidas en la comparación con los puntos de la red geodésica (Tabla 7).

ID	Red Altimétrica	SRTM	ΔH	Información	
	H	H		Red	Año
PF23N(189)	471,51	473,0	-1,5	Red de	1959

MODELO DE ELEVACION SRTM – Misión, técnicas de adquisición, método de evaluación.

PF24N(189)	482,82	486,0	-3,2	Nivelación Altimétrica
PF25N(189)	487,20	490,0	-2,8	
PF26N(189)	489,81	492,0	-2,2	
PF27N(189)	486,52	488,0	-1,5	
PF28N(189)	477,17	478,0	-0,8	
PF29N(189)	468,23	470,0	-1,8	
PF30N(189)	461,02	463,0	-2,0	
PF31N(189)	445,89	450,0	-4,1	
PF32N(189)	439,54	443,0	-3,5	
PF33N(189)	430,71	433,0	-2,3	
PF35N(189)	400,11	405,0	-4,9	

Tabla 3: Puntos de control sobre red de nivelación IGN.

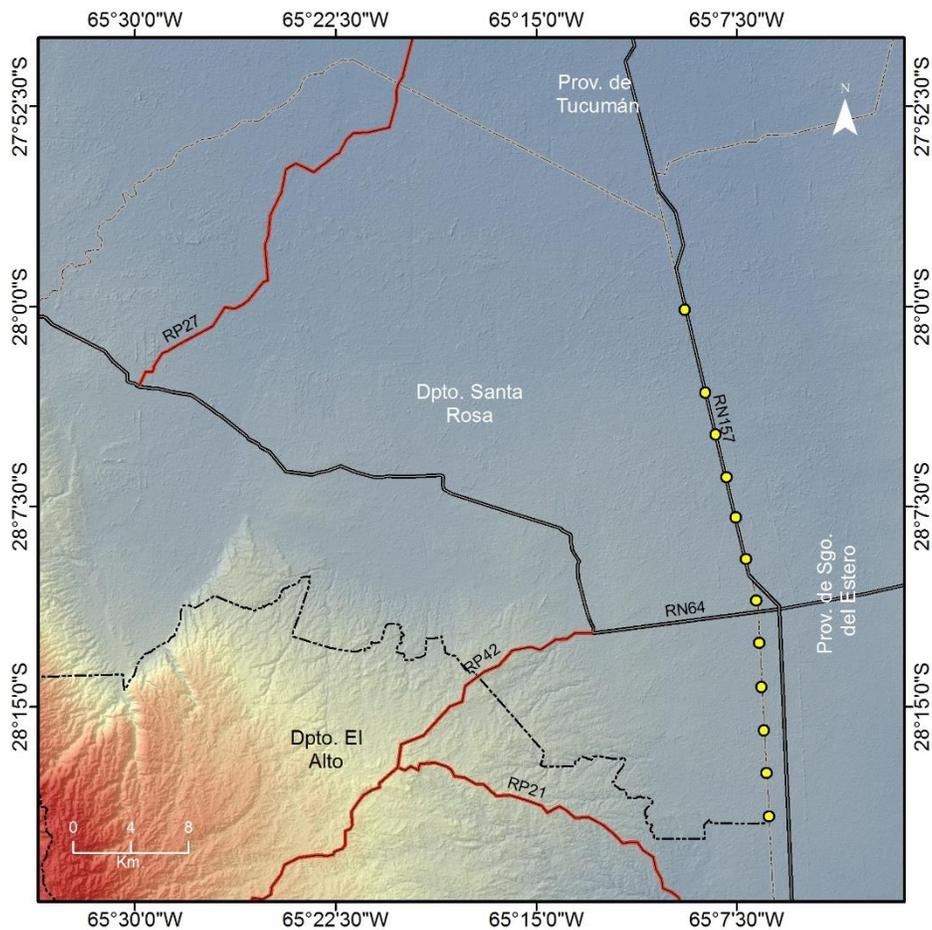


Fig. 11: Puntos de control de la red de nivelación IGN (en amarillo).

Contrastes en otras zonas de la provincia:

Otros valores de referencia, distribuidos uniformemente en los extremos de la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca, fueron empleados para tener un contraste en la precisión de las comparaciones efectuadas en otra localización geográfica (Fig. 12).

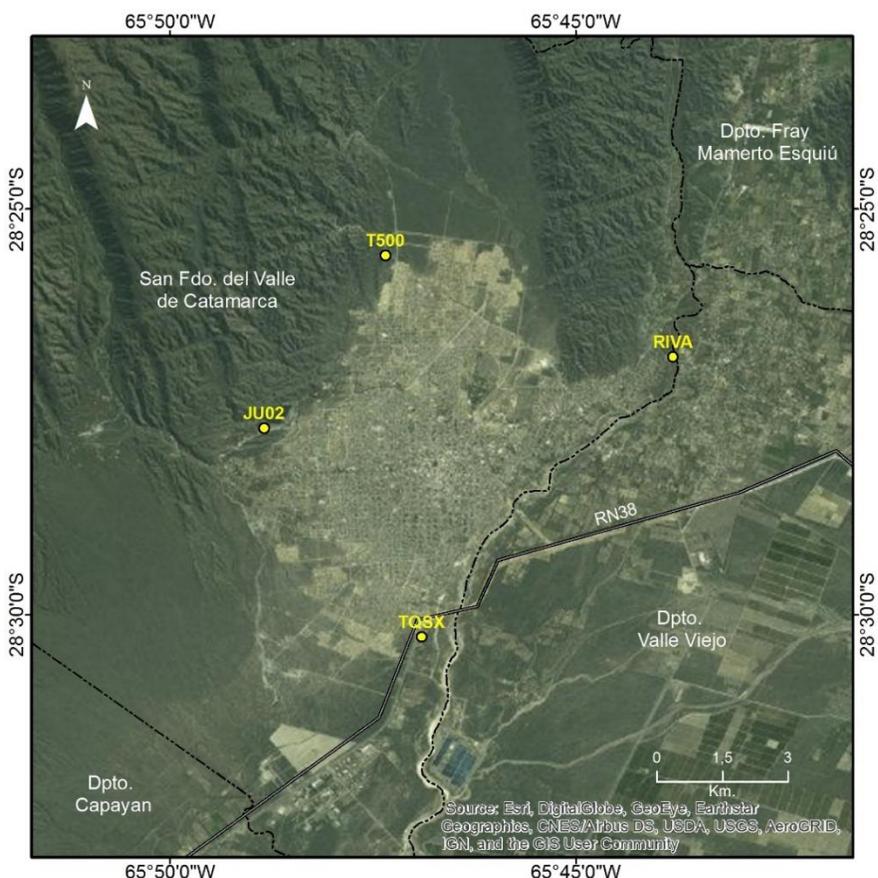


Fig. 12: Puntos de control de la red geodésica IGN (en amarillo) en áreas cercanas a la ciudad de S.F. del V. de Catamarca.

El promedio en la desviación de las alturas pseudo-ortométricas (ΔH) es de 1,4 m. El valor central es de 1 m. Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 7,8$ m. respecto al mismo. En esta serie de muestras no se aprecia una tendencia hacia valores negativos o positivos. El valor mínimo es de -5,2 m. y el máximo de 8,8 m. El promedio en la desviación de la ondulación geoidal del geoide EGM96 respecto al Ar-16 es de 0,7 m. El valor central es de 0,67 m. Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 0,15$ m. (Tabla 4). Los puntos pertenecen a la red de densificación de la red de POSGAR 2007. La precisión de las mediciones no fue reportada.

ID	IGN (Ar-16)			SRTM (EGM96)			Desviación IGN-DEM		
	H	h	N	H	h	N	ΔH	Δh	ΔN
RIVA	514,8	544,0	29,192	520,0	548,6	28,57	-5,2	-4,6	0,6
T500	594,8	624,3	29,461	586,0	614,7	28,74	8,8	9,5	0,7

MODELO DE ELEVACION SRTM – Misión, técnicas de adquisición, método de evaluación.

TQSX	496,3	525,2	28,972	497,0	525,5	28,45	-0,8	-0,2	0,5
JU02	654,7	684,1	29,388	652,0	680,7	28,65	2,7	3,4	0,7

Tabla 4: Comparación puntos de control IGN en la ciudad de S.F. del V. de Catamarca y el modelo SRTM.

ID	Precisión (IGN)			Información	
	h±	φ±	λ±	Red	Año
RIVA	No reportada	No reportada	No reportada	POSGAR 2007	2007
T500					
TQSX					
JU02					

Tabla 11: Información de puntos de control IGN en la ciudad de San Fdo. Del Valle de Catamarca

Otra serie de valores de la red geodésica fue tomada en sectores montañosos, para apreciar la desviación en un entorno topográfico más desfavorable respecto a la técnica y a la perturbación de la superficie geoidal.

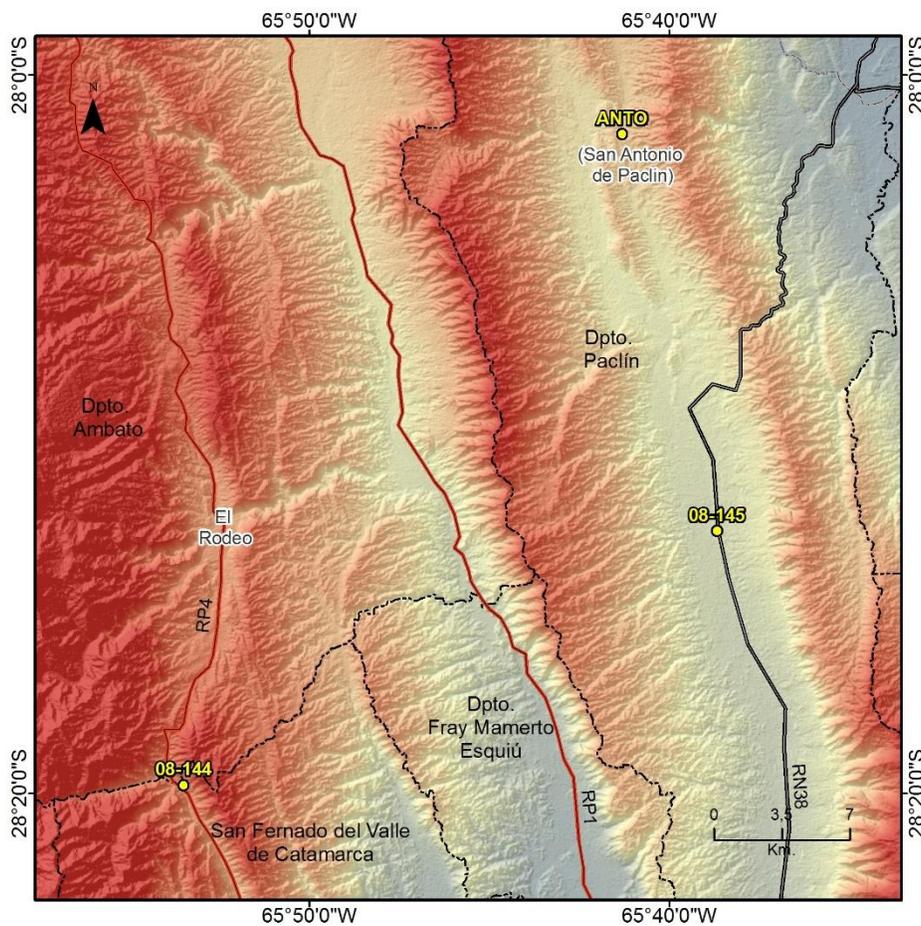


Fig. 13: Puntos de control de la red geodésica IGN (en amarillo) en sectores montañosos.

MODELO DE ELEVACION SRTM – Misión, técnicas de adquisición, método de evaluación.

Los puntos están medidos con distintos grados de precisión y en distintos momentos. (Tabla 5).

ID	Precisión (IGN)			Información	
	h±	φ±	λ±	Red	Año
08-144	0,062 m.	0,052 m.	0,045 m.	PASMA	1997 - 2001
08-145					
ANTO	0,010 m.	0,005 m.	0,005 m.	POSGAR 2007	2007

Tabla 5: Información de puntos de control IGN sectores montañosos. "h" es altura elipsoidal, "φ" latitud y "λ" longitud geodésicas.

El promedio en la desviación de las alturas pseudo-ortométricas (ΔH) es de -9,4 m. El valor central es de -5,8 m. Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 15,3$ m. respecto al mismo. Las desviaciones son negativas. El valor mínimo es de -21,1 m. y el máximo de -1,2 m. El valor de desviación más bajo es el evaluado en un punto principal POSGAR 2007 (Tabla 6).

En la Fig. 13 se puede observar que la topografía en el punto "08-144" es bastante más accidentada en relación a la ubicación de los puntos "ANTO" y "08-145". La técnica de interferometría tiene mejor respuesta en zonas de relieve de poca expresión.

El valor promedio en las ondulaciones geoidales (ΔN) es de 0,63 m. El valor central es de 0,5 m. Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 0,9$ m. Los valores de las desviaciones en la ondulación geoidal son positivos (Tabla 6). El punto de control ANTO, punto principal de la red POSGAR 2007, presenta la desviación en las ondulaciones geoidales más cercana a 0 m. de todas las muestras tomadas (esto implica que es donde más coincidencia hay entre EGM96 y Ar-16).

ID	IGN (Ar-16)			SRTM (EGM96)			Desviación IGN-DEM		
	H	h	N	H	h	N	ΔH	Δh	ΔN
08-144	1393,9	1424,5	30,634	1415,0	1444,3	29,26	-21,1	-19,8	1,4
08-145	835,2	865,0	29,802	841,0	870,3	29,30	-5,8	-5,3	0,5
ANTO	1121,8	1151,9	30,098	1123,0	1153,1	30,12	-1,2	-1,3	0,0

Tabla 6: Comparación puntos de control IGN en sectores montañosos y el modelo SRTM. elipsoidal, "φ" latitud y "λ" longitud geodésicas.

Contrastes con mediciones de GPS de mano:

El GPS utilizado para las mediciones en el desarrollo del trabajo fue un GARMIN ETREX 10. Esta unidad, en condiciones ideales (máxima cantidad de satélites y buena distribución de los mismos respecto al horizonte) alcanza una exactitud de 3 m. en el posicionamiento. Está aceptado de manera generalizada que la exactitud vertical es de aproximadamente 1,5 veces la horizontal, de manera que la exactitud vertical sería de 4,5 m. aprox.

A fines de determinar si las elevaciones medidas por la unidad GPS eran elevaciones pseudo-ortométricas o elevaciones sobre la superficie elipsoidal, se comparó las mediciones GPS con elevaciones pseudo-ortométricas obtenidas de la red geodésica IGN y el geode Ar-16.

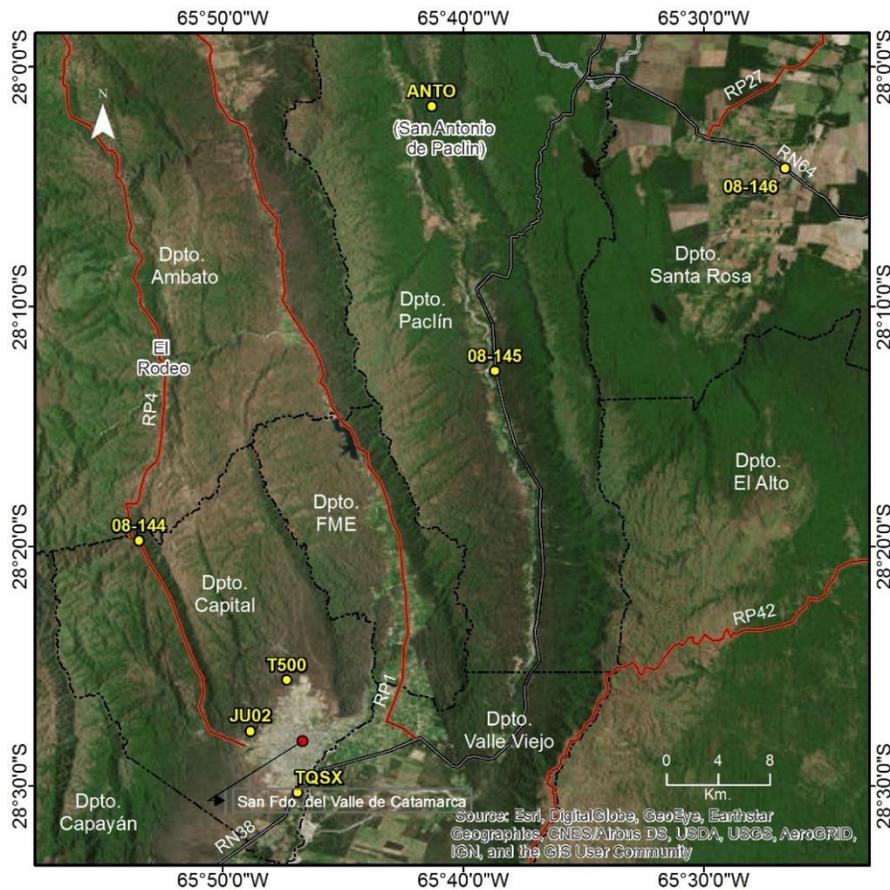


Fig. 14: Puntos de control de la red geodésica IGN medidos con GPS.

La desviación promedio entre los valores GPS y los valores IGN es de -3,83 m. El valor central es de -3,9 m. Estos valores adquieren mayor sentido si se compara la exactitud reportada para las mediciones del IGN (del orden de algunos centímetros) con la exactitud reportada para la unidad GPS (3 m. en condiciones óptimas). Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 2,15$ m. respecto al valor central. La desviación mínima es de -5,63 m. La desviación máxima es de -1,75 m. (Tabla 7).

Nombre	ID	GPS	IGN	ΔH
TQSX	61	500,9	496,25	-4,6
T500	62	656,5	654,7	-1,8
JU02	63	597,8	594,8	-3,0
08-144	64	1397,1	1393,9	-3,2
08-145	08	840,1	835,2	-4,8
08-146	09	463,6	457,9	-5,6

Tabla 7: Comparación mediciones GPS y alturas pseudo-ortométricas

MODELO DE ELEVACION SRTM – Misión, técnicas de adquisición, método de evaluación.

de la red geodésica IGN.

Los valores de los datos IGN son alturas pseudo-ortométricas, de manera que el GPS mide, con menor exactitud, una altura elipsoidal y la corrige utilizando un modelo de geoide gravimétrico.

Una gran porción de las desviaciones es negativa, al igual que en las desviaciones de SRTM respecto a los valores de referencia IGN; aun así, la cantidad de muestras es insuficiente para establecer una tendencia general en este sentido.

Al comparar directamente mediciones GPS y valores SRTM, la desviación promedio entre los valores GPS y el modelo SRTM es de -1,9 m. El valor central es -2,4 m. Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 6,9$ m. respecto al mismo. El valor mínimo es de -7,4 m. El valor máximo es de 4,5 m. 78,5% de las muestras tienen una desviación respecto a las mediciones GPS comprendida entre 1 m. y -5 m. (Fig. 15).

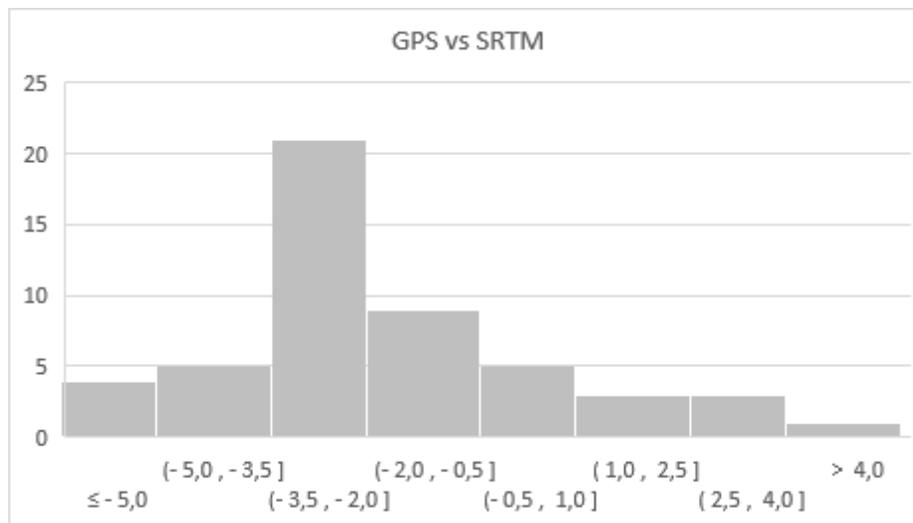


Fig. 15: Histograma de frecuencias de desviaciones de modelo SRTM respecto a mediciones GPS.

ID	GPS	SRTM	ΔH	ID	GPS	SRTM	ΔH	ID	GPS	SRTM	ΔH
08	840,1	841,0	-0,9	031	483,0	486,0	-3,0	052	433,9	433,0	0,9
09	463,6	461,0	2,6	032	483,1	486,0	-2,9	053	433,8	430,0	3,8
010	502,2	505,0	-2,8	033	461,3	464,0	-2,7	054	467,6	475,0	-7,4
011	501,9	505,0	-3,1	034	460,7	464,0	-3,3	055	472,5	477,0	-4,5
012	502,0	505,0	-3,0	035	466,5	468,0	-1,5	056	479,5	479,0	0,5
015	504,2	506,0	-1,8	036	467,1	469,0	-1,9	057	475,2	481,0	-5,8
016	500,8	505,0	-4,2	037	467,1	469,0	-1,9	058	482,8	489,0	-6,2
017	504,0	506,0	-2,0	038	467,7	470,0	-2,3	059	534,7	539,0	-4,3
018	503,9	506,0	-2,1	039	467,6	470,0	-2,4	060	506,2	508,0	-1,8
019	502,5	505,0	-2,5	040	467,2	470,0	-2,8				
020	496,9	501,0	-4,1	041	466,9	470,0	-3,1				
021	496,7	501,0	-4,3	042	478,2	477,0	1,2				
022	495,8	501,0	-5,2	043	480,9	481,0	-0,1				

MODELO DE ELEVACION SRTM – Misión, técnicas de adquisición, método de evaluación.

023	497,7	501,0	-3,3	044	484,3	482,0	2,3
024	498,8	502,0	-3,2	045	480,9	482,0	-1,1
025	501,1	504,0	-2,9	046	483,7	484,0	-0,3
026	488,1	487,0	1,1	047	458,6	461,0	-2,4
027	485,3	487,0	-1,7	048	483,8	487,0	-3,2
028	484,5	487,0	-2,5	049	438,6	436,0	2,6
029	485,4	487,0	-1,6	050	439,5	435,0	4,5
030	482,2	485,0	-2,8	051	434,6	434,0	0,6

Tabla 8: Comparación elevaciones GPS y SRTM.

La mayor frecuencia se obtiene en el intervalo -2 m. a -3,5 m. Respecto al GPS, los valores en el modelo de elevación también parecen estar sobre-estimados. La tendencia en la desviación es negativa (80,9% de las desviaciones son negativas). En conjunto, solo un 7,8% de los valores sobrepasa una desviación de ± 5 m. respecto a las mediciones GPS.

Para tener una idea más acabada de la resolución del modelo para captar la topografía en el área de estudio se plantearon líneas de perfiles sobre los caminos, aproximadamente perpendiculares a la dirección de líneas de flujo acumulado en el modelo de flujo superficial.

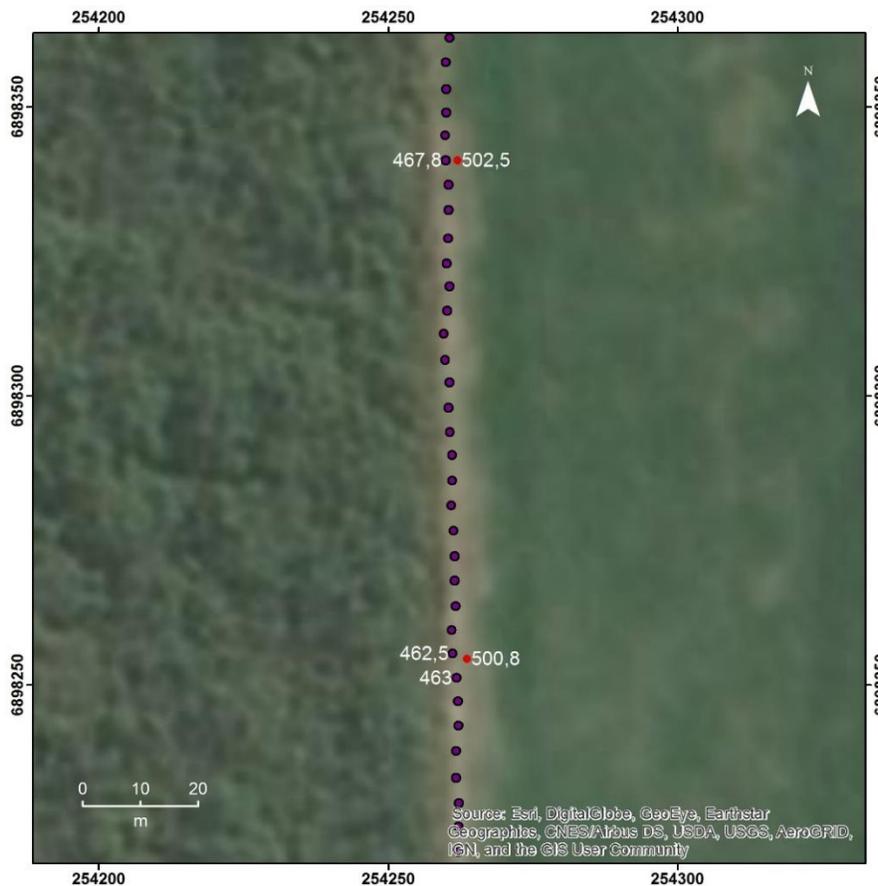


Fig. 16: Puntos de muestreo en el perfil GPS (morado) y mediciones GPS puntuales (rojo). Elevaciones en blanco.

La exactitud de la unidad GPS disminuyó en la función tracking (Fig. 16). En ningún momento se consiguió una desviación similar a la obtenida en mediciones puntuales.

La desviación promedio entre los perfiles GPS y los SRTM es de 31,2 m. El valor central es de 30,3 m. Los extremos presentan una desviación de $\pm 28,74$ m. respecto al mismo. El valor mínimo es de 23,8 m. El valor máximo es de 59,0 m. (Fig. 17)

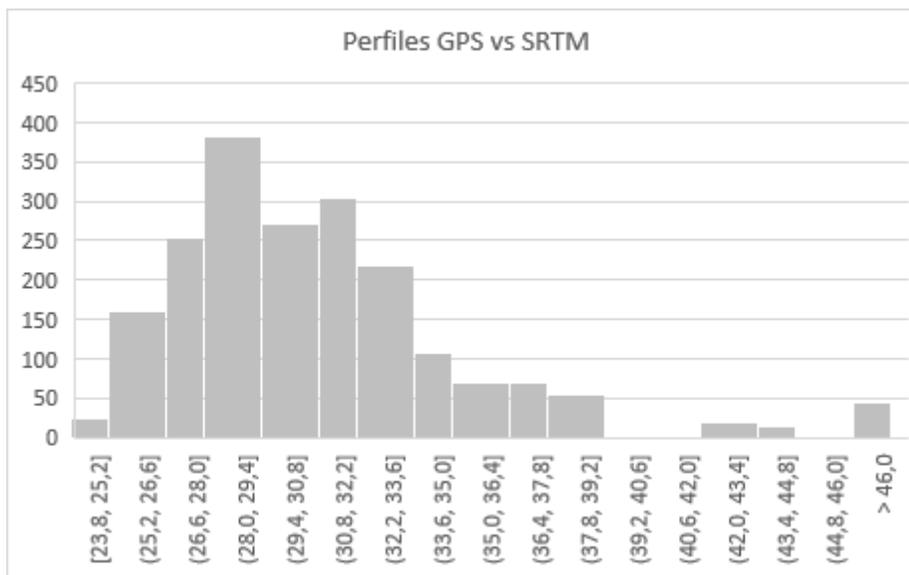


Fig. 17: Histograma de frecuencias de desviaciones de perfiles GPS respecto a perfiles SRTM.

El aumento en las desviaciones en la función tracking no obedece a que las alturas medidas por el GPS sean elipsoidales, debido a que la ondulación del geode presenta valores positivos en el área (tomando en cuenta dos modelos de geode distintos). Sí se resta la ondulación del geode (promedio aprox. 29 m. en el área) a las supuestas alturas elipsoidales, entonces se tendría una desviación promedio en las alturas por tracking respecto a las SRTM del orden de 60 m. Ningún punto de control evaluado en las mediciones GPS puntuales presenta una desviación respecto a las alturas SRTM mayor a 10 m. Las alturas medidas en la función tracking son alturas pseudo-ortométricas con un grado considerablemente menor de exactitud en comparación con las mediciones puntuales.

Los perfiles GPS tienen una mayor resolución que los perfiles SRTM, debido a que el dispositivo fue configurado para que el intervalo de toma de datos de elevación fuese cada 3 segundos, a medida que se caminaba sobre la línea del perfil. En el caso del perfil SRTM, a pesar de haber sido interpolado en una superficie continua, la cantidad de datos con los que se construye la misma proviene del modelo de elevación ráster, con un espaciamiento de tres segundos de arco (90 m. aprox.)

A través de la comparación de los perfiles SRTM y GPS se puede ver que, aun considerando la falta de exactitud en la determinación de las elevaciones en los perfiles GPS y de la mayor resolución de los mismos, los rasgos topográficos generales concuerdan. Esto es importante porque los perfiles

GPS tenían la finalidad de ser empleados como controles adicionales de las líneas de flujo acumulado.

Los perfiles fueron tomados en caminos de tierra entre parcelas cultivadas. Los perfiles N°1, N°3 y el tramo inicial de N°7 se tomaron arriba de un vehículo con el dispositivo afuera, por cuestiones de logística. Esto no parece haber afectado significativamente a la precisión del dispositivo, ya que las desviaciones, comparadas con el resto de los perfiles, son similares. El mayor grado de desviación está en el tramo final del perfil N°2, que se realizó a pie. El resto de los perfiles (N°2, N°4, N°5, N°6, tramo restante de N°7) se realizaron caminando, con el dispositivo a una altura aprox. de 1,15 m. El tramo N° 2 está dividido en dos partes porque hubo que desviar el rumbo de la caminata unos metros para cruzar un alambrado y retomar el camino.

El perfil N°1 (Fig. 18) presenta una desviación promedio de las mediciones GPS respecto al modelo SRTM de 30,4 m. El valor central es de 30,5 m. Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 5,3$ m. respecto a este valor. El valor mínimo es de 25,5 m. y el valor máximo es 35,8 m.

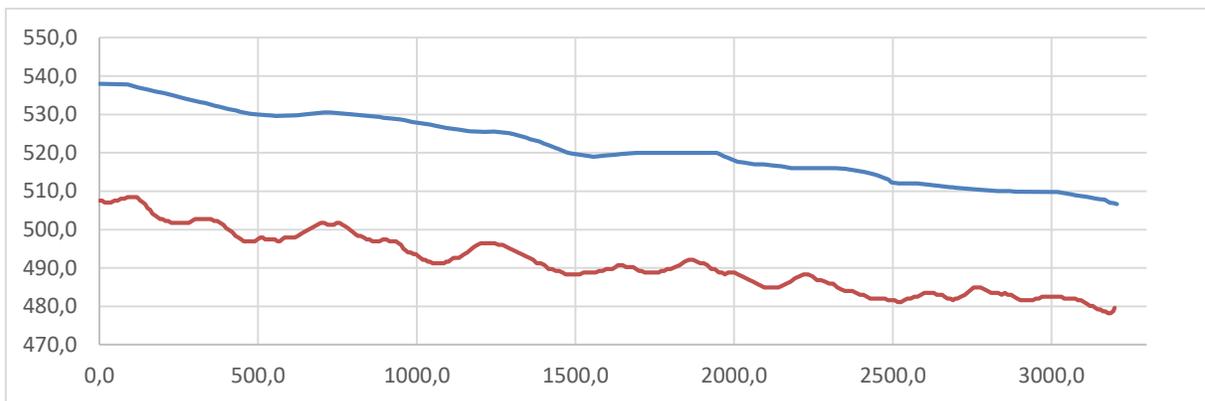


Fig. 18: Perfil vertical N°1. GPS: Naranja. SRTM: Azul.

El perfil N°2a (Fig. 19) presenta una desviación promedio de las mediciones GPS respecto al modelo SRTM de 31,2 m. El valor central es de 31,6 m. Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 5,3$ m. respecto a este valor. El valor mínimo es de 26,3 m. y el valor máximo es 35,0 m.

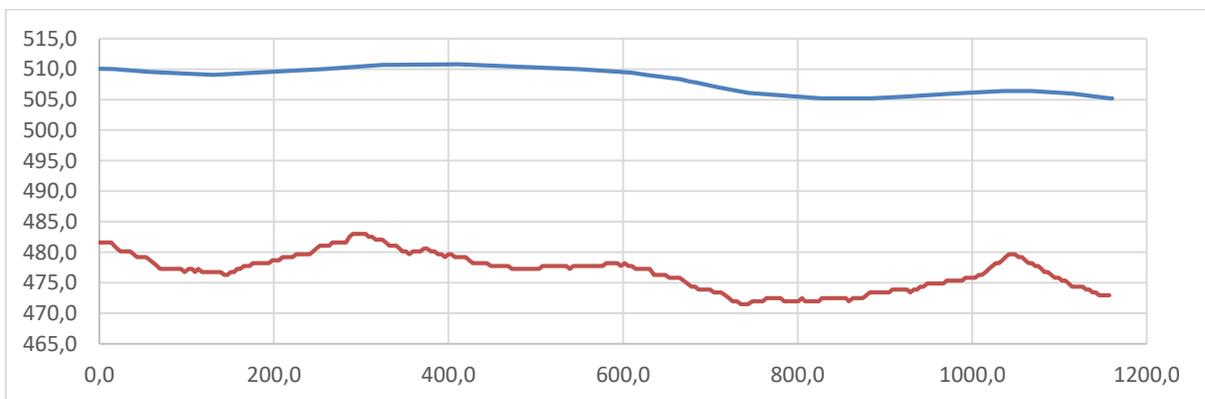


Fig. 19: Perfil vertical N°2a. GPS: Naranja. SRTM: Azul.

El perfil N°3 (Fig. 20) presenta una desviación promedio de las mediciones GPS respecto al modelo SRTM de 28,4 m. El valor central es de 28,7 m. Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 4,8$ m. respecto a este valor. El valor mínimo es de 23,8 m. y el valor máximo es 33,5 m.

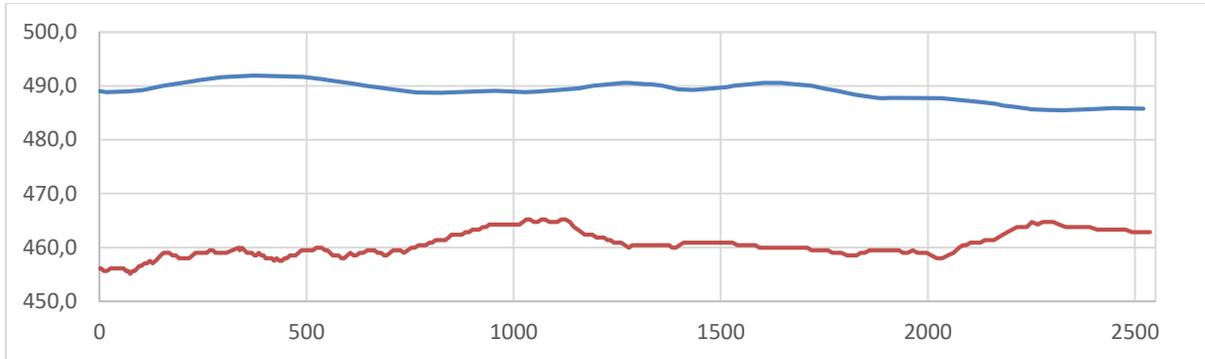


Fig. 20: Perfil vertical N°3. GPS: Naranja. SRTM: Azul.

El perfil GPS N°3 muestra algunas diferencias respecto al perfil SRTM. Es difícil distinguir cuál de las dos aproximaciones es la correcta en este caso, dada la baja expresión del relieve en el tramo, prácticamente plano, en zona de transición entre facies proximal y distal de geoforma de ladera.

El perfil N°4 (Fig. 21) presenta una desviación promedio de las mediciones GPS respecto al modelo SRTM de 27,5 m. El valor central es de 27,9 m. Los valores extremos presentan una desviación de ± 3 m. respecto a este valor. El valor mínimo es de 24,9 m. y el valor máximo es 30,3 m. Este perfil se hizo a pie.

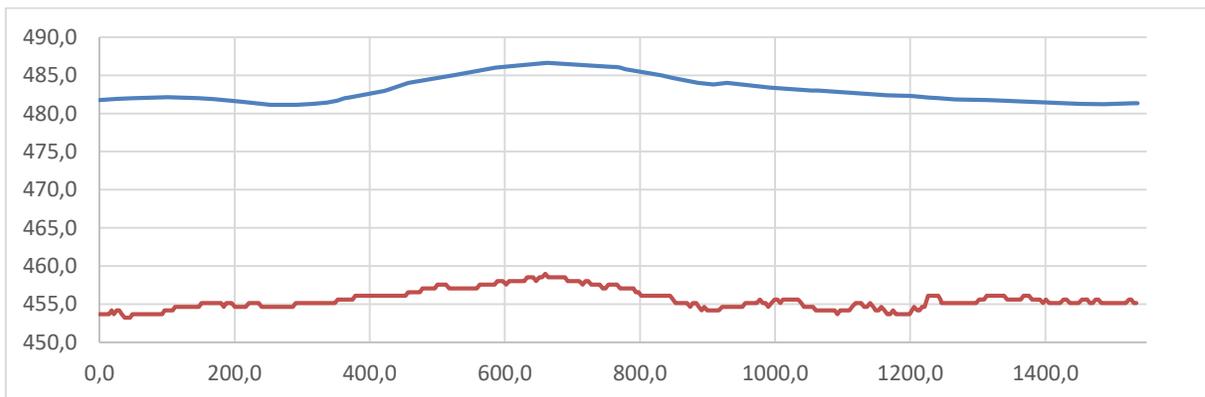


Fig. 21: Perfil vertical N°4. GPS: Naranja. SRTM: Azul.

Los perfiles N°5 y N°6 son los de menor extensión; se los incluye, pero sus valores no son tan representativos como el resto dada la relación de cantidad de muestras.

El perfil N°5 (fig. 22) presenta una desviación promedio de las mediciones GPS respecto al modelo SRTM de 26,4 m. El valor central es de 26,3 m. Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 0,9$ m. respecto a este valor.

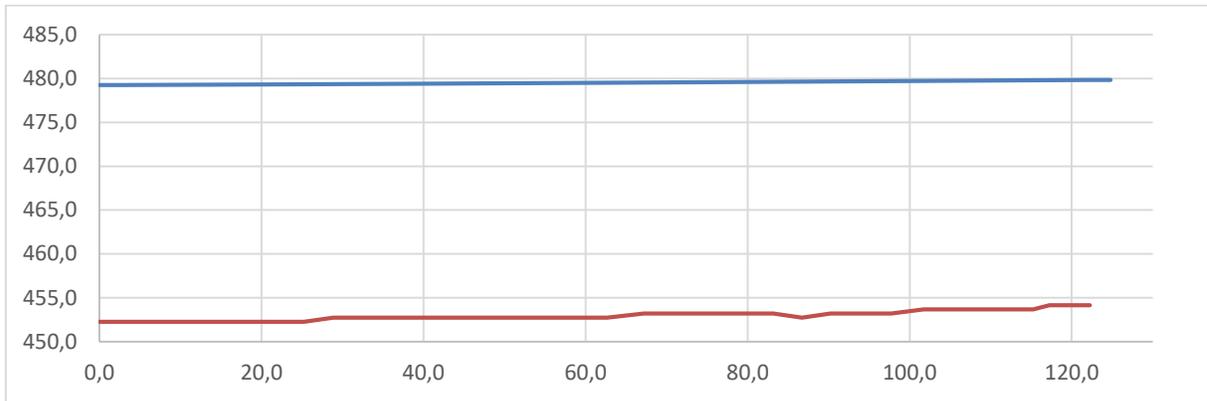


Fig. 22: Perfil vertical N°5. GPS: Naranja. SRTM: Azul.

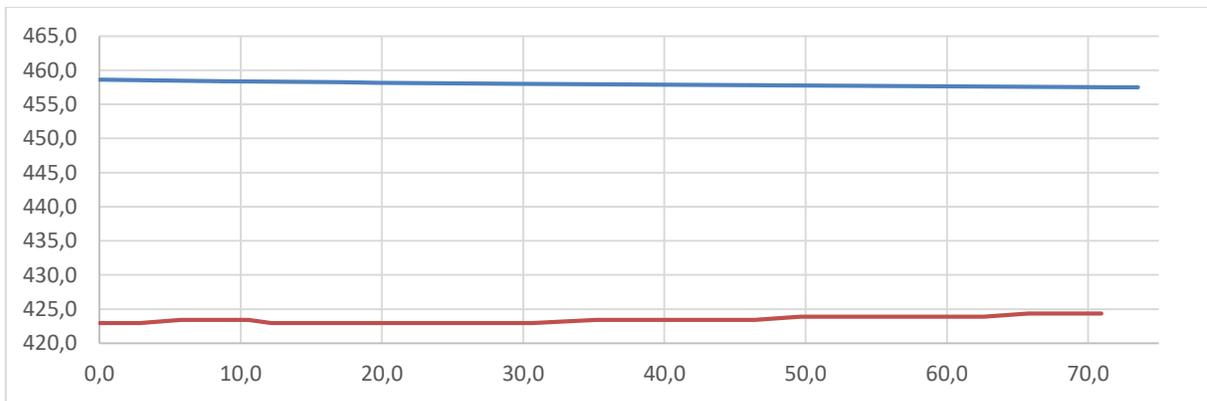


Fig. 23: Perfil vertical N°6. GPS: Naranja. SRTM: Azul.

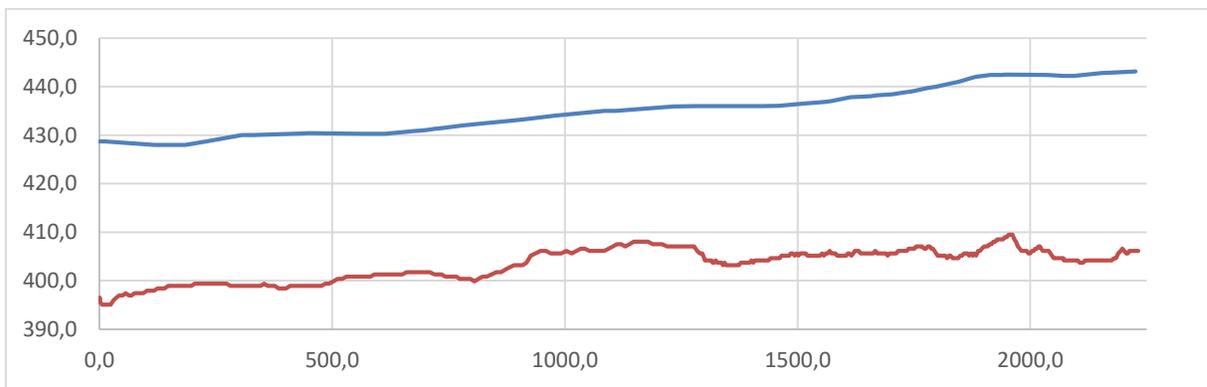


Fig. 24: Perfil vertical N°7. GPS: Naranja. SRTM: Azul.

El perfil N°6 (Fig. 23) presenta una desviación promedio de las mediciones GPS respecto al modelo SRTM de 34,5 m. El valor mínimo es de 33,6 m. y el valor máximo es 35,1 m.

El perfil N°7 (Fig. 24) presenta una desviación promedio de las mediciones GPS respecto al modelo SRTM de 31,7 m. El valor central es de 31,5 m. Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 7,8$ m. respecto a este valor. El valor mínimo es de 25,6 m. y el valor máximo es 39,3 m.

Tendencias generales:

El promedio general de todas las desviaciones medidas (en Dpto. Santa Rosa, en cercanía de SFV de Catamarca y en sectores montañosos) es de -3,1 m. El valor central es de 3 m. Los valores extremos presentan una desviación de $\pm 17,1$ m. respecto al mismo. Un 88% de las muestras tiene una desviación del valor del modelo SRTM en relación a los puntos de las redes IGN entre 0 y -6 m. Solo dos valores (8% de la población) presentan desviaciones superiores a los 8 m. (Fig. 25). Uno de los valores (08-144) está en una zona topográficamente desfavorable, el otro (T500) en una zona con vegetación de 1,5 m. en promedio, fuerte pendiente y suelos pedregosos. Ambas situaciones son desfavorables para la técnica con la que fueron calculadas las alturas en el modelo de elevación.

En el área de estudio las desviaciones respecto a dos métodos de cálculo de elevaciones (red geodésica y red de nivelación) son negativas, lo que implica que las mediciones del modelo sobreestiman la elevación localmente. La desviación es muy inferior al error absoluto teórico de 16 m. en el modelo SRTM (Farr et al., 2007).

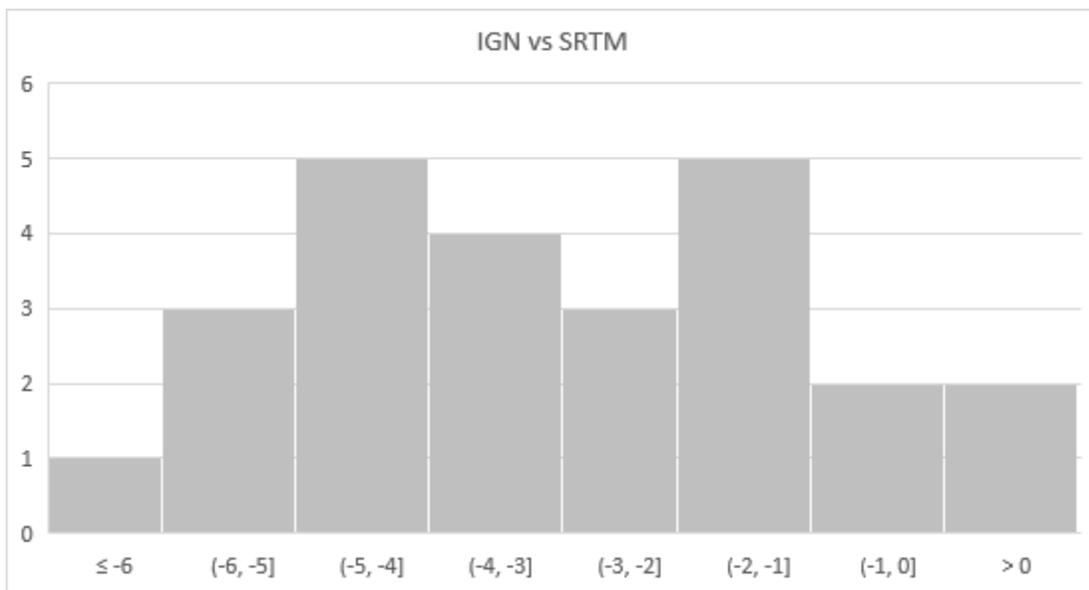


Fig. 25: Histograma de frecuencias sobre desviaciones verticales en todas las muestras.

La desviación promedio relativa al método de nivelación tradicional es más baja que la desviación comparada con las mediciones GPS relativas al geoide (-2,5 m. y -4,1 m., respectivamente). Esto puede deberse al método empleado en el cálculo de las alturas ortométricas en ese tramo de la red, que se desconoce, ya que no se declara en el informe del levantamiento del tramo.

BIBLIOGRAFIA

MODELO DE ELEVACION SRTM – Misión, técnicas de adquisición, método de evaluación.

- Alonso Fernández-Coppel, I.; 2001. Localizaciones geográficas: El datum. Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenieras Agrarias. Universidad de Valladolid.
- Alonso Sarría, F. Sistemas de Información Geográfica. Departamento de Geografía. Universidad de Murcia.
- Álvarez J. A., Rivas Mielgo, M.; 2011. Determinación geométrica de la ondulación del geoide a lo largo de un tramo de la REDNAP, Ocaña-Cuenca y su comparación con el geoide geométrico. Tesis. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía.
- Cabrera M., Morales, H., 2012. Verificación y Densificación de la red de catastro de la Provincia de Cordoba. Tesis. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Escuela de Agrimensura. Universidad Nacional de Cordoba.
- Cartografía y geodesia. Sistemas de proyección. Universidad de Murcia, Departamento de Geografía.
- Campos J., 2004. Altitudes y Geoide. Notas del curso Geofísica General, Facultad de Ingeniería, Universidad de Chile.
- Corchete V., 2009. Geodesia Geométrica y Geodesia Física. Departamento de Física Aplicada. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Almería.
- Corchete V., 2009. Determinación gravimétrica del geoide. Departamento de Física Aplicada. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Almería.
- Fallas, J., 2007. Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones.
- Farr T. G. et al., 2007. *The Shuttle Radar Topography Mission*. Rev. Geophys. 45, RG2004. doi:10.1029/2005RG000183.
- Felicísimo, Á. Curso de Introducción a los modelos digitales de terreno. <http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/CursoMDT.html>.
- Furones A. M., 2010. Sistemas y marcos de referencia terrestres, sistemas de coordenadas. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Universidad Politécnica de Valencia.
- Madsen, S. N. y H. A. Zebker, 1998. *Imaging radar interferometry. Manual of Remote Sensing*, vol. 2. chap. 6, pp. 359–380, John Wiley, Hoboken, N. J.
- Márquez, R. A. Altimetría Satelital: Modelos locales de geoide y nivelación GPS. Departamento de Ingeniería en Agrimensura, Facultad de Ingeniería, UNSJ.
- Martínez García P., 2012. Modelo digital de elevaciones a partir de cartografía. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Escuela de Agrimensura. Universidad Nacional de Cordoba.
- Moreira et al., 2013. A tutorial on synthetic aperture radar. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. doi: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
- Ordnance Survey – Southampton, United Kingdom, 2016. *A guide to coordinate systems in Great Britain: An introduction to mapping coordinate systems and the use of GNSS datasets with Ordnance Survey mapping*.

- Página web del Instituto Geográfico Nacional. <http://www.ign.gob.ar>.
- Panozzo Zénere M., 2013. Focalización de imágenes SAR utilizando el algoritmo Omega-K. Simulación y validación. Tesis Magistral. Universidad Nacional de Cordoba.
- Rodríguez et al., 2006. *An assessment of the SRTM topographic products*. Jet Propulsion Laboratory. https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf
- Rosen, P. et al., 2000. *Synthetic aperture radar interferometry*. Proceedings of the IEEE, Vol. 88, NO. 3.
- Tomiyasu, K., 1978. *Tutorial review of synthetic-aperture radar (SAR) with applications to imaging of the ocean surface*. Proceedings of the IEEE, Vol. 66. NO. 5.
- Vaníček, P. et al., 2004. Algunos aspectos sobre alturas ortométricas y normales. Revista Cartografica, Vol. 76-77, pp. 79-86.