

Evaluación de Modelos Digitales de Elevación obtenidos mediante imágenes PAZ y la técnica InSAR en una zona cordillerana de la región Metropolitana de Chile

Paulina Vidal-Páez^(1,2), Alfonso Fernández-Sarría⁽²⁾, María José González-Bonilla⁽³⁾, Juan Manuel Cuerda⁽³⁾, Nuria Casal⁽³⁾, Waldo Pérez-Martínez^(1,2), Jaime H. Ortega⁽⁴⁾, Pablo Sarricolea^(5,6)

⁽¹⁾Hémera Centro de Observación de la Tierra, Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Mayor, Chile, 8580745, paulina.vidal@umayor.cl; waldo.perez@umayor.cl

⁽²⁾Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, afernan@cgf.upv.es

⁽³⁾Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), España, glezbmj@inta.es; cuerdamjm@inta.es; casaln@inta.es

⁽⁴⁾Departamento de Ingeniería Matemática, Centro de Modelamiento Matemático CNRS-IRL 2807, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile. jortega@dim.uchile.cl

⁽⁵⁾Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile. psarricolea@uchilefau.cl

⁽⁶⁾Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.

Resumen: Se generó dos Modelos Digitales de Elevación (MDEs) a partir de imágenes del satélite de radar español PAZ en un sector montañoso de la región Metropolitana de Chile a partir de imágenes de órbita ascendente y descendente con polarización VV con el software ENVI SARscape®. Los MDEs se evaluaron en base a 23 puntos de control; 14 extraídos a partir de un MDE Lidar de 1m resolución espacial y 9 puntos correspondiente a mediciones GNSS realizadas en dos campañas de terreno. Se obtuvo un valor de RMSE de 27 m en el MDE generado a partir del par interferométrico descendente con polarización VV y un valor de RMSE de 21 m en el MDE generado a partir del par interferométrico ascendente con polarización VV.

Palabras clave: Modelo Digital de Elevación, InSAR, PAZ, Cordillera de Los Andes.

Evaluation of Digital Elevation Models obtained using PAZ images and InSAR technique in a mountainous area of the Metropolitan Region of Chile

Abstract: Two Digital Elevation Models (DEMs) were generated from images of the Spanish radar satellite PAZ in a mountainous sector of the Metropolitan region of Chile from ascending and descending orbit images with VV polarization with the ENVI SARscape® software. The DEMs were evaluated based on 23 control points; 14 were extracted from a 1m spatial resolution Lidar DEM and 9 points corresponded to GNSS measurements made in two field campaigns. An RMSE value of 27 m was obtained in the DEM generated from the descending interferometric pair with VV polarization, and an RMSE of 21 m in the DEM generated from the ascending interferometric pair with VV polarization.

Keywords: Digital Elevation Model, InSAR, PAZ, Andes High Mountain.

1. INTRODUCCIÓN

Entre las fuentes de datos de información geoespacial, los Modelos Digitales de Elevación tienen un papel importante, ya que representan las variaciones continuas de la topografía almacenadas dentro de una cuadrícula *raster* regular y son el input para una variada cantidad de aplicaciones (Braun, 2021), como manejo de recursos naturales, desastres naturales, ciencias forestales, mapeo topográfico, sistemas de información geográfica (SIG), entre otras aplicaciones (Makineci y Karabörk, 2016).

La idea básica detrás de la técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR), es la combinación de información proporcionada por dos imágenes SAR diferente que tienen una distancia conocida (Línea de base perpendicular; B_p). En función de la posición de ambos satélites se puede recuperar información tridimensional de la superficie de la tierra mediante las diferentes longitudes de trayectoria de las señales de eco del radar (Braun,

2021). Existen dos variables que pueden contribuir en la obtención de MDE confiables; la línea de base temporal (B_T) y la línea de base perpendicular (B_p).

En relación con la línea de base temporal, se recomienda que sea la mínima, debido a que se observa una pérdida de coherencia con una línea de base temporal creciente, producto de los cambios en las masas vegetales y a la sensibilidad a las perturbaciones troposféricas y vapor de agua. Por otro lado, desde la perspectiva de la geometría de adquisición, dos puntos son cruciales para la recuperación confiable de información topográfica, por lo que se recomienda que la línea base perpendicular debe estar entre 150 y 400 m para permitir una descripción precisa de las variaciones topográficas de las franjas observadas (Ferretti *et al.*, 2007).

Además, Abdikan *et al.* (2022) señalan que la evaluación de los MDE puede jugar un papel esencial en la obtención del producto final. Los autores mencionados

anteriormente, evaluaron MDE en diferentes usos de suelo en cinco pares interferómetros obtenidos mediante imágenes PAZ en el *software* SNAP, en donde el valor de RMSE más bajo se obtuvo en el Par 1 (6.89 m) y el valor más alto en el par 4 (17.53 m).

Debido a que el lanzamiento del satélite PAZ fue el año 2018, los estudios que utilizan datos PAZ para la elaboración de MDE aún son muy limitados.

Sin embargo, existen diversos estudios (Kakavas *et al.*, 2018; Ahmadabadi *et al.*, 2020; Dabiri *et al.*, 2020) que generan MDE mediante la técnica InSAR e imágenes del satélite Sentinel-1, obteniendo RMSE entre 2.42 m y 39 m mediante validación con puntos de control en terreno y MDE de referencia.

El objetivo de este trabajo es evaluar MDEs obtenidos a partir de imágenes SAR del satélite español PAZ, mediante la técnica InSAR, en relación con un MDE de referencia Lidar y puntos de control GNSS capturados en terreno, en un sector montañoso de la región Metropolitana de Chile.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a un sector de la región Metropolitana de Chile (y la región de Valparaíso), localizado entre los 33.032640° y 33.507255° de latitud sur y los 70.475131° y 70.020157° de longitud oeste y tiene una superficie de 1654.8 km² y 1802.3 km² para la órbita ascendente y descendente respectivamente (Figura 1). Presenta un clima mediterráneo, con precipitaciones promedio de 341 mm que se concentran en invierno (DGA, 2019). El relieve corresponde a un sector montañoso con altitudes que van desde los 1.179 hasta los 6.058 m s.n.m. en donde el 44.3% de la superficie del área de estudio está sobre los 3500 m s.n.m.

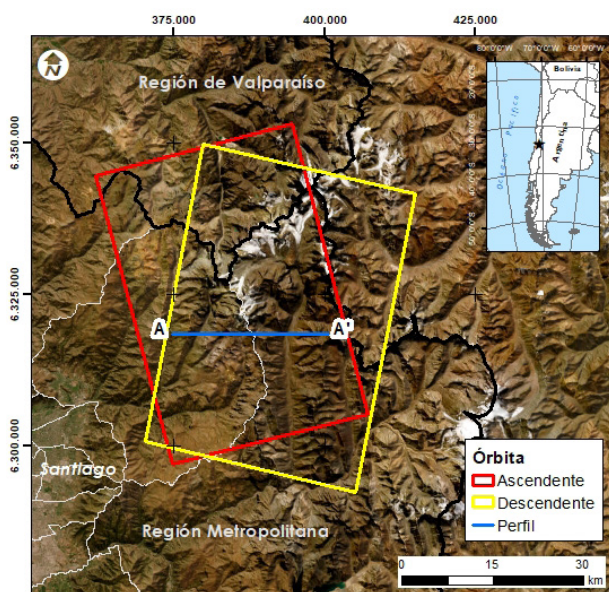


Figura 1. Área de estudio. El recuadro rojo muestra el área en donde se generó el MDE de órbita ascendente y el recuadro amarillo el MDE de órbita descendente. En azul se observa el perfil A-A' para comparar los MDE generados.

2.2. Adquisición de datos

Imágenes PAZ

Se utilizó 2 set de imágenes PAZ proporcionadas por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) de España, obtenidas mediante el anuncio de oportunidad AO-001-050 del año 2019. Las imágenes SAR del satélite español PAZ operan en banda X (100/150 MHz) y su modo de adquisición es *Stripmap* (SM) y poseen un nivel de procesamiento *Single Look Slant Range Complex* (SSC) y su cobertura es de 30 km × 50 km y son obtenidas con una resolución espacial de 0.90 x 2.04 m (en rango y acimut). Se utilizó la combinación de 19 imágenes PAZ de órbita ascendente entre el 17 de septiembre del 2019 y el 22 de abril del 2021 y 22 imágenes PAZ de órbita descendente entre el 17 de septiembre del 2019 y el 05 de junio del 2021. La línea de base perpendicular y temporal máxima para las imágenes de órbita ascendente y polarización VV fue de 370.45 metros y 176 días y se analizaron 77 pares en todas las combinaciones. La línea de base perpendicular y temporal máxima para las imágenes de órbita descendente y polarización VV fue de 415.33 metros y 176 días y se analizó 104 pares en todas las combinaciones.

MDE de referencia y puntos GNSS

La evaluación de los modelos digitales de elevación generados con las imágenes PAZ se realizó en base a 23 puntos de control (GCP). 14 GCP fueron extraídos a partir de un MDE de referencia (DEM Lidar 1m resolución espacial), localizados en sectores estables y que fueron distribuidos aleatoriamente. Además, se utilizó 9 GCP obtenidos mediante mediciones GNSS en 2 campañas de terreno en el área de estudio (1 campaña de terreno se realizó en noviembre del año 2020 y la otra en abril del año 2021 con precisión igual o inferior a 30 cm con receptores satelitales de doble frecuencia a partir de un vértice conocido o estación permanente). Debido a que el área de estudio es un sector montañoso con pendientes escarpadas, los puntos de control (GCP) se localizaron en sectores accesibles y de pendiente baja a moderada.

Se realizó una comparación (perfil A-A') del MDE interferométrico obtenido a partir de imágenes PAZ de órbita descendente y polarización VV y el MDE SRTM para visualizar la diferencia de altitud del perfil topográfico de ambos Modelos Digitales de Elevación. Se utilizó el MDE SRTM debido a que el MDE Lidar no cubre toda el área de estudio.

2.3. Procesamiento InSAR para la generación de MDE

Se generó 2 MDE a partir de imágenes PAZ y la técnica InSAR con el *software* ENVI SARscape® y la técnica *Small Baseline Subset* (SBAS) (Berardino *et al.*, 2002); uno generado a partir de la combinación de imágenes de órbita ascendente y otro a partir de la combinación de imágenes de órbita descendente con polarización VV. Se utilizó un tamaño de píxel de 7 m para los MDEs generados.

Se utilizó un MDE SRTM de 30 metros de resolución espacial para el co-registro de las imágenes y para mejorar la calidad de los interferogramas se utilizó el filtro de Goldstein (Goldstein y Werner, 1998). Para el desenvolvimiento de la fase, se utilizó el algoritmo *Minimum cost*

flow (MCF). En la etapa de desenvolvimiento de fase, se utilizó un umbral de coherencia de 0.3 por lo que todos los pixeles con valores inferiores a 0.3 se eliminaron del análisis. Una vez generados los MDE, se obtuvo los valores del geoide de los GCP desde <https://geographiclib.sourceforge.io/> y se restó este valor a los MDE generados de acuerdo con la formula ($H = h - N$, donde H es la altura ortométrica, h la altura elipsoidal y N el valor promedio del geoide en el área).

2.4. Evaluación de MDE

Los valores de elevación de los 23 puntos de control de los MDEs generados, se evaluaron en base a los GCP de referencia obtenidos mediante diferentes fuentes con el método *Root Mean Square error* (RMSE, Ecuación 1) y el *Mean absolute error* (MAE, Ecuación 2) que se muestran a continuación:

Ecuación 1. *Root Mean Square error (RMSE)*

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

Ecuación 2. *Mean absolute error (MAE)*

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |a - b|}{N} \quad (2)$$

Donde N= es el número de puntos evaluados, ΔZ_i son los errores individuales, a= valores reales (GCP) y b= valores estimados mediante los MDE.

3. RESULTADOS

Se obtuvo dos MDEs; uno generado a partir de las imágenes ascendente y otro a partir de las imágenes descendente con polarización VV con el software ENVI SARscape®. En la Figura 2 se observan los MDEs obtenidos mediante el procesamiento InSAR y las imágenes PAZ de 7 metros de resolución espacial en donde se visualiza sectores con pérdida de información de altitud por la baja coherencia en esos sectores (< 0.3); esto debido a que el área de estudio corresponde a un sector montañoso de la zona central de Chile con pendientes escarpadas. La superficie con pérdida de coherencia para ambos MDE es aproximadamente el 69%. Se podría obtener un MDE continuo de la superficie, sin embargo, Braun (2021) señala que se requiere una coherencia suficientemente alta para realizar estimaciones precisas de la altura. Los valores de RMSE y MAE se muestran en la tabla 2, en donde se obtuvo un valor de RMSE de 27 m y 21 m y un MAE de 15 m y 21 m en el MDE interferométrico descendente y ascendente respectivamente.

En el perfil A-A' correspondiente a la Figura 3, se observa la diferencia de altitud del perfil topográfico del MDE SRTM de referencia y MDE interferométrico obtenido a partir de imágenes PAZ de órbita descendente y polarización VV en donde el MDE interferométrico subestima los valores de altitud en el transecto del perfil. Sin embargo, hay sectores que no presentan información debido a la baja coherencia en esos sectores.

Tabla 2. RMSE obtenidos a partir de Puntos de control y los MDE generados.

Tipo de órbita	RMSE	MAE
Ascendente VV	21	15
Descendente VV	27	21

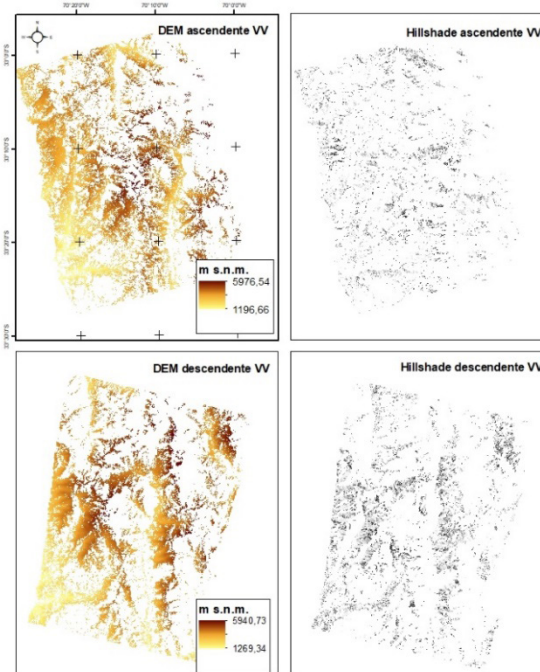


Figura 2. Modelos Digitales de Elevación obtenidos mediante imágenes PAZ de órbita ascendente y descendente con polarización VV y el hillshade correspondiente.

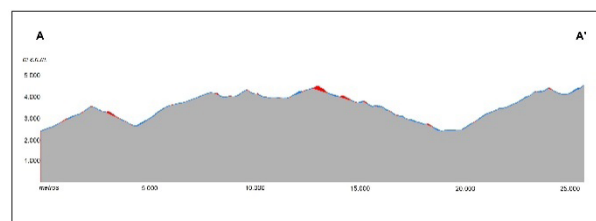


Figura 3. Diferencia de altitud de perfil topográfico de MDE de referencia y MDE interferométrico obtenido a partir de imágenes PAZ de órbita descendente y polarización VV.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Producto del procesamiento InSAR con imágenes del satélite de radar español PAZ se obtuvo dos MDE en un sector montañoso de la región Metropolitana de Chile con valor de RMSE de 27 y 21 m y MAE de 15 y 21 m para los MDE de órbita descendente y ascendente respectivamente.

Los MDE son utilizados como insumo para diferentes aplicaciones (Schillaci *et al.*, 2012; Maune, 2007) y la obtención de ellos mediante la técnica InSAR es de gran utilidad. Sin embargo, debido a la geometría de adquisición de las imágenes SAR y de la topografía compleja del área de estudio, las imágenes PAZ presentan distorsiones geométricas como inversión por relieve (*layover*) y sombra (*shadow*); fuente de error a considerar en la elaboración de MDEs. Otra fuente importante de error para considerar en

la elaboración de MDEs son los efectos atmosféricos debido a que la distribución heterogénea de refracción de la atmósfera puede causar retraso de la señal (Braun, 2021). En relación con lo anterior, el área de estudio corresponde a un sector montañoso con altitudes sobre los 3.000 m s.n.m. por lo que es un área meteorológicamente inestable lo que podría afectar la interacción de la señal del radar con la superficie. Crosetto y Crippa (2000), señalan que existe una importante disminución de la precisión de los MDEs en las áreas montañosas, como es el caso de este trabajo y como lo obtenido con imágenes S1 en esta misma área de estudio por Vidal *et al.* (2019).

Por otro lado, en general los RMSE son altos, sin embargo, los MDE elaborados por otros autores (con imágenes S1) corresponden a sectores relativamente planos con altitudes que no sobrepasan los 2000 m s.n.m. a diferencia del área de este estudio. Para un futuro trabajo, se propone utilizar otras métricas estadísticas adicionales para la evaluación de MDE proveniente de imágenes PAZ y compararlo con otros sensores como S1 (banda C) o Saocom (banda L). Disponer de MDE de alta resolución para grandes extensiones de terreno, sigue siendo en la actualidad limitado y costoso, por lo que la técnica InSAR ofrece una oportunidad para su elaboración, sin embargo, hay que tener en consideración las características del área de estudio y las limitaciones de las imágenes de radar para este tipo de aplicaciones.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) y al segmento PAZ-Ciencia (Explotación Científica de PAZ, proyecto PAZ-AO-001-050) que proporcionó todas las imágenes de PAZ y a la Compañía Anglo American que proporcionó el MDE Lidar y los puntos de control en terreno.

6. BIBLIOGRAFÍA

Abdikan, S., Bayik, C., Calò, F., Pepe, A., Balik Sanli, F. (2022). Evaluation of DEM derived by repeat-pass X-band stripmap mode PAZ data, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B3-2022, 243–248, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-243-2022>.

Ahmadabadi, A., Karam, A., Saffari, A., Yazdanpanah, M. (2020). Estimation of surface and elevation displacement of Ardestan sand dunes using radar interferometry and spectral indices: *Quant Geomorphol Res.*, 5(8), 1–17.

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline Diferential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>

Braun, A. (2021). Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data—open applications, techniques, and limitations”. *Open Geosciences* 13(1), 532–69. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0246>

Crosetto, M., Crippa, B. (2000). Quality Assessment of Interferometric SAR DEMs. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII (part B1), 46–53.

Dabiri, Z., Hölbling, D., Abad, L., Helgason, J.K., Sæmundsson, Þ., Tiede, D. (2020). Assessment of landslide-induced geomorphological changes in Hitardalur Valley, Iceland, using Sentinel-1 and Sentinel-2 data *Appl Sci.*, 10, 5848. <https://doi.org/10.3390/app10175848>

DGA. (2019). Boletines hidrológicos y pronóstico anuales, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas de Chile. Retrieved March 11, 2019, from <http://www.dga.cl/Paginas/default.aspx>

Ferretti, A., Monti-Guarnieri A., Prati, C., Rocca, F., Massonnet, D. (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry *Processing and Interpretation*. *ESA Publications, TM-19*. ISBN 92-9092-233-8.

Goldstein, R.M., Werner, C.L. (1998). *Radar interferogram filtering for geophysical applications*. California: California Institute of Technology. <https://doi.org/10.1029/1998GL900033>

Kakavas, M., Nikolakopoulos, K.G., Kyriou, A., Zagana, H. (2018). Assessment of freely available DSMs for automatic karst feature detection. *Arab J Geosci.*, 11, 388. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3654-8>

Makeineci, H.B., Karabörk, H. (2016). Evaluation Digital Elevation Model Generated by Synthetic Aperture Radar Data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLI-B1, 57-62. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B1-2>

Maune, D.F. (2007). *Digital elevation model technologies and applications: the DEM user's manual*. 2nd edn. Bethesda: ASPRS; 2007.

Schillaci, C., Braun, A., Kropáček, J. (2012). Terrain analysis and landform recognition. In: Cook SJ, Clarke LE, Nield J, editors. *Geomorphological techniques: online edition*. London: *British Society for Geomorphology*; p. 1–18.

Vidal, P., Pérez, W., Fernández-Sarría, A. (2019). Evaluación de Modelos Digitales de Elevación (MDEs) obtenidos a partir de imágenes Sentinel-1 en la Región Metropolitana de Chile. *Teledetección: hacia una visión global del cambio climático* (Eds. Luis A. Ruiz, Javier Estornell, Abel Calle y Juan Carlos Antuña-Sánchez). pp. 373-376.