

GENERACIÓN DE MDE UTILIZANDO INTERFEROMETRÍA RADAR CON DATOS DEL SATÉLITE SAOCOM Y CONTROL DE LA PRECISIÓN EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Soto Leandro ⁽¹⁾, Sisti Jorge, Pérez Elvio

Cátedras de SIG, Cartografía y Percepción Remota / Dto. de Agrimensura, Calle 47 esq. 116 (1900) La Plata, ⁽¹⁾ leandro.soto@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCION

Los objetivos del presente proyecto consistieron en el diseño e implementación de una metodología para la elaboración de modelos digitales de elevaciones (MDE) con niveles de confiabilidad conocida, en zona de paisaje llano de la Provincia de Buenos Aires, utilizando técnicas de interferometría radar (InSAR), aplicadas a las imágenes capturadas por los satélites de teleobservación argentinos SAOCOM 1A y 1B.

Se trabajó en el estudio y evaluación de las distintas técnicas y herramientas de procesamiento de imágenes SAR, realizándose los procesos adecuados de co-registración, generación de interferograma, filtrado, desenvolvimiento de fase, conversión de fase a elevación y geo codificación de los MDE resultantes.

El proyecto se enfocó en la estimación de la calidad geométrica de los modelos obtenidos, utilizando puntos de control de alta calidad posicional vinculados a la Red Geodésica Nacional, relevados con técnicas de observación GNSS.

Finalmente, se planteó como objetivo la generación y control de productos de alto valor agregado, tales como modelos vectoriales de curvas de nivel, mapas de pendientes y perfiles topográficos, de potencial valoración para ser implementados en aplicaciones de obras civiles, hidráulicas, viales y otras relacionadas.

DESCRIPCION GENERAL

Los modelos digitales de elevaciones (MDE), constituyen un producto de gran utilidad para la generación de la cartografía, el apoyo a obras civiles de distinta envergadura, soporte a la gestión de emergencias, al desarrollo de los catastros, la prospección de hidrocarburos y en general, a la investigación aplicada a las ciencias de la Tierra.

En base a lo expuesto, consideramos que el desarrollo de una metodología confiable para la producción de éstos, permite lograr productos de calidad y en particular de precisiones conocidas, sumamente valiosos para el desarrollo de la sociedad.

Este proyecto, se centró en la confección de varios MDE de la región comprendida entre las localidades de Verónica y Punta Indio, en la provincia de Buenos Aires (aprox. 35° 21' 8.6" Latitud Sur, 57° 17' 21.4" Longitud Oeste). Dicha región presenta un paisaje típico de llanura pampeana Bonaerense y con un uso de suelo mayoritariamente rural, centrada en las instalaciones de la Base Aeronaval de Punta Indio, perteneciente a la Armada Argentina.

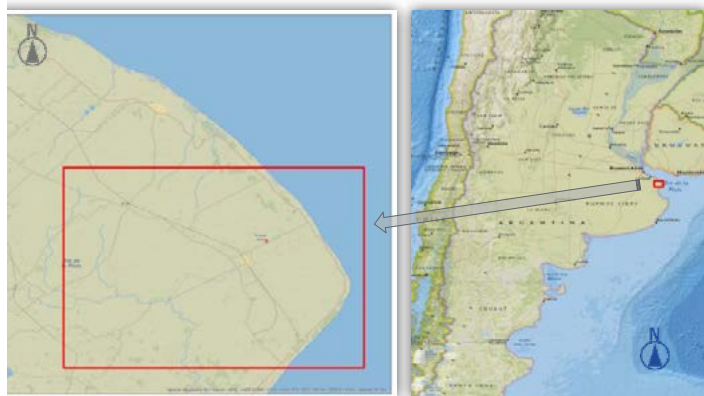


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

Entendemos que esta metodología, puede llegar a ser extrapolable a toda la eco región Pampeana, la cual se extiende por la mayor parte de la provincia de Buenos Aires, La Pampa, Córdoba y Santa Fe.

El objetivo principal del proyecto consistió en realizar comprobaciones del nivel de calidad plani-altimétrica de los modelos obtenidos con metodologías predefinidas, comparándolos con una cantidad considerable de puntos de control relevados en campo con técnicas topogeodésicas de alta precisión.

MATERIALES Y METODOLOGÍA UTILIZADOS

Imágenes Radar de Apertura Sintética (SAR):

Se realizó una cuidadosa selección de las imágenes SAR más adecuadas para el proyecto, trabajando sobre los catálogos de imágenes de CONAE¹. Se realizó el análisis sistemático de la coherencia entre las imágenes que conformaron los distintos pares interferométricos así como las líneas de base perpendicular y temporal de cada par, verificándose que fuesen acordes a las necesidades del procesamiento InSAR ([InSAR processing: a practical approach – ESA, B-8]²)

Procesamiento de los pares interferométricos y obtención de los MDE InSAR:

El procesamiento de los pares interferométricos se realizó utilizando las herramientas 'Sentinel-1 Toolbox (S1TBX) - SNAP³' de la ESA, la herramienta de desenvolvimiento de fase (Phase Unwrapping) SNAPHU⁴ del 'Stanford Radar Interferometry Research Group' y una versión de evaluación del software comercial ENVI + Sarscape⁵ (temporalmente facilitada por la empresa distribuidora oficial de ENVI en Argentina).

La generación del MDE se basó en la siguiente metodología [InSAR processing: a practical approach – ESA, B-11]:

- Co-registración de las imágenes que conformaron los pares interferométricos y análisis de los resultados de la estimación de parámetros de calidad del resultado.
- Remuestreo y superposición (stack) de las imágenes 'Master' y 'Slave' de cada uno de los pares.
- Generación de los interferogramas y cálculo de los mapas de coherencia.

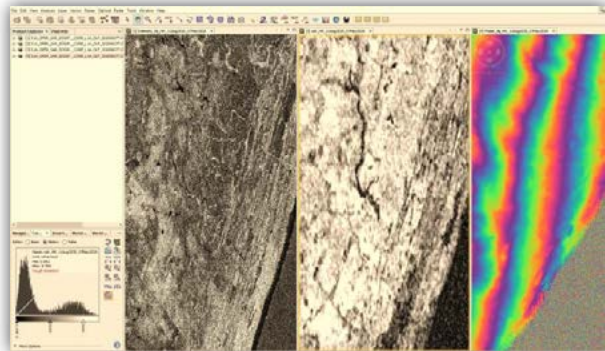


Figura 2: Imagen de amplitud, coherencia e interferograma generados con SNAP.

- Reconstrucción del MDE utilizando técnicas de desenvolvimiento de fase (Phase unwrapping), llevando fase a elevación y finalmente, utilizando un modelo de geoide transformación geométrica para la obtención de alturas (cotas) ortométricas.
- Geocodificación (transformación a coordenadas de terreno), de los modelos generados.

ANÁLISIS PRELIMINARES

Los primeros resultados obtenidos fueron muy satisfactorios, pudiéndose observar niveles de coherencia elevados entre las imágenes utilizadas. Se calcularon valores de coherencia con medias aritméticas que rondaron los 0,7, valor más que aceptable teniendo en cuenta la zona

¹ <https://catalog.saocom.conae.gov.ar/catalog/>

² https://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/InSAR_Principles_Guidelines_for_SAR_Interferometry_Processing_and_Interpretation_br_ESA_TM-19#.Y_-kerskRE8.link

³ <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>

⁴ <https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>

⁵ <https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI-SARscape>

de trabajo². Esto resultó muy alentador considerando que el área de estudio se ubica en la llanura pampeana con zonas bajas anegadizas. Efectivamente y en relación con lo antedicho, las regiones de menor coherencia se correspondieron con la ubicación de cursos de agua, bañados y zonas de vegetación de muy alta densidad.

Los primeros modelos obtenidos presentaron niveles de calidad bastante homogénea, que se correlacionaron satisfactoriamente con el MDE-Ar del IGN⁶ de 30 metros de resolución espacial y precisión altimétrica de aprox. 2 metros).

En la (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se presenta una comparación absoluta preliminar de cotas sobre dos modelos, a lo largo de un perfil arbitrario (verde MDE-Ar IGN de 30m de resolución y rojo MDE InSAR SAOCOM, observándose un alto nivel de correspondencia entre las líneas de tendencia de ambos.

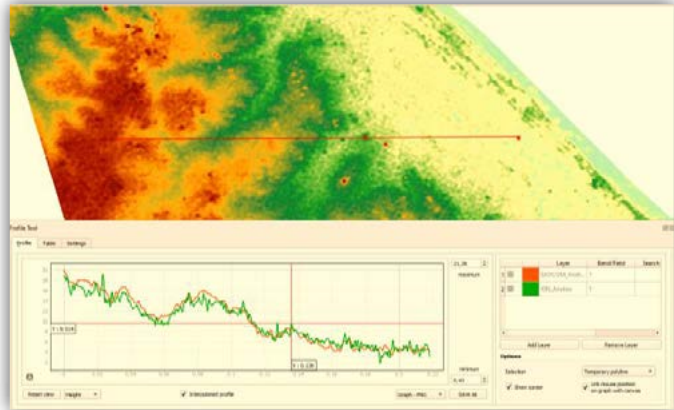


Figura 3: Comparación absoluta de un modelo obtenido.

En rojo DEM Saocom, en verde MDE-Ar

Una vez que contamos con los MDE generados y verificados contra otros productos similares, comenzamos con el trabajo de planificación de los relevamientos de campo, que nos permitieron mejorar nuestro mecanismo de control y aseguramiento de calidad.

RELEVAMIENTO EN CAMPO DE PUNTOS DE APOYO Y CONTROL GEOMÉTRICO

Se realizaron tareas de campo para el relevamiento y determinación de puntos de apoyo y de control geométrico, utilizando las siguientes tecnologías y métodos:

Equipos receptores GNSS Geodésicos doble frecuencia de última generación, marca Topcon modelo Hiper VR, doble frecuencia y 4 constelaciones satelitales para la determinación de puntos 3D, utilizando métodos estáticos, stop-go y cinemático dependiendo del tipo de uso que a posteriori se le daría a cada uno. Como base para el relevamiento GNSS, se utilizó una ubicación dentro de la Base Aeronaval de Punta Indio (BAPI), por cuestiones logísticas y de seguridad. (Figura 3.)

En total se relevaron unos 15.000 puntos de control.



Figura 3: Campaña de relevamiento GNSS. estación Base y móvil montado en el vehículo.

El procesamiento de los datos para la obtención de dichos puntos se realizó con el programa GPS/GNSS Magnet Tools versión 7.1 de la firma Topcon.

A fin de asegurar la calidad de la posición correspondiente al punto base, se obtuvieron a través del sitio Web del proyecto RAMSAC (Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo),

⁶ <https://www.ign.gov.ar/content/nuevo-modelo-digital-de-elevaciones-para-la-rep%C3%BAblica-argentina-0>

los datos de observación de las dos estaciones permanentes más cercanas y que formaron junto a nuestro punto base, la figura más robusta posible para realizar un ajuste. Obteniendo de esta forma, una figura triangular de lados similares con las estaciones IGN1 y SMDM. Fijando tanto las coordenadas horizontales como verticales de estos puntos geodésicos, se realizó el procesamiento y correspondiente ajuste de nuestro punto base (Base1), obteniéndose así, una precisión en todo el relevamiento del orden de 15mm.

CONTROLES GEOMÉTRICOS Y EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LA CALIDAD DE LOS MODELOS OBTENIDOS

Para llevar a cabo los controles geométricos, se realizaron análisis estadísticos basados en los histogramas de las diferencias de altura encontradas entre los modelos InSAR y los puntos de control, como así también, en sus diagramas de dispersión.

Se confecciona una tabla con los valores de altura extraídos de todos los DEM bajo análisis, en cada punto relevado con GNSS. Para su obtención, se utilizó QGIS, software de SIG de licencia gratuita, que mediante el uso de operaciones de análisis espacial permitió extraer la información necesaria. Esta información representa en forma matricial, la cota de cada punto relevada en campo con GNSS, agregando, además, los valores de altura para dicha ubicación relativa a cada uno de los modelos de terreno bajo análisis, de esta forma, se pudo comparar punto a punto las diferencias encontradas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

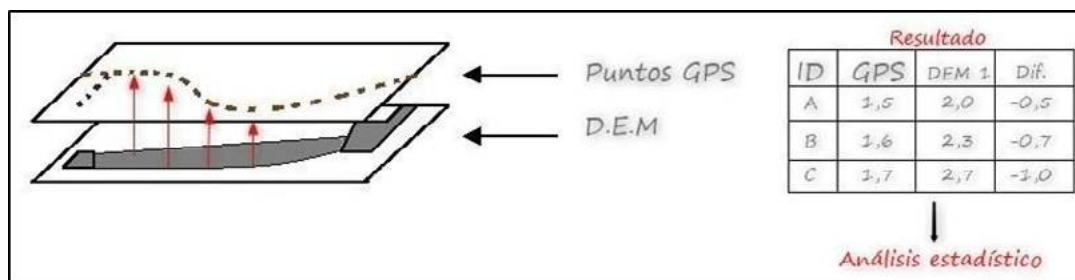


Figura 5.: Proceso de extracción de cotas de los raster en los puntos de control

La herramienta utilizada para procesar todos los modelos se denomina "Point Sampling Tool"⁷. Luego, los datos fueron llevados a MS Excel (15.000 filas por 16 columnas, un total de 240.000 datos), donde se mostró en la primera columna las alturas relevadas con GNSS y en las demás, las alturas correspondientes a los modelos analizados para cada punto y su correspondiente "ID".

Una vez organizados los datos, se procedió a calcular los correspondientes indicadores estadísticos de calidad, utilizando los programas de análisis "R"⁸ y "RStudio"⁹.

La aplicación de estas herramientas requirió la definición de código de programación para el procesamiento de los datos.

En el siguiente punteo, se indican los pasos seguidos para generar los principales estadísticos analizados, que luego, replicamos tantas veces como modelos se analizaron.

- Se eliminaron los "outliers", es decir, aquellas observaciones atípicas o anormales en una muestra de datos, estos tienen gran peso y afectan potencialmente la estimación de parámetros (por ejemplo, la media). Es por ello, el primer paso fue limpiar estos datos atípicos para seguir trabajando.
- Se crearon "Box Plots" o diagramas de cajas, donde se muestra por medio de gráficos la distribución de una variable numérica, utilizando los valores de los cuartiles, los extremos (el mínimo y el máximo) y valores raros o atípicos (outliers), que como

⁷ <https://plugins.qgis.org/plugins/pointsamplingtool/>

⁸ <https://www.r-project.org/about.html>

⁹ <https://www.rstudio.com/>

anteriormente los quitamos, nos permitirá ver de manera gráfica, los nuevos intervalos en comparación a los anteriores (con outliers).

- Se crearon gráficos “Q-Q Plots” o cuantil–cuantil, para permitirnos observar cuan cerca estaba la distribución del conjunto de datos, de una distribución normal. A modo de simplificación, cuando el gráfico Q-Q plot se aproxima a una recta, estamos hablando de una distribución normal o gaussiana, en cambio si se trata de una curva, nos permite inferir, que los datos podrían estar afectados por errores sistemáticos.
- Finalmente creamos histogramas, son gráficos que muestran de forma agrupada, el número de veces que se repiten los datos de una muestra. Para completar los histogramas anteriores, se calculan los mínimos, máximos, medias, medianas, primer y tercer cuartil.

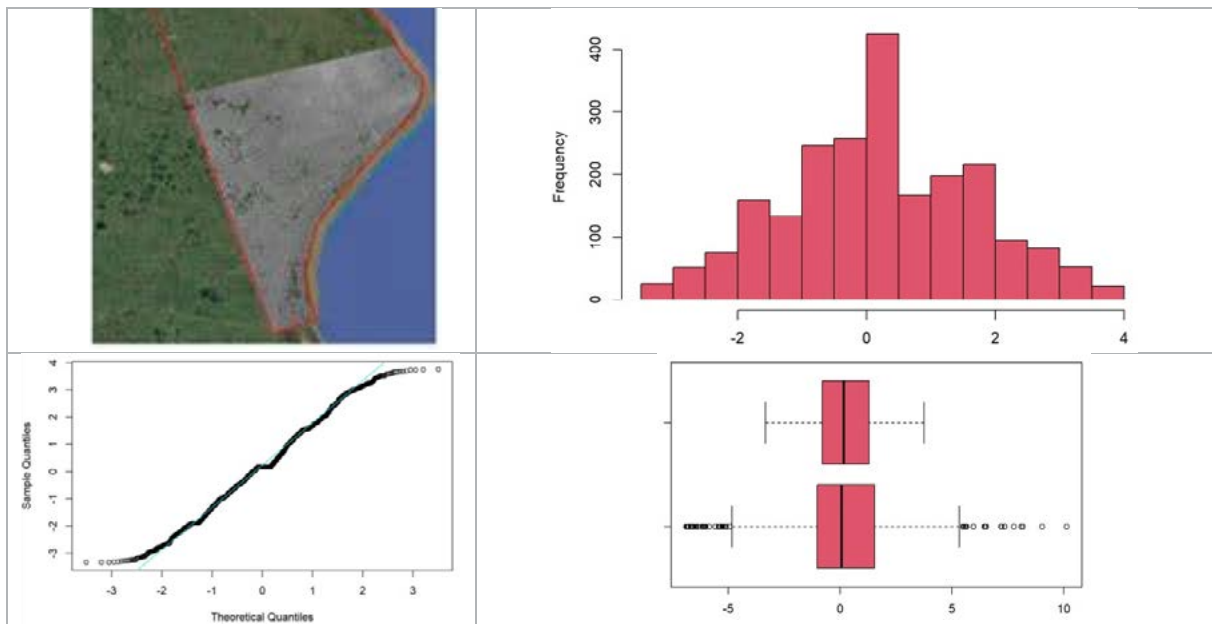


Figura 4: Superposición de MDE e imagen satelital. Histograma de frecuencia de errores determinados, Gráficos Q-Q y Box Plot calculados con RStudio para uno de los modelos.

RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados a los que se arribó finalmente con el desarrollo del proyecto fueron los siguientes:

Se logró implementar correctamente una metodología de procesamiento de pares de imágenes SAOCOM para la generación de modelos digitales de elevaciones controlados geoméricamente con técnicas estadísticas que permitieron evaluar su calidad.

El procesamiento se desarrolló tanto con software de uso libre “SNAP”, como con software comercial “ENVI-SARscape”, obteniéndose en ambos casos excelentes resultados.

La metodología aplicada puede ser replicable en escenarios estándar de producción, así como los mecanismos de control de calidad y las validaciones geométricas analizadas.

Se lograron obtener muy buenos resultados, aun en las difíciles condiciones que impone el terreno llano del área de estudio, como así también, las condiciones de alta humedad del suelo y su variabilidad estacional.

En base a los controles geoméricos realizados a los DEM obtenidos y los valores de precisión alcanzados (del orden de 1m a 2m en altimetría, dependiendo del valor de coherencia en cada zona) permitió plantear su uso en las siguientes áreas de la ingeniería:

Proyectos de Ingeniería Civil: Diseño de proyectos viales y ferroviarios. Evaluación, diseño y mantenimiento de proyectos de recursos hídricos para la generación de energía, riego y abastecimiento de agua en general a áreas urbanas.

Sensores remotos y Cartografía: Referencia altimétrica para la generación de Ortoimágenes. Generación de curvas de nivel, mapas de sombreado de relieve y puntos acotados para la confección de cartografía topográfica.

Recursos naturales: Base altimétrica para el análisis de flujos de vientos para el estudio de recursos eólicos o la dinámica de contaminantes. Análisis de cuencas visuales para planificación urbana o de redes de comunicaciones inalámbricas.

En agricultura de precisión, para la determinación de aptitud del terreno y el análisis de riesgo de erosión.

La posibilidad de su aplicación en todas estas áreas se potencia con la ventaja de la disponibilidad de modelos muy actualizados que pueden ser analizados de forma periódica para la detección de cambios y la consecuente toma de decisiones.

En referencia al análisis de los resultados obtenidos del procesamiento de señales SAR en banda L (30 – 15 cm) para la generación de DEM, pudimos observar que se presentan muchas ventajas en referencia a la coherencia de los pares interferométricos, siendo bastante inmunes a los cambios estacionales o a los cambios normales de humedad de suelos que se puedan observar entre imágenes, incluso de grandes bases temporales (varios meses), manteniéndose un alto nivel de coherencia entre las imágenes.

Respecto a la experiencia adquirida por el grupo de trabajo en el transcurso del proyecto, podemos decir que, si bien aún queda mucho por aprender y mucho trabajo por realizar, hemos experimentado un gran crecimiento en el manejo de la tecnología SAR, sus principios, potenciales aplicaciones y manejo de herramientas para su manipulación y procesamiento de datos. Los conocimientos adquiridos nos han mostrado caminos hacia un nuevo mundo de posibilidades y desafíos que esperamos poder transitar en el futuro cercano, gracias al valioso recurso que nos acercan los satélites SAOCOM.

CONCLUSIONES

Como conclusiones generales del análisis de los DEM generados y evaluados, podemos resaltar que tal como se esperaba, los pares de imágenes con bases temporales extremadamente grandes (más de 250 días) presentan los peores niveles de coherencia, siendo los pares que poseen una base temporal de 8 días los que presentan niveles de coherencia óptimos.

Las diferencias en las imágenes de coherencia obtenidas del procesamiento de los pares SAOCOM con respecto a las Sentinel analizadas en otras experiencias es muy grande, siendo notorias las ventajas aportadas por la banda L. No se llegan a observar, al menos en los modelos analizados, diferencias sustanciales en diferentes periodos estacionales, sin embargo, la zona estudiada no tiene lotes de cultivo de relevancia donde podrían realizarse análisis más detallados para el caso de diferentes explotaciones agrícolas y su impacto en los DEM.

Las precisiones logradas en los modelos realizados con imágenes SAOCOM son muy superiores a las obtenidas con imágenes Sentinel-1, podemos atribuir estas diferencias al incremento de los niveles de coherencia de los pares interferométrico SAOCOM. Las diferencias encontradas entre los DEM SAOCOM y los puntos de control tienen una media que ronda los 0,5~0,8 m con una desviación estándar del orden de 1,5 m. Estas precisiones varían en función de las diferentes coberturas de suelo, principalmente en áreas anegadas, urbanas y de vegetación prominente.

Se observa que en la porción de los DEM's afectados por montes o cobertura vegetal de gran altura, es recomendable realizar un enmascarado selectivo para quitar estas zonas y luego, a través de un proceso de interpolación, rellenar los vacíos con un algoritmo adecuado que se ajuste a las variaciones del terreno. Esto se podría lograr, por ejemplo, realizando una clasificación supervisada desde una imagen satelital óptica y una vez identificadas las zonas de interés se las debería quitar del modelo.

REFERENCIAS

- Zhilin Li, Qing Zhu, Christopher Gold (2005), "Digital Terrain Modeling - Principles and Methodology", CRC Press
- Euillades Pablo y Vénere Marcelo (2003), "Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros", Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, Vol. 19, 1, 33-44.
- CONAE (2021), "Catálogo SAOCOM / Manual de Usuario", https://catalogos.conae.gov.ar/catalogo/docs/SAOCOM/Manual_Usuario_SAOCOM_Enero2021.pdf
- Ferretti Alessandro y otros (2007), "InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation", ESA Publications, Part A – Part B.
- Veci Luis (2016), "SENTINEL-1 Toolbox: SAR Basics Tutorial", Array Systems Computing Inc. <http://www.array.ca/>, <http://step.esa.int>.