



Ministerio de Ciencia,  
Tecnología e Innovación  
**Argentina**

Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos  
Operacionales de la Misión SAOCOM

## **Anuncio de Oportunidad para el Desarrollo de Modelos Digitales de Elevación y su Uso en Aplicaciones SAR**

Proyecto N° 2

**- Informe Final -**

**“DESARROLLO DE UN MODELO DIGITAL DE TERRENO  
URBANO, UTILIZANDO MODELOS DIGITALES DE  
ELEVACIÓN INTERFEROMÉTRICOS AJUSTADOS Y  
VALIDADOS MEDIANTE DATOS GNSS. CASO ROSARIO –  
ARGENTINA”**

PI: Mgtr. Lic. Laura Balparda  
ORGANISMO: Área de Sensores Remotos (ASR)  
Escuela de Agrimensura  
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA)  
Universidad Nacional de Rosario (UNR)

Fecha: 8 de julio de 2022



Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos  
Operacionales de la Misión SAOCOM

ÍNDICE

1. Objetivos del Proyecto .....	3
General.....	3
Específicos.....	3
2. Equipo de trabajo.....	3
3. Descripción general .....	4
4. Imágenes solicitadas y recibidas .....	5
Imágenes SAOCOM 1A/1B .....	5
Imágenes COSMO–SkyMed .....	5
5. Descripción de Actividades .....	6
Red Geodésica de Rosario Densificada.....	6
Generación de MDE InSAR .....	7
Parámetros <i>Graph Builder</i> para los pares SAOCOM.....	7
Parámetros <i>Graph Builder</i> para los pares COSMO–SkyMed .....	9
Procesamiento manual.....	11
Proceso de ajuste y validación.....	12
Cálculo de indicadores de calidad de ajuste .....	13
Geolocalización de las intersecciones de ejes de calle .....	14
Análisis exploratorio de datos espaciales .....	14
Modelos digitales de terreno.....	15
Capacitación .....	16
Difusión .....	17
6. Resultados esperados.....	21
7. Resultados obtenidos .....	21
Red Geodésica de Rosario Densificada.....	21
Modelos digitales de elevación interferométricos SAOCOM 1A/1B .....	21
Modelos digitales de elevación interferométricos COSMO–SkyMed .....	25
Calidad de los MDE desarrollados .....	27
Geolocalización de las intersecciones de ejes de calle .....	28
Estimación de parámetros a usar en la interpolación geoestadística .....	28
Modelado preliminar de los datos extraídos del MDE COSMO–SkyMed .....	30
8. Inconvenientes encontrados por los que no pudieron ser alcanzados los resultados esperados .....	31
9. Conclusiones y líneas abiertas.....	31
Conclusiones.....	31
Líneas abiertas .....	32
10. Referencias .....	33



Ministerio de Ciencia,  
Tecnología e Innovación  
**Argentina**

Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos  
Operacionales de la Misión SAOCOM

## 1. Objetivos del Proyecto

### General

- Generar un Modelo Digital de Terreno, a partir de un Modelo Digital de Elevaciones creado utilizando interferometría radar, ajustado y validado usando datos del Sistema Global de Navegación por Satélite. Rosario, Santa Fe, Argentina.

### Específicos

- Generar un modelo digital de elevaciones utilizando interferometría radar, usando pares interferométricos ALOS-PALSAR (2010), COSMO–SkyMed (2010) y SAOCOM 1A/1B (2020-2022), variando el modo, polarización y sentido de órbita.
- Densificar la Red Geodésica de Rosario, con nuevos puntos relevados con el Sistema Global de Navegación por Satélite.
- Georreferenciar los modelos digitales de elevaciones, por mínimos cuadrados considerando los puntos de la Red Geodésica de Rosario Densificada.
- Identificar y cuantificar errores en los modelos digital de elevaciones, usando datos de la Red Geodésica de Rosario Densificada.
- Ajustar y validar los modelos digitales de elevaciones, usando datos Red Geodésica de Rosario Densificada.
- Calcular indicadores de bondad de ajuste para cada uno de los modelos digitales de elevaciones obtenidos o disponibles, en comparación con datos de la Red Geodésica de Rosario Densificada.
- Extraer los datos de elevación en las intersecciones de los ejes de calles, en un modelo digital de elevaciones seleccionado.
- Aplicar un método de interpolación para obtener un modelo digital de terreno.

## 2. Equipo de trabajo

- Área de Sensores Remotos, Escuela de Agrimensura, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario: PI Laura Rita Balparda y Diego Alejandro Germán López.
- Dirección de Cartografía. Municipalidad de Rosario: Guillermo Dannenberg y Néstor Ramires.
- Centro de Investigación y Estudios de Matemática. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Universidad Nacional de Córdoba: Pilotta, Elvio Ángel.
- Escuela de Posgrado y Educación Continua. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario: María Crisitna Pacino.
- Escuela de Agrimensura, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario: Dardo Delorenzi y Gustavo Noguera.
- INVAP Sociedad del Estado: Gabriel Platzeck.
- Unidad de Emergencias y Alertas Tempranas. Comisión Nacional de Actividades Espaciales: Mario Lanfri.



## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

- VENG S.A. Maestría en Aplicaciones de Información Espacial. Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich”. Comisión Nacional de Actividades Espaciales. Universidad Nacional de Córdoba. Pasantía realizada en *Agenzia Spaziale Italiana*: O'Connor, Jorge Guillermo.

### 3. Descripción general

En el presente proyecto se planteó la generación de modelos digitales de terreno (MDT) a partir de modelos digitales de elevaciones (MDE) obtenidos a partir de un desarrollo propio, para la ciudad de Rosario (Argentina).

En una primera etapa, se realizó la generación de MDE utilizando la técnica de interferometría SAR (InSAR) con imágenes de los sensores satelitales SAOCOM y COSMO–SkyMed, considerando diferentes parámetros de adquisición de imágenes y procesamiento.

Dada la existencia, en la ciudad de Rosario de una Red geodésica para el año 2011 (Acosta *et al.*) basada en una pre-existente en el año 2001, en el marco del presente proyecto se realizó la densificación de la misma, llevando a cabo campañas de relevamiento de puntos de control mediante *Post Processed Kinematic* (PPK) o *Real Time Kinematic* (RTK).

A continuación, cada MDE InSAR generado, se georreferenció en X, Y, Z utilizando un 60% de puntos de la Red Geodésica de Rosario Densificada (RGRD), siguiendo los métodos propuestos por Eulliades y Vénere (2003) y Zhou *et al.* (2011).

Luego, se realizó un **ajuste** regional y local de cada uno de los MDE InSAR georreferenciados usando el 60% de los datos de la RGRD (subgrupo A) y posteriormente la **validación** de los mismos empleando el 40% restante de los puntos de control de dicha red (subgrupo B), utilizando interpolación *spline* de primer grado con filtro pasa bajo y *spline* cúbico.

Para cada uno de los MDE ajustados y validados, se obtuvieron indicadores de bondad de ajuste, aplicando estadísticas básicas y cálculos de error (error cuadrático medio). Asimismo, se aplicó el mismo procesamiento estadístico al modelo digital de elevaciones aerofotogramétrico MDE-Ar 5m, desarrollado por el Instituto Geográfico Nacional de Argentina.

En la última etapa, se eligió el MDE COSMO-SkyMed con el menor error cuadrático medio y se obtuvieron las alturas elipsoidales de los puntos correspondientes a las intersecciones de ejes de calles. Estos datos fueron analizados utilizando técnicas de análisis espacial y modelados para obtener MDT preliminares, donde se emplearon algoritmos de interpolación determinísticos tales como de *Inverse Distance Weighted* (IDW) y *Multilevel b-spline*.

Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

#### 4. Imágenes solicitadas y recibidas

##### Imágenes SAOCOM 1A/1B

Se estableció una programación para la solicitud de captura de imágenes ascendentes Stripmap S8 cuadripolarizadas en formato L1A de nuestra área de estudio, en el período de abril a agosto de 2021. La cancelación de las solicitudes se explicita en inconvenientes encontrados (sección 8).

Las imágenes recibidas fueron encontradas en el catálogo SAOCOM haciendo búsquedas por localización de nuestra área de interés. En la tabla 1 se indican las fechas de captura y de descarga de las imágenes solicitadas mediante el catálogo, donde se observa que las últimas 7 fueron identificadas en la etapa final del Anuncio de Oportunidad SAOCOM-DEM (AO-SAOCOM-DEM).

Tabla 1: Listado imágenes SAOCOM 1A/1B solicitadas, recibidas y trabajadas

Imagen	Satélite	Fecha captura	Procesamiento geolocalización	Fecha procesamiento
EOL1ASARSAO1A1078570	1A	29/05/2020	OLF	08/10/2020
EOL1ASARSAO1A2031984	1A	29/05/2020	OLF	08/07/2021
EOL1ASARSAO1A2084176	1A	29/05/2020	OLF	16/07/2021
EOL1ASARSAO1A1241528	1A	07/12/2020	OLVF	07/12/2020
EOL1ASARSAO1A2003215	1A	07/12/2020	OLF	03/07/2021
EOL1ASARSAO1A4271866	1A	21/09/2021	OLF	19/04/2022
EOL1ASARSAO1B4277397	1B	29/09/2021	OLF	20/04/2022
EOL1ASARSAO1B4279620	1B	29/09/2021	OLF	20/04/2022
EOL1ASARSAO1B4389891	1B	18/12/2021	OLF	04/05/2022
EOL1ASARSAO1A4389886	1A	26/12/2021	OLF	04/05/2022
EOL1ASARSAO1B4269595	1B	24/03/2022	OLF	19/04/2022
EOL1ASARSAO1A4269300	1A	01/04/2022	OLF	19/04/2022

Nota: Figuran resaltados los pares utilizados

##### Imágenes COSMO–SkyMed

Con respecto al satélite COSMO–SkyMed se solicitaron 7 imágenes satelitales ascendentes Stripmap Himage y Single-look Complex Slant, dos correspondientes al par utilizado en la tesis de maestría de O'Connor (2021) y las 5 restantes referidas a nuevas adquisiciones. En la tabla 2 se deja constancia las imágenes solicitadas, recibidas y trabajadas en el AO-SAOCOM-DEM.

## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

Tabla 2: Listado imágenes COSMO-SkyMed recibidas y trabajadas.

Imagen	Satélite	Polarización	Fecha captura
EL20100822_103859_121	CSK1	HH	22/08/2010
EL20100830_103856_221	CSK2	HH	30/08/2010
EL20210613_101803_421	CSK4	VV	13/06/2021
EL20210614_101805_221	CSK2	VV	14/06/2021
EL20210816_101805_421	CSK4	HH	31/07/2021
EL20210817_101809_221	CSK4	HH	16/08/2021
EL20210731_101806_421	CSK2	HH	17/08/2021

Nota: Figura resaltado el par utilizado

## 5. Descripción de Actividades

### Densificación de la Red Geodésica de Rosario

Los puntos GNSS a utilizar para el ajuste y validación deben ser inamovibles, visibles en la imagen, perdurables en el tiempo, distribuidos homogéneamente, guardando cierta equidistancia entre ellos, cubriendo toda la zona de trabajo, emplazados en áreas abiertas y llanas (O'Connor, 2020).

Para llevar a cabo el proceso de georreferenciación, ajuste y validación de los MDE generados se procedió a densificar una red geodésica obtenida en el trabajo final de la carrera de Ingeniería en Agrimensura, llevado a cabo por Gustavo Acosta, Guillermo Dannenberg y Germán Tanabe, bajo el título “Red Geodésica para la ciudad de Rosario” (Escuela de Agrimensura - FCEIA - UNR). Dicho trabajo se realiza tomando como base la Red Geodésica de la ciudad de Rosario que data del año 2001, establecida en el marco de referencia POSGAR 94 Faja 5. Los puntos obtenidos en el trabajo final constituyen el primer conjunto de datos (ADT) (figura 1).

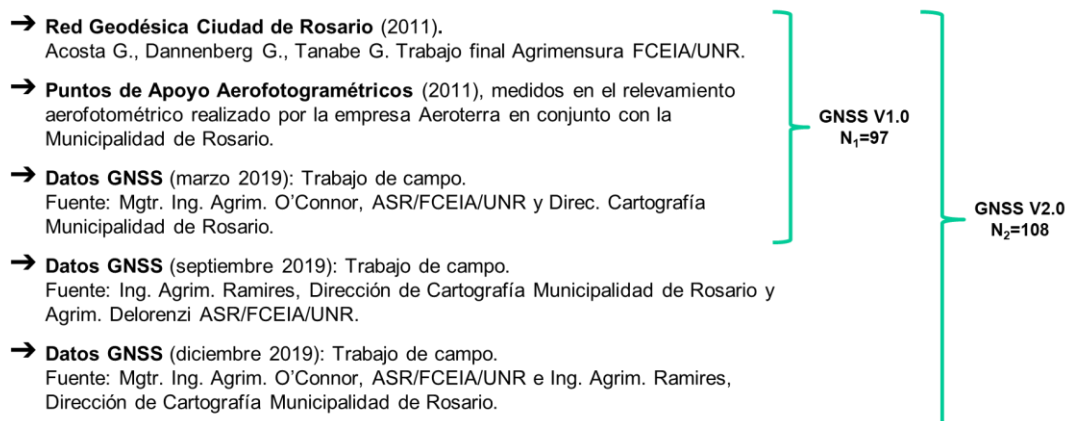


Figura 1: Versiones de la Red Geodésica Densificada de la ciudad de Rosario

## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

El segundo conjunto de datos consistió en una nube de puntos utilizada como Punto de Apoyo Fotogramétrico (PAF)<sup>1</sup> medido con receptores satelitales GNSS doble frecuencia L1/L2 en modo diferencial (O'Connor, 2021).

El tercer conjunto de puntos fue relevado en campo en varias campañas por el Ing. Agrim. O'Connor, en el marco de su tesis de maestría MAIE (IG-CONAE-UNC), en conjunto con la Cátedra de Geodesia de la carrera de Ingeniería en Agrimensura de la UNR y la Municipalidad de Rosario. El procesamiento de los mismos fue realizado por el Grupo de Geodesia Satelital de Rosario, a cargo de la Estación Permanente UNRO. Estos puntos se tomaron siguiendo la premisa de estar ubicados en áreas despejadas como:

- playones deportivos municipales,
- áreas cementadas o de tierra,
- rotondas y avenidas,
- baldíos.

Se documentaron los puntos relevados en una monografía que incluye las áreas participantes, el número de Punto de Apoyo Interferométrico (PAI), fecha de medición, operador, sistema de referencia y sus coordenadas, marco de referencia y sus coordenadas, altura elipsoidal, croquis general y fotos del emplazamiento.

### Generación de MDE InSAR

Para poder obtener los MDE InSAR se utilizaron dos etapas, la primera corresponde a una programación de tareas a ejecutarse utilizando el *Graph Builder* de SNAP para posteriormente terminar con una serie de pasos manuales en SNAP y QGIS. La metodología y las especificaciones técnicas que se presentan a continuación tienen como base el trabajo de tesis de O'Connor (2020) con ajustes realizados en función a los conocimientos del equipo de trabajo.

### Parámetros en *Graph Builder* para los pares SAOCOM

En la figura 2 se presenta el diagrama de procesamiento SAOCOM en SNAP utilizando *Graph Builder*. En las operaciones *Read* y *Read(2)* se leen las dos imágenes del par interferométrico a procesar. Luego, en las operaciones *Subset* y *Subset(2)* se generan los recortes de las imágenes al área de interés, especificando los límites norte 32° 51' 14.4" lat. S., sur 33° 3' 3.6" lat. S., este 60° 39' 3.6" lon. O. y oeste 33° 3' 3.6" lon. O., seleccionando solamente las bandas correspondientes a las polarizaciones HH y VV.

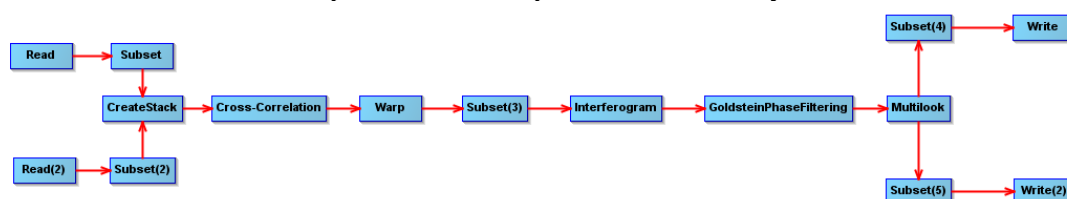


Figura 2: Diagrama de procesamiento de pares SAOCOM en SNAP Graph Builder

<sup>1</sup> Relevados en conjunto por Aeroterra y Municipalidad de Rosario, 2011.



## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

En la corrección se emplearon las operaciones de *CreateStack*, *Cross-Correlation* y *Warp*. En la primera se seleccionó la imagen Master utilizando la opción de *Find Optimal Master*, no se utilizó ningún método de remuestreo en la opción *Resampling Type (NONE)*, se empleó el valor *Orbit* en el ítem *Initial Offset Method* y por último se eligió como extensión de salida en *Output Extents* la opción *Master*. En la segunda operación se utilizaron los valores que se presentan en la tabla 3.

Tabla 3: Parámetros utilizados en la operación *Cross-Correlation* para el procesamiento de pares SAOCOM

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
<i>Number of GCP's:</i>	20000	<i>Fine Registration Window Width:</i>	32
<i>Apply Fine Registration:</i>	si	<i>Fine Registration Window Height:</i>	32
<i>Test GCPs are on land:</i>	no	<i>Coherence Threshold:</i>	0.6
<i>Estimate Initial Coarse Offset:</i>	no	<i>Cross-Correlation based registration:</i>	si
<i>Coarse Registration Window Width:</i>	128	<i>Fine Accuracy in Azimuth:</i>	16
<i>Coarse Registration Window Height:</i>	128	<i>Fine Accuracy in Range:</i>	16
<i>Row Interpolation Factor:</i>	4	<i>Fine Window oversampling factor:</i>	16
<i>Column Interpolation Factor:</i>	4	<i>Coherence based registration:</i>	no
<i>Max Iterations:</i>	10	<i>Use Coherence Sliding Window:</i>	no
<i>GCP Tolerance:</i>	0.25	<i>Coherence Window Size:</i>	3

La tercera operación tuvo como parámetros el *RMS Threshold (pixel accuracy)* en 0.001, el *Warp Polynomial Order* en 1 y como método de interpolación una convolución cúbica definida en el parámetro *Interpolation Method* con la opción *Cubic convolution (6 points)*.

Luego se recortó el par corregido para que queden incluidos la menor cantidad de píxeles sin valores. Se utilizó la operación *Subset(3)* sin seleccionar ninguna banda en la opción *Source Bands*, lo que por defecto significó la utilización de todas. Se mantuvieron los metadatos de la imagen de origen habilitando el ítem *Copy Metadata*. Se definió el sector a recortar utilizando filas y columnas seleccionando la opción *Pixel Coordinates* junto con los valores de X igual a 128, Y en 0, *Width* en 2114 y *Height* en 5996. El *Sub-sampling* en X e Y quedó definido en 1.

La generación del interferograma se realizó con la operación *Interferogram* con los valores presentados en la tabla 4.

Tabla 4: Parámetros utilizados en la operación *Interferogram* del procesamiento de SAOCOM

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
<i>Subtract flat-earth phase:</i>	si	<i>Output Elevation:</i>	no
<i>Degree of "Flat Earth" polynomial:</i>	5	<i>Output Orthorectified Lat/Lon:</i>	no
<i>Number of "Flat Earth" estimation points:</i>	1001	<i>Include coherence estimation:</i>	si
<i>Orbit interpolation degree:</i>	5	<i>Square Pixel:</i>	si
<i>Subtract topographic phase:</i>	no	<i>Independent Window Size:</i>	no
<i>Digital Elevation Model:</i>	no	<i>Coherence Range Window Size:</i>	10
<i>Tile Extension %:</i>	no	<i>Coherence Azimuth Window Size:</i>	18

Para aplicar el filtro de Goldstein al interferograma se utilizó el proceso *GoldsteinPhaseFiltering*, definiéndose cuatro sets de valores a utilizar en las opciones *Adaptive Filter Exponent in (0,1]*, *FFT (Fast Fourier Transform) Size*, *Window Size* y *Coherence Threshold in [0,1]*. Los valores utilizados se visualizan en la tabla 5. La opción *Use coherence mask* no se utilizó.



Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos  
Operacionales de la Misión SAOCOM

Tabla 5: Parámetros utilizados en la operación *GoldsteinPhaseFiltering* del procesamiento de SAOCOM

Parámetro	Sigla	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
<i>Adaptive Filter Exponent in (0,1]:</i>	FE	0.1	0.1	0.3	1.0
<i>FFT Size:</i>	FFT	64	256	256	64
<i>Window Size:</i>	WS	3	3	3	3
<i>Coherence Threshold in [0,1]:</i>	CT	0.2	0.2	0.2	0.2

En la operación *Multilook* se emplearon todas las bandas presentes, se utilizó la opción de *Ground Range Square Pixel* con valores de 2 en *Range Looks* y 4 en *Azimuth Looks*. Se deshabilitó la salida de intensidad.

Se generaron los *Subset(4)* y *Subset(5)* que corresponden respectivamente a las polarizaciones HH y VV, donde se seleccionaron las bandas del interferograma: i, q, coherencia, intensidad y fase. Se copiaron los metadatos y se mantuvo el tamaño del subset.

Por último se almacenó el resultado final de todo el procesamiento en dos archivos con las operaciones *Write* y *Write(2)* teniendo en cuenta para el nombre la siguiente nomenclatura:

- Subset\_S1N1N2\_OPER\_SAR\_EOSSP\_CORE\_L1A\_OLF\_Fecha1\_Fecha2\_Stack\_Ifg\_Flt\_FE\_FFT\_WS\_CT\_ML\_PP

donde:

- N1, N2 = A o B
- Fecha1, Fecha2 = fecha de las imágenes que forman el par en formato AAAAMMDD
- FE = 01 (0.1), 03 (0.3), 10 (1.0)
- FFT = 064 (64), 256 (256)
- WS = 03 (3)
- CT = 02 (0.2)
- PP = HH o VV según polarización

Los sufijos Stack, Ifg, Flt, ML son colocados automáticamente para identificar los procesos realizados de corrección, interferograma, filtro de Goldstein y *multilook*.

### Parámetros en *Graph Builder* para los pares COSMO–SkyMed

En la figura 3 se presenta el diagrama de procesamiento COSMO–SkyMed en SNAP utilizando *Graph Builder*. La parametrización utilizada en las operaciones de *Read*, *Read(2)*, *Subset* y *Subset(2)* es la misma exceptuando la selección de las polarizaciones ya que las imágenes son monopolarizadas.

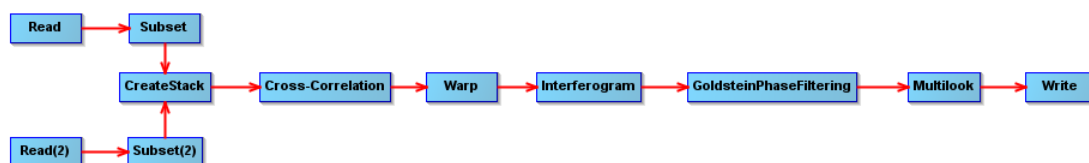


Figura 3: Diagrama de procesamiento de pares COSMO–SkyMed en SNAP *Graph Builder*

Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos  
Operacionales de la Misión SAOCOM

En la corrección se emplearon las operaciones de *CreateStack*, *Cross-Correlation* y *Warp*. En la primera se seleccionó la imagen Master utilizando la opción de *Find Optimal Master*, no se utilizó ningún método de remuestreo en la opción *Resampling Type* (*NONE*), se empleó el valor *Orbit* en el ítem *Initial Offset Method* y por último se eligió como extensión de salida en *Output Extents* la opción *Master*. En la segunda operación se utilizaron los valores que se presentan en la tabla 6.

Tabla 6: Parámetros utilizados en la operación *Cross-Correlation* del procesamiento de COSMO–SkyMed

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
<i>Number of GCP's:</i>	20000	<i>Fine Registration Window Width:</i>	32
<i>Apply Fine Registration:</i>	si	<i>Fine Registration Window Height:</i>	32
<i>Test GCPs are on land:</i>	no	<i>Coherence Threshold:</i>	0.6
<i>Estimate Initial Coarse Offset:</i>	no	<i>Cross-Correlation based registration:</i>	si
<i>Coarse Registration Window Width:</i>	128	<i>Fine Accuracy in Azimuth:</i>	16
<i>Coarse Registration Window Height:</i>	128	<i>Fine Accuracy in Range:</i>	16
<i>Row Interpolation Factor:</i>	4	<i>Fine Window oversampling factor:</i>	16
<i>Column Interpolation Factor:</i>	4	<i>Coherence based registration:</i>	no
<i>Max Iterations:</i>	10	<i>Use Coherence Sliding Window:</i>	no
<i>GCP Tolerance:</i>	0.25	<i>Coherence Window Size:</i>	3

La tercera operación tuvo como parámetros el *RMS Threshold (pixel accuracy)* en 0.001, el *Warp Polynomial Order* en 1 y como método de interpolación una convolución cúbica definida en el parámetro *Interpolation Method* con la opción *Cubic convolution (6 points)*.

La generación del interferograma se realizó con la operación *Interferogram* con los valores presentados en la tabla 7.

Tabla 7: Parámetros utilizados en la operación *Interferogram* del procesamiento de COSMO–SkyMed

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
<i>Subtract flat-earth phase:</i>	si	<i>Output Elevation:</i>	no
<i>Degree of "Flat Earth" polynomial:</i>	5	<i>Output Orthorectified Lat/Lon:</i>	no
<i>Number of "Flat Earth" estimation points:</i>	1001	<i>Include coherence estimation:</i>	si
<i>Orbit interpolation degree:</i>	5	<i>Square Pixel:</i>	si
<i>Subtract topographic phase:</i>	no	<i>Independent Window Size:</i>	no
<i>Digital Elevation Model:</i>	no	<i>Coherence Range Window Size:</i>	10
<i>Tile Extension %:</i>	no	<i>Coherence Azimuth Window Size:</i>	18

En la aplicación del filtro de Goldstein al interferograma se utilizó el proceso *GoldsteinPhaseFiltering*, definiéndose los parámetros *Adaptive Filter Exponent in (0,1]* en 1.0, *FFT Size* en 64, *Window Size* en 3 y *Coherence Threshold in [0,1]* en 0.2. La opción *Use coherence mask* no se habilitó.

En la operación *Multilook* se utilizaron todas las bandas presentes, se empleó la opción de *Ground Range Square Pixel* con valores de 4 en *Range Looks* y 4 en *Azimuth Looks*. Se deshabilitó la salida de intensidad.

Por último, se almacenó el resultado final de todo el procesamiento en un archivo con la operación *Write* teniendo en cuenta para el nombre la siguiente nomenclatura:

## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

- Subset\_CSKSN1N2\_SCS\_B\_HI\_0A\_HH\_RA\_SF\_Fecha1\_Fecha2\_Stack\_Ifg\_Flt\_ML

donde:

- N1, N2 = 1, 2, 4
- Fecha1, Fecha2 = fecha de las imágenes que forman el par en formato AAAAMMDD

Los sufijos Stack, Ifg, Flt, ML son colocados automáticamente para identificar los procesos realizados de corregestración, intergerograma, filtro de Goldstein y *multilook*.

### Procesamiento manual

Los procesos finales de desenrollado de fase, pasaje de fase a elevación, la corrección de distorsiones geométricas por topografía, exportación a GeoTiff y recorte a los límites de Rosario, indicados en la figura 4, se realizaron de forma manual debido a que no se pudo automatizar el procesamiento con el software SNAPHU.

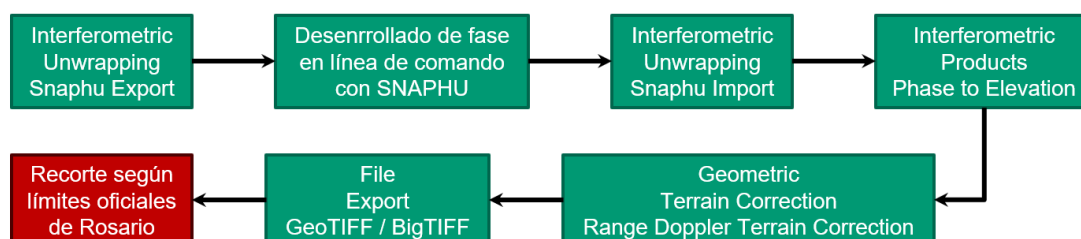


Figura 4. Diagrama de flujo del procesamiento en modo manual en SNAP (operaciones en color verde) y QGIS (operaciones en color rojo).

El procesamiento manual de los 3 pares SAOCOM, 8 archivos de salida por cada par (2 polarizaciones y 4 sets de parámetros del filtro de Goldstein), se inició en SNAP con la exportación empleando la operación SNAPHU Export, seleccionando una carpeta de trabajo, definiendo el *Statistical-cost mode* en TOPO, método inicial en MCF (*minimum cost flow*), *Number of Tile Rows* y *Number of Tile Columns* en 1 (dado que el subset es chico y no es necesario el multiprocesamiento), *Number of Processors* en 4, *Row Overlap* y *Column Overlap* en 0 (dado que se procesa en un solo sector) y *Tile Cost Threshold* en 500.

Se ejecutó por fuera de SNAP, en modo línea de comando, el programa SNAPHU especificando el archivo de configuración snaphu.conf generado para cada par exportado.

Posteriormente la banda desenrollada se procedió a importar con la operación SNAPHU Import, seleccionando la imagen sin desenrollar en *1-Read-Phase/Source Product*, la salida de la ejecución del SNAPHU en modo comando en *2-Read-Unwrapoed-Phase/Source Product* y por último se seleccionó el nombre del archivo de salida en *4-Write*. Al nombre original del archivo de salida se agregó el sufijo UnW.

Para el pasaje de fase desenrollada a elevaciones se utilizó el comando *Phase to Elevation* en el que se definieron el archivo de trabajo (*Source Product*) y el de salida (*Target Product*)

## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

dentro de los parámetros de entrada/salida (*I/O Parameters*) y se seleccionaron como parámetros de procesamiento (*Processing Parameters*) el modelo digital de elevaciones (*Digital Elevation Model*) y el método de resampleo del modelo digital de elevaciones (*DEM Resampling Method*), eligiendo SRTM 1Sec HGT (*Auto Download*) y *BILINEAR\_INPERPOLATION* respectivamente.

Para realizar la corrección de distorsiones geométricas por topografía se empleó el comando *Range Doppler Terrain Correction*, en el que se definió el archivo de trabajo (*Source Product*) y el de salida (*Target Product*) dentro de los parámetros de entrada/salida (*I/O Parameters*), y se seleccionaron como parámetros de procesamiento (*Processing Parameters*) el modelo digital de elevaciones (*Digital Elevation Model*) en SRTM 1Sec HGT (*Auto Download*), el método de resampleo del modelo digital de elevaciones (*DEM Resampling Method*) en *BILINEAR\_INPERPOLATION*, el método de resampleo de la imagen (*Image Resampling Method*) en *BILINEAR\_INPERPOLATION*, el sistema de proyección del archivo de salida (*Map Projection*) en POSGAR 94 / Argentina 5 y se seleccionaron la opción DEM en *Output bands for*, dejando los demás parámetros por defecto.

Posteriormente se almacenó la imagen generada utilizando el formato GeoTIFF empleando el comando *Export* de SNAP. Este archivo luego se recortó utilizando los límites oficiales de la ciudad de Rosario, obtenidos a través del portal de datos abiertos Rosario Datos<sup>2</sup>.

### Proceso de ajuste y validación

La tarea de ajuste y validación se codificó en lenguaje Python 3.7, considerando los procesos presentes en el diagrama de flujo de la figura 5. Este proceso se basa en la propuesta realizada por O'Connor (2020) modificada por el equipo de trabajo del presente proyecto.

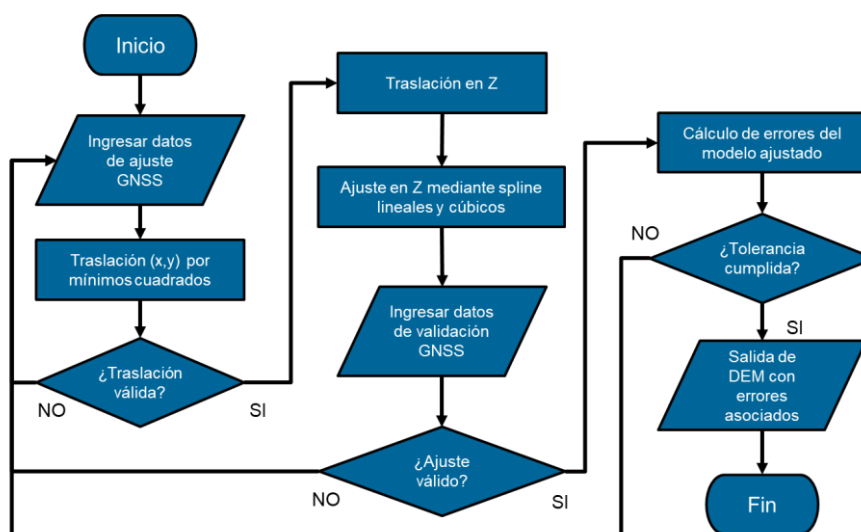


Figura 5: Diagrama de flujo del proceso de georreferenciación, ajuste y validación de los DEM interferométricos generados.

<sup>2</sup> Rosario Datos. Portal de datos abiertos de la Municipalidad de Rosario, provincia de Santa Fe, Argentina. [Consulta: 15/03/2020]. Disponible en: <https://datosabiertos.rosario.gob.ar/dataset/límites-del-municipio>



Ministerio de Ciencia,  
Tecnología e Innovación  
**Argentina**

## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

La georreferenciación de los MDE se realizó mediante la comparación de los valores de altura elipsoidal respecto a datos de la RGRD, considerando el subgrupo A los cuales fueron seleccionados utilizando muestreo simple al azar. Siguiendo a Euillades (2003), se procedió a realizar los siguientes pasos:

- Ingreso de los puntos de control de la red geodésica densificada.
- Traslación en (x,y) buscando el menor RMS para desplazamientos en X, Y del DEM, trabajando la traslación a nivel de pixel.
- Traslación en z mediante media geométrica.

Luego de aplicar la traslación planimétrica (x,y) y en altimetría (z) se procede al ajuste mediante superficies generadas a partir de spline lineales a los cuales se les aplica un filtro de pasa bajos para suavizar los vértices y las líneas de intersección entre estos últimos. A la par, se generan superficies spline cúbicas. Finalmente se combinan estas superficies mediante matemática de bandas, Es decir se calcula un promedio ponderado de las superficies antes obtenidas (DEM ajustado en (x,y,z), superficies spline lineal y spline cúbico) (O'Connor, 2020).

Se procede posteriormente a validar los diferentes MDE a partir de la comparación con las alturas elipsoidales del subgrupo B de la RGRD, siguiendo en esta etapa con la propuesta de Euillades y Venere (2003).

De acuerdo a Zhou et al. (2011), inicialmente se propone en la validación utilizar los puntos de validación de la red geodésica densificada, calculando las diferencias de alturas entre los DEMs obtenidos y la red geodésica densificada, así como también el uso de estadísticas básicas de dichas diferencias (media, mediana y desvío) y error cuadrático medio.

### **Cálculo de indicadores de calidad de ajuste**

Por último, se calcularon indicadores de calidad de ajuste basados en estadísticas básicas para cada uno de los MDE interferométricos generados, así como también para el MDE-Ar 5m aerofotogramétrico, en comparación a la red geodésica densificada.

Debido a que el MDE-Ar 5m se encuentra referenciado al modelo de geoide GEOIDE-Ar16, se realizó el pasaje de altura ortométrica a elipsoidal. A tales fines, al modelo MDE-Ar 5m se sumó la altura que los puntos tienen con respecto a dicho geoide.

Para el cálculo de los indicadores se utilizaron los puntos de validación de la RGRD v1.0 (subgrupo B). Se obtuvo la diferencia de altura elipsoidal existente entre los puntos de validación y los MDE detallados anteriormente. A partir de dichas diferencias, teniendo en cuenta los puntos que posean datos en todos los MDE, se calcularon estadísticas básicas (mínimo, máximo, media, mediana y desvío) y el error cuadrático medio, que permitieron determinar una medida del ajuste de los diferentes modelos de elevación.



## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

### Geolocalización de las intersecciones de ejes de calle

Para poder generar un MDT se procedió primeramente a obtener los puntos a utilizar para extraer las alturas elipsoidales del mejor MDE InSAR generado. Se definió en tal sentido usar la geolocalización de las intersecciones de ejes de calle como un método válido para la ubicación de los puntos a partir de los cuales realizar la extracción de alturas elipsoidales de los MDE, por ser una superficie plana de dimensión acorde a la resolución espacial esperada.

Se comenzó empleando los ejes de calles<sup>3</sup> del portal Datos Abiertos Rosario, disponible en formato *Geography Markup Language*. Luego se obtuvo una base cartográfica de los nodos de los segmentos de ejes de calle donde los mismos corresponden principalmente a las intersecciones de calle y nodos de segmentos sin intersección (rotonda, calles curvas, principio o fin de una calle, entre otros). A continuación, se eliminaron los nodos duplicados y los correspondientes a calles con un ancho menor a 18 metros. El conjunto de puntos fue dividido según los distritos descentralizados de Rosario para la corrección fina del emplazamiento utilizando como fuente de ajuste el fotomosaico del año 2013 disponible en el Servicio de Mapa Base (WMS) de la Ciudad de Rosario<sup>4</sup>.

### Análisis exploratorio de datos espaciales

En el estudio de la variable altura elipsoidal se utilizan herramientas o técnicas de la estadística espacial, dado que permite analizar datos que corresponden a la medición de variables aleatorias en distintos sitios (puntos del espacio o agregaciones espaciales) de una región.

Resulta de interés estudiar la dependencia espacial de la variable altura elipsoidal, definida como la relación funcional existente entre los valores de una variable en una unidad del espacio y en unidades vecinas. Este efecto de la dependencia espacial o también conocida como autocorrelación espacial, puede tener signo positivo, negativo o nulo.

La autocorrelación espacial positiva se refiere a la asociación entre valores similares de una variable y locaciones cercanas. Por otro lado, si en un espacio las unidades con valores altos se encuentran rodeadas de unidades con valores bajos o viceversa, existe autocorrelación espacial negativa (Olaya, 2014, Siabato & Guzman-Manrique, 2019). Por último, la ausencia de autocorrelación espacial en una variable geográfica se presenta cuando ésta se distribuye de forma aleatoria sobre el espacio.

Además, se utilizan técnicas del Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE) que permiten describir y visualizar la distribución espacial, identificar ubicaciones atípicas (outliers espaciales) y descubrir parámetros de asociación espacial (conglomerados espaciales), los cuales orientan a la identificación de diferentes estructuras espaciales y otras formas de inestabilidad espacial o no estacionariedad espacial.

---

<sup>3</sup> Rosario Datos. Portal de datos abiertos de la Municipalidad de Rosario, provincia de Santa Fe, Argentina. [Consulta: 03/10/2020]. Disponible en: <https://datosabiertos.rosario.gob.ar/dataset/ejes-de-calles>

<sup>4</sup> Servicio de Mapa Base (WMS) de la Ciudad de Rosario. Servicio WMS Rosario. Fotomosaico Foto2013. [Consulta: 12/12/2020]. Disponible en: <https://www.rosario.gob.ar/wms/planobase>





Ministerio de Ciencia,  
Tecnología e Innovación  
**Argentina**

## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

A tales fines se calculan medidas como el índice I de Moran para evaluar el grado de autocorrelación en un conjunto de datos espaciales. Este indicador varía entre -1 y 1 y su esperanza es  $E[I] = -1/(n-1)$  bajo la hipótesis nula de aleatoriedad espacial. Si la estimación de I es mayor al de su valor esperado indica autocorrelación espacial positiva. En cambio, si es menor indica autocorrelación espacial negativa y cuando está cercano a  $E[I]$  (cercano a cero cuando n crece) indica ausencia de autocorrelación espacial. En la significación del I de Moran se comprueba la hipótesis de no autocorrelación espacial, usando el test de hipótesis basado en supuestos de normalidad o en distribuciones experimentales.

El índice I de Moran es un indicador global de la dependencia espacial de la variable de interés y para identificar la existencia de estructuras regionales se utiliza su versión local LISA (por su sigla en inglés Local Indicators of Spatial Association). Su representación gráfica en un mapa facilita la identificación de puntos calientes hot spots o atípicos espaciales, cuya intensidad depende de la significación asociada de los datos estadísticos analizados (Anselin, 1995).

Por último, en la detección de valores extremos y outliers se utiliza el enfoque de la estadística clásica. Se ajusta un modelo de regresión lineal, donde la variable respuesta es la variable en estudio “altura elipsoidal” y el predictor es el retardo espacial. Luego, se calculan una serie de estadísticos de diagnóstico, tales como *Leverage* (valores de la matriz Hat), Distancia de Cook (observaciones influyentes son valores atípicos con alto *leverage*), *DFfits* (una medida de como los valores predichos de las observaciones cambian entre el modelo ajustado con todos los datos y el modelo ajustado con la i-ésima observación omitida), *DFbetas* (una versión del *DFits* para los coeficientes beta) y *COVRATIO* (mide el aumento en la incertidumbre sobre los coeficientes de regresión cuando se omite la observación i-ésima).

La estadística espacial y el análisis exploratorio de datos espaciales permiten analizar la distribución de la variable “altura elipsoidal” en el espacio, identificar el modelo que explica su variabilidad y estimar una serie de parámetros, los cuales son usados en la etapa siguiente de modelado y predicción kriging.

### Modelos digitales de terreno

Empleando los datos obtenidos de la extracción de alturas elipsoidales en las intersecciones de ejes de calle, con el fin de incursionar en la generación de MDT, se emplearon de forma inicial los algoritmos de *Inverse Distance Weighted* (IDW) y *Multilevel b-spline interpolation*. El primero se encuentra implementado en la biblioteca de herramientas de GRASS<sup>5</sup> como v-surf.idw<sup>6</sup> y el segundo corresponde a un proceso de SAGA<sup>7</sup>.

Un método de interpolación determinístico es el que calcula el valor para una celda de la cuadrícula empleando únicamente los valores de las propiedades físicas de las muestras de elevación, de modo tal de crear superficies basadas en los puntos medidos y en fórmulas matemáticas (Childs, 2004; Goovaerts, 1997). El más difundido es el *Inverse Distance*

<sup>5</sup> Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) v7.8

<sup>6</sup> Autor: Michael Shapiro, U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory. Algoritmo mejorado por Paul Kelly.

<sup>7</sup> System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v2.3.2

Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

*Weighted* (IDW), el cual pondera los resultados en función inversa de la distancia, tal como plantea Toro y Melo (2009), suponiendo que “cada punto medido tiene una influencia local que disminuye con la distancia. Le asigna una ponderación mayor a los puntos más cercanos por predecir, que a aquellos que se encuentran más alejados, de ahí el nombre de distancia inversa ponderada”. Los parámetros utilizados se visualizan en la tabla 8.

Tabla 8. Parámetros empleados en el proceso de interpolación IDW

Parámetro	Valor
Capa vectorial de entrada	Alturas elipsoidales de intersecciones de ejes de calle
Número de puntos de interpolación	12
Parámetro de potencia	1.1
Columna de la tabla de atributos con valores a interpolar	Campo con las alturas elipsoidales
Tamaño de celda de la región de GRASS GIS 7	10
IDW Interpolado	Nombre de archivo de salida

El *Multilevel b-spline interpolation* es otro algoritmo determinístico para la interpolación espacial de datos dispersos desarrollado por Lee, Wolberg y Shin (1997). Utiliza una jerarquía de grillas de control de grueso a fino para crear una secuencia de funciones *B-spline* bicúbicas, cuya suma se aproxima a la función de interpolación deseada. Los valores empleados se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Parámetros utilizados en el proceso de interpolación *Multilevel B-Spline*

Parámetro	Valor
<i>Points</i>	Capa de alturas elipsoidales de las intersecciones de ejes de calle
<i>Attribute</i>	Campo con las alturas elipsoidales
<i>Method</i>	<i>with B-Spliner refinement</i>
<i>Maximum Level</i>	Campo con las alturas elipsoidales
<i>Cellsize</i>	10
<i>Grid</i>	Nombre de archivo de salida

## Capacitación

A continuación, se enuncian distintas instancias de formación en las cuales los integrantes del equipo de trabajo del presente proyecto ocuparon el rol de estudiante, docente u organizador.



Ministerio de Ciencia,  
Tecnología e Innovación  
**Argentina**

## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

- ✓ **Maestría:** Aplicaciones de Información Espacial. Córdoba, cohorte: 2018. Organizó: IG-CONAE-FAMAF-UNC. Becario: O'Connor J. G.
- ✓ **Curso:** Interferometría de imágenes radar y sus aplicaciones. Docente: Euillades P. Córdoba, 5 al 11 de noviembre de 2018. Organizó: IG-CONAE-FAMAF-UNC. Asistente: Ramires N.
- ✓ **Curso:** Introducción a las imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR). Buenos Aires, 5 al 7 de junio de 2019. Organizó: CONAE-IGN en el marco del AO-SAOCOM-DEM. Docentes: Camuyrano M., Dadamia D., Soldano A., Grunfeld Brook N. y Palomeque M. Asistentes: Balparda L. y Ramires N.
- ✓ **Curso:** Curso Introductorio a las Imágenes de Radar de Apertura Sintética. Rosario, 30 de septiembre al 4 de octubre de 2019. Organizó: CONAE-EPEC. Asistente: López D.
- ✓ **Curso:** Fotogrametría Digital en ambiente GIS. Rosario, 23 al 25 de octubre de 2019. ASR-EPEC-FCEIA-UNR. Docente: Platzcek G. Asistentes: López D. y Ramires N.
- ✓ **Curso:** Geoestadística. Especialización en Infraestructura de Datos Espaciales. Docentes: Pagura A., Borra V., Balparda L. Rosario, primera edición 24 de julio a 15 de agosto 2020, segunda edición 28 de junio al 3 de julio 2021. Organizó: ASR-EPEC-FCEIA-UNR.
- ✓ **Tesina de grado:** Estudio del comportamiento de la variable altura elipsoidal, utilizando el Análisis Exploratorio de Datos Espaciales. Ciudad de Rosario, año 2010. FCEyE-UNR y ASR-FCEIA. Directora: Borra V. Co-Directora: Balparda L. Tesinista: Suarez M. (en desarrollo).
- ✓ **Curso:** Procesamiento de imágenes de radar de apertura sintética (SAR). Docente: Platzcek G. Rosario, 8 al 12 de noviembre de 2021. Organizó: ASR-EPEC-FCEIA-UNR. Asistentes: Balparda L. y López D.

### Difusión

Desde la fecha de notificación de aprobación, 3 de mayo de 2019, hasta la fecha de finalización del AO SAOCOM MDE, 8 de julio de 2022, el Área de Sensores Remotos junto al equipo de integrantes del presente proyecto, llevaron a cabo la difusión de los avances en eventos académicos e institucionales. A continuación, se mencionan los mismos y se presenta una breve reseña.

#### 1) Reuniones Anuncio de oportunidad SAOCOM MDE

En la Reunión de inicio AO SAOCOM MDE (CONAE-IGN) realizada en Buenos Aires, el 3 y 4 de junio de 2019, la PI Balparda Laura presentó la propuesta de trabajo del ASR, donde estaban identificados los integrantes del equipo de trabajo, los objetivos generales y específicos, los antecedentes del ASR (trabajos relevantes en radar y capacitaciones en InSAR), una síntesis del proyecto, el área de estudio, los datos de entrada a utilizar. También se mencionaron los puntos más relevantes en cada una de las 8 etapas del proyecto, el cronograma inicial, los beneficiarios y el impacto del proyecto en la comunidad (figura 6).

## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM



Figura 6. Autoridades del AO SAOCOM MDE e integrantes del equipo de trabajo ASR/FCEIA/UNR, 4 de junio de 2019, Buenos Aires

La I Reunión de avance AO SAOCOM MDE (CONAE-IGN) se realizó en la modalidad virtual del 27 al 29 de mayo de 2020; a poco menos de 3 meses de iniciado el período de Aislamiento Social Preventivo y Obligatorio (ASPO), a causa de la pandemia covid-19 y por Decreto de Necesidad y Urgencia 297/2020<sup>8</sup>. El ASR participó con tres de sus integrantes residentes en Trelew (Chubut), Rosario (Santa Fe) y Victoria (Entre Ríos). En este contexto, el Ing. O'Connor expuso de manera sucinta el desarrollo de su tesis y el Prof. López se refirió a los problemas en la selección de imágenes COSMO–SkyMed en portales abiertos de internet, así como también a las actividades pendientes y a las modificaciones en el cronograma de trabajo.

La II Reunión de avance AO SAOCOM MDE (CONAE-IGN) ocurrió en Buenos Aires, del 9 al 11 de diciembre de 2020, bajo la modalidad virtual. En esta oportunidad el área informó sobre la revisión realizada al producto “*DEM InSAR COSMO–SkyMed ajustado y validado usando los datos GNSS-V1.0*”, obtenido por el Ing. O'Connor. Este proceso se desarrolló en un marco de trabajo interdisciplinario con la participación de un integrante de la Dirección de Cartografía de la Municipalidad de Rosario (modalidad virtual *home office*), donde se habilitó la transferencia e intercambio de conocimientos teóricos y prácticos en la temática MDE InSAR. En esta etapa se usaron dos equipos informáticos con sistemas operativos y hardware diferentes, a saber: 1) equipo AMD Ryzen 7 3700X 32GB RAM, Windows 10 y 2) notebook Lenovo v110-15ast, Ubuntu 20.4. Con el primer equipo se obtuvo un nuevo producto con mejoras, en tanto que usando *software* libre se presentó un error que no fue posible sortear. También se presentaron los avances realizados en relación al análisis geoestadístico de la altura elipsoidal (GNSS-V1.0)<sup>9</sup>, donde se emplearon técnicas del Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE), modelado de la variabilidad espacial y predicción kriging<sup>10</sup>. A continuación, se mencionaron las actividades de capacitación y transferencia

<sup>8</sup> Boletín Oficial de la República Argentina. Aislamiento social preventivo y obligatorio. Decreto 297/2020. [Consulta: 3 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/227042/20200320>.

<sup>9</sup> GNSS-V1.0 incluye: a) Acosta *et al.* (2011), b) Puntos de apoyo aerofotogramétricos (2011), medidos en el relevamiento fotométrico realizado por la empresa Aeroterra en conjunto con la Municipalidad de Rosario y c) Datos GNSS (marzo, 2019), trabajo de campo de Mgtr. Ing. O'Connor en colaboración con ASR/FCEIA/UNR y Dirección Cartografía de la Municipalidad de Rosario.

<sup>10</sup> Schmidt Strano, E. y Balparda, L. (2019). Análisis geoestadístico de la altura elipsoidal. Monografía aprobada en el curso de doctorado Estadística Espacial (FCEyE-UNR), a cargo de Dra. Ojeda (2019). Material no publicado.



Ministerio de Ciencia,  
Tecnología e Innovación  
Argentina

## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

vinculadas principalmente a la geoestadística<sup>11,12</sup>. Por último, se notificó sobre los problemas referidos a la selección de pares interferométricos COSMO–SkyMed en portales de internet.

La Reunión de cierre del AO SAOCOM DEM (CONAE-IGN) ocurrió en Buenos Aires, del 4 al 6 de mayo de 2022, bajo la modalidad virtual. La exposición estuvo a cargo de Mgtr. Lic. Balparda. En el último encuentro, se enunciaron el objetivo general y los específicos, los datos ráster y GNSS utilizados, el procesamiento interferométrico y el ajuste y validación del MDE. Se compararon el MDE InSAR COSMO–SkyMed, año 2010, obtenido en el marco de la maestría de Ing. O'Connor con el MDE resultante del proceso de revisión realizado por TCS López, Ing. Agrim Ramires y Mgtr. Lic. Balparda, con el acompañamiento de Mgtr. Ing. Agrim. O'Connor. Se presentaron los indicadores de los dos MDE desarrollados. Se mencionó el proceso que permitió la extracción de datos de altura elipsoidal del MDE en las intersecciones de ejes de calles. A continuación, se comentó el Análisis Exploratorio de Datos Espaciales realizado y sus principales resultados. Se mostraron los dos modelos digitales de terreno obtenidos usando Inverse Distance Weighted (IDW) y multilevel B-Spline. Luego se presentaron los tres MDE InSAR SACOM para los años 2020, 2021 y 2022, con sus correspondientes indicadores de ajuste y validación. Posteriormente, se analizaron las estadísticas básicas de las diferencias entre GNSS-V1.0 y los diferentes MDE. Por último, se mencionaron las oportunidades de mejoras, las capacitaciones realizadas y las instancias de difusión en la que participaron sus integrantes en relación al presente proyecto.

## 2) XII Congreso Nacional de Agrimensura

En el XII Congreso Nacional de Agrimensura 2019, organizado por la Federación Argentina de Agrimensura (FADA), llevado a cabo en Mendoza, el 8 de octubre de 2019, el Ing. O'Connor presentó el trabajo “Ajuste y validación de DEMs CSK InSAR en áreas urbanas mediante datos GNSS medidos en campo” con la co-autoría de sus tutores en la ASI Cigna F. y Tapete D., el trabajo a distancia de su director de tesis, integrantes del ASR Balparda L. y López D., así como también de la Dirección de Cartografía de la Municipalidad de Rosario Ramires N. y Dannenberg G. Esta fue la primera vez que se presentaron resultados del trabajo del becario a nivel nacional (figura 7), a saber: la idea general del procesamiento de las imágenes satelitales, justificación de la elección del par interferométrico, mapas que evidencian el procesamiento realizado (obtención del interferograma, aplicación del filtro del Goldstein, multilooking y procesamiento de fase a elevación) y el principal resultado, un MDE InSAR CSK de resolución espacial de 10 m (a partir de datos COSMO–SkyMed, año 2010). También, mostró mapas y estadísticas básicas resultantes de la etapa de ajuste y validación aplicados al MDE InSAR CSK 10m, obtenidos de realizar un desarrollo de programación usando el software Python versión 3.7.

---

<sup>11</sup> Asignatura Geoestadística, de la Especialidad Infraestructura de Datos Espaciales (IDE- EPEC-FCEIA-UNR). Agosto, 2020. Docentes: Dr. Pagura, Mgtr. Borra y Lic. Balparda.

<sup>12</sup> Tesinista Marina Suarez, estudiante de Lic. Estadística, Facultad de Ciencias Económicas y Estadística, UNR (inicio agosto, 2020). Tema: *Estudio del comportamiento de la variable altura elipsoidal de la ciudad de Rosario, utilizando el Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE)*. Directora: Mgtr. Lic. Balparda. En desarrollo.



Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos  
Operacionales de la Misión SAOCOM



Figura 7. Expositor Ing. O'Connor, el 8 de octubre de 2019, Mendoza. Fuente: FADA (2019)

### 3) III Jornada de difusión del Área de Sensores Remotos

La III Jornada de difusión del Área de Sensores Remotos (FCEIA-UNR) se realizó el 12 de diciembre de 2019 en Rosario (figura 8). En esta oportunidad se dio a conocer el informe de inicio del proyecto AO SAOCOM N° 2 correspondiente al Anuncio de Oportunidad SAOCOM DEM (CONAE-IGN), así como también los avances finales en la tesis de Ing. O'Connor.



Figura 8. Expositor Ing. O'Connor y organizadores de la jornada, 12 de diciembre de 2019, Rosario

### 4) Defensa de tesis O'Connor

El 30 de junio de 2020, el Ing. O'Connor realizó su defensa de tesis en la MAIE (IG/CONAE/FAMAF-UNC) con el título “Metodología para ajuste y validación de DEMs InSAR en áreas urbanas con datos GNSS”, modalidad virtual. Bajo la dirección del Dr. Elvio Pilotta, la co-dirección de la Dra. Ing. Francesca Cigna, el asesoramiento metodológico del Dr. Deodato Tapete, la UD Área de Sensores Remotos (FCEIA-UNR) y el apoyo-acompañamiento de un amplio conjunto de personas e instituciones. En la tesis se propone una metodología para obtener un modelo digital de elevaciones mediante interferometría con radar de apertura sintética, ajustado y validado utilizando datos del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) medidos en campo; así como también los resultados de la aplicación de la metodología en el área urbana de la ciudad de Rosario.

### 5) Jornada de Experiencias Innovadoras en Educación en la FCEIA

El 3 de diciembre de 2021 se realizó la VII edición de la “Jornada de experiencias innovadoras en educación en la FCEIA”, modalidad virtual. En dicha oportunidad dos integrantes del proyecto, Mgtr. Lic. Laura Balparda y TCS Diego López, presentaron el trabajo Experiencia multiplicadora del vínculo con el Instituto Gulich en carácter de Unidad de Desarrollo. Posteriormente, el 26 de mayo de 2022, se envió el trabajo extenso para su publicación en



Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos  
Operacionales de la Misión SAOCOM

Memorias de la Jornada (e-book con ISBN), con evaluación por pares (en proceso de compilación). El documento tuvo por objeto explicitar la temática de interés para el ASR (modelos digitales de elevación obtenidos a través de interferometría radar), los antecedentes que posibilitaron la vinculación con el IG, las experiencias que se dieron a consecuencia de la misma y en el marco del AO SAOCOM DEM, cuáles fueron las oportunidades de difusión, los resultados más importantes y las acciones pendientes en las cuales el ASR se encuentra comprometida.

## 6. Resultados esperados

A continuación, se detallan los resultados que se esperaban obtener al inicio del anuncio a partir del desarrollo del presente proyecto:

1. MDE InSAR urbanos utilizando datos ALOS-PALSAR y COSMO-SkyMed, de la ciudad de Rosario.
2. Obtención de la red geodésica de Rosario densificada, con puntos GNSS medidos en terreno, para ajuste y validación de los MDE InSAR urbanos.
3. MDE InSAR urbanos utilizando datos ALOS-PALSAR y COSMO-SkyMed ajustados y validados con datos de la red geodésica de Rosario densificada, en la ciudad de Rosario.
4. Indicador de bondad de ajuste de los MDE InSAR urbanos ajustados y validados.
5. Indicador de bondad de ajuste del MDE-Ar y del MDE aerofotogramétrico del IGN, considerando la red geodésica de Rosario densificada.
6. MDT derivado del MDE con el mejor indicador de bondad de ajuste para la ciudad de Rosario.

## 7. Resultados obtenidos

### Red Geodésica de Rosario Densificada

Los puntos de la RGRD quedaron conformados en la versión 1.0 por 97 puntos y en la versión 2.0 por 108 puntos, siendo su composición la que se describe en la tabla 10.

Tabla 10: Cantidad de puntos GNSS para el ajuste y la validación

Tipo	RGRD v1.0	RGRD v2.0
PAF	22	22
ADT	13	13
GNSS	62	73

### Modelos digitales de elevación interferométricos SAOCOM 1A/1B

Se generaron un total de 24 modelos digitales de elevación a partir de los 3 pares de imágenes SAOCOM 1A/1B seleccionados, utilizando las polarizaciones directas (HH y VV) y los 4 sets de parámetros establecidos en la metodología para el filtro de Goldstein. Del total de

Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos  
Operacionales de la Misión SAOCOM

modelos digitales de elevación se seleccionaron los que presentaban un mejor acercamiento a los valores de las alturas elipsoidales en los puntos de ajuste de la RGRD. El procesamiento con el set 3 de parámetros de filtro de Goldstein brindó el mejor ajuste.

En relación al MDE generado a partir del par SAOCOM 1A con polarización HH del 29/05/2020 y 07/12/2020 (figura 9), el proceso de georreferenciación no requirió corrección en (x,y) y una traslación en z en un valor de 6.12 m, el cual fue restado a los valores obtenidos del MDE. Las estadísticas resultantes del proceso de ajuste y validación son las que se observan en la tabla 11.

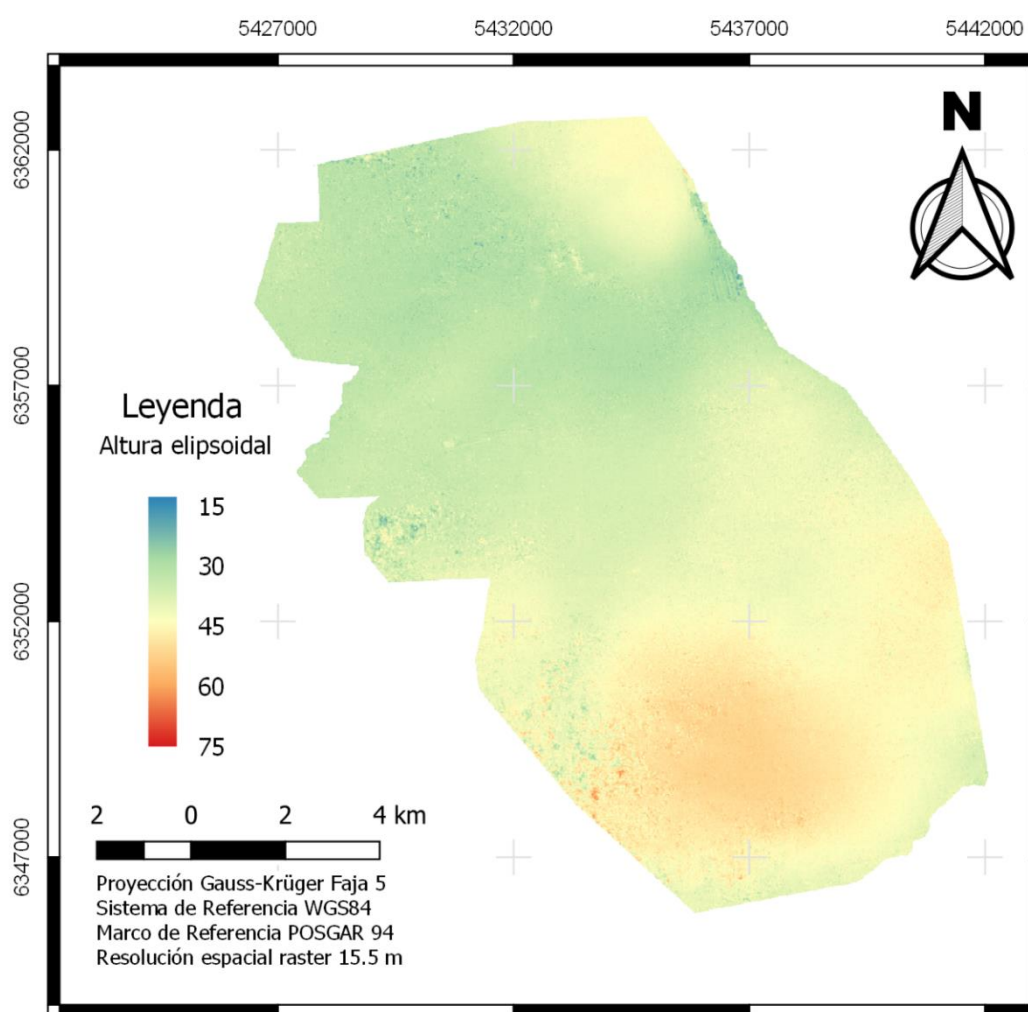


Figura 9: MDE InSAR SAOCOM 1A (29/05/2020 y 07/12/2020), polarización HH, ajustado y validado usando datos GNSS-V1.0.

Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

Tabla 11. Estadísticas MDE InSAR SAOCOM 1A (29/05/2020 y 07/12/2020), polarización HH, ajustados y validados con datos GNSS V1.0

MDE	Mínimo	1° cuartil	Promedio	3° cuartil	Máximo	Desviación Estándar
Original	-6.70	1.74	6.12	9.95	20.12	6.15
Ajustado	-4.98	-1.71	0.29	2.25	8.19	2.86

En relación al MDE generado a partir del par SAOCOM 1A 21/09/2021 y 1B del 29/09/2021 (figura 10), el proceso de georreferenciación requirió corrección planimétrica en (x,y) de (15.5, 31) metros y una traslación en z en un valor de 2.66 m, el cual fue restado a los valores obtenidos del MDE. Las estadísticas resultantes del proceso de ajuste y validación son las que se observan en la tabla 12.

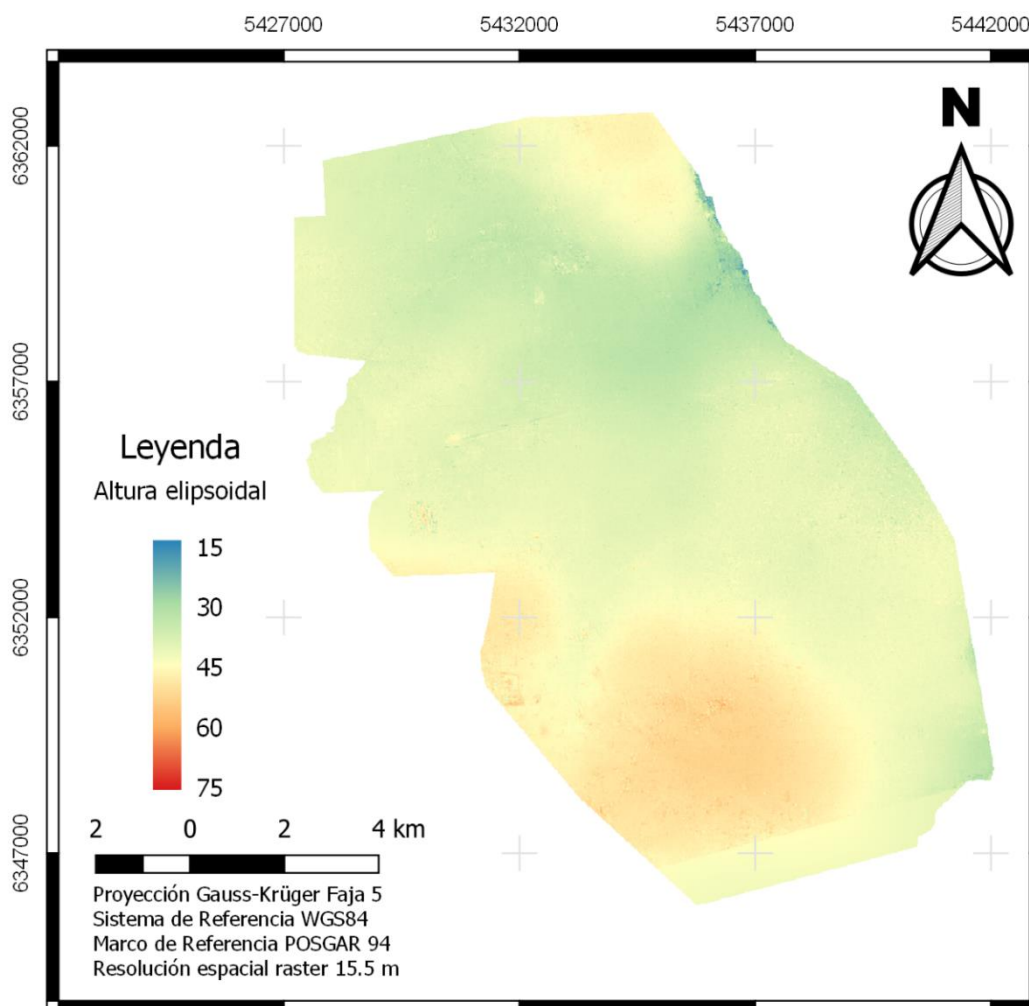


Figura 10: MDE InSAR SAOCOM 1A (21/09/2021) y 1B (28/09/2021), polarización VV, ajustado y validado usando datos GNSS-V1.0.

Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

Tabla 12. Estadísticas MDE InSAR SAOCOM 1A 1A (21/09/2021) y 1B (28/09/2021), polarización VV, ajustados y validados con datos GNSS V1.0

MDE	Mínimo	1° cuartil	Promedio	3° cuartil	Máximo	Desviación Estándar
Original	-5.53	0.96	2.66	4.58	9.61	2.88
Ajustado	-4.11	-0.86	-0.34	0.27	3.43	1.41

En relación al MDE generado a partir del par SAOCOM 1B (24/03/2022) y 1A (01/04/2022) (figura 11), el proceso de georreferenciación requirió corrección planimétrica en (x,y) de (31, 0) metros y una traslación en z en un valor de 7.89 m, el cual fue restado a los valores obtenidos del MDE. Las estadísticas resultantes del proceso de ajuste y validación son las que se observan en la tabla 13.

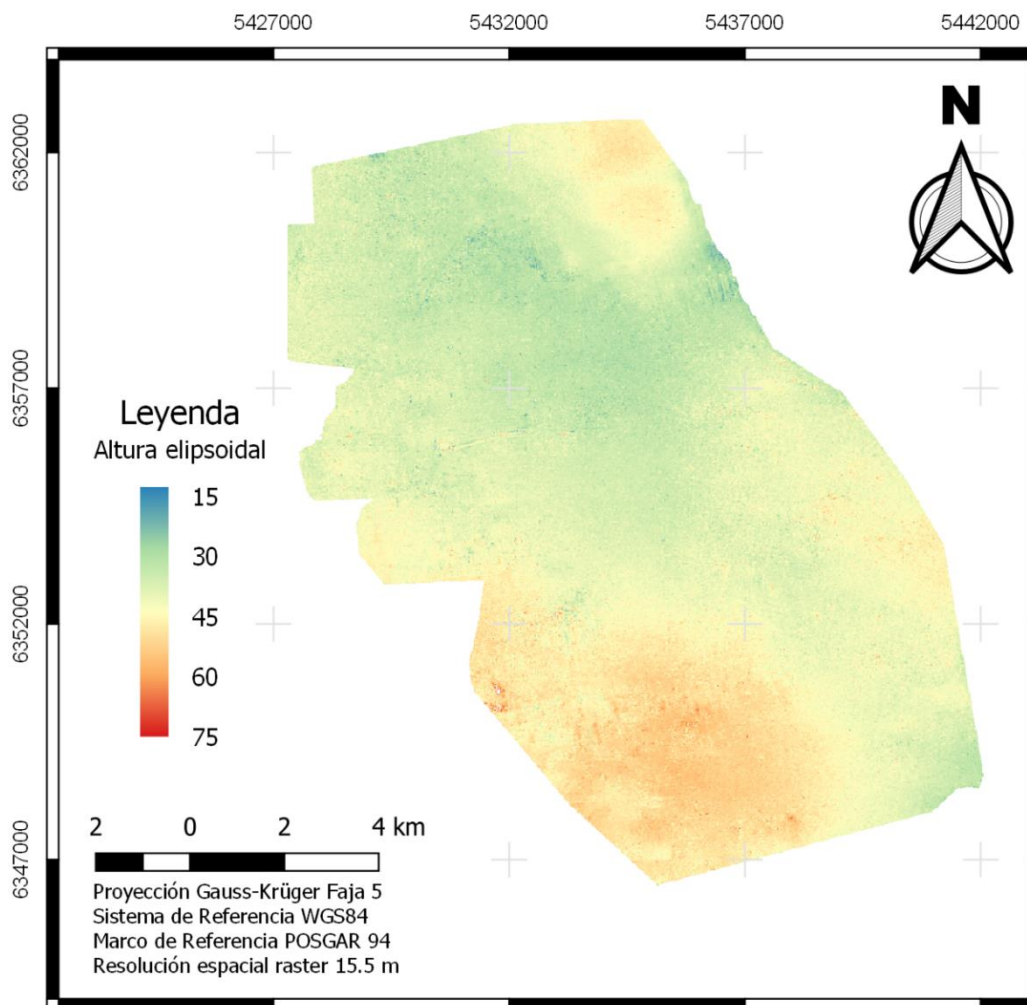


Figura 11: MDE InSAR SAOCOM 1B (24/03/2022) y 1A (01/04/2022), polarización HH, ajustado y validado usando datos GNSS-V1.0.

Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos  
Operacionales de la Misión SAOCOM

Tabla 13. Estadísticas MDE InSAR SAOCOM 1B (24/03/2022) y 1A (01/04/2022), polarización HH, ajustados y validados con datos GNSS V1.0

MDE	Mínimo	1° cuartil	Promedio	3° cuartil	Máximo	Desviación Estándar
Original	-7.04	4.34	7.89	12.27	20.08	5.43
Ajustado	-5.98	-1.50	0.29	2.51	6.34	3.10

**Modelos digitales de elevación interferométricos COSMO–SkyMed**

En la figura 12 se presenta el MDE generado por el Ing. Agrim. O'Connor (2020) en el marco de la Maestría MAIE (IG– CONAE–UNC) / Unidad de Desarrollo ASR (FCEIA– UNR) y la pasantía realizada en la *Agenzia Spaziale Italiana* (ASI). En el mismo se utilizó el par de imágenes COSMO–SkyMed de 22/08/2010 y 30/08/2010, polarización HH, ajustado y validado utilizando datos GNSS V1.0.

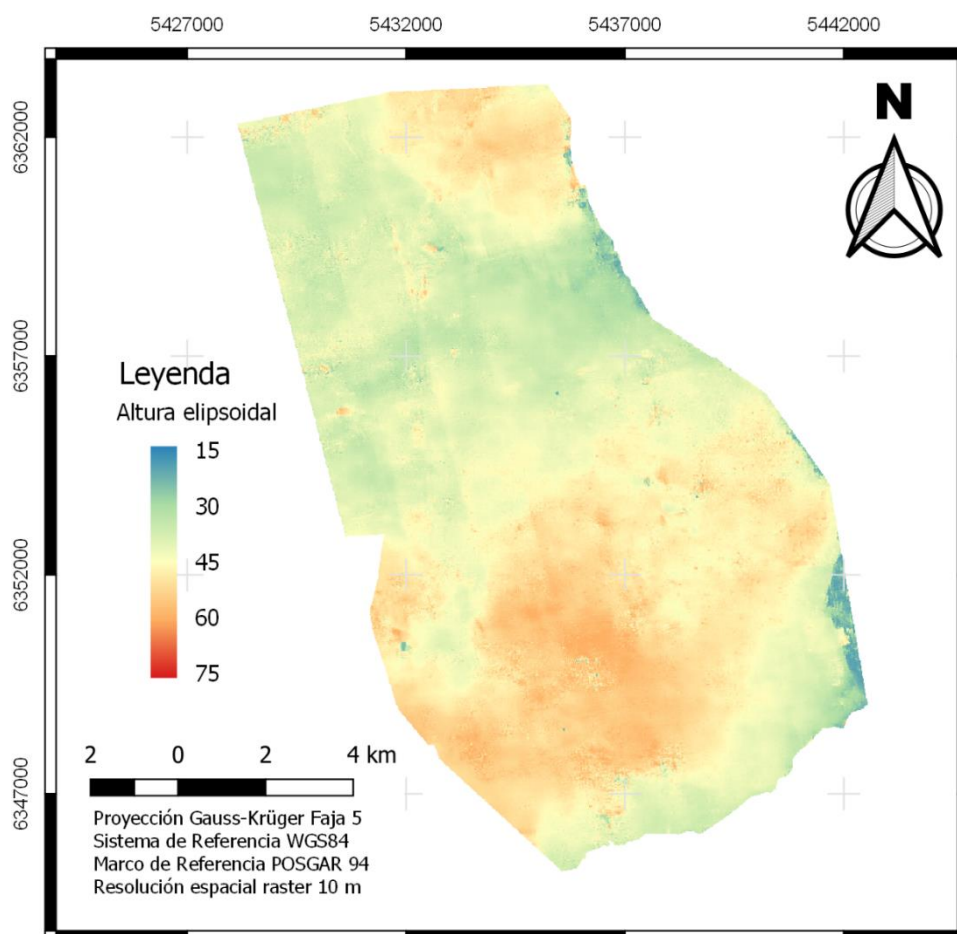


Figura 12: MDE InSAR COSMO–SkyMed (22/08/2010–30/08/2010), polarización HH, ajustado y validado utilizando datos GNSS V1.0. Fuente modificado de O'Connor (2020). Maestría MAIE (IG– CONAE–UNC). Unidad de Desarrollo ASR (FCEIA–UNR). Pasantía ASI



Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos  
Operacionales de la Misión SAOCOM

El proceso de georreferenciación requirió corrección planimétrica en (x,y) de (-10, 0) metros y una traslación en z en un valor de 1.66 m, el cual fue restado a los valores obtenidos del MDE. Las estadísticas resultantes del proceso de ajuste y validación son las que se observan en la tabla 14.

Tabla 14: Estadísticas MDE InSAR COSMO–SkyMed (22/08/2010–30/08/2010), polarización HH, ajustado y validado utilizando datos GNSS V1.0.

MDE	Mínimo	1° cuartil	Promedio	3° cuartil	Máximo	Desviación Estándar
Original	-9.73	-0.73	1.66	4.71	8.09	3.66
Ajustado	-3.19	-0.72	0.85	2.37	6.02	2.19

Fuente: modificado de O'Connor (2020). Maestría MAIE (IG– CONAE–UNC). Unidad de Desarrollo ASR (FCEIA–UNR). Pasantía ASI

En la figura 13 se presenta el MDE generado en el marco del AO–SAOCOM–DEM por el equipo de trabajo del presente proyecto. En este MDE se utilizó el mismo par de imágenes COSMO–SkyMed que en la figura 12, donde en un proceso de aprendizaje se optimizó la metodología, siendo ajustado y validado utilizando datos GNSS V1.0.

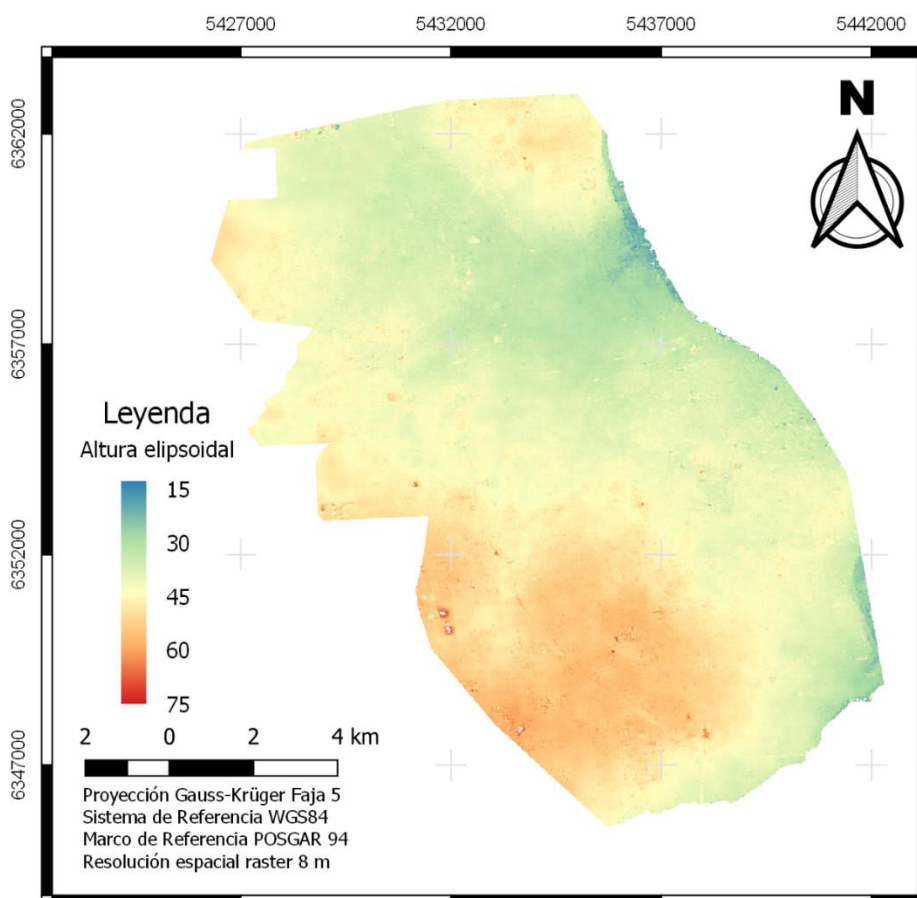


Figura 13: MDE InSAR COSMO–SkyMed V2.0 (22/08/2010–30/08/2010), polarización HH, ajustado y validado utilizando datos GNSS V1.0.



Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

El proceso de georreferenciación requirió corrección planimétrica en (x,y) de (-16, -8) metros y una traslación en z en un valor de -5.78 m, el cual fue restado a los valores obtenidos del MDE. Las estadísticas resultantes del proceso de ajuste y validación son las que se observan en la tabla 15.

Tabla 15: Estadísticas MDE InSAR COSMO–SkyMed V2.0 (22/08/2010–30/08/2010), polarización HH, ajustado y validado utilizando datos GNSS V1.0.

MDE	Mínimo	1° cuartil	Promedio	3° cuartil	Máximo	Desviación Estándar
Original	-22.26	-10.43	-5.78	0.37	4.90	6.81
Ajustado	-9.31	-2.86	-0.62	2.42	7.32	3.29

### Calidad de los MDE desarrollados

En la tabla 16 se encuentran los resultados del proceso de cálculo de las estadísticas básicas de los modelos digitales de elevación anteriormente presentados.

Tabla 16. Estadísticas básicas de las diferencias entre GNSS V1.0 y diferentes MDE

	Diferencias con relevamiento GNSS V1.0					
	Aerofotogramétrico	Interferométrico				
	MDE-Ar 5m + GEOIDE-Ar16	CSK TESIS	CSK AO	SAOCOM 1A	SAOCOM 1B-1A	SAOCOM 1A-1B
Año	2011-2016	2010	2010	2020	2021	2022
Mínimo	-5.396	-9.446	-4.086	-9.421	-3.757	-6.344
Máximo	0.398	7.179	4.998	4.783	3.778	5.977
Promedio	-0.544	-2.992	0.240	-0.333	0.127	-0.200
Desviación Estándar	1.090	4.205	2.407	2.963	1.630	3.160
Rango	5.793	16.625	9.083	14.204	7.535	12.320
RMSE	1.203	5.108	2.383	2.936	1.610	3.119

Se aprecia en la tabla 16 que en general el modelo MDE-AR 5m es el que presenta las mejores estadísticas básicas en cuanto al máximo, desviación estándar, rango y RMSE. No obstante, el MDE SAOCOM 1B-1A del 2021, es el modelo que tiene en promedio las diferencias más bajas en relación a los puntos GNSS V1.0 y en general presenta el mejor acercamiento global de los MDE desarrollados.

Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos  
Operacionales de la Misión SAOCOM

### Geolocalización de las intersecciones de ejes de calle

En la figura 14 se muestra la ciudad Rosario con sus Distritos Descentralizados y los puntos correspondientes a las intersecciones de ejes de calles modificados. De un total de 19852 intersecciones, se ajustó la ubicación de 4092 (20.6%) y se eliminaron 8449 (42.6%). El total de puntos válidos a utilizar es de 11403 (57.4%).

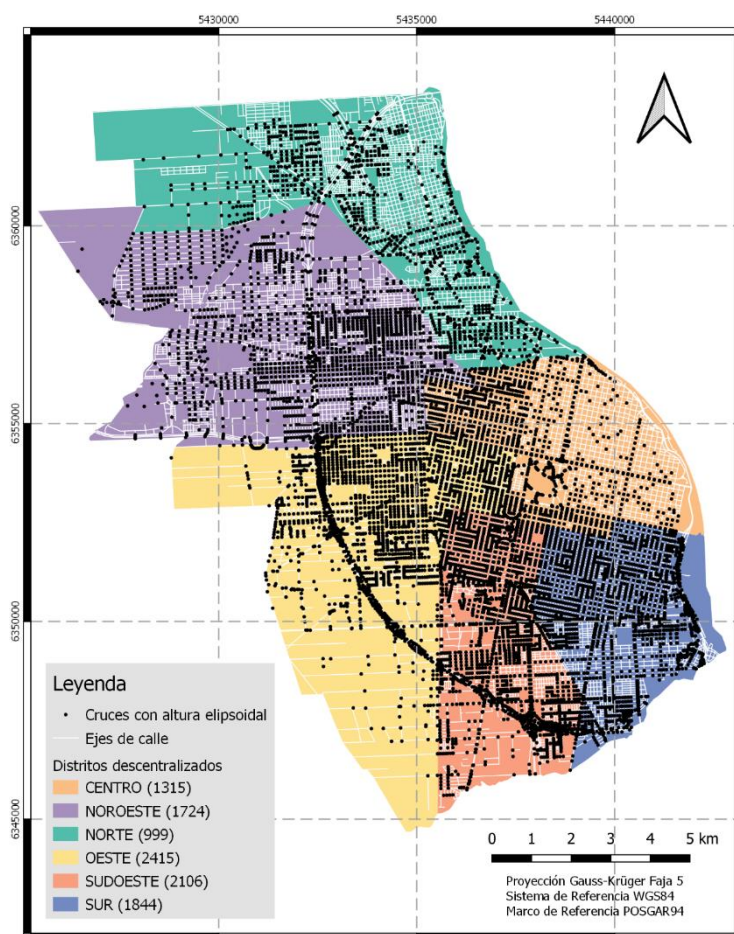


Figura 14: Geolocalización de las intersecciones de ejes de calles modificados de la ciudad de Rosario

### Estimación de parámetros a usar en la interpolación geoestadística

En este apartado se presentan los resultados más significativos del Análisis Exploratorio de Datos Espaciales aplicados a la variable altura elipsoidal.

En primer lugar, el índice I de Moran global arrojó un valor de 0.91 con una variancia igual a  $2.16 \times 10^{-16}$  y una probabilidad asociada  $p\text{-value} < 2.22 \times 10^{-16}$ ; considerando una distancia de vecindad de 678 m y la matriz de pesos W (donde cada elemento  $w_{ij}$  de la matriz toma valor 1 dividido la cantidad de vecinos de i, si i y j son vecinos, y cero en caso contrario). Teniendo en cuenta que la esperanza del índice de Moran es igual a  $-9.61 \times 10^{-5}$ , el valor extremadamente

Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos  
Operacionales de la Misión SAOCOM

alto del índice I de Mora denota la presencia de autocorrelación espacial positiva de la variable altura elipsoidal.

En el análisis de los outliers clásicos se identificaron dos unidades (puntos) en el distrito sudoeste con valores muy altos de altura elipsoidal y 112 puntos distribuidos en el distrito Sur y en el Norte con valores muy bajos de altura elipsoidal. Estos puntos y sus correspondientes valores de altura elipsoidal se analizaron en su contexto espacial, a partir del cual se tomó la decisión de continuar el análisis sin eliminar estas observaciones.

En el análisis de las observaciones influyentes (puntos) el criterio  $dfits$  () identificó 215 observaciones, la razón de covarianza detectó 8600 observaciones y en función del Leverage ( $\hat{h}$ ) se encontraron 29 observaciones. No obstante, en función de su análisis conjunto se decide continuar el análisis sin realizar eliminaciones del conjunto de datos.

En la Figura 15 se presenta el mapa LISA, que corresponde a la representación cartográfica de la estadística de Moran Local; donde los puntos en color rojo (1) indican valores altos de la altura elipsoidal rodeados de puntos vecinos con valores altos de esta variable. Los puntos en color azul (3) refieren a localizaciones con una altura elipsoidal baja rodeada principalmente de valores bajos de la misma variable. En tanto que, los puntos en color fucsia o rosa intenso (4), corresponden a intersecciones de ejes de calles donde la altura elipsoidal es alta y las intersecciones más cercanas (vecinas) tienen valores bajos; la situación inversa se presenta en los puntos en color violeta (2). Por último, los puntos en color gris (5) no son significativos para la estadística de Moran Local.

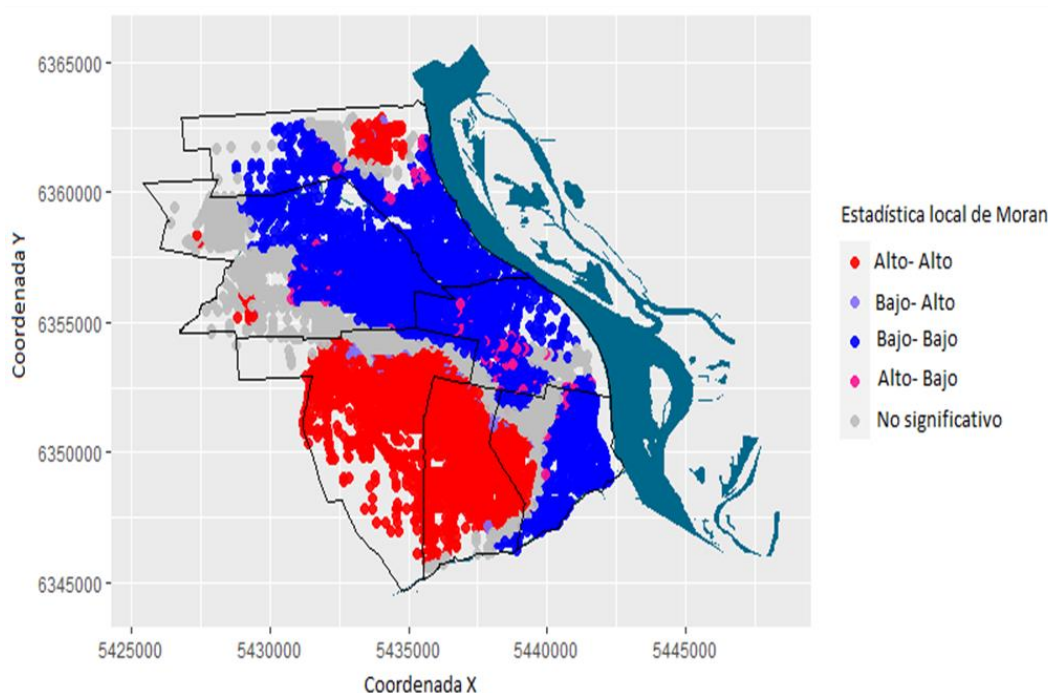


Figura 15: Mapa LISA de la altura elipsoidal en las intersecciones de ejes de calles modificados de la ciudad de Rosario, Santa Fe, Argentina. Año 2010. Fuente: Suarez (2021)

## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

En la estimación de un modelo que ajuste a los datos de altura elipsoidal de la ciudad de Rosario se selecciona un modelo con tendencia cuadrática tanto en la coordenada X como en la coordenada Y, dado que presentaron los valores de R cuadrado (0.56) y R ajustados (0.56) más altos, así como también los mejores valores en los criterios AIC (57.29) y BIC (57.34).

Por último, el AEDE aplicado a los datos de altura elipsoidal en las intersecciones de ejes de calle en el modelo MDE InSAR CSK-V2.0, permitió describir y visualizar las distribuciones espaciales, identificar ubicaciones atípicas, descubrir formas de asociación espacial de carácter global/local e identificar la estructura espacial subyacente. Estos hallazgos se constituyen en datos de entrada, que se traducen en parámetros a incluir en el proceso de modelación y estimación (kriging) en la obtención de un MDT para la ciudad de Rosario.

### Modelado preliminar de los datos extraídos del MDE COSMO–SkyMed

En la figura 16 se presentan los dos modelos MDT preliminares generados mediante procesos determinísticos de interpolación con IDW y *Multilevel B-Spline*, usando las alturas elipsoidales extraídas del MDE COSMO-SkyMed V2.0 del año 2010, correspondientes a las intersecciones de ejes de calle filtradas y modificadas.

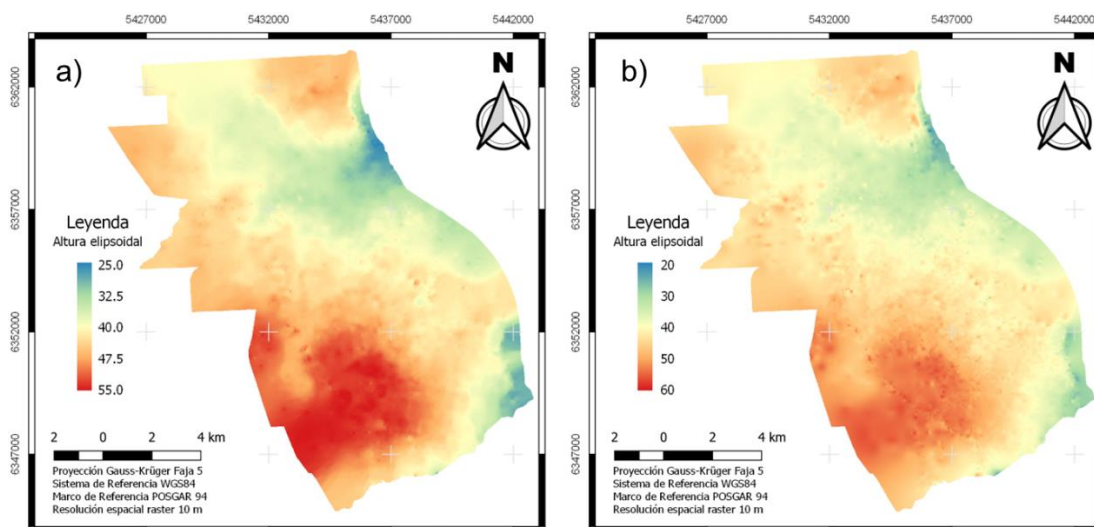


Figura 8. Modelo digital de terreno, a partir de datos extraídos en las intersecciones de ejes de calles modificados en el DEM InSAR CSK V2.0 ajustado y validado, ciudad de Rosario, Santa Fe, Argentina. Año 2010. Método de interpolación: a) *Inverse distance weighted* (IDW) y b) *Multilevel B-Spline*

Cabe mencionar que si bien se parte del mismo conjunto de datos, ambos algoritmos arrojan MDT con un rango de variación de altura elipsoidal diferente.

A partir de un análisis visual y del conocimiento de los integrantes del equipo de trabajo sobre la zona de estudio (ciudad de Rosario), se considera que dichos MDT se condicen con el relieve que presenta el área estudiada.



Ministerio de Ciencia,  
Tecnología e Innovación  
Argentina

## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

### **8. Inconvenientes encontrados por los que no pudieron ser alcanzados los resultados esperados**

A nueve meses de iniciado el Anuncio de Oportunidad se comenzó a sentir el efecto de la pandemia covid-19 y del Aislamiento Social Preventivo y Obligatorio (ASPO, decreto de necesidad y urgencia 297/2020), generando un cambio significativo en el proceso de trabajo de los integrantes del presente proyecto conduciendo del trabajo presencial al virtual. La etapa de adaptación al cambio de modalidad de trabajo produjo una dilatación en los tiempos especificados en el cronograma inicial y condujo a la realización de prácticamente todo el proyecto, donde el equipo quedó con interés de cumplimentar con algunas tareas que se plantean en el ítem Líneas Abiertas.

Una de las inquietudes que se presentó en el equipo fue el uso de la herramienta presente en el catálogo para programar tomas de nuevas imágenes. Dado que nuestra área de estudio se encuentra dentro de una zona de prioridad para la generación de mapas de humedad de suelo integrado, la programación que se estableció se canceló en su totalidad. Las imágenes solicitadas y recibidas fueron gestionadas a través de búsquedas por localización de nuestra área de interés en el catálogo SAOCOM de imágenes de archivo y obtenidas cercana a la finalización del llamado.

Cabe mencionar que durante el desarrollo del AO se notó una mejora continua de las herramientas del catálogo SAOCOM, evidenciado por un proceso intrincado al inicio y un acceso ágil y eficiente hacia la finalización del anuncio, realizando las mismas tareas de búsqueda y selección.

### **9. Conclusiones y líneas abiertas**

#### **Conclusiones**

En el presente proyecto presentado al AO-SAOCOM-DEM se obtuvieron MDE InSAR haciendo uso de datos SAOCOM 1A/1B y COSMO-SkyMed, ajustados y validados utilizando puntos GNSS para la ciudad de Rosario, Santa Fe, Argentina, para los años 2010, 2020, 2021 y 2022. Además, se avanzó en el análisis exploratorio de datos espaciales de la variable altura elipsoidal y se desarrollaron modelos digitales de terreno preliminares mediante técnicas de interpolación determinísticas a partir del mejor DEM InSAR COSMO-SkyMed año 2010.

En el marco del AO y la maestría de O'Connor en la MAIE se logró formar a un equipo en la obtención de modelos digitales de elevación InSAR, donde el proceso de aprendizaje se realizó utilizando imágenes COSMO-SkyMed, lo que posibilitó obtener un *know how* en la temática.

Dicho proceso de aprendizaje sumado a otras capacitaciones recibidas, posibilitó el desarrollo en tiempo récord de modelos digitales de elevación con imágenes SAOCOM obtenidas en cercanía de la finalización del anuncio. Asimismo, este *know how* en función del aprendizaje con las imágenes COSMO-SkyMed, permitió detectar la necesidad de utilizar distintos





Ministerio de Ciencia,  
Tecnología e Innovación  
**Argentina**

## Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos Operacionales de la Misión SAOCOM

parámetros en el filtro de Goldstein aplicado a las imágenes SAOCOM y obtener buenos resultados.

### **Líneas abiertas**

En la etapa final del anuncio de oportunidades y en el contexto del trabajo interdisciplinario se comenzaron a visualizar diferentes oportunidades de mejora, así como también a definir nuevas líneas de trabajo.

Primero: existe la posibilidad de procesar pares de imágenes ALOS PALSAR disponibles en el repositorio de Alaska Satellite Facility, para nuestra área de estudio en el año 2010. Esto permitiría realizar una comparación con datos SAOCOM, tomando como sitios testigo lugares que permanecen sin cambio en el período 2010-2022.

Segundo: en lo que respecta a la Red Geodésica de Rosario, si bien se logró densificar, se encontró que el producto MDE CSK 8 m podría mejorarse en algunas micro-regiones, al sumar nuevos puntos a la versión GNSS V2.0, a saber:

- ✓ zona costera de la ciudad de Rosario,
- ✓ fuera de los límites de la ciudad de Rosario (distancia a definir),
- ✓ sitios donde en función del análisis visual (conocimiento de los investigadores locales) el MDE no refleja la realidad de terreno (basurales en el distrito Oeste, Casino de la ciudad de Rosario, entre otros).

Tercero: a los fines de mejorar la precisión y exactitud en el método de traslación (x,y) por mínimos cuadrados se propone trabajar a nivel sub-pixel. En tal sentido se identifica como punto de partida el trabajo de Dr. Oscar Bustos.

Cuarto: uso de un método de la inferencia estadística espacial “kriging” para la modelación de los datos en la muestra y predicción en sitios no muestreados para obtener un Modelo Digital de Terreno (MDT). Presentación de la cartografía en altura ortométrica.

Quinto: ampliar y profundizar la obtención indicadores de calidad de MDE o MDT, contemplando estándares internacionales, tales como la norma ISO 19157.

Sexto: ampliar y profundizar la validación de los MDT usando datos de cuencas hidrológicas de otras fuentes (gubernamentales o académicas).

Séptimo: difusión de los resultados en el Repositorio de Datos Académicos de la Universidad Nacional de Rosario (RDA-UNR), actualmente en etapa de desarrollo. Lanzamiento del repositorio 2 de agosto de 2022. Datos a almacenar en el repositorio: datos GNSS (archivo csv y ficha técnica), MDE CSK (10 m y 8 m), MDE SAOCOM (15,5 m) y MDT (preliminares).





Ministerio de Ciencia,  
Tecnología e Innovación  
**Argentina**

Programa de Investigación y Desarrollo de Herramientas, Aplicaciones y Productos  
Operacionales de la Misión SAOCOM

Octavo: difusión de los resultados en el Nodo IDE de la Universidad Nacional de Rosario, actualmente en etapa de desarrollo y sin fecha de lanzamiento. Bases cartográficas (vectorial-raster) a almacenar en el nodo IDE UNR: datos GNSS, MDE CSK (10 m y 8 m), MDE SAOCOM (15,5 m) y MDT, así como también sus correspondientes metadatos.

## 10. Referencias

Anselin, L. (1995). *Local indicators of spatial association LISA*. Geographical analysis, 27(2): 93-115.

Anselin, L. (1996). *The Moran scatterplot as an ESDA tool to assess local instability in spatial association*.

Childs, C., Interpolating Surfaces in ArcGis Spatial Analyst, (en la web: <https://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpolating.pdf>, acceso: 10 de julio, 2015), (2004)

Giraldo, H.R. (2002). *Introducción a la geoestadística: Teoría y aplicación*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Goovaerts, P., Geostatistics for Natural Resources Evaluation, pp. 483, Oxford University Press, New York, USA (1997)

Lee, S., Wolberg, G., Shin, S.Y. (1997): 'Scattered Data Interpolation with Multilevel B-Splines', IEEE Transactions On Visualisation And Computer Graphics, Vol.3, No.3

Olaya, V. (2014). *Sistemas de información geográfica*. Un libro libre de Víctor Olaya. [Consulta: noviembre 2020]. Disponible en: <https://volaya.github.io/libro-sig/>

Toro, G. y Melo, C., Aplicación de métodos de interpolación geoestadísticos para la predicción de niveles digitales una imagen satelital con líneas perdidas y efecto sal y pimienta, <http://www.redalyc.org/pdf/2570/257020606007.pdf>, ISSN: 0123-921X, Tecnura, 12 (24), 57-69 (2009)

Euillades P. y Vénere M. (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, 19(1), 11pp. [https://www.scipedia.com/public/Euillades\\_Vénere\\_2003a](https://www.scipedia.com/public/Euillades_Vénere_2003a)

Zhou, H., Zhang, J., Gong, L. y Shang, X. (2012). Comparison and Validation of Different DEM Data Derived from InSAR. Procedia Environmental Sciences, 12, pp.590-597.