

Interferometría radar aplicada al desarrollo de productos geodésicos

Federico Ibarra¹

¹ Instituto Geográfico Nacional, Buenos Aires, Argentina. fibarra@ign.gob.ar

Resumen. La creciente disponibilidad de datos satelitales de radar de apertura sintética (SAR) de acceso libre ha propiciado la investigación aplicada al desarrollo de productos geodésicos orientados al conocimiento de la forma, posición y deformación de la superficie terrestre. Los modelos digitales de elevación (MDE) y los marcos de referencia revisten particular interés para el área de la defensa ya que permiten conocer con distintos niveles de precisión las coordenadas de los elementos naturales y antropogénicos sobre el territorio y las características topográficas de este último. Considerando la vital importancia de contar con productos de calidad para el apoyo logístico en actividades como la respuesta a emergencias, en el Instituto Geográfico Nacional se están llevando a cabo investigaciones tendientes a incorporar técnicas interferométricas (InSAR) para la producción de MDE del territorio nacional y para la mejora del acceso al marco de referencia oficial de la República Argentina.

Palabras clave: InSAR, MDE, modelos de trayectoria, Sentinel-1, SAOCOM.

1 Introducción

Desde sus inicios en la década del 70', las técnicas InSAR se han constituido como herramientas poderosas para el estudio remoto de la superficie terrestre y otros cuerpos celestes. Inicialmente, la formulación más sencilla del proceso interferométrico fue empleada para la obtención de modelos digitales de elevación (MDE) y el estudio de la topografía [1]; sin embargo, sus aplicaciones se diversificaron rápidamente hacia el estudio de las deformaciones de la superficie terrestre, mediante la introducción de procesamientos diferenciales [2]. Luego de que los primeros estudios demostraran la potencialidad de la técnica para diversas aplicaciones, las nuevas misiones satelitales SAR fueron diseñadas para la implementación de técnicas interferométricas, a diferencia de sus predecesoras. Particularmente, se ha dado un incremento exponencial en la cantidad de misiones satelitales SAR públicas y privadas en la última década, con más de diez misiones y constelaciones en órbita actualmente. Esto se ha traducido en una cantidad de datos de calidad sin precedentes, en distintas longitudes de onda (principalmente C, L y X), que han propiciado la diversificación y especialización de la técnica en un amplio espectro de métodos. Entre sus aplicaciones destacan la producción de MDE, el

monitoreo de volcanes, los estudios del ciclo sísmico, la identificación de procesos de remoción en masa, los estudios de subsidencia natural e inducida, y la caracterización del flujo de glaciares, entre otras [3][4][5][6][7][8].

El Instituto Geográfico Nacional, a través de la Ley de la Carta (N° 22.963) y la Disposición Administrativa 520/96, es el responsable nacional de la producción y actualización de información geoespacial y productos cartográficos, así como de la infraestructura geodésica y el establecimiento, mantenimiento, actualización y perfeccionamiento del Marco de Referencia Geodésico Nacional. A lo largo de su historia, ha incorporado nuevos métodos y tecnologías para la captura de información y ha estado a la vanguardia de los métodos geodésicos para la determinación de marcos de referencia, redes de nivelación y redes gravimétricas, entre otras. En este contexto, se están llevando a cabo investigaciones para incorporar distintas técnicas interferométricas en la generación de productos estratégicos y de interés para el Estado Nacional y las actividades que se desarrollan en él. A lo largo de este trabajo, se presentan los avances alcanzados a la fecha y los proyectos planeados para iniciar este año. Particularmente, los esfuerzos se orientan a dos campos, la producción de MDE y la actualización del Marco de Referencia Geodésico Nacional. Los MDE, en tanto representaciones de la elevación del terreno, son cruciales para diversas aplicaciones ingenieriles y para la evaluación de los riesgos que afectan a las poblaciones en el territorio. Por otro lado, los marcos de referencia accesibles y actualizados constituyen el sistema de posicionamiento básico y preciso utilizado para los sistemas de infraestructura crítica, las operaciones de defensa, entre muchas otras actividades. Aunque las técnicas interferométricas no son empleadas para su desarrollo específicamente, tienen el potencial de contribuir a la mejora de los modelos de trayectoria utilizados para transformar coordenadas entre distintas épocas.

2 Antecedentes

2.1 InSAR para producción de MDE

Las técnicas interferométricas para la producción de MDE llevan décadas de investigación acumulada y se basan fundamentalmente en la diferencia de fase entre dos escenas SAR para resolver un problema geométrico y recuperar información de la estructura tridimensional de la superficie relevada. Las misiones específicas para este tipo de aplicación trabajan normalmente en modo bi-estático, adquiriendo la información de ambas escenas al mismo tiempo, en una misma pasada (como SRTM y TanDEM-X). Sin embargo, las misiones que adquieren solamente una escena por pasada en la zona objetivo (como Sentinel-1 y SAOCOM-1) también pueden ser utilizadas para la producción de MDE. A pesar que su uso introduce errores relacionados con la ventana temporal entre ambas adquisiciones (producidos por cambios en las condiciones atmosféricas, movimientos de la superficie terrestre, modificaciones de la cobertura superficial, entre otros), su principal ventaja reside en la amplia y reciente disponibilidad de datos abiertos al público general. Para países con territorios extensos y recursos limitados como Argentina, el acceso a estos datos y

la posibilidad de extraer productos de calidad a partir de los mismos es sumamente relevante, dado que los MDE de alta resolución producidos a partir de datos SAR (así como los datos primarios) son usualmente restringidos y de precio elevado.

Argentina cuenta actualmente con el modelo MDE-Ar, desarrollado por el IGN a partir de los MDE globales SRTM y ALOS. En su producción se incluyeron etapas de post-proceso para mejorar la exactitud del modelo en territorio argentino, como filtros espaciales para remoción de ruido y la adopción del modelo geoidal Geoide-Ar como modelos geopotencial de referencia. MDE-Ar ofrece cobertura nacional con un error absoluto promedio de -2.11 m y una resolución horizontal de 30 m. Adicionalmente, el IGN ofrece MDE fotogramétricos con una mejor resolución (5 m y 0.5 m) y exactitud (sub-métrica a centimétrica). Sin embargo, dado que el territorio del país es extenso y estos últimos MDE cubren sólo una porción del mismo, es necesario realizar esfuerzos para ofrecer modelos superadores para aplicaciones en las que la resolución de MDE-Ar no es suficiente. La disponibilidad de datos SAR representa en este sentido una oportunidad económica y eficiente para la producción de MDE de amplia cobertura espacial y mejor resolución que MDE-Ar

Idealmente, la ventana temporal entre adquisiciones para la producción de dichos MDE debe ser lo más corta posible para evitar cambios en las condiciones ambientales, ó, en su defecto, ambas escenas deben corresponder a una misma estación del año. Aún así, los múltiples factores que pueden influenciar la calidad de los productos obtenidos (variaciones atmosféricas de alta frecuencia, eventos geológicos como sismos y deslizamientos, modificaciones de cobertura por acción humana) imposibilitan la estandarización de parámetros óptimos y condiciones de borde a la hora de seleccionar el par de escenas a utilizar. Como consecuencia, a pesar que las técnicas interferométricas permiten obtener MDE con una resolución horizontal superadora de los modelos de escala regional/global, los mismos no son confiables en cuanto a su calidad. En este sentido, diversos estudios se han enfocado en este problema, explorando el impacto de distintas variables y la aplicación de técnicas de fusión de datos [9][10].

A pesar de que en los últimos años han aumentado las investigaciones abocadas a evaluar la mejora de los MDE mediante técnicas de fusión simple, no existen aún estudios sistemáticos respecto de la influencia de distintos flujos de procesamiento o fuentes de datos utilizados. En esta línea, y con el objetivo final de desarrollar una metodología sencilla y normalizada que reduzca la incerteza en la calidad de los MDE, en el IGN se realizó un trabajo exhaustivo en un área piloto en Córdoba para llevar adelante un análisis estadístico de distintos MDE obtenidos mediante interferometría y evaluar en forma sistemática distintos procesos de fusión simple de datos [11]. Los resultados demostraron que los MDE obtenidos mediante la fusión de MDE interferométricos son, en promedio, tres veces más exactos que estos últimos. Los mejores resultados se obtuvieron de la fusión de MDE de invierno (i.e. cuyas escenas SAR fueron adquiridas en invierno), así como de la utilización de datos SAR del satélite SAOCOM-1. Adicionalmente, la fusión de los MDE de Sentinel-1 y SAOCOM-1 permitió mejorar la exactitud del resultado final; sin embargo, a pesar de que se logró una mejor resolución que MDE-Ar (15 m), no se alcanzó la misma exactitud.

Trabajo en curso. Actualmente, se están llevando a cabo más pruebas en la zona empleando sumas ponderadas para intentar superar la exactitud de MDE-Ar y se

planea utilizar técnicas de aprendizaje automático (como súper-resolución) que hagan uso de la redundancia de datos para producir un resultado superador. A su vez, se están llevando a cabo pruebas en una región de Santa Cruz para evaluar el desempeño de los métodos desarrollados en zonas con distinta topografía y cobertura del suelo. La región presenta además como ventaja la disponibilidad de datos del satélite SAOCOM en geometría ascendente y descendente, cuya utilización conjunta podría permitir reducir errores causados por efectos geométricos como las sombras.

2.2 InSAR y marcos de referencia

Tradicionalmente en geodesia, los marcos de referencia han sido considerados estáticos en la práctica, con sistemas de coordenadas invariables en el tiempo. El advenimiento de los sistemas de posicionamiento satelital (GNSS por sus siglas en inglés) y su continua y progresiva mejora en la precisión han marcado un hito en la disciplina, permitiendo determinar las variaciones seculares producidas por los movimientos de placa. Como consecuencia, la descripción estática de la Tierra ha tenido que migrar hacia un enfoque cinemático o dinámico que considere dichos movimientos, indicando le época de definición del marco de referencia (época convencional) y la velocidad de movimiento de los vértices geodésicos. Es así que las coordenadas registradas por las estaciones GNSS cambian porque la corteza se mueve y deforma constantemente. En este contexto, los desplazamientos acumulados en el tiempo traen como consecuencia diferencias entre la posición de los elementos físicos en el terreno (definida por el posicionamiento GNSS en tiempo real) y sus coordenadas en los marcos de referencia (definidas para la época convencional), que requieren de una transformación de las mediciones hacia la época de referencia y/o una actualización de esta última, constituyéndose así los marcos cinemáticos.

Para realizar estas transformaciones se utilizan modelos de trayectoria que describen las coordenadas de las estaciones en función del tiempo [12]. Las causas más importantes de los movimientos corticales son el movimiento secular de placas, la deformación cortical o litosférica (como las deformaciones inter-, co- y post-sísmicas), el ajuste isostático glacial, y las respuestas elásticas y viscoelásticas a los cambios en las cargas superficiales. Una parte de estos movimientos es uniforme y por lo tanto, sencilla de modelar y predecir. Sin embargo, el problema se dificulta al intentar predecir las coordenadas en regiones que registraron, por ejemplo, saltos cosísmicos y transitorios post-sísmicos, particularmente cuando la densidad de estaciones GNSS es baja. Cuando suceden estos eventos es necesario actualizar los modelos de trayectoria. En la última década se ha comenzado a emplear un enfoque híbrido cinemático-dinámico mediante la incorporación de modelos físicos del proceso sísmico obtenidos a partir de los desplazamientos observados. Estos modelos son luego utilizados para predecir los parámetros de los modelos de trayectoria de cualquier punto en el terreno.

Existen diversos ejemplos a nivel mundial de este tipo de desarrollos, como en los países nórdicos y bálticos, en Nueva Zelanda y Taiwán [13][14][15]. A nivel local, Argentina cuenta actualmente con un marco de referencia asociado a un modelo de predicción de trayectorias que incluye modelos de deformación para los dos sismos de mayor magnitud que afectaron a nuestro país en las últimas dos décadas, los eventos

de Maule (27/02/2010) e Illapel (16/09/2015). En el año 2016, se desarrolló la primera versión del modelo de predicción de trayectorias para transformación de coordenadas entre distintas épocas del marco de referencia, denominado Vel-Ar. Su desarrollo se basa en la estimación de parámetros de modelos extendidos de trayectorias de series de tiempo GNSS, considerando movimientos lineales y no lineales (saltos, componentes periódicas y logarítmicas) [16]. En su actualización al modelo Vel-Ar v2.0, se utilizó un enfoque híbrido mediante el uso de modelos geofísicos en conjunto con los modelos de trayectoria GNSS para estimar los desplazamientos co-sísmicos [17].

La complejidad para desarrollar estas transformaciones y modelos, así como sus resultados en términos de precisión, dependen de la magnitud de las deformaciones y de la cobertura de estaciones GNSS de monitoreo. Ante la falta de buena cobertura espacial de estaciones y altos gradientes de los campos de deformación, la incorporación de productos interferométricos se constituye como una opción interesante y novedosa. En la actualidad no existen muchos ejemplos de países que hayan incorporado la tecnología en sus modelos nacionales; países como Islandia, Suecia, Noruega, Japón, Dinamarca, Países Bajos, Japón y Nueva Zelanda se encuentran en distintas etapas de implementación de procedimientos que permiten incorporar estos datos. Algunos de los proyectos contemplan el despliegue de una serie de reflectores pasivos de posición inicial conocida que puedan ser seguidos mediante interferometría diferencial, la evaluación de transmisores activos en reemplazo de reflectores pasivos, y la incorporación de mapas de deformación obtenidos mediante la técnica al modelado de los movimientos corticales.

Trabajo en curso. Una de las estrategias relevantes para abordar la deformación sísmica consiste en la elaboración de modelos geofísicos de desplazamiento co-sísmico y post-sísmico que expliquen la deformación superficial registrada, integrando desplazamientos observados mediante interferometría y estaciones GNSS. En este contexto y a modo de prueba piloto, en el IGN se ha seleccionado un área en San Juan para estudiar las deformaciones sísmicas producidas por el sismo de Illapel y un sismo local ocurrido el 18/01/2021. A la fecha, se han obtenido mapas de deformación co-sísmica mediante interferometría diferencial (DInSAR) para ambos eventos y se están comenzando a procesar series de tiempo.

3 Metodología

3.1 InSAR

Explicado en términos sencillos, la diferencia de fase (o fase interferométrica) entre dos escenas SAR se compone de términos geométricos y variaciones del trayecto recorrido por la señal. Entre las componentes geométricas se incluyen las posiciones orbitales de los satélites cuando las escenas son adquiridas y la topografía del terreno, mientras que las variaciones del recorrido responden a cambios en el medio de propagación (componente atmosférica) y movimientos del terreno. Asumiendo que el terreno y la atmósfera permanecen estables en el tiempo y conociendo las órbitas de los satélites, es posible calcular la componente topográfica

para obtener información sobre la elevación de la superficie. Para realizar el proceso interferométrico se utilizó el software SNAP (*Sentinel Application Platform*). Entre las distintas etapas del mismo para la producción de MDE se incluyen el co-registro de las escenas, *multilooking*, obtención de la fase interferométrica, filtrado (filtro de Goldstein), desenrollado de la fase (utilizando el software SNAPHU), conversión de fase a elevación y corrección topográfica (incluye geolocalización). Cuando existen movimientos de la superficie entre la adquisición de las escenas SAR y se pretende obtener mapas de deformación, es necesario remover la fase topográfica durante la cadena de procesamiento, es decir, la componente de la fase que responde a las variaciones de elevación del terreno. Dicha fase se modela a partir de un MDE externo (en este caso se utilizó el modelo SRTM) y es removida antes de la etapa de desenrollado. Finalmente, la fase desenrollada resultante se convierte a desplazamiento con respecto a la línea de vista del sensor (conocida como LOS por sus siglas en inglés). Durante el proceso también se calculó la coherencia entre las escenas de cada par. La misma se define como el coeficiente de correlación entre dos señales complejas y se constituye como una medida de la precisión en la determinación de la fase interferométrica.

Para la producción de MDE se utilizaron datos de los satélites SAOCOM-1 y Sentinel-1, mientras que para la obtención de mapas de deformación sólo se usaron datos de Sentinel-1. SAOCOM-1 es una constelación que consta de dos satélites con instrumentos SAR que operan en banda L (longitud de onda de 23.5 cm). Para el proyecto de trabajo se utilizaron escenas adquiridas en modo *StripMap* con un nivel de procesamiento L1 (productos *SLC* con información de fase). Todos los pares interferométricos SAOCOM formados tienen bases temporales que no superan los 32 días. Por otro lado, la constelación Sentinel-1 también consta de dos satélites aunque uno de ellos se encuentra fuera de servicio desde finales del 2021. Los instrumentos SAR de esta constelación operan en banda C (longitud de onda de 5.5 cm). Para los proyectos del instituto se emplearon escenas TOPSAR adquiridas en modo IW, con un nivel de procesamiento L1 y bases temporales de hasta 24 días para la producción de MDE y 48 días para los mapas de deformación. La misión Sentinel-1 es particularmente útil para este último fin debido a su servicio de órbitas precisas y el mantenimiento de las mismas dentro de un tubo orbital de 100 m que asegura bases perpendiculares pequeñas, óptimas para técnicas DInSAR.

En total, se utilizaron casi 80 y 40 escenas de las misiones Sentinel-1 y SAOCOM-1, respectivamente. Para el proyecto de producción de MDE en Córdoba se usaron 69 escenas Sentinel-1 (mayormente descendentes) y 14 escenas SAOCOM-1 (en su mayoría ascendentes), para los MDE en Santa Cruz se emplearon únicamente 22 escenas SAOCOM-1 (ascendentes y descendentes); y para los mapas de deformación de San Juan se utilizaron 8 escenas Sentinel-1 (4 ascendentes y 4 descendentes). Para los MDE se trabajó principalmente con polarizaciones HH siempre que la información estuviese disponible y para los mapas de deformación se utilizó el modo de polarización VV. Los pares interferométricos de Sentinel-1 presentan bases perpendiculares entre 20 m y 160 m, con alturas de ambigüedad resultantes en el rango 75-370 m, mientras que los pares de SAOCOM-1 presentan bases perpendiculares entre 150 m y 2000 m, y alturas de ambigüedad entre 30 m y 230 m. Debido a la falta de órbitas precisas para la misión SAOCOM-1, fue necesario

realizar una corrección orbital a los MDE obtenidos utilizando una aplicación desarrollada en Python, denominada *xDEM* [18].

3.2 Post-proceso y fusión de MDE

En base a los resultados de investigaciones previas en el IGN, se seleccionaron para fusión aquellos MDE formados a partir de escenas adquiridas durante la época invernal (principios de Junio a principios de Septiembre). Luego, éstos fueron co-registrados con MDE fotogramétricos de cada zona (Córdoba y Santa Cruz) y recortados para cubrir el área de solapamiento de todos los MDE invernales disponibles por región. Para realizar la fusión, se tomó en cada píxel la mediana de las elevaciones registradas por los distintos MDE. Finalmente, se aplicó un filtro multidireccional para remover valores anómalos. De este proceso, se obtuvo un MDE fusionado para cada área de estudio. Adicionalmente, se realizó una fusión mediante suma ponderada utilizando las coherencias calculadas para asignar pesos, de manera que los píxeles cuya coherencia sea mayor que la del resto de los MDE interferométricos tengan mayor peso en la determinación de la elevación final del píxel fusionado.

4 Resultados y discusiones

A la fecha se han obtenido resultados parciales para los distintos proyectos y zonas de estudio. En Córdoba se produjeron dos nuevos MDE fusionados (uno por cada misión satelital) utilizando la coherencia para realizar una suma ponderada, de manera de poder comparar su exactitud con los estudios previos realizados en el IGN (Ibarra et al 2024). En Santa Cruz también se obtuvieron dos MDE fusionados, pero ambos corresponden a la misión SAOCOM-1, uno tomando la mediana como criterio de fusión y otro realizando una suma ponderada. En la Tabla 1 se presentan el error medio y la desviación estándar de los distintos MDE con respecto a los MDE fotogramétricos de referencia.

Tabla 1. Medidas de calidad de los MDE producidos con respecto a los MDE de referencia. Se incluyen los resultados previos obtenidos en el IGN a modo de comparación.

MDE	Error medio (m)	Desviación estándar (m)
Córdoba – Sentinel-1 - Mediana	2.25 m	7.61 m
Córdoba –SAOCOM-1 - Mediana	0.39 m	3.77 m
Córdoba – Sentinel-1 - Ponderado	1.73 m	5.82 m
Córdoba – SAOCOM-1 - Ponderado	0.35 m	3.02 m
Santa Cruz – SAOCOM-1 –Mediana	0.87 m	2.15 m
Santa Cruz – SAOCOM-1 –Ponderado	0.73 m	1.69 m

Los resultados obtenidos muestran que si bien se reducen los errores medios y desviaciones estándar a partir de la implementación de sumas ponderadas, dichas

mejoras no son significativas (particularmente para SAOCOM-1), ni suficientes para alcanzar la exactitud de MDE-Ar en Córdoba (-1.62 m de error medio y 1.77 m de desviación estándar). La suma ponderada no produce grandes cambios para SAOCOM-1 debido a que las coherencias obtenidas para los distintos pares interferométricos son consistentes entre sí, y generalmente altas. En cambio, en el caso de Sentinel-1 se observa una reducción mayor (particularmente en la desviación estándar) atribuible al menor peso de aquellos píxeles con baja coherencia; ésta es más variable entre los distintos pares utilizados. En el caso de Santa Cruz, a pesar que la suma ponderada no produce una modificación importante en la calidad del resultado, el desempeño es similar al de MDE-Ar en la zona (error medio -1.47 m y desviación estándar de 1.56 m). La diferencia de calidad entre los MDE SAOCOM-1 fusionados en Córdoba y Santa Cruz probablemente responda a la variedad de geometrías de adquisición disponibles en cada región; particularmente, en Santa Cruz se cuenta con escenas tanto ascendentes como descendentes que favorecen una reducción de los errores producidos por distorsiones geométricas.

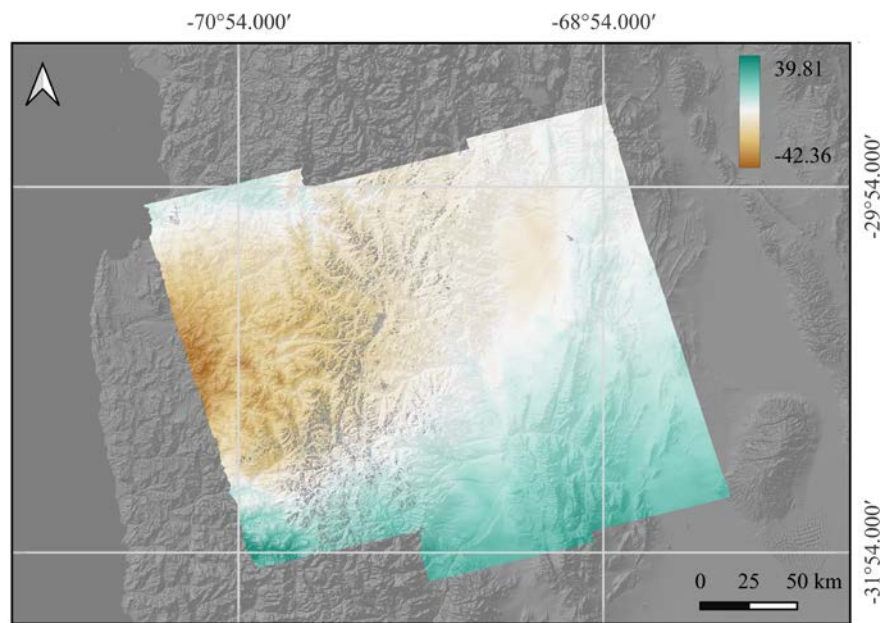


Fig. 1. Mapa de desplazamiento en centímetros en la dirección LOS (aproximadamente OSO) para el par de escenas ascendentes Sentinel-1 correspondientes al 02/09/2015 y 20/10/2015 (antes y después del sismo de Illapel).

Los resultados de deformación co-sísmica en la zona de San Juan (Fig.1) muestran que los patrones de desplazamiento no son homogéneos, con zonas que presentan acortamiento en la distancia al satélite en la dirección de vista (valores negativos) y zonas que se alejan (valores positivos). Estos desplazamientos respecto del satélite

pueden deberse a componentes de movimiento tanto vertical como horizontal. Si se compara con la información registrada en las estaciones GNSS, éstas muestran un desplazamiento en dirección oeste, consistente con los valores negativos del mapa de deformación. Las zonas que se alejan del satélite muestran un comportamiento que podría ser distintivo, en caso que el movimiento efectivamente haya ocurrido en la horizontal (en dirección este) y no en la vertical (subsistencia del terreno). Las posibles heterogeneidades de desplazamiento superficial identificadas podrían ayudar a refinar los modelos de predicción de trayectoria, iluminando comportamientos variables en las regiones comprendidas entre estaciones GNSS permanentes. Para poder determinar con mayor claridad el problema, es necesario realizar nuevos mapas de deformación descendentes que permitan calcular campos de deformación en las distintas componentes para analizar patrones de deformación horizontal y vertical.

5 Conclusiones

A pesar que todavía hay mucho trabajo por delante, los resultados obtenidos a la fecha muestran el potencial de las técnicas InSAR para el desarrollo de distintos productos dentro del área de incumbencia del IGN. La generación de MDE interferométricos y su posterior fusión se constituye como una herramienta útil para la obtención de MDE de calidad y resolución media (15 m) en zonas del territorio nacional que presenten una disponibilidad de datos SAR adecuada. Si bien no es posible en el corto plazo realizar un MDE de cobertura nacional con estas técnicas, se pueden identificar zonas prioritarias donde no haya MDE fotogramétricos de mejor resolución ni se planee su obtención en el futuro. Por otro lado, los mapas de deformación obtenidos muestran que los patrones de deformación de la superficie parecen ser más heterogéneos que lo observado en las estaciones GNSS., de manera que su inclusión en los modelos de trayectoria podría mejorar la transformación entre épocas del marco de referencia. Se espera que a partir de los trabajos en curso se puedan establecer procedimientos internos estandarizados para facilitar la obtención de productos interferométricos y su integración al circuito de producción del instituto.

References

1. Graham, L.C.: Synthetic interferometer radar for topographic mapping. *Proceedings of the IEEE*. 62, 763--768 (1974)
2. Massonet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., Rabaut, T.: The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*. 364, 138-142 (1993)
3. Carlà, T., Intrieri, E., Raspini, F., Bardi, F., Farina, P., Ferreti, A., Colombo, D., Novali, F., Casagli, N.: Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR. *Scientific Reports*. 9 (2019)
4. Derauw, D., d'Orey, N., Jaspard, M., Caselli, A., Samsonov, S.: Ongoing automated ground deformation monitoring of Domuyo – Laguna del Maule area (Argentina) using Sentinel-1 MSBAS time series: Methodology description and first observations for the period 2015-2020. *Journal of South American Earth Sciences*. 104 (2020)

5. Euillades, L., Euillades, P., Riveros, N., Masiokas, M., Ruiz, L., Pitte, P., Elefante, S., Casu, F., Balbarani, S.: Detection of glaciers displacement time-series using SAR. *Remote Sensing of Environment*. 184, 188-198 (2016)
6. Fang, J., Ou, Q., Wright, T., Okuwaki, R., Amey, R., Craig, T., Elliott, J., Hooper, A., Lazecký, M., Maghsoudi, Y.: Earthquake Cycle Deformation Associated With the 2021 MW 7.4 Maduo (Eastern Tibet) Earthquake: An Intrablock Rupture Event on a Slow-Slipping Fault From Sentinel-1 InSAR and Teleseismic Data. *JGR Solid Earth*. 127 (2022)
7. Tamburini-Beliveau, G., Grosso-Heredia, J., Béjar-Pizarro, M., Pérez-López, R., Portela, J., Cismondi-Duarte, M., Monserrat, O.: Assessment of ground deformation and seismicity in two areas of intense hydrocarbon production in the Argentinian Patagonia. *Scientific Reports*. 12 (2022)
8. Vachon, P., Geudtner, D., Gray, A., Touzi, R.: ERS-1 Synthetic Aperture Radar Repeat-Pass Interferometry Studies: Implications for Radarsat. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 21, 441-454 (1995)
9. Braun, A.: Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data - Open applications, techniques, and limitations. *Open Geosciences*. 13, 532-569 (2021)
10. Okolie, C. J., Smit, J. L.: A systematic review and meta-analysis of Digital elevation model (DEM) fusion: pre-processing, methods, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 188, 1-29 (2022)
11. Ibarra, F., Cuello, A., Gotuso, A., Guerrieri, M., Ludueña, S., Marquez, J. L., Micou, A. P., Migliorini, R., Ortone, A., Perez, M., Posadas, A., Seco, J. L., Soldano, A., Sotelo, A., Tamayo, C., Chiarito, E.: Exploring C and L band InSAR Digital Elevation Model stacking: a case study in Córdoba, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*. 143 (2024)
12. Bevis, M., Brown, A.: Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy. *Journal of Geodesy*. 88, 283-311 (2014)
13. Häkli, P., Evers, K., Jivall, L., Nilsson, T., Himle, S., Kollo, K., Liepiņš, I., Paršeliūnas, E., Vestøl, O., Lidberg, M.: NKG2020 transformation: An updated transformation between dynamic and static reference frames in the Nordic and Baltic countries. *Journal of Geodetic Science*. 13 (2023)
14. Kierulf, H., Valsson, G., Evers, K., Lidberg, M., Hakli, P., Prizginiene, D., Hjelle, G., Vestøl, O., Hakansson, M., Knudsen, P., Poutanen, M.: Towards a dynamic reference frame in Iceland. *Geophysica*. 54, 3-17 (2019)
15. Chen, K., Chuang, R., Ching, K.: Realization approach of non-linear postseismic deformation model for Taiwan semi-kinematic reference frame. *Earth, Planets and Space*. 72 (2020)
16. Gómez, D., Piñón, D., Smalley, R., Bevis, M., Cimbaro, S., Lenzano, L., Barón, J.: Reference frame access under the effects of great earthquakes: a least squares collocation approach for non-secular post-seismic evolution. *Journal of Geodesy*. 90, 263-273 (2015)
17. Gómez, D., Figueroa, M., Sobrero, F., Smalley, R., Bevis, M., Caccamise, D., Kendrick, E.: On the determination of coseismic deformation models to improve access to geodetic reference frame conventional epochs in low-density GNSS networks. *Journal of Geodesy*. 97 (2023)
18. Hugonnet, R., Brun, F., Berthier, E., Dehecq, A., Mannerfelt, E. S., Eckert, N., Farinotti, D.: Uncertainty Analysis of Digital Elevation Models by Spatial Inference From Stable Terrain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 15, 6456-6472 (2022)