

Determinación de subsidencia del terreno mediante tecnología InSAR. Caso de estudio: Vía San Antonio-San Vicente

Determining ground subsidence using InSAR technology: San Antonio-San Vicente road case study

Jaime Adrián Peralta-Delgado¹, Luis Enrique Acosta-González^{2*}, Emil Cristhian Veja-Ponce¹, Walkis Herrera-Blanco³, Henry Antonio Pacheco-Gil¹

¹Universidad Técnica de Manabí (Facultad de Posgrado), Manabí, Ecuador.

²Universidad de Holguín, Cuba.

³Universidad de Moa, Holguín, Cuba.

*Autor para la correspondencia: luis.acosta.glez@gmail.com

Resumen

Esta investigación presenta un esquema de trabajo para determinar la subsidencia del terreno mediante el uso de imágenes satelitales SENTINEL-1 y el procesamiento con el software SNAP. Se describen los pasos necesarios para obtener los desplazamientos del terreno, desde la descarga de las imágenes en las plataformas Copernicus y Alaska hasta la exportación final de los resultados en formatos que faciliten su interpretación. Como caso de estudio se analizó la carretera San Antonio-San Vicente, en Manabí (Ecuador), donde se evidenciaba la posibilidad de subsidencia en la infraestructura vial y las edificaciones circundantes. Mediante el esquema propuesto se obtuvieron valores de desplazamiento para el período 2017-2024 y los resultados se presentaron mediante herramientas gráficas que facilitan el análisis interdisciplinario y la toma de decisiones oportunas. Los desplazamientos registrados alcanzaron valores de hasta 29 cm que provocaron grietas en la estructura de la vía. Estos resultados sugieren la existencia de un proceso de subsidencia en la zona de estudio, lo que fue corroborado mediante inspecciones visuales en varios tramos de la carretera, y enfatizan la importancia del monitoreo satelital para la detección temprana y la gestión del riesgo geológico en infraestructuras.

Palabras clave: interferometría, SENTINEL-1, estimación de desplazamientos, SNAP, InSAR

Abstract

This research presents a scheme for determining ground subsidence using satellite images SENTINEL-1 and processing with SNAP software. Necessary steps for obtaining ground displacements are described, from the download of images in the Copernicus and Alaska platforms to the final export of results in formats that allow an easy interpretation. The San Antonio-San Vicente road, in Manabí (Ecuador) was analyzed as a case study, where the possibility of subsidence in the road infrastructure and surrounding buildings was evident. Displacement values were obtained for 2017-2024 period, using the proposed technological scheme, and graphical tools allowed presenting results that facilitate interdisciplinary analysis and timely decision making. The recorded displacements reached values up to 29 cm, causing cracks in the road structure. These results suggest the existence of a subsidence process in the study area, which is corroborated by visual inspections in several sections of the road, highlighting the importance of satellite monitoring for early detection and management of geological risk in infrastructures.

Keywords: interferometry, SENTINEL-1, displacement estimation, SNAP, InSAR

1. INTRODUCCIÓN

La Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR, por sus siglas en inglés) es una valiosa herramienta que se emplea en la monitorización y el análisis de las deformaciones de la superficie terrestre asociadas a diversos fenómenos geológicos (ESA, 2017; Palacios, 2019; Braun & Veci, 2021). Se basa en el procesamiento de imágenes de radar de apertura sintética obtenidas por satélites y permite obtener mediciones precisas de los cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo. Su capacidad para cubrir grandes áreas y su disponibilidad de datos históricos y actualizados la convierten en una opción atractiva para investigadores, profesionales y entidades interesadas en el monitoreo, la gestión del medio, emplazamientos e infraestructuras.

La tecnología InSAR proporciona tanto mapas de distribución de desplazamientos como series temporales que muestran la evolución en el tiempo de los desplazamientos de la superficie del terreno y de las estructuras asentadas sobre el mismo (Besoya *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2022; Tomás, 2022; Ruiz-Armenteros *et al.*, 2023). Es una técnica de teledetección activa, que a lo largo de los años ha demostrado ser una herramienta versátil y precisa en la detección de deformaciones del terreno, lo que la hace útil en una amplia gama de aplicaciones, como en el seguimiento a las afectaciones

de peligros en incendios, sismos, ciclones, erupciones volcánicas. Además, se aplica en diversos campos de la Ingeniería Civil, la Geotecnia y la Geomática, especialmente en el ámbito de las infraestructuras (presas, embalses, carreteras, túneles), así como en la minería, en líneas de ferrocarriles, empleada también para el análisis en la estabilidad de taludes (Xiao *et al.*, 2021; Xing *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2022; Tao *et al.*, 2022; Ruiz-Armenteros *et al.*, 2023; Piter *et al.*, 2024).

InSAR es una metodología que permite calcular la diferencia de fase entre dos o más imágenes SAR de una misma área de estudio, pero obtenidas en diferentes períodos de tiempo con el propósito de determinar la topografía y/o deformación del terreno (Guzmán-Acevedo *et al.*, 2020; Tao *et al.*, 2022). La interferometría SAR se sirve de un par de pases de los satélites para medir las diferencias de fase (Martínez-Villar, 2005). La imagen SAR que se conoce como *master* (maestra o de referencia) es adquirida en la primera pasada; y, se nombra *slave* (esclava) a la imagen tomada en la segunda pasada (Palacios, 2019; Ojeda-Arzuza, 2021). Un interferograma SAR, por lo tanto, se genera al cruzar dos imágenes SAR. Este “cruzamiento” equivale a la multiplicación pixel a pixel, de la primera imagen SAR con el conjugado complejo de la segunda (Diaz, 2016). La amplitud de ambas imágenes es multiplicada, y las fases son restadas para formar el interferograma (Guzmán-Acevedo *et al.*, 2020).

Con la llegada de los dos satélites SENTINEL-1 (Torres *et al.*, 2012; Braun & Veci, 2021), los datos de radar de apertura sintética (SAR) con alta resolución temporal y espacial están disponibles libremente. Esto proporciona un marco prometedor para facilitar las investigaciones detalladas de las inestabilidades de la superficie y los movimientos en escalas grandes con alta resolución temporal, pero también plantea desafíos sustanciales de procesamiento debido a los requisitos de almacenamiento y computación. Se necesitan métodos para detectar de manera eficiente los cambios a corto plazo en entornos dinámicos. Se requieren enfoques considerando el procesamiento de una serie de escenas consecutivas para retener la resolución temporal máxima con respecto a los análisis temporales.

Actualmente se encuentra disponible una variedad de productos de software especializados en el procesamiento de datos SAR, de los cuales SNAP (Di-Bisceglie *et al.*, 2010; Fomelis *et al.*, 2018; Delgado-Blasco *et al.*, 2019; Raspini *et al.*, 2022) GMTSAR (Sandwell *et al.*, 2011), ISCE (Rosen *et al.*, 2012), GAMMA (Yu *et al.*, 2019) y SARPROZ (Perissin & Wang, 2011; Hussain, 2022) son los productos más maduros y desarrollados activamente.

En esta investigación se presenta un esquema de trabajo para la estimación de desplazamientos en el terreno a partir de imágenes satelitales de SENTINEL-1 procesadas mediante el software SNAP. Como caso de estudio se analiza la carretera San Antonio-San Vicente, ubicada en Manabí, Ecuador. Este estudio se enmarca en la Maestría en Geomática de la Facultad de Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí. Se describen las etapas del proceso, desde la descarga de las imágenes hasta la final exportación de los resultados en formatos que faciliten su interpretación y reutilización.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en la carretera San Antonio-San Vicente, Manabí, Ecuador. Esta zona es de interés debido a los antecedentes de desplazamientos en la estructura de la carretera y construcciones existentes. Se encuentra en las coordenadas: $\phi = 0^{\circ}39' N$ y $\lambda = 80^{\circ}18' W$ (Figura 1).



Figura 1. Zona de estudio: vía San Antonio-San Vicente.

En esta zona se evidencian deformaciones en la corteza terrestre. Estas se identificaron a partir de daños visibles en la infraestructura vial y las construcciones, manifestándose principalmente en un intenso agrietamiento observado mediante inspección visual. Todo ello sugiere la posibilidad de subsidencia del terreno en esta zona (Figura 2).



Figura 2. Grietas detectadas en la carretera a partir de la inspección visual (Fuente: elaboración propia).

2.1. Descarga de las imágenes satelitales

Las imágenes fueron obtenidas en formato SLC “Single Look Complex” (Zebker, 2017) desde la plataforma *Alaska Satellite Facility* (ASF), disponible en <https://search.asf.alaska.edu> (Figura 3).

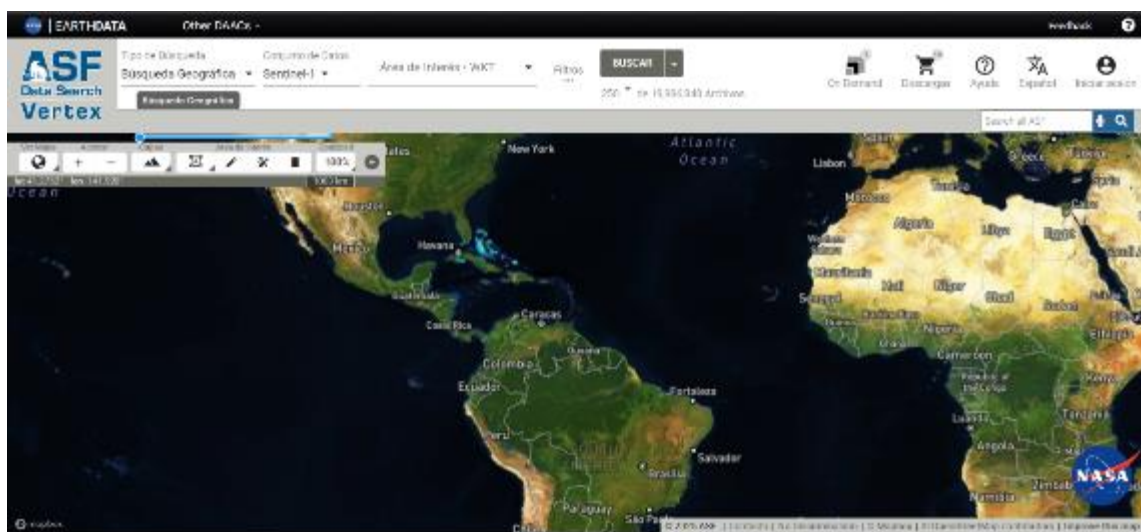


Figura 3. Vista general de la plataforma ASF.

Asimismo, se utilizó la plataforma *Copernicus Open Access Hub* (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) para mejorar la visualización de los detalles del área de estudio y verificar la delimitación del polígono correspondiente al caso de estudio (ESA, 2018; Braun & Veci, 2021).

Para la búsqueda de imágenes disponibles en el área de estudio, primero se delimitó un polígono que representa la zona de interés y, posteriormente, se aplicaron los filtros correspondientes (Figura 4).

Opciones de Área de Interés

Área de Interés - WKT

POLYGON((-76.2889 20.8343,-76.2119 20.8343,-76.2119 20.9339,-76.2889 20.9339,-76.2889 20.8343))

Borrar

Arrastre y Suelte

Archivos Geoespaciales

(shp, geojson, kml, zip)

Importar archivo

Buscar una ubicación

Filtros de Fecha

Fecha de Inicio

1/1/2023

MM/DD/YYYY

Fecha Final

6/2/2024

MM/DD/YYYY

Búsqueda Estacional

Filtros Adicionales

L1 Single Look Compl...

1/14 tipos de archivos seleccionados

Ascendente, Descendi...

2/2 direcciones de vuelo seleccionadas

IW

1/9 modos de haz seleccionados

SA, SB

2/2 subtipos seleccionados

VV

1/8 polarizaciones seleccionadas

Group ID

Figura 4. Polígono del área de estudio y filtros para realizar la búsqueda.

Una vez definido el polígono y cargado en la plataforma ASF, se visualizan los resultados de las imágenes disponibles en el área de estudio (Figura 5).

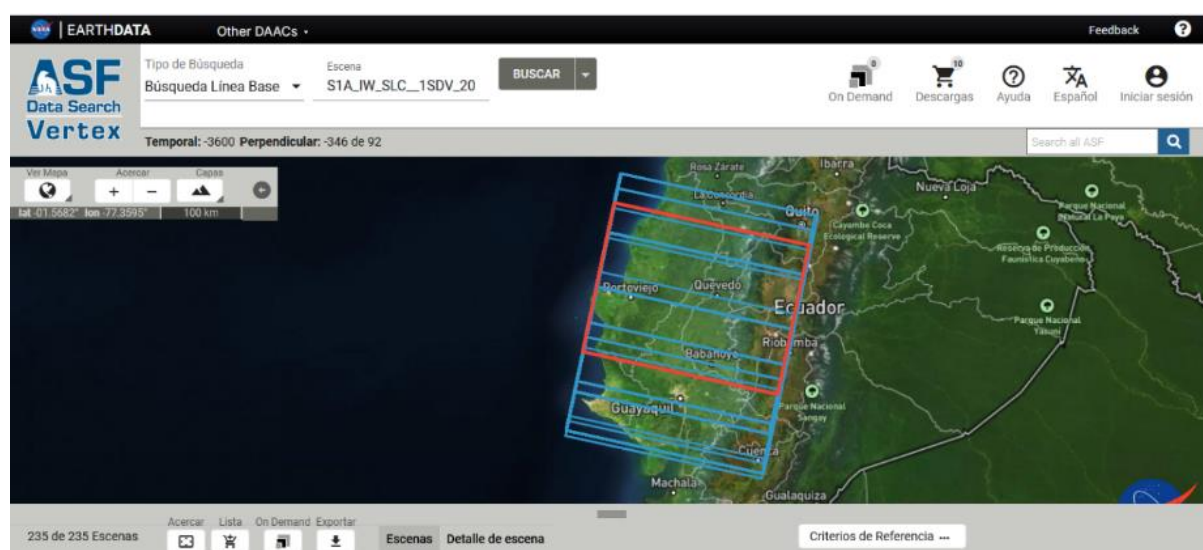


Figura 5. Visualización en ASF de las imágenes de la zona de estudio.

Luego de completar esta operación, la plataforma muestra todos los resultados disponibles según los parámetros introducidos. A partir de estos, se selecciona una imagen de referencia y se elige el par más adecuado mediante el análisis de las condiciones de la técnica del Conjunto de Pequeñas Líneas de Base -SBAS, por sus siglas en inglés- (Figura 6).

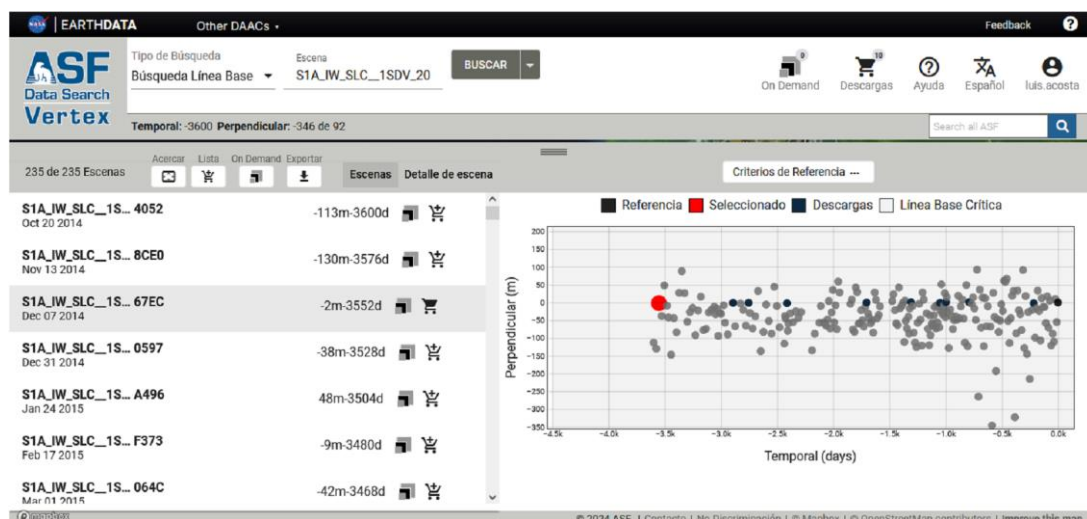


Figura 6. Búsqueda por línea base.

Para la búsqueda SBAS, se seleccionó una imagen de referencia del área de estudio, y la plataforma identificó todas las escenas secundarias que coincidían con la cobertura espacial. Posteriormente, las imágenes fueron agrupadas en pares siguiendo un orden cronológico, con el fin de facilitar su visualización y la selección de la más adecuada para el estudio. Además, se aplicó un filtro estableciendo una línea de base temporal de 12 días, mientras que la línea de base perpendicular se mantuvo en su valor máximo (Figura 7).

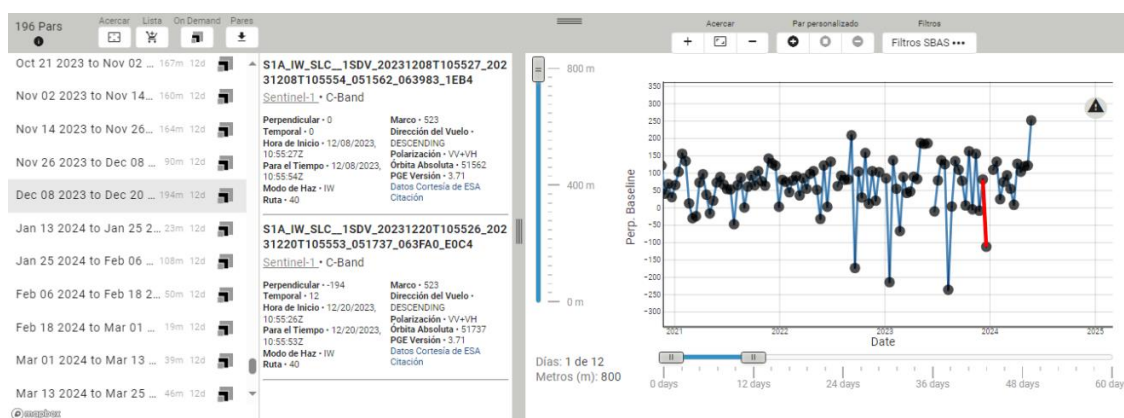


Figura 7. Búsqueda SBAS en la plataforma ASF.

Como resultado de la búsqueda, se obtuvieron las imágenes identificadas en la Tabla 1. Estas imágenes cumplen con el requisito de tener una desviación respecto a la línea base que no supera el metro. Además, presentan una distribución uniforme de los intervalos de tiempo desde 2017 hasta la fecha.

Tabla 1. Denominación de las imágenes identificadas para el estudio

ID imagen	Fecha de adquisición	Coordenadas geográficas (grados)	
		φ	λ
S1A_IW_SLC__1SSV_20150909T110040_20150909T110108_007637_00A966_00DA	2015-09-09	1.83	78.18
S1A_IW_SLC__1SSV_20160224T110032_20160224T110100_010087_00EDCD_C14B	2016-02-24		
S1A_IW_SLC__1SSV_20170424T110052_20170424T110119_010962_010747_782F	2017-04-24		
S1B_IW_SLC__1SSV_20180224T110017_20180224T110044_004441_007BA3_7C5A	2018-02-24		
S1B_IW_SLC__1SDV_20210219T110023_20210219T110050_009691_0117BD_CF35	2021-02-19		
S1B_IW_SLC__1SDV_20240615T110046_20240615T110113_027366_0344BA_E61	2024-06-15		

2.2. Flujo de trabajo en el SNAP

El flujo de trabajo empleado se ilustra en las Figuras 8, 9 y 10 mediante la herramienta de grafos disponible en SNAP (ESA, 2017; SPA, 2018; ESA, 2021; Mancini, 2021). Las operaciones utilizadas para obtener los desplazamientos incluyeron *TOPSAR-Split*, *Apply-Orbit-File*, *Back-Geocoding*, *Enhanced-Spectral-Diversity*, *Interferogram*, *TOPSAR-Deburst*, *TopoPhaseRemoval*, *Multilook*, *GoldsteinPhaseFiltering* y *SnapHuExport*.



Figura 8. Gráfico utilizado para la primera etapa de procesamiento en SNAP.

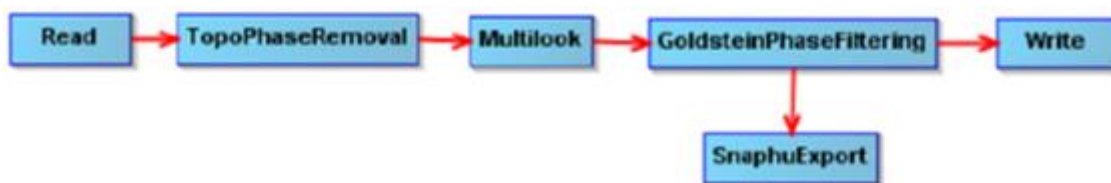


Figura 9. Gráfico utilizado para la segunda etapa de procesamiento en SNAP.

El primer paso (*TOPSAR-Split*) forma parte del preprocesamiento de las imágenes, cuyo objetivo es seleccionar únicamente el área de interés y, de esta manera, optimizar el proceso computacional. Dado que el área de interés se encuentra contenida en tres ráfagas de la imagen SENTINEL-1, no es necesario procesar la totalidad de la subfranja compuesta por ocho ráfagas. La extracción de ráfagas en el modo TOPS de SENTINEL-1 debe realizarse por adquisición y por subfranja. Este procedimiento reduce el tiempo de procesamiento, siendo especialmente recomendable cuando el análisis se centra en una zona específica y no en la escena completa.

El procesamiento (*Apply-Orbit-File*) se basa en aplicar los archivos de órbita a los productos SENTINEL-1, lo que proporciona información precisa sobre la posición y la velocidad del satélite. El siguiente paso (*Back-Geocoding*), consiste en registrar conjuntamente las dos imágenes de SENTINEL-1, donde la segunda imagen (esclava) se corregirá respecto a la primera (maestra).

En el paso *Enhanced-Spectral-Diversity* se utilizan los datos del área superpuesta de las ráfagas adyacentes, seguido de la corrección de rango y azimut para cada ráfaga. En la siguiente etapa (*Interferogram*) se genera un interferograma entre el par interferométrico (maestro y esclavo), incorporando una estimación de la imagen de coherencia a partir de la pila de imágenes complejas corregidas, con un valor de coherencia de 0.3. Posteriormente, en el proceso de *TOPSAR-Deburst*, las imágenes de todas las ráfagas en todas las subfranjas se remuestrean en una cuadrícula de espaciado de píxeles común en rango y azimut, manteniendo la información de fase.

El siguiente paso consiste en eliminar la fase topográfica inducida del interferograma desglosado (*TopoPhaseRemoval*). Dado que la imagen SAR original contiene ruido moteado inherente, en este momento se aplica el procesamiento *Multilook* para reducir la apariencia moteada y mejorar la interpretación de la imagen. En la etapa *GoldsteinPhaseFiltering* se lleva a cabo el filtrado de fase del interferograma con el fin de reducir el ruido de fase, lo que mejora la visualización y facilita el desarrollo del siguiente paso de desenrollado de fase. El paso final en esta parte del procesamiento es

exportar los datos para el procesamiento de *SNAPHU Unwrapping*, con el objetivo de aplicar el desenrollado de fases (ESA, 2017; ESA, 2021; Braun & Veci, 2021).

La Figura 10 ilustra el proceso para el desenrollado de fase. Mediante este proceso, se obtiene un archivo con la extensión *KMZ*, que puede abrirse en *Google Earth* para visualizar el interferograma resultante y los índices de subsidencia en la zona seleccionada.

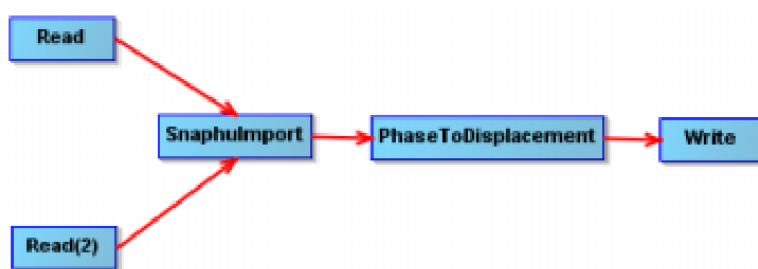


Figura 10. Gráfico utilizado para obtener el interferograma resultante.

Para que se observe un desplazamiento, es necesario que la coherencia sea menor o igual a 0.3. En caso de no obtener desplazamiento, se debe cambiar las imágenes analizadas, ya que podrían contener un nivel de ruido excesivo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 11 muestra los resultados al aplicar el flujo de trabajo descrito previamente, con los interferogramas diferenciales generados. Esto se realizó luego de importar los resultados del procesamiento de *SNAPHU* y construir el producto interferométrico, que incluye la banda de fase sin envolver y los metadatos del producto original. El mapa de coherencia se presenta en la Figura 11(a). Además, es posible convertir la fase interferométrica a un mapa de desplazamiento, como se observa en la Figura 11(b). Debido a las variaciones topográficas de la escena y la inclinación del sensor del satélite, las distancias pueden distorsionarse en las imágenes SAR. Por esta razón, se deben realizar correcciones del terreno para compensar estas distorsiones, a fin de que la representación geométrica de la imagen sea lo más precisa posible en relación con el mundo real. El resultado de los desplazamientos corregidos se muestra en la Figura 11(c).

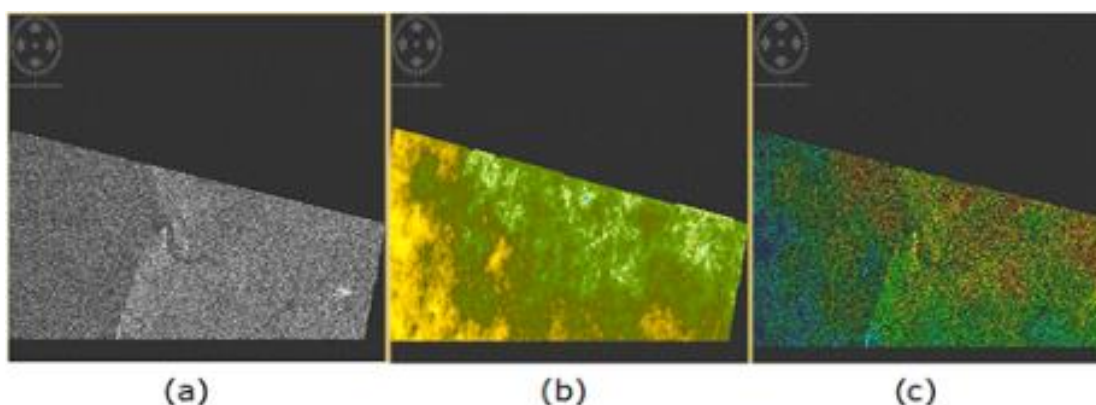


Figura 11. (a) Coherencia. (b) Desplazamiento con ruidos. (c) Desplazamiento con correcciones.

Para el desenrollado de fase se utilizan los operadores *SnaphuImport* y *PhaseToDisplacement*. A partir de la aplicación de cada uno de los pasos descritos en el procedimiento, se obtiene un nuevo archivo que contiene los desplazamientos generados entre las imágenes maestra y esclava. En este archivo, el color rojo indica las áreas donde podría ocurrir subsidencia del terreno, como se muestra en la Figura 12.

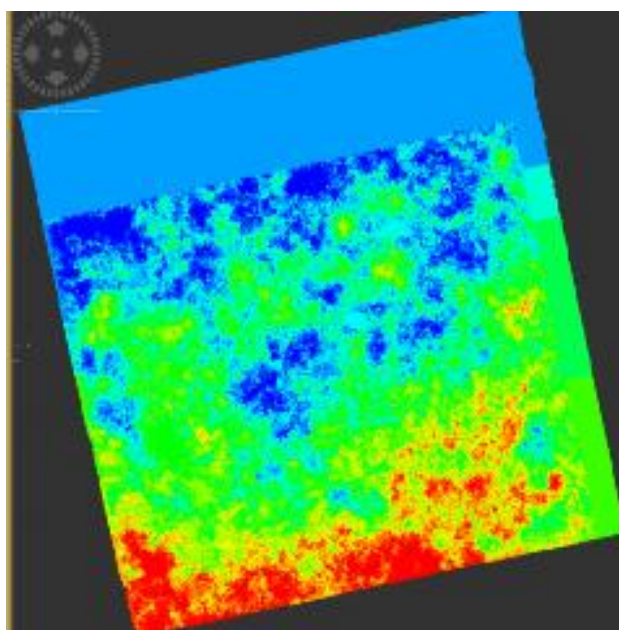


Figura 12. Visualización de los desplazamientos generados entre las imágenes maestra y esclava.

Los resultados de los desplazamientos, luego de eliminar los valores incoherentes y exportarlos para su visualización de manera general en *Google Earth*, se muestran en la Figura 13.

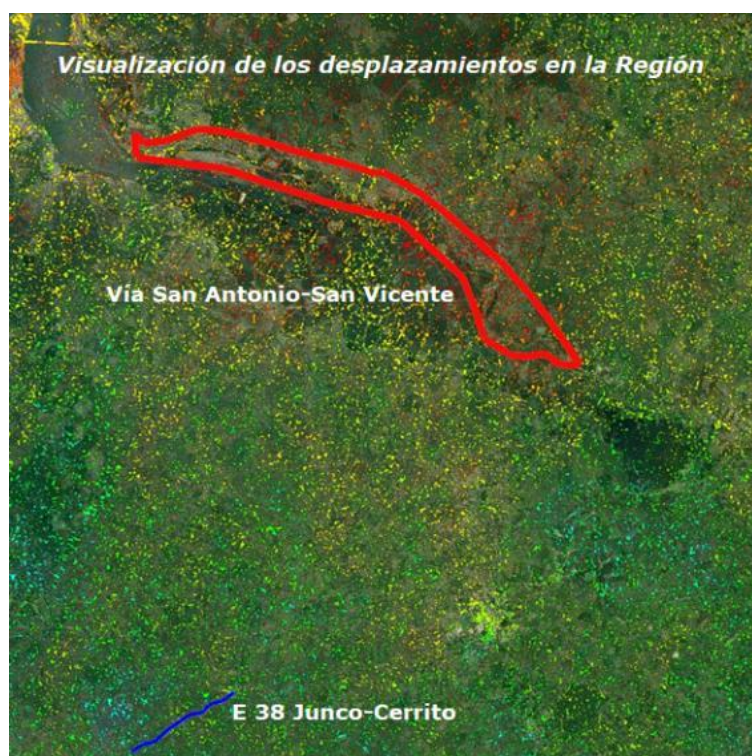


Figura 13. Visualización general de los desplazamientos en *Google Earth*.

La Figura 14 presenta el mapa de los desplazamientos obtenidos en la zona de estudio, calculados a partir de imágenes de radar para un periodo de dos años, desde 2017 hasta 2019. Los valores de desplazamiento oscilan entre 11 cm y 21 cm, con un valor promedio de 16 cm, lo que corresponde a una velocidad de deformación de la corteza terrestre de 8 cm por año.



Figura 14. Resultados de los desplazamientos para el periodo 2017-2019.

Los valores de los desplazamientos obtenidos para el periodo de 2019 a 2024 varían entre 10 cm y 29 cm, con un valor promedio de 20 cm, lo que

corresponde a una velocidad de deformación de la corteza terrestre de 5 cm por año, como se muestra en la Figura 15.

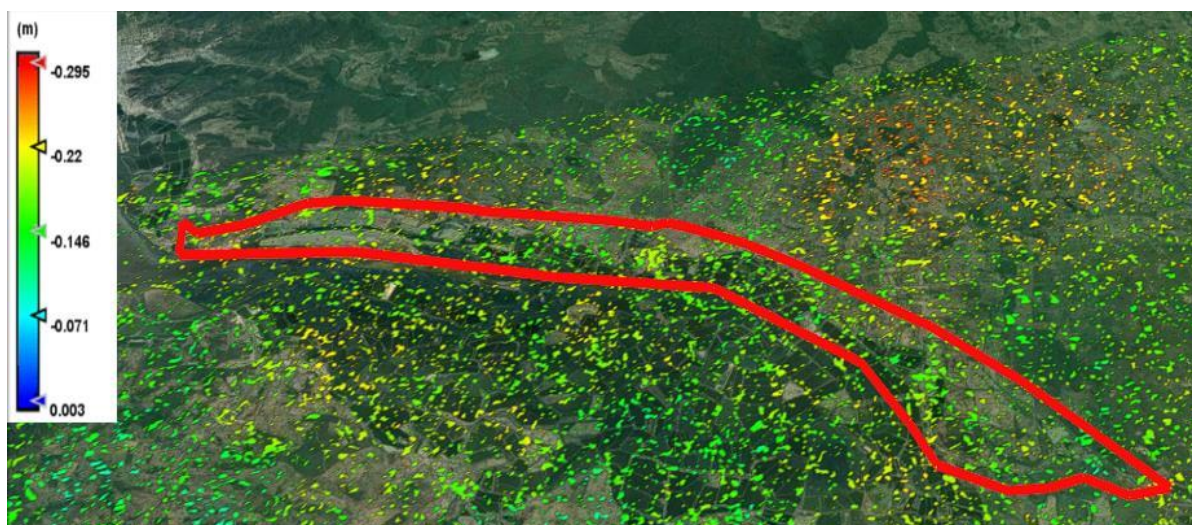


Figura 15. Resultados de los desplazamientos para el periodo 2019-2024.

Los desplazamientos obtenidos en la zona de estudio son significativos, alcanzan un valor máximo de 29 cm, lo que sugiere la posible existencia de subsidencia en el área. Esta hipótesis ha sido corroborada a través de inspecciones visuales realizadas en diferentes tramos de la carretera, donde se evidenció un intenso agrietamiento y fallas en la base de la subestructura de la vía, como se ilustra en la Figura 16.



Figura 16. Correlación de los desplazamientos con los daños en la vía.
(Fuente: elaboración propia).

4. CONCLUSIONES

- La aplicación del software SNAP ha demostrado ser una herramienta eficaz para calcular, de manera rápida y precisa, los cambios en la superficie del terreno a partir de datos obtenidos de plataformas de acceso libre. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados en el análisis de subsidencia en nuevas zonas de construcción, así como en la identificación de áreas con mayor susceptibilidad a deformaciones del terreno.
- Si bien la integración de SNAP con otros programas especializados no fue viable en este caso debido a la densa vegetación del área de estudio, el software demostró su efectividad en este tipo de escenarios. Se logra obtener un número significativo de puntos con la coherencia necesaria para el análisis e interpretación de los resultados, lo que facilita la toma de decisiones oportunas sobre la vulnerabilidad de la infraestructura vial y los emplazamientos constructivos. Además, SNAP ofrece ventajas en términos de facilidad de manejo de datos, disponibilidad de información georreferenciada y generación de visualizaciones gráficas de los desplazamientos.
- Los valores de desplazamiento obtenidos sugieren la existencia de subsidencia en la zona de estudio, lo que fue corroborado mediante inspecciones visuales en varios tramos de la vía. Durante el período analizado (2017-2024), se observan desplazamientos significativos, con magnitudes que oscilan entre 10 cm y 29 cm, y velocidades de deformación de la corteza terrestre de hasta 8 cm/año. Estas deformaciones han provocado la aparición, en distintos tramos de la carretera, de grietas representativas que evidencian la necesidad de monitoreo continuo y medidas de mitigación.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración entre las universidades: Estatal del Sur de Manabí (UNESUM), Técnica de Manabí (UTM), Holguín (UHo) y Moa (UMoa), en particular a la Maestría en Geomática de la Facultad de Posgrado de la UTM y a la Facultad de Ciencias Técnicas, Carrera de Ingeniería Civil, de la UNESUM. Asimismo, expresan un agradecimiento especial al MSc. Luis Alberto Ramírez Meléndez, de la Facultad de Geología y Minas de la UMoA, y al Ing. Adrián de la Luz Álvarez Martínez, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Holguín.

6. REFERENCIAS

- Besoya, M., Govil, H., & Bhaumik, P. (2020). Review on surface deformation evaluation using multitemporal SAR interferometry techniques. *Springer*. <https://doi.org/10.1007/s41324-020-00344-8>.
- Braun, A., & Veci, L. (2021). *TOPS Interferometry Tutorial*.
- Chen, Y., Zhang, L., He, Y., Wang, W., & Yang, W. (2022). Ground deformation monitoring and analysis of Zhongchuan International Airport based on the time series InSAR of Sentinel-1A with ascending and descending orbits. *Journal of Engineering Geology*, 30(3), 803-816.
- Delgado-Blasco, J. M., Fomelis, M., Stewart, C., & Hooper, A. (2019). Measuring urban subsidence in the Rome metropolitan area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS persistent scatterer interferometry. *Remote Sensing*, 11(2), 129.
- Di-Bisceglie, M., Di Santo, M., Galdi, C., Lanari, R., & Ranaldo, N. (2010). Synthetic aperture radar processing with GPGPU. *IEEE Signal Processing Magazine*, 27(2).
- Díaz, D. E. H. (2016). *Interferometría radar de apertura sintética (insar) aplicada al estudio del movimiento en laderas aledañas al volcán calbuco con ayuda de imágenes sentinel-1a*. Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago.
- ESA. (2017). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation (TM-19, February 2007).
- ESA. (2018). LAND SUBSIDENCE WITH SENTINEL-1 using SNAP. https://rus-copernicus.eu/portal/wp-content/uploads/library/education/training/HAZA03_Land-Subsidence_Mexico-city.pdf
- ESA. (2021). Sentinel-1 Toolbox. TOPS Interferometry Tutorial. Updated june 2021.
- Fomelis, M., Blasco, J., Desnos, Y., Engdahl, M., Fernández, D., Veci, L., & Wong, C. (2018). ESA SNAP-StaMPS integrated processing for Sentinel-1 persistent scatter interferometry. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- Guzmán-Acevedo, G., Quintana-Rodríguez, J., & Gasca-Zamora, H. (2020). Análisis del potencial de tecnología satelital InSAR para el monitoreo de la infraestructura carretera.
- Hussain, M. A., Chen, Z., Shoaib, M., Shah, S. U., Khan, J., & Ying, Z. (2022). Sentinel-1A for monitoring land subsidence of coastal city of Pakistan using Persistent Scatterers In-SAR technique. *Scientific Reports*, 12(1), 5294.
- Mancini, F., Grassi, F., & Cenni, N. (2021). A workflow based on SNAP–StaMPS open-source tools and GNSS data for PSI-Based ground deformation using dual-orbit sentinel-1 data: Accuracy assessment with error propagation analysis. *Remote Sensing*, 13(4), 753.

- Martínez-Villar, J. (2005). *Elaboración y análisis de imágenes radar desde satélite: Monitorización de deformaciones del terreno*. Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, Universitat Politècnica Catalunya, España.
- Ojeda-Arzuza, A. D. (2021). *Potencial de la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) para el análisis del desplazamiento del terreno: caso de estudio Barranquilla, Colombia*. Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.
- Palacios, D. G. (2019). *Aplicación de la interferometría SAR satelital para la detección y monitoreo de los deslizamientos en la carretera escénica Tijuana-Ensenada, BC*. (Maestría), Baja California, México.
- Perissin, D., & Wang, T. (2011). *The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China*. Proceedings of the ISRSE. Sidney, Australia.
- Piter, A., Haghshenas-Haghighi, M., & Motagh, M. (2024). Challenges and Opportunities of Sentinel-1 InSAR for Transport Infrastructure Monitoring. *PFG-Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 1-19.
- Raspini, F., Caleca, F., Del Soldato, M., Festa, D., Confuorto, P., & Bianchini, S. (2022). Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis. *Earth-Science Reviews*, 235, 104239.
- Rosen, P., Shams, K., Gurrola, E., Goerge, B., & Knight, D. (2012). InSAR scientific computing environment on the cloud. AGU Fall Meeting Abstract, 2012, IN31C-1508.
- Ruiz-Armenteros, A., Delgado-Blasco, J. M., Bakon, M., Lamas-Fernández, F., Marchamalo-Sacristán, M., Gil-Cruz, A. J., ... & Sousa, J. (2023). *Monitoring embankment dams from space using satellite radar interferometry: Case studies from RemoDams project*. In 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM 2022) (pp. 397-404).
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., & Wessel, P. (2011). Gmtsar: An insar processing system based on generic mapping tools.
- SPA, S. I. (2018). Land Subsidence with Sentinel-1 using SNAP. (version 1.2). Retrieved from RUS Lectures at. <https://rus-copernicus.eu/portal/the-rus-library/learn-by-yourself/>
- SNAP. (s.f.). Obtenido de <https://step.esa.int/main/>
- Tao, W., Dai, L., Zhang, Z., Tang, B., & Yu, L. (2022). Stability Analysis Model of Expressway Passing through Goaf Based on SBAS-InSAR Technology. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Tomás, R. (2022). Aplicaciones de la interferometría radar de satélite en ingeniería civil. Universidad de Alicante, España.
- Torres, R., Snoeji, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., & Rostan, F. (2012). *GMES Sentinel-1 mission. Remote sensing of environment* (120).

- Xiao, B., Zhao, J., Li, D., Xi, W., Zhou, D., Gao, S., & Zhao, Z. (2021). *The Subsidence Detection and Analysis Along Kunming Subway Network Based on SBAS-InSAR*. In 2021 28th International Conference on Geoinformatics (pp. 1-8). IEEE.
- Xing, X., Zhu, Y., Xu, W., Peng, W., & Yuan, Z. (2022). Measuring Subsidence Over Soft Clay Highways Using a Novel Time-Series InSAR Deformation Model With an Emphasis on Rheological Properties and Environmental Factors (NREM). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-19.
- Yu, H., Lan, Y., Yuan, Z., Xu, J., & Lee, H. (2019). Phase unwrapping in InSAR: A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7(1), 40-58.
- Zebker, H. (2017). User-friendly InSAR data products: Fast and simple timeseries processing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(11), 2122-2126.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de autores

JADP: revisión bibliográfica, trabajo en la base de datos, procesamiento e interpretación de los resultados, redacción del documento original. **LEAG**: interpretación de los resultados, revisión del documento y corrección de la versión final. **ECVP**: revisión del documento primario y de la versión final. **WHB**: trabajo en la base de datos, procesamiento e interpretación de los resultados. **HAPG**: sugerencia de la zona de estudio; revisión del documento primario y de la versión final. Todos los autores aprobaron la versión final del artículo enviado a publicación.

ORCID

JADP, <https://orcid.org/0000-0003-3830-9719>

LEAG, <https://orcid.org/0000-0002-2723-9850>

ECVP, <https://orcid.org/0000-0002-2906-8717>

WHB, <https://orcid.org/0000-0002-6471-0381>

HAPG, <https://orcid.org/0000-0002-9997-9591>

Recibido: 20/01/2025

Aprobado: 05/02/2025