

Monitoreo de deslizamientos para la preservación de sitios arqueológicos

Rosell, Patricia A.^{1,2,5}; Euillades, Pablo^{2,5}; Euillades, Leonardo^{2,5}; Castillo, Emiliano³; Mendoza, Manuel¹; Olguín, Leandro¹; Zárate Bernardi, Sol^{3,4,5}; Mackern, María Virginia^{1,2,5}; Mateo, María Laura^{1,2}; Camisay, María Fernanda^{1,5}; Durán, Víctor^{3,4,5}; Trillas, Darío^{3,4}

1 Facultad de Ingeniería y Enología. Universidad Juan Agustín Maza. Argentina.
 2 Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ingeniería. Instituto CEDIAC. Argentina.
 3 Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Filosofía y Letras. Argentina.
 4 Laboratorio de Paleoeología Humana, Instituto ICB. CONICET-Universidad Nacional de Cuyo.
 5 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Introducción

La preservación del patrimonio cultural tiene por objetivo la conservación y el acceso a los bienes y evidencias del pasado de la humanidad. Los sitios arqueológicos ubicados en las laderas de montañas presentan el riesgo de ser afectados por procesos de remoción en masa, como por ejemplo deslizamientos. Éstos ponen en riesgo tanto la naturaleza como la vida, por lo que su monitoreo es fundamental para la generación de políticas de prevención. En este sentido, las técnicas de Interferometría Diferencial de Imágenes de Apertura Sintética (DInSAR), son de esencial importancia para su identificación y monitoreo, ya que permiten alta resolución espacial y temporal.

Objetivos

- Identificar posibles riesgos en sitios arqueológicos en alta montaña mediante la aplicación de DInSAR para el cálculo de velocidad media de deformación.
- Identificar vías de flujo de material ante una posible ruptura de deslizamientos.

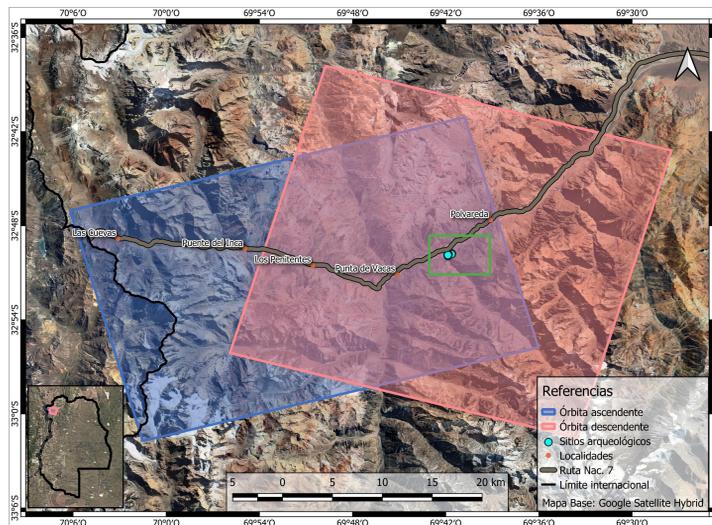


Figura 1. Área arqueológica de interés (Verde) y área procesada en órbitas ascendente y descendente

Área de estudio

Área arqueológica de interés: Margen sureste de la confluencia entre Río Mendoza y Arroyo Colorado (≈5 km al este de Punta de Vacas – Mendoza)
 Área procesada: ≈1450 km² cada órbita. En común: ≈850 km²

Metodología

- Procesamiento DInSAR:
 - Sensores: Sentinel 1A y B
 - Período: 2015 a 2022
 - Se descartaron imágenes pertenecientes a épocas de deshielo para evitar decorrelación temporal.
 - Órbita ascendente: 46 imágenes
 - Órbita descendente: 191 imágenes
 - DEM: SRTM 30 m
 - Método SBAS para la generación de mapas de velocidad media de deformación
 - Coherencia: 0,80
 - Corrección atmosférica aplicada: GACOS
- Generación de direcciones de flujo: SAGA para Qgis v. 3.10.6
- Cálculo de índice SAVI con imágenes PLANET (res. 3 m)

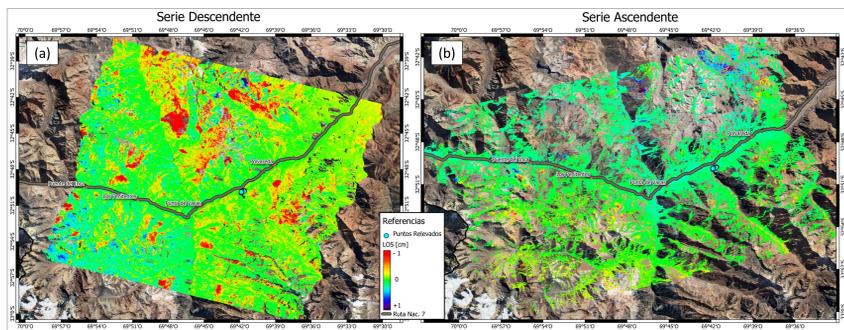


Figura 2. Mapas de velocidad media de deformación descendente (a) y ascendente (b), medidos a lo largo de la línea de visión del satélite (LOS)

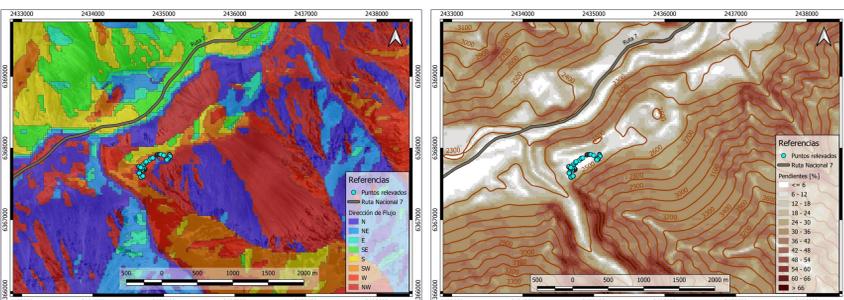


Figura 3. Mapa de direcciones de flujo

Figura 4. Mapa de pendientes expresadas en porcentaje [%]

Resultados

- Se generaron mapas de velocidad media de deformación con una resolución de 80 m.
- Los mapas mostraron la presencia de diversos procesos de remoción en masa en toda el área procesada, con velocidades medias de deformación, cercanas a ±1 cm/año para la serie descendente (Figura 2a) y ±0,5 cm/año para la serie ascendente (Figura 2b), ambas medidas a lo largo de la vista del satélite (Line-Of-Sight, LOS).
- Debido a problemas de funcionamiento de uno de los satélites, la serie ascendente presentó una gran discontinuidad de datos, generando que el mapa de velocidad media de deformación muestre una menor cantidad de píxeles coherentes.
- Entre los deslizamientos detectados, se identificó uno cercano a sitios arqueológicos (Figura 5). Este fue analizado en forma independiente, mediante dos series temporales de deformación.
 - Serie descendente: Presenta comportamiento de características estacionales, relacionadas, posiblemente, con efectos atmosféricos no compensados (Figura 5c).
 - Serie ascendente: Muestra una componente de ruido más intensa y pone en evidencia la falta de imágenes para los últimos años de estudio (Figura 5d).
- A causa de estos fenómenos, se aplicó un modelo de ajuste lineal a ambas series. Esto permitió determinar que ambos mapas se presentan con el mismo sentido de deformación, mostrando movimientos principalmente verticales.
- A fin de identificar si este deslizamiento podría generar un riesgo para los sitios estudiados, se calculó un mapa de dirección de flujo (Figura 3) derivado del mapa de pendientes (Figura 4). Ambos se calcularon con Qgis y su complemento SAGA. Este mapa fue superpuesto a los mapas de deformaciones con el objetivo de analizar la dirección del flujo ante una posible ruptura del deslizamiento (Figura 5).
- Adicionalmente, se calculó un mapa de vegetación (Figura 6) con el objetivo de analizar la cobertura vegetal presente en el área.

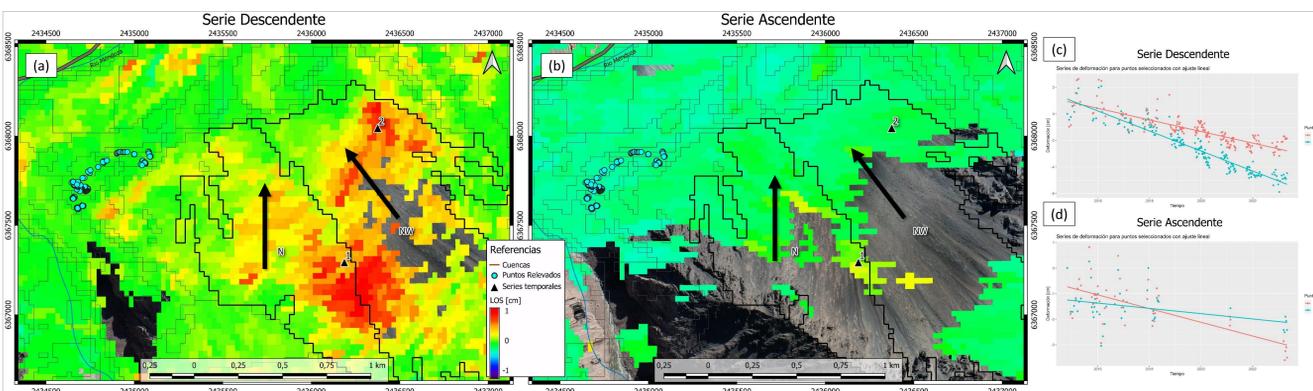


Figura 5. Dirección de flujo de deslizamientos para el área de interés propuesta.

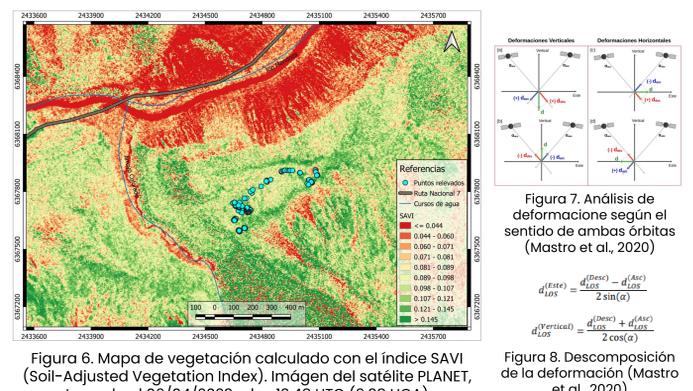


Figura 6. Mapa de vegetación calculado con el índice SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index). Imagen del satélite PLANET, tomada el 06/04/2023 a las 13:48 UTC (9:38 HOA)

Figura 8. Descomposición de la deformación (Mastro et al., 2020)

Conclusiones

- En el área procesada se detectaron fenómenos de remoción en masa, posiblemente relacionados a deslizamientos de material. Se pudo identificar uno en cercanías a los sitios arqueológicos estudiados.
- El mapa de velocidad media de deformación mostró movimientos de -1 cm/año para la órbita descendente (figura 5a), y -0,5 cm/año para la ascendente (Figura 5b). Considerando un ángulo de observación medio del satélite de 34°, y siguiendo las ecuaciones de Mastro et al., 2020 (Figura 8), la magnitud de la deformación en sentido este-oeste es de -0,14 cm/año mientras que la componente vertical presenta un valor de -0,62 cm/año. Esto se condice con el sentido de ambas series de deformación, el cual indica movimientos verticales descendentes (Figura 7).
- Aunque los resultados muestran que la componente de deslizamiento principal es la vertical, los valores calculados están al límite de la precisión de la técnica, por lo que dichas magnitudes deberían considerarse solo como aproximaciones.
- En lo que respecta a la órbita ascendente, esta presentó una baja cantidad de imágenes debido a fallas del sensor, por lo que los resultados de este procesamiento sólo aportan información en los primeros años de estudio (2014-2018). Esto es un limitante para tareas de monitoreo ya que no se permite el estudio de la temporalidad de los deslizamientos detectados.
- Con lo mencionado previamente, se presenta un caso en donde la búsqueda de imágenes por épocas de año no resulta óptima, ya que no permite estudiar la continuidad de las deformaciones, limita los estudios de efectos atmosféricos y disminuye notablemente la cantidad de imágenes posibles a ser utilizadas.
- Mediante el análisis de orientaciones del terreno, se puede observar que el deslizamiento presente en cercanías de los sitios estudiados se encuentra en dos cuencas con dirección de flujo Norte y Noroeste. Ante un posible desmoronamiento de material, el flujo se alejaría de los sitios actualmente estudiados. Sin embargo, sí podría verse afectado las zonas que están previstas prospectar a futuro.
- Dadas las complejidades que presenta la topografía, los modelos de corrección atmosférica no han podido modelar correctamente esta componente, dejando remanentes que han afectado el cálculo de los mapas de deformación. Es necesario aplicar modelos a precisiones más altas y con datos obtenidos in situ.

Bibliografía

- Acosta, G., Rodríguez, A., Euillades, P., Euillades, L., Ruiz, F., Rosell, P., Sanchez, M., Leiva, F., Ariza, J., & García, H. (2021). Detection of active landslides by DInSAR in Andean Precordillera of San Juan, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 108(January), 103205. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103205>
- Chen, F., Guo, H., Tapete, D., Cigna, F., Piro, S., Lasaponara, R., & Masini, N. (2022). The role of imaging radar in cultural heritage: From technologies to applications. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112(December 2021), 102907. <https://doi.org/10.1016/j.ijag.2022.102907>
- Durán, V., M.S. Zárate Bernardi, D. Winocor, M.I. Zonana, D. Trillas, A. Castillo, D. Estrella, D. Guevara, A. Gasco y R. Barberena. Caminos, pasos y paisajes sacralizados en el extremo sur del Tawantinsuyu. (2022). *Revista Comechingonia*. Aceptado para su publicación en Diciembre de 2022.
- Euillades, P., Euillades, L., Pepe, A., Mastro, P., Falabella, F., Imperatore, P., Tang, Y., & Rosell, P. (2021). Recent advancements in multi-temporal methods applied to new generation SAR systems and applications in South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 111(May), 103410. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103410>
- Mastro, P., Serio, C., Masiello, G., & Pepe, A. (2020). The Multiple Aperture SAR Interferometry (MAI) Technique for the Detection of Large Ground Displacement Dynamics: An Overview. *Remote Sensing*, 12(7), 1189. <https://doi.org/10.3390/rs12071189>
- Planet Team (2022). Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth. San Francisco, CA. <https://api.planet.com>
- Rosell, P. (2022). Desarrollo de un modelo de corrección de la influencia del vapor de agua troposférico en el procesamiento DInSAR con el aporte de GNSS y ERA5. Tesis Doctoral. FCEN-UNCuyo

Agradecemos los trabajos de excavación llevados a cabo por la Dra. Alejandra Gasco y las Prof. Inés Zonana y Jimena Paiva (CONICET-UNCuyo), con participación de estudiantes de la carrera de Arqueología de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNCuyo. Estos trabajos interdisciplinarios han sido posibles gracias al financiamiento de SIIP-UNCuyo, PIBAA-CONICET y UMaza.