

Análisis de la deformación superficial del deslizamiento de tierra que afecta la localidad de Cuenca, Huancavelica, mediante datos de radar terrestre - GBSAR, imágenes de radar satelital del S1A/B y mediciones GPS

 Renzo Anchivilca*¹ y Juan Villegas-Lanza²

¹Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

²Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

Recibido 21 Feb 2024 – Aceptado 30 Mar 2024 – Publicado 23 Abr 2024

Resumen

Los deslizamientos de tierra en el Perú ocurren frecuentemente debido principalmente a factores condicionantes, tales como la pendiente y el tipo de suelo, así como factores desencadenantes, tales como las precipitaciones pluviales, terremotos e incluso la actividad humana. En este trabajo se emplearon técnicas geodésicas para caracterizar la deformación superficial de un deslizamiento localizado en Cuenca, Huancavelica, en la región central del Perú. Este deslizamiento viene afectando desde hace más de una década, no solamente a la infraestructura de dicha localidad, sino también vías de comunicación, campos de cultivo, entre otros, tal y como se observó en 2014 cuando un deslizamiento produjo el embalse del río Mantaro. Con ese propósito, se procesaron dos diferentes fuentes de datos de radar; la primera consiste en datos de imágenes de radar de apertura sintética (SAR) de la misión satelital Sentinel 1 (S1), y la segunda en datos de un radar terrestre denominado GBSAR (Ground Based SAR), el cual está ubicado a 630 metros frente al deslizamiento. Los datos analizados comprenden el periodo del 2019 al 2023, y fueron procesados con dos algoritmos que se emplean para generar interferogramas y series de tiempo: Frequency Domain Back Projection (FDBP) y Small Baseline Subset InSAR (SBAS InSAR). Los resultados de desplazamiento fueron validados con datos GPS obtenidos en 3 puntos de control ubicados en el área de estudio, para los cuales se observaron desplazamientos horizontales de hasta 12.5 mm y 12.6 mm en las estaciones CU17 y CU16, respectivamente. Los resultados muestran que los valores obtenidos con SBAS InSAR son muy similares a los valores GNSS registrados. Sin embargo, los resultados encontrados con esta técnica dependen de la línea de vista del satélite con respecto a la orientación del deslizamiento. Los valores obtenidos del GBSAR son físicamente más robustos en comparación con los datos GNSS, encontrando un desplazamiento de hasta 87.54 mm que se correlaciona temporalmente con el final de la temporada de lluvias. En conclusión, los sistemas GBSAR se consideran más apropiados para estudiar deslizamientos ya que, al poder alcanzar una línea de base cero y presentar una mayor tasa de adquisición de datos, pueden servir como una herramienta de monitoreo para detectar desplazamientos en deslizamientos de tierra.

Palabras clave: SBAS InSAR, FDBP, deslizamiento de Cuenca.

* renzo.anchivilca@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



Analyzing of the surface deformation of the landslide that affects Cuenca village, Huancavelica from terrestrial radar data - GBSAR, S1A/B satellite radar images and GPS measurements

Abstract

Landslides in Peru occur frequently due mainly to conditioning factors such as slope and type of soil, as well as triggering factors like rainfall, earthquakes, and even human activity. In this study, we use geodetic techniques to characterize the surface deformation of a landslide located in Cuenca, Huancavelica, in central Peru. This landslide which started a decade ago, is currently affecting the infrastructure, communication routes, and farmlands of the Cuenca village. In 2014 the landslide produced the damming of the Mantaro river. We process data from two radar sources: the first one consists of synthetic aperture radar (SAR) satellite data from the Sentinel-1 (S1) satellite mission, and the second one consists of data from a terrestrial radar called GBSAR (Ground Based SAR), located 630 m away from the landslide. The data were analyzed covering the period from 2019 to 2023, and were processed with two algorithms used to generate interferograms and time series: Small Baseline Subset InSAR (SBAS InSAR) and Frequency Domain Back Projection (FDBP). The displacements obtained with both SAR techniques were then compared to the displacements of three GPS campaign stations located in the study area, for which we observed displacements of up to 12.5 mm and 12.6 mm, in the CU17 and CU16 stations, respectively. Our results suggest that the SBAS InSAR technique provides suitable results since are in agreement with the GNSS data. However, the results with this technique depends of the line of sight of the satellite with respect of the orientation of the landslide. The values obtained with the GBSAR technique are physically more robust compared with GNSS data, we found displacement as large as 87.54 mm that temporally correlate with the end of the rain season. In summary, GBSAR systems are considered more appropriate for studying landslides, as they can reach a zero baseline and have a higher rate and continuous data acquisition, which can serve as a monitoring tool to detect displacement in landslides.

Keywords: SBAS InSAR, FDBP, Cuenca landslide.

1. Introducción

Los movimientos en masa son fenómenos que se producen en diversos lugares del planeta, y su importancia se hace notoria cuando causan la destrucción y/o deterioro de cultivos, generan daños en infraestructura pública y viviendas, y producen el embalsamiento de ríos cercanos [1,2]. Los tipos de movimientos en masa más comunes son los desprendimientos de tierra o rocas, volcamientos, deslizamientos de tierra (traslacional o rotacional), propagaciones laterales y flujos [3]. Entre ellos, se destacan a los deslizamientos por ser el objeto de estudio de la presente investigación.

En el Perú, desde tiempos históricos, se han producido diversos movimientos en masa [4]. Algunos eventos de este tipo han sido detonados por sismos de gran magnitud, como el ocurrido el 31 de mayo de 1970 (7.9 Mw) en el departamento de Ancash, que generó un aluvión por el desprendimiento de una parte del pico norte del Nevado Huascarán [5]. Este aluvión es muy recordado debido a que sepultó las ciudades de Yungay y Ranrahirca, y porque produjo miles de fallecidos y desaparecidos (~6000, según [6]). Además de este evento, también ocurrió un deslizamiento de tipo rotacional en la provincia de Recuay, el cual produjo el agrietamiento y colapso de

algunas viviendas del lugar [4].

Otro deslizamiento importante se produjo el 25 de abril de 1974 a las 20:45 h (hora local) en la carretera La Mejorada - Ayacucho (Huancavelica), la cual está ubicada en los Andes Centrales del Perú. Este evento se produjo por fuertes precipitaciones pluviales ocurridas sobre el lugar, y ocasionó 450 fallecidos, daños materiales, entre otros [7,8].

Entre los deslizamientos más recientes, se destacan dos eventos que afectaron el centro poblado Cuenca y sus alrededores [9], el cuál se encuentra emplazado en la ladera del cerro Huamanraza a una altitud de 3192 m s.n.m, en el distrito Cuenca de la provincia y departamento Huancavelica (Perú). El primer evento, considerado como el principal, se produjo el 20 de enero de 2014 a las 04:00 h (hora local) debido a intensas precipitaciones pluviales, y generó el embalsamiento del río Mantaro. El segundo evento fue una consecuencia del primero porque se produjo por el embalsamiento del río Mantaro, y generó la interrupción de la carretera Huancayo - Huancavelica, sector Casma. Según INDECI [9], estos deslizamientos produjeron un fallecido y daños en la infraestructura del lugar.

Otro deslizamiento reciente ocurrido en el territorio peruano aconteció el 30 de junio de 2022 a las 17:00 h

aproximadamente, en el sector Cruz de Shallapa localizado en el distrito Chavín de Huantar [10]. Según las primeras evaluaciones, se encontró que este evento afectó 50 viviendas y la red de energía eléctrica del lugar.

Dado el impacto que causan los deslizamientos en la sociedad (pérdida de vidas, infraestructuras, cultivos, entre otros), resulta importante estudiar, caracterizar y realizar el monitoreo de la dinámica de los deslizamientos. Gracias al desarrollo tecnológico, en las últimas décadas han comenzado a implementarse técnicas que involucran el uso de instrumentos GPS, extensómetros de cable, sistemas radar instalados en suelo (GBSAR) o ubicados en plataformas satelitales (*spaceborn radar*), para medir los desplazamientos ocurridos en la superficie terrestre.

En general, la información adquirida por sistemas radar pueden ser utilizados para estudiar los desplazamientos o estimar la topografía de la superficie terrestre [11, 12]. El método que se utiliza para estudiar los desplazamientos en superficie es denominado *Interferometría Diferencial Radar de Apertura Sintética* (DInSAR), cuyos valores están orientados en la dirección de la línea de vista (LOS) del sensor. Los desplazamientos estimados por sistemas radar (satelitales o terrestres) son calculados a partir de la multiplicación compleja, píxel a píxel, de los valores de dos imágenes de radar. Estos permiten formar un mapa de fase (interferograma) que, mediante la aplicación de filtros y otros procesos (desenvolvimiento de fase), es posible obtener los desplazamientos que ocurrieron en superficie.

Los satélites que tienen (o tenían) incorporados radares son muchos y se diferencian por el tiempo de revisita, longitud de onda empleada, resolución espacial, entre otras. Entre ellos, se mencionan a los satélites ERS (30 x 30m, 35 días), RADARSAT (15m x 30m, 24 días) y S1A/B (5m x 20m [IW], 12 días), los cuales emplean la banda C ($\lambda = 5.7$ cm), y el satélite JERS-1 (18m x 18m, 44 días), el cual empleó la banda L ($\lambda = 23.5$ cm) [13, 14]. Aunque tienen diversas ventajas, tales como la posibilidad de calcular desplazamientos sobre grandes regiones de suelo, también presenta algunas desventajas tales como los diversos fenómenos de decorrelación asociados a la geometría de observación (decorrelación geométrica), periodo de revisita (decorrelación temporal), atmósfera (decorrelación atmosférica: troposférica y ionosférica), entre otros.

Los sensores terrestres GBSAR, por otro lado, consisten en radares instalados in-situ sobre el terreno, frente y próximos a los deslizamientos de modo que permitan el monitoreo de sus superficies mediante la emisión y recepción de señales microondas, mientras se mueven a lo largo de un camino de riel (*rail track*) [11]. Estos sensores se definen como un sistema electrónico compuesto por un radar, una técnica de adquisición de datos y un algoritmo de procesamiento [15]. Estos sistemas de radar presentan ciertas ventajas respecto al sensor satelital ta-

les como la posibilidad de alcanzar una línea de base cero (*zero baseline*) y presentar periodos de adquisición de datos bastantes bajos, además de brindar la posibilidad de poder ajustar sus parámetros de observación para adaptarlos a un caso en particular.

En esta investigación se emplean datos de radar satelital del S1A/B y de un sensor terrestre GBSAR para estudiar la dinámica del deslizamiento de Cuenca, ubicado en la provincia y departamento de Huancavelica - Perú, durante el periodo comprendido entre noviembre de 2019 y enero de 2023. Las imágenes satelitales SAR del S1 cubrieron el periodo comprendido entre el 10 de noviembre de 2019 y 31 de agosto de 2022. Por otro lado, los datos adquiridos por el GBSAR abarcaron el periodo comprendido entre enero 2022 y enero 2023. Estos resultados son validados con mediciones GPS realizadas durante el año 2022. Los resultados muestran que el procesamiento de datos mediante las metodologías SBAS InSAR y FDBP permiten obtener valores de desplazamiento que representan físicamente lo mismo que las mediciones GPS, resaltando que los valores obtenidos del procesamiento de datos GBSAR fueron más generales ya que abarcaron un área y no solo un punto geográfico.

1.1. Antecedentes

GBSAR

En el Perú se han realizado pocos estudios sobre deslizamientos a partir del uso de un sensor terrestre GBSAR. Entre las posibles causas, puede mencionarse el costo que tiene el analizador de redes vectoriales (Vector Network Analyzer, VNA), el cual forma parte de las componentes de hardware necesarias para la implementación de un GBSAR. Según Sárries [16], el VNA no es una solución muy rentable debido a su alto costo unitario. A pesar de que es posible implementar un sensor GBSAR que puede operar con una sola frecuencia (núcleos de radar personalizados), a diferencia del VNA que trabaja con múltiples frecuencias, este haría que el sistema pierda flexibilidad operacional.

En un estudio realizado sobre el departamento de Cuzco, Perú, se realizó una evaluación de la evolución geomorfológica y estabilidad de pendiente de la ciudadela de Machu Picchu durante el periodo comprendido entre 2002 y 2004 aproximadamente [17]. Para ello, se emplearon diferentes instrumentos de monitoreo que incluyeron sensores radar de tipo terrestre y satelital. Respecto al sensor terrestre, se empleó un sistema radar LISA para monitorear la parte inferior de la entrada de la ciudadela, una parte de Wayna Picchu y otros. Los resultados adquiridos, hasta ese momento, mostraron que no se produjo desplazamientos significativos sobre el área observada. Adicionalmente, se utilizaron imágenes de los satélites ERS 1/2, Envisat y Radarsat para estudiar despla-

zamientos superficiales a partir de las técnicas DInSAR y PS InSAR. Debido a la muy baja coherencia de las parejas interferométricas (DInSAR), no se pudo obtener información sobre el área de interés. Los resultados obtenidos con PS InSAR mostraron movimientos en dirección de la línea de vista (LOS) del satélite de 5 cm aproximadamente. Estas evaluaciones fueron complementadas con otras que involucraron el uso de fotos aéreas estereoscópicas y dos imágenes satelitales ópticas de alta resolución (Quickbird), para realizar evaluaciones geomorfológicas y geomecánicas, y el empleo de instrumentos GPS instalados en septiembre de 2003, en el valle de Urubamba y la ciudadela de Machu Picchu.

En otro estudio elaborado en Italia se hizo un monitoreo del deslizamiento de Ruinon, el cual está ubicado en los Alpes Italianos, para medir los desplazamientos ocurridos en su superficie mediante *Interferometría Diferencial SAR* (DInSAR) durante una semana aproximadamente (julio - agosto 2000) [18]. Para ello, emplearon un sensor terrestre LISA que provee mediciones de 17 GHz con una apertura sintética de 2.8 m. Los resultados fueron evaluados principalmente en la escarpa superior (upper scarp) e inferior (lower scarp) del deslizamiento, a partir de dos secuencias de interferogramas que cubrieron dos periodos distintos: la secuencia 1 (N° intf: 9) comenzó el 27 de julio de 2000 durante 15:55 h, mientras que la secuencia 2 (N° intf: 29) comenzó el 30 de julio de 2000 durante 55:14 h. En la primera secuencia se observaron áreas bien definidas con valores de desplazamiento relevantes en las dos escarpas principales. En la escarpa inferior, sobre un área de 100 x 100 m, se obtuvo una tasa de desplazamiento promedio igual a 1.32 mm/h. Por otro lado, en la escarpa superior, sobre un área de 50 x 80 m, se obtuvo una tasa de desplazamiento promedio igual a 0.75 mm/h. En la segunda secuencia se obtuvo patrones de movimiento similares, pero con ritmos de desplazamiento más bajos. Para este caso, en la escarpa inferior se obtuvo una tasa de desplazamiento promedio de 0.45 mm/h, mientras que se obtuvo el valor de 0.33 mm/h en la escarpa superior. Los resultados de tasa de desplazamiento superiores a 1.2 mm/h fueron medidos con una resolución espacial de 5m y una precisión de 0.75 mm. Estos fueron validados con datos obtenidos mediante extensómetros automáticos y mediciones topográficas.

Además de los estudios anteriores, se han hecho esfuerzos nacionales para implementar este tipo de tecnologías en Perú a partir de la elaboración de prototipos de este sensor y evaluar diferentes metodologías de procesamiento. En el trabajo elaborado por [19] se hizo una comparación de tres algoritmos que son comúnmente utilizados en los estudios sobre deslizamientos: *Frequency Domain Back Projection* (FDBP), *Range Migration Algorithm* (RMA) y *Discrete Linear Inverse Problem* (DLIP), para identificar cuál produce mejores resultados en términos de calidad de reconstrucción de imagen, eficien-

cia computacional y mediciones de desplazamientos. El análisis sobre la reconstrucción de imagen concluye que el DLIP produce mejores resultados que los algoritmos FDBP y RMA, en ese orden. Respecto al análisis de eficiencia computacional, se observó que el algoritmo FDBP es más rápido que el DLIP y mucho más rápido que el RMA. Por último, la evaluación de interferogramas indicaron que el algoritmo FDBP obtiene una mayor cantidad de píxeles con alta coherencia, en comparación con los obtenidos mediante RMA. En dicha evaluación no emplearon DLIP por su gran costo computacional. Los autores concluyeron que el algoritmo FDBP es el más adecuado para estudios de deslizamientos de tierra.

SBAS InSAR

Durante los últimos años, el uso de información de radares de apertura sintética (SAR) viene siendo ampliamente utilizada para estudios de deformación de la superficie terrestre. Una de las metodologías es denominada *Small Baseline Subset* (SBAS) InSAR, ya que permite obtener series temporales de deformación para estudiar y evaluar la evolución temporal de deslizamientos. Esta técnica presenta una notoria ventaja respecto a otras más directas (como DInSAR satelital), pues permiten mitigar fenómenos de decorrelación asociados a la geometría de observación (decorrelación geométrica), tiempo de revista (decorrelación temporal) y presencia de la atmósfera (decorrelación atmosférica).

Entre los diferentes estudios realizados sobre deslizamientos, se menciona uno donde se evaluaron los desplazamientos ocurridos en superficie e identificaron diferentes características de los deslizamientos que están ubicados en el área de Sukabumi, Java Occidental, Indonesia [20]. Para ello, emplearon las metodologías SBAS InSAR y DInSAR a partir de productos LiCSAR (interferogramas enrollados, desenrollados y mapas de coherencia georreferenciados) formados mediante imágenes del S1 de tipo ascendente adquiridos entre el 09 de abril de 2019 y 13 de agosto de 2020. Los valores de desplazamiento fueron obtenidos utilizando un paquete de procesamiento basado en Python (LiCSBAS). Los resultados muestran que el área investigada presentó tasas de movimiento ubicadas entre -36.30 mm/yr y 58.84 mm/yr. En particular, las tasas de movimiento observadas en los deslizamientos se encontraron entre -9.79 mm/yr y 33.69 mm/yr.

En otro estudio sobre deslizamientos, se emplearon imágenes SAR satelitales del EnviSAT y ERS para evaluar el potencial de los métodos SBAS InSAR y PS InSAR en estudios de detección y monitoreo de deformaciones superficiales sobre tres lugares: Area Nainital, Area Mansa Debi Hills y en áreas ubicadas en los alrededores de las ciudades Chamoli Gopeshwar y Joshimath, todas ubicadas en India [21]. El procesamiento fue realizado mediante SARscape, y los periodos de estudio estu-

ron sujetos a la disponibilidad de imágenes SAR sobre cada área de interés. Respecto a los resultados encontrados, podrían mencionarse a las velocidades promedio de -2.50 mm/yr a 1.50 mm/yr observadas en los alrededores del lago Nainital. Además, también se obtuvieron grandes valores de velocidad en un área ubicada a lo largo de las laderas de las montañas al NE del lago, cuyo valor promedio fue 20 mm/yr.

1.2. Área de estudio

El área de estudio se ubica en el distrito de Cuenca, provincia y departamento Huancavelica, en un valle interandino de la región central del Perú (Figura 1). Esta área es un deslizamiento (lat: -12.434° , lon: -75.039°) que tiene un área aproximada de $235\,000\text{ m}^2$ y está localizada junto al centro poblado Cuenca.

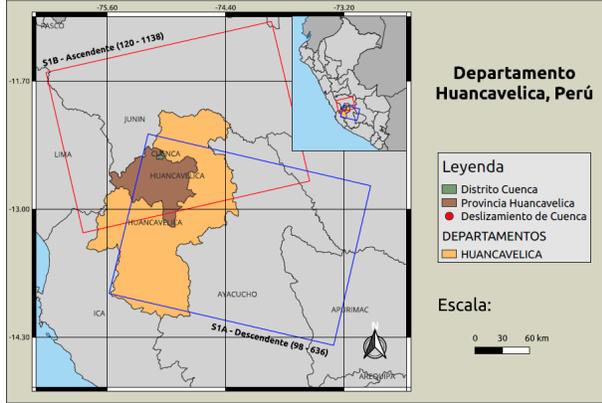


Figura 1: Mapa del distrito Cuenca, Huancavelica, el cual contiene el deslizamiento de interés.

2. Datos

2.1. Datos GBSAR

Los datos del GBSAR (lat: -12.428° , lon: -75.033°) fueron adquiridos a partir de la emisión y recepción de señales de onda continua con frecuencia escalonada (SF-CW). El sensor empleado se ubica a 630 m aproximadamente del centro del deslizamiento, trabaja en banda Ku ($f_c = 15.55$ GHz) y presenta una apertura (L_s) de 1.4 m [19, 22]. Estos datos fueron registrados empleando un tiempo de sensado de 9 minutos en promedio y se almacenaron en archivos con formato *.hdf5 cuyos tamaños aproximados son de 1.4 MB. Además de almacenar información relacionada a las señales, estos archivos también contienen datos asociados a los parámetros de observación (frecuencias mínima y máxima de señal, número de frecuencias, entre otros).

En total se descargaron 43771 archivos *.hdf5, los cuales estaban almacenados en directorios que contenían

datos mensuales. La cantidad de datos recopilados por mes se muestra en la Tabla 1.

Cabe precisar la baja tasa de registro de datos en algunos meses del periodo de estudio (enero 2022 - enero 2023). Esto se debió principalmente a los cortes de energía eléctrica que ocurrieron en el lugar. Como se visualiza en la Tabla 1, en los meses de julio, agosto y diciembre de 2022, así como enero 2023, hubo una menor cantidad de datos adquiridos (< 3000).

Fecha	Cantidad	Fecha	Cantidad
Enero 2022	3860	Agosto 2022	1916
Febrero 2022	4274	Setiembre 2022	4388
Marzo 2022	3815	Octubre 2022	3124
Abril 2022	4769	Noviembre 2022	3654
Mayo 2022	4433	Diciembre 2022	2566
Junio 2022	3394	Enero 2023	2527
Julio 2022	1051	-	-

Tabla 1: Datos mensuales (*.hdf5) adquiridos durante el periodo enero 2022 - enero 2023 mediante el radar GBSAR que está ubicado frente al deslizamiento de Cuenca. Los datos fueron adquiridos cada 9 minutos en promedio.

2.2. Datos SAR satelitales - S1

Se emplearon imágenes satelitales ascendentes y descendentes de la misión Sentinel 1 - S1A/B (<https://search.asf.alaska.edu/#/>) para analizar la tasa de movimiento del deslizamiento de Cuenca a partir del método SBAS InSAR (Figura 1).

Debido a la ausencia de datos en los meses iniciales del año 2022 (enero - marzo, para ambos satelitales), la culminación de la operación del satélite S1B el 23 de diciembre de 2021 y la ausencia de la ruta 98 del satélite S1A durante los años anteriores al 2022 [23, 24], se agruparon las imágenes descargadas en dos conjuntos que abarcan el periodo comprendido entre noviembre de 2019 y agosto de 2022: el conjunto 1 abarca el periodo noviembre 2019 - diciembre 2021, mientras que el conjunto 2 abarca el periodo marzo - agosto 2022.

El primer conjunto (Figura 2(a)) estuvo conformado por 32 imágenes del S1B que abarcan el periodo comprendido entre el 10 de noviembre de 2019 y 17 de diciembre de 2021. Estos datos satelitales fueron adquiridos mediante el modo *Interferometric Wide* (IW) utilizando polarización dual (VV+VH), y tienen una ruta (*track*) y marco (*frame*) iguales a 120 y 1138 , respectivamente. La resolución temporal empleada para este conjunto de imágenes fue 24 días, en promedio.

En este conjunto solo existieron dos parejas de imágenes que estuvieron separadas por 36 días. Estas separaciones se observaron entre las adquisiciones del 26 de julio y 31 de agosto de 2021 (círculo naranja), y entre el

18 de octubre y 23 de noviembre de 2021 (círculo verde). Se escogieron esas separaciones pues, aunque había una imagen entre cada par de fechas, estas generaban separaciones temporales distintas en ambos sentidos (12 y 24 días). Esto se hizo para que se tengan separaciones temporales comparables con la escogida para la mayoría de parejas (≥ 24 días).

El segundo conjunto (**Figura 2(b)**) estuvo conformado por 13 imágenes del S1A que abarcan el periodo comprendido entre el 28 de marzo y 31 de agosto de 2022. Estos datos satelitales fueron adquiridos mediante el modo *Interferometric Wide* (IW) utilizando polarización dual (VV+VH), y tienen una ruta y marco iguales a 98 y 636, respectivamente. En este caso, la resolución temporal empleada fue 12 días, en promedio.

Para este conjunto de imágenes, solo hubo una sepa-

ración de 36 días (elipse roja) entre las adquisiciones del 28 de marzo y 21 de abril de 2022. Esto se debió a que no existen imágenes disponibles entre ambas fechas.

2.3. Datos GPS

Los datos GPS fueron obtenidos mediante cuatro campañas de mediciones geodésicas realizadas sobre 07 puntos de monitoreo durante los años 2021 y 2023. Estos registros fueron realizados con equipos GNSS de doble frecuencia durante sesiones de 24 a 48 horas, que tuvieron 30 s como intervalo de muestreo. Estos son parte de la red de monitoreo geodésico del deslizamiento de Cuenca, la cual se encuentra conformada por 09 puntos de control temporal de monitoreo y 01 estación de referencia [25,26]. La evaluación de los desplazamientos consideró a CU04

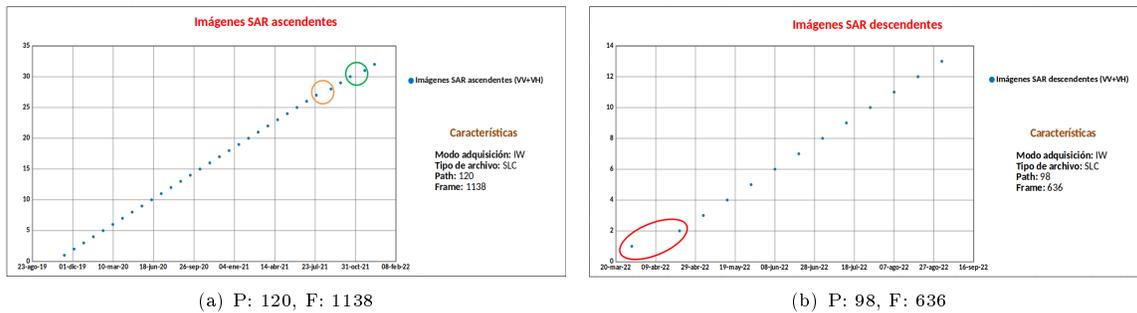


Figura 2: Distribuciones temporales de las imágenes SAR (a) ascendentes [120, 1138] y (b) descendentes [98, 636] que fueron empleadas para monitorear el deslizamiento de Cuenca durante el periodo comprendido entre el 10 de noviembre de 2019 y 31 de agosto de 2022.

como la estación de referencia, la cual se localiza a 3 km al Oeste de la localidad Cuenca. Los datos GPS se procesaron con el programa GAMIT/GLOBK v10.70, el cual fue desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts - MIT [27, 28].

Este programa permite el cálculo de soluciones libres utilizando criterios de dobles diferencias de fase entre las estaciones y los satélites. Las soluciones son coordenadas precisas para las componentes Este, Norte y Elevación, para cada época de medición. Los errores de la desviación estándar para las componentes horizontales son 2 mm en promedio, y para la componente vertical son 4 mm.

Entre los 07 puntos de monitoreo mencionados previamente, se consideraron de interés para este artículo únicamente las estaciones CU15, CU16 y CU17 porque se ubicaron dentro y muy cerca del deslizamiento (contorno verde) (**Figura 3**), y de la región de ésta que fue monitoreada por el GBSAR.



Figura 3: Visualización del deslizamiento de Cuenca y las ubicaciones de las estaciones geodésicas de interés: CU15, CU16 y CU17. La última medición GPS fue realizada el 27 de noviembre de 2023.

Los registros obtenidos del monitoreo permitieron

calcular los valores de desplazamiento en dirección Este (dE), Norte (dN) y vertical (dU) ocurridos durante el periodo de tiempo máximo comprendido entre el 08 de diciembre de 2021 y 02 de diciembre de 2022. Los desplazamientos ocurridos en ese periodo fueron calculados a partir de la diferencia de posiciones registradas en dos épocas diferentes (2021-2022).

3. Metodología

3.1. GBSAR

La metodología empleada, conocida como *Frequency Domain Back Projection* - FDBP, ha sido implementada en un código de Python que está disponible en un repositorio de Github (https://github.com/LuisDLCP/Landslide_Project/tree/master2/src). Este permite procesar los datos de un GBSAR y obtener mapas de coherencia y desplazamiento, así como series de tiempo de desplazamiento que sirven para el monitoreo de un determinado deslizamiento.

Es importante mencionar que la adquisición de datos por el sensor GBSAR que toma en cuenta el código anterior debe tener una estructura similar a la mostrada en la **Figura 4**, ya que depende de parámetros que caracterizan dicha geometría y de las señales empleadas para el monitoreo. Esta geometría considera que los datos fueron recopilados en ciertas posiciones u_k de un riel desde el cual se emitieron señales SF-CW, compuestas por N_f frecuencias, hacia objetivos ubicados sobre un plano XY.

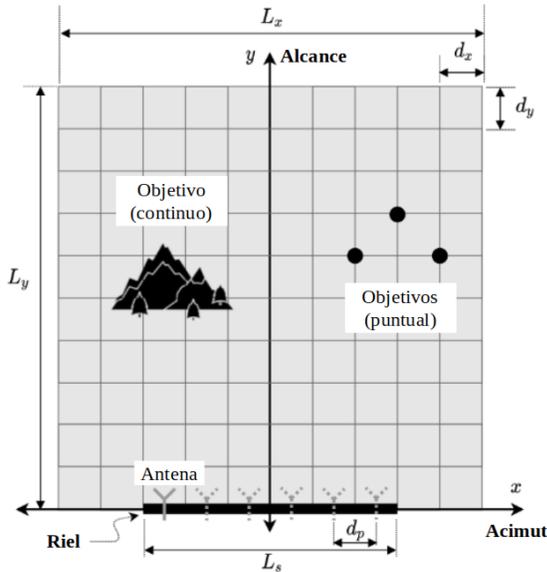


Figura 4: Geometría de adquisición empleada por el sensor GBSAR. Modificado a partir de Cruz *et al.* (2020) [19].

La metodología está basada en el algoritmo *Frequency Domain Back Projection* (FDBP), el cual consiste en aplicar la Transformada de Fourier al historial de fase de los datos recopilados a lo largo del eje de frecuencia.

La formación de imágenes SAR mediante datos de un GBSAR puede realizarse a partir de la ecuación [29]:

$$I_n = \frac{1}{N_f N_p} \sum_{k=0}^{N_p-1} R_{n,k}^2 F_n^k \quad (1)$$

donde I_n son los valores de la imagen compleja formada.

La ecuación (1) depende de un factor F_n^k que tiene unidades de voltaje, cuyas magnitudes son calculadas a partir de mediciones realizadas por antenas receptoras ubicadas en posiciones u_k .

Su valor se estima mediante la siguiente ecuación:

$$F_n^k = \sum_i E_{i,k} e^{j \frac{4\pi}{c} f_i (R_{n,k} - R_0)} \quad (2)$$

donde $E_{i,k}$ (I^m , Q^m), conocido como historial de fase, son valores medidos por el sintetizador microondas de la unidad receptora que compone el GBSAR, f_i son valores de frecuencia de la señal, $R_{n,k}$ y R_0 representan la distancia entre el n-ésimo blanco con la k-ésima posición del riel (u_k) y un valor constante de retraso inducido por los cables, respectivamente.

Aunque la aplicación directa de las ecuaciones (1) y (2) pueden emplearse para formar imágenes SAR, estas suelen tener un tiempo de procesamiento bastante grande. Debido a ello, se emplean algoritmos adicionales tales como FDBP, RMA y DLIP.

3.2. SBAS InSAR

Los datos satelitales SAR del S1 fueron procesados mediante el sistema de procesamiento GMTSAR, pues este permite formar series de tiempo empleando la metodología SBAS InSAR.

La metodología SBAS consiste en utilizar un conjunto de imágenes SAR para generar series de tiempo, a partir de la formación de interferogramas diferenciales que presentan líneas de base espacial pequeñas (*short spatial baseline*) y temporal moderadas (*moderate temporal baseline*). Estas condiciones de aplicabilidad permiten evitar, en lo posible, la presencia de fenómenos de decorrelación espacial y temporal en los interferogramas [30, 31].

La metodología SBAS fue propuesta por [32], el cual será resumido mencionando sus consideraciones y ecuaciones más importantes. El método SBAS necesita de $N+1$ imágenes SAR de una determinada área que fueron adquiridas en tiempos ordenados (t_0, t_1, \dots, t_n), pues estos serán utilizados para formar interferogramas diferenciales (M) de forma apropiada. Es decir, los interferogramas deben caracterizarse por líneas de base espacial y temporal pequeñas; además de tener un movimiento frecuencial (*frequency shift*) mínimo entre sus centroides

Doppler [33]. También se asume que cada imagen puede combinarse con otra por lo menos, y además han sido corregistrados con respecto a una única imagen denominada imagen maestra [32, 34].

El proceso de formación de series de tiempo se entiende analizando la fase de un determinado pixel del j -ésimo interferograma formado. En primer lugar, se considera que el valor de fase de un pixel ubicado en (x, r) de este interferograma, el cual fue formado por dos imágenes SAR adquiridas en tiempos distintos t_A y t_B , es:

$$\begin{aligned} \delta\phi_j(x, r) &= \phi(t_B, x, r) - \phi(t_A, x, r) \\ \delta\phi_j(x, r) &\approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)] \end{aligned} \quad (3)$$

donde $d(t_B, x, r)$ y $d(t_A, x, r)$ son las deformaciones acumuladas en los instantes de tiempo t_B y t_A , respecti-

vamente. Es importante mencionar que la deformación $d(t_0, x, r)$ es cero, ya que es tomada como referencia.

Es importante mencionar que la ecuación (3) no toma en cuenta factores relacionados a fenómenos de decorrelación, así como otros que son generados por la presencia de la atmósfera y/o remociones no precisas de la fase topográfica. Además, asume implícitamente que la señal está desenvuelta y calibrada con respecto a un pixel cuya deformación es conocida (generalmente, un pixel de gran coherencia cuya deformación es prácticamente cero). A pesar de esto, su uso es muy importante porque reduce considerablemente el análisis sin perder la lógica de la demostración.

Durante la formación de interferogramas, si se considera que las imágenes maestras (IE) y esclavas están ordenadas cronológicamente ($IE_j > IS_j, \forall j = 1, \dots, M$),

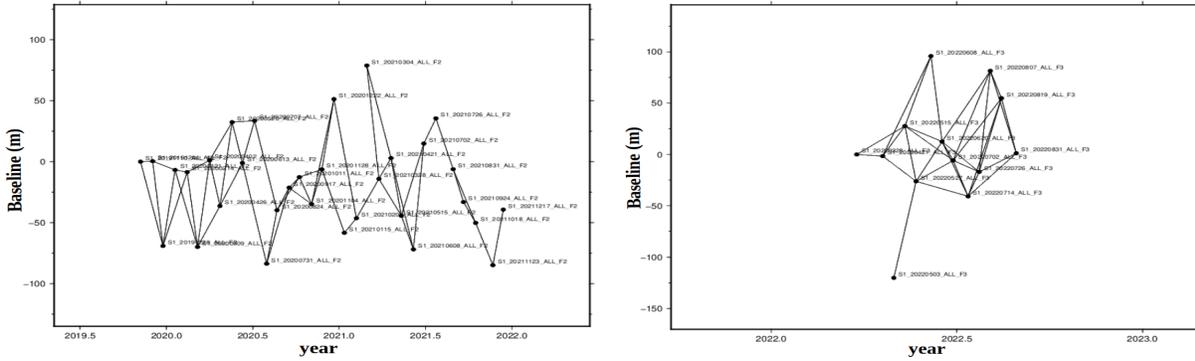


Figura 5: Parejas interferométricas que fueron formadas a partir de 32 imágenes ascendentes (izquierda) y 13 imágenes descendentes (derecha) del S1.

es posible definir las fases interferométricas como:

$$\delta\phi_j = \phi_{t_{IE_j}} - \phi_{t_{IS_j}}, \quad \forall j = 1, \dots, M \quad (4)$$

El sistema de ecuaciones (4) puede resumirse utilizando la siguiente ecuación matricial:

$$\mathbf{A}\phi = \delta\phi \quad (5)$$

donde \mathbf{A} es una matriz de $M \times N$ dimensiones.

Si el sistema \mathbf{A} de la ecuación (5) estuviera conformado por adquisiciones que presentan un solo subconjunto de línea de base (SB), la solución sería obtenida mediante mínimos cuadrados (*Least-Squares*, LS):

$$\phi = \mathbf{A}^\# \delta\phi \quad (6)$$

donde:

$$\mathbf{A}^\# = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \quad (7)$$

Desafortunadamente, es muy común que todo el conjunto de datos pertenezca a un solo subconjunto SB. Este

problema se supera reemplazando las incógnitas de la ecuación (5) con la velocidad de fase promedio entre adquisiciones adyacentes:

$$\mathbf{v} = \left[v_1 = \frac{\phi_{t_1}}{t_1 - t_0}, \dots, v_N = \frac{\phi_{t_N} - \phi_{t_{N-1}}}{t_N - t_{N-1}} \right] \quad (8)$$

Eso genera que la ecuación (4) se transforme en:

$$\sum_{k=IE_j+1}^{IE_j} (t_k - t_{k-1}) v_k = \delta\phi_j \quad (9)$$

el cual tiene una forma similar a (5) si es expresado en forma matricial:

$$\mathbf{B}\mathbf{v} = \delta\phi \quad (10)$$

Finalmente, la ecuación (10) se resuelve empleando el método *Singular Value Decomposition* (SDV), el cual

permite evaluar la pseudoinversa de la matriz B que brinda la solución LS de norma mínima. La solución debe encontrarse empleando un paso de integración adicional que implica obtener los valores de ϕ a partir de los v estimados.

En esta investigación se formaron parejas interferométricas de tal forma que los valores de línea de base espacial y temporal fueron 100 m y 50 días, respectivamente. Las parejas interferométricas formadas, para cada conjunto de imágenes, se muestran en la **Figura 5**.

Para el conjunto de 32 imágenes, se escogió como imagen maestra la que fue adquirida el 28 de noviembre de 2020. Respecto al conjunto de 13 imágenes, la imagen maestra seleccionada fue adquirida el 20 de junio de 2022. La selección de ambas imágenes maestras fue realizada con la herramienta InSAR Stack Overview del programa *SentiNel Application Platform* (SNAP).

A cada uno de los interferogramas formados se le aplicaron los filtros Gaussiano y Goldstein. Para el filtro Gaussiano, se asignó el valor 100 al parámetro *filter_wavelength* que se encuentra definido en un archivo de configuración *batch_tops.config*. Respecto al filtro Goldstein, se empleó un exponente (-alpha) de filtro igual a 0.9 y un tamaño de parche (-psize) igual a 32.

El valor del exponente alfa tiene importancia en la aplicación del filtro Goldstein, ya que la respuesta de este último se encuentra relacionada a una multiplicación de un valor encontrado mediante la Transformada de Fourier con otro que está determinado por este exponente [35]. La importancia del tamaño del parche se relaciona con el exponente alfa. Esto se debe a que el parámetro alfa puede sobrestimar o subestimar el valor del ruido del interferograma después de aplicar Goldstein, pues cada parcela (definida con psize) utilizada durante este proceso contiene diferentes características de ruido [36].

Respecto al filtro Gaussiano, este permite retener las variaciones espaciales en la señal y también reducir el ruido de fase. Su impacto depende de un valor de distancia y un parámetro de ancho del filtro. Este último genera mejores resultados para ciertos valores de longitudes de onda: 200 (mayoría de casos) y 60 (procesamiento de mayor resolución) [37].

Para el desenvolvimiento de fase, se empleó un umbral de coherencia (desenvuelve solo los píxeles que superan un determinado valor) igual a 0.10, y el valor 0 como discontinuidad máxima (define el tipo de deformación de interés), para ambos casos (ascendente y descendente). Antes de ejecutar SBAS, se seleccionó un pin (punto de referencia) estable sobre la ubicación del GBSAR.

4. Resultados y Discusión

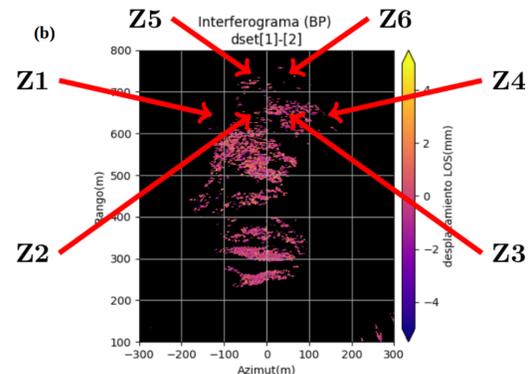
4.1. Resultados

GBSAR

Las series de tiempo formadas con los datos GBSAR fueron para seis regiones de una cierta zona del deslizamiento de Cuenca monitoreada por el sensor (**Figura 6**). Esta zona se encuentra ubicada esencialmente en la parte derecha del deslizamiento, ya que los valores de desplazamiento se encontraron principalmente entre [-100 m, 100 m] en acimut y [250 m, 750 m] en alcance.



(a) Deslizamiento de Cuenca



(b) Mapa de desplazamiento

Figura 6: (a) Porción del deslizamiento observado por el GBSAR (círculo) y la escarpa del deslizamiento (línea azul) [38], y (b) un ejemplo de mapa de desplazamiento obtenido para esa región. Las flechas muestran las 6 zonas (Z1-Z6) del deslizamiento que fueron analizadas.

Las series de tiempo fueron formadas empleando los resultados de desplazamiento mensuales, pues el objetivo fue analizar la tasa de movimiento anual del deslizamiento. Para ello, se tuvieron que calcular nuevos valores de desplazamiento acumulado a partir de valores de desplazamiento obtenidos mensualmente.

En la **Figura 8** se muestran series de tiempo para las seis zonas (Z1 - Z6) de interés. Estas series de tiempo

muestran que todas las zonas del deslizamiento, las cuales están ubicadas en la parte superior del deslizamiento, presentaron tasas de movimiento negativos durante el periodo comprendido entre enero 2022 - enero 2023. En particular, la zona 3 (Z3) tuvo la mayor tasa de movimiento (-17.55 cm/yr). Por otro lado, las zonas Z2, Z4, Z5 y Z6 tuvieron tasas de movimiento regular iguales a -5.69 cm/yr, -7.10 cm/yr, -5.14 cm/yr y -8.51 cm/yr, respectivamente. La zona 1 (Z1) tuvo una tasa de movimiento baja (-0.40 cm/yr).

Además de las series de tiempo, se estimó el desplazamiento total ocurrido en la zona 6 (Z6) durante el periodo comprendido entre el 03 de enero y 01 de diciembre de 2022. El valor estimado de desplazamiento de la zona 6 fue -87.54 mm, el cual se interpretó como un acercamiento en dirección LOS (sensor GBSAR - Z6). Es importante mencionar que las regiones (Z1-Z6) donde se observaron desplazamientos negativos deben interpretarse como zonas donde se produjeron deslizamientos.

SBAS InSAR

En esta sección se muestran mapas y series de tiempo de desplazamiento calculados sobre algunos píxeles de mayor interés que están ubicados sobre el deslizamiento.

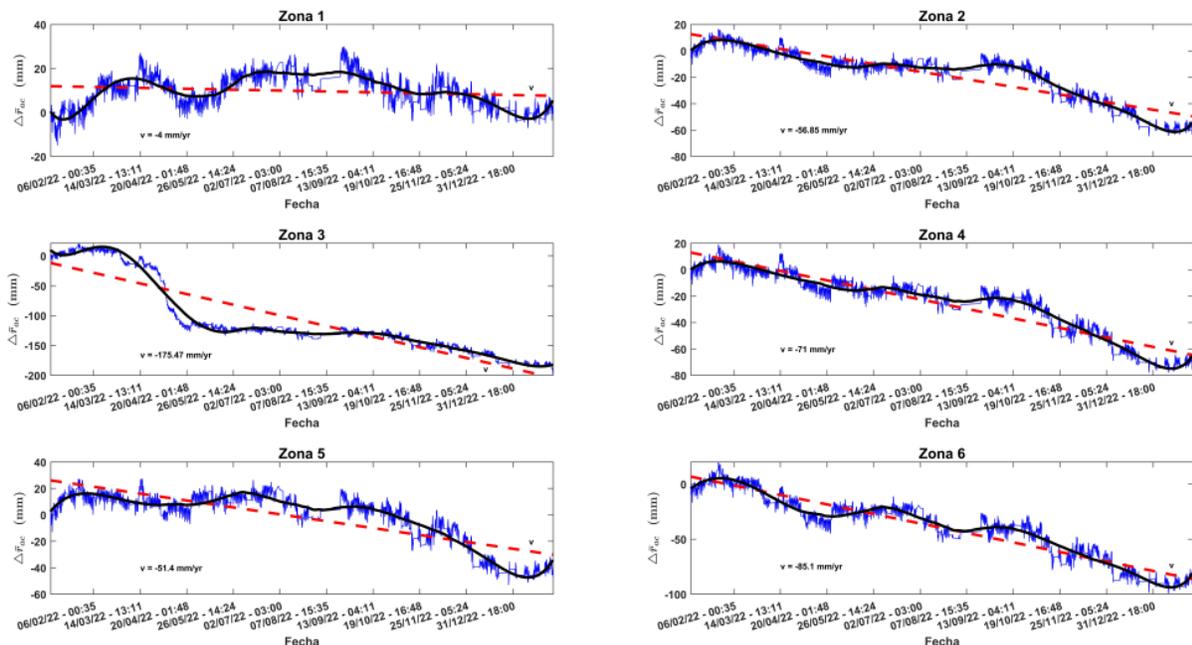


Figura 8: Series de tiempo generadas para las 6 zonas de interés, con curvas de ajuste que permiten analizar el comportamiento (lineas negras) y la tendencia (lineas rojas discontinuas) de las series.

Aunque solo se obtuvieron desplazamientos negativos, es posible distinguir diferencias entre las magnitudes de estos píxeles (los más negativos se encuentran en la parte superior).

El primer conjunto de imágenes, el cual abarca el periodo comprendido entre el 10 de noviembre de 2019 y 17 de diciembre de 2021, permitió obtener un mapa de desplazamiento total del deslizamiento de Cuenca, cuyos valores fueron todos de alejamiento (píxeles azules) en dirección LOS (Figura 7).

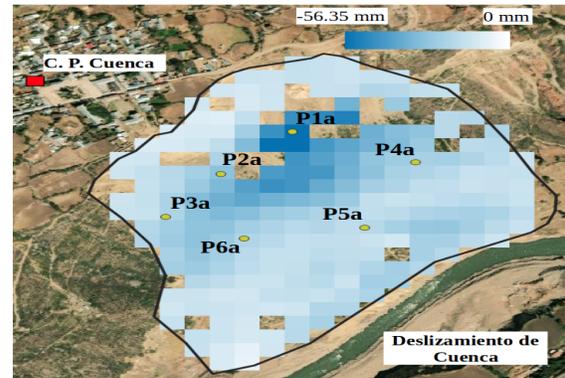


Figura 7: Mapa de desplazamiento total registrado sobre el deslizamiento. Periodo: 10 de noviembre de 2019 - 17 de diciembre de 2021. La paleta de colores es referencial.

Los valores de desplazamiento obtenidos sobre todo el área de procesamiento, el cual cubre el deslizamiento y regiones ubicadas fuera de este, estuvieron entre -70.67 mm y 86.14 mm. En particular, los valores de despla-

zamiento encontrados sobre el deslizamiento (polígono negro) se encuentran entre -62.43 mm y -5.66 mm.

Pixel	Ubicacion (°)	
	Latitud	Longitud
Pixel 1 (P1a)	-12.43075	-75.03798
Pixel 2 (P2a)	-12.43155	-75.03705
Pixel 3 (P3a)	-12.43216	-75.03618
Pixel 4 (P4a)	-12.42938	-75.03729
Pixel 5 (P5a)	-12.42994	-75.03596
Pixel 6 (P6a)	-12.43129	-75.03574

Tabla 2: Ubicación de los píxeles que permitieron analizar la tasa de movimiento del deslizamiento de Cuenca, durante el periodo 10 de noviembre de 2019 - 17 de diciembre de 2021.

Los píxeles fueron escogidos de tal forma que se pudiera analizar la tasa de movimiento de la parte superior e inferior del deslizamiento (Tabla 2).

En este caso, los píxeles que permitieron analizar la parte superior fueron denominados P1, P2 y P3, mientras que los denominados P4, P5 y P6 se emplearon para analizar la parte inferior.

Las series de tiempo obtenidas para estos píxeles se muestran en la Figura 9.

Como puede notarse, una gran parte de los píxeles ubicados en la parte central superior del deslizamiento presentaron valores de tasa de movimiento intensos, en comparación a los demás valores obtenidos. Entre ellos se encuentran los píxeles P1 y P2, los cuales tuvieron tasas de movimiento iguales a -28.54 mm/yr y -14.13 mm/yr, respectivamente. Respecto a los píxeles ubicados en la parte inferior, estos tuvieron una tasa de movimiento promedio cercano a los -9 mm/yr.

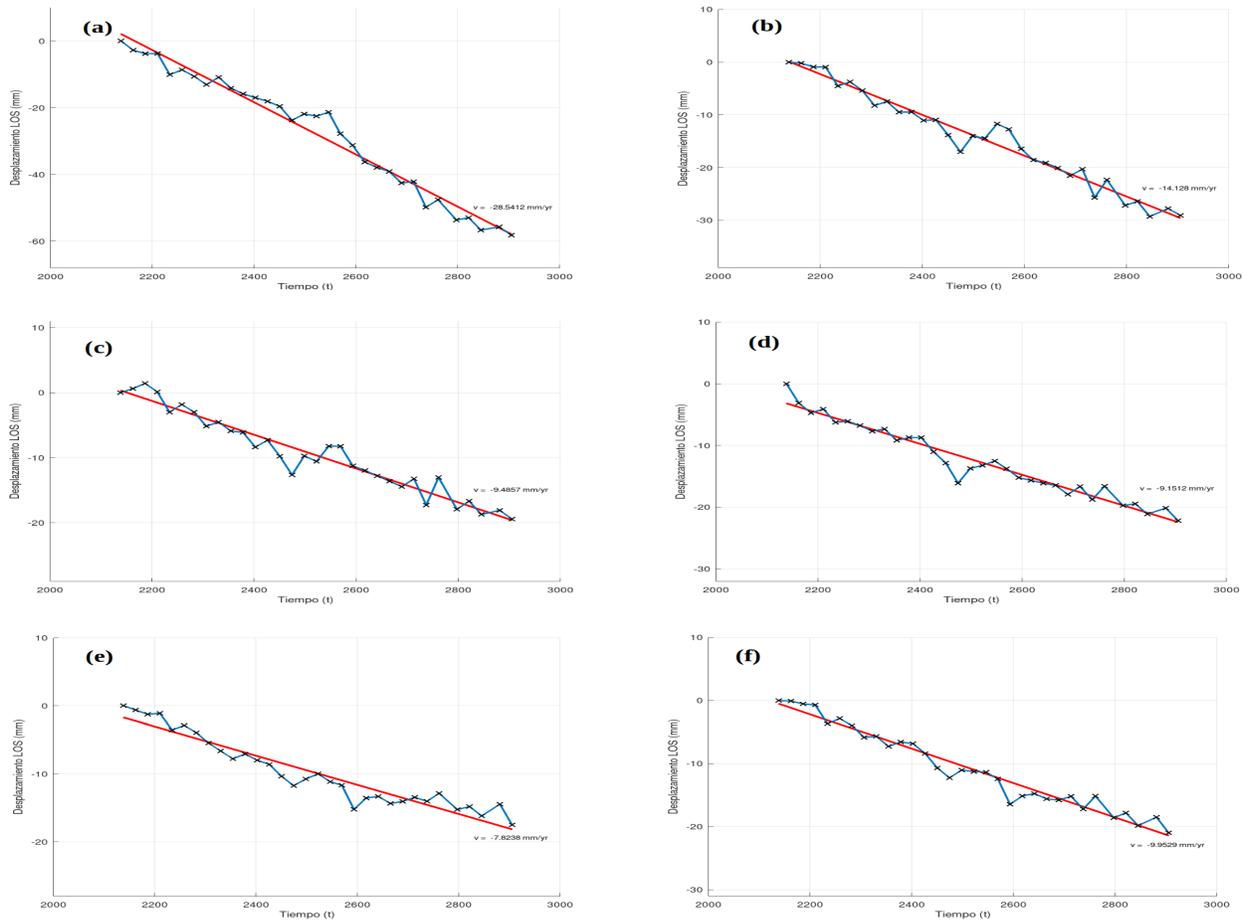


Figura 9: Series de tiempo formadas a partir de los archivos de desplazamiento generados por SBAS, para los píxeles (a) P1a, (b) P2a, (c) P3a, (d) P4a, (e) P5a y (f) P6a.

Es importante mencionar que, como se procesaron imágenes ascendentes, estas tasas de desplazamiento deben ser interpretados como movimientos en dirección LOS que están orientados en dirección -Z (vertical) y este (E) cuando son negativos, y orientados en dirección +Z (vertical) y oeste (W) cuando son positivos.

El segundo conjunto de imágenes, el cual abarca el periodo comprendido entre el 28 de marzo y 31 de agosto de 2022, permitió obtener un mapa de desplazamiento total del deslizamiento de Cuenca, cuyos valores fueron de acercamiento (píxeles rojos) y alejamiento (píxeles azules) en dirección LOS (Figura 10).

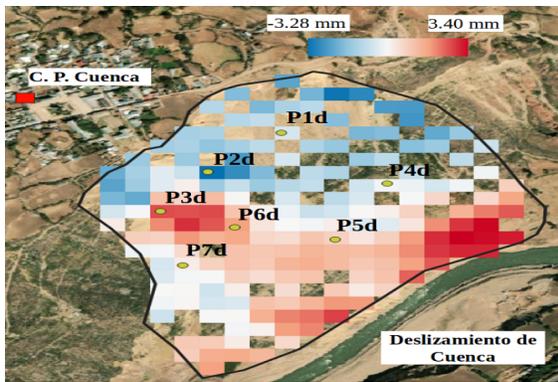


Figura 10: Mapa de desplazamiento total registrado sobre el deslizamiento de Cuenca. Periodo de estudio: 28 de marzo - 31 de agosto de 2022.

Los valores de desplazamiento obtenidos sobre todo el área de procesamiento, cuya significación fue explicada anteriormente, estuvieron entre -41.46 mm y 16.42 mm. En particular, los valores de desplazamiento encontrados sobre el deslizamiento se encuentran entre -3.28 mm y 3.40 mm.

De manera similar, los píxeles fueron escogidos de tal forma que se pueda analizar la tasa de movimiento de la parte superior e inferior del deslizamiento (Tabla 3). Los píxeles que permitieron analizar la parte superior fueron denominados P1, P2 y P3, mientras que los denominados P4, P5, P6 y P7 fueron empleados para analizar la parte inferior.

Las series de tiempo obtenidas para este procesamiento se muestran en la Figura 11. En este caso los píxeles fueron más heterogéneos, pues se observaron magnitudes positivas y negativas sobre todo el deslizamiento.

Con respecto a los píxeles analizados que se ubicaron en la parte superior, estos tuvieron magnitudes iguales a -2.18 mm/yr (P1), -5.32 mm/yr (P2) y 4.26 mm/yr (P3). Por otro lado, los píxeles ubicados en la parte infe-

rior tuvieron tasas de movimiento iguales a -0.50 mm/yr (P4), 2.16 mm/yr (P5), 3.15 mm/yr (P6) y 0.35 mm/yr (P7). En ambos casos, los valores fueron más pequeños que los encontrados en el periodo anterior. Aunque no se observan diferencias notables entre las magnitudes de los píxeles sobre el deslizamiento, aún se aprecia que la parte superior derecha del deslizamiento tiende a alejarse del radar, mientras que la parte inferior tiende a acercarse.

Pixel	Ubicación (°)	
	Latitud	Longitud
Pixel 1 (P1d)	-12.43081	-75.03823
Pixel 2 (P2d)	-12.43159	-75.03737
Pixel 3 (P3d)	-12.43210	-75.03652
Pixel 4 (P4d)	-12.42957	-75.03712
Pixel 5 (P5d)	-12.43015	-75.03593
Pixel 6 (P6d)	-12.43128	-75.03619
Pixel 7 (P7d)	-12.43186	-75.03538

Tabla 3: Ubicación de los píxeles que permitieron analizar la tasa de movimiento del deslizamiento de Cuenca, durante el periodo 28 de marzo - 31 de agosto de 2022.

Es importante mencionar que, para imágenes descendentes, las tasas de desplazamiento deben ser interpretados como movimientos en dirección LOS que están orientados en dirección -Z (vertical) y oeste (W) cuando son valores negativos, y orientados en dirección +Z (vertical) y este (E) cuando son positivos.

GPS

Las mediciones GPS realizadas sobre el deslizamiento permitieron estimar los desplazamientos, en dirección este (dE), norte (dN) y vertical (dU), que se produjeron durante el periodo máximo comprendido entre el 08 de diciembre de 2021 y 02 de diciembre de 2022 (ver Tabla 4).

Estos desplazamientos se visualizan en la Figura 12. Los vectores negros representan los desplazamientos totales horizontales (dH, mm) que fueron calculados a partir de las componentes este (dE) y norte (dN) de desplazamiento, mientras que los vectores azules representan los desplazamientos verticales (dU, mm).

Los vectores se graficaron empleando diferentes colores para resaltar que las escalas empleadas para el dibujo de ambos no fueron las mismas, ya que hubo desplazamientos (dH: 12.64 mm [CU16], dH: 3.35 mm [CU15], dU: -3.43 mm [CU17]) cuyas magnitudes fueron algo diferentes.

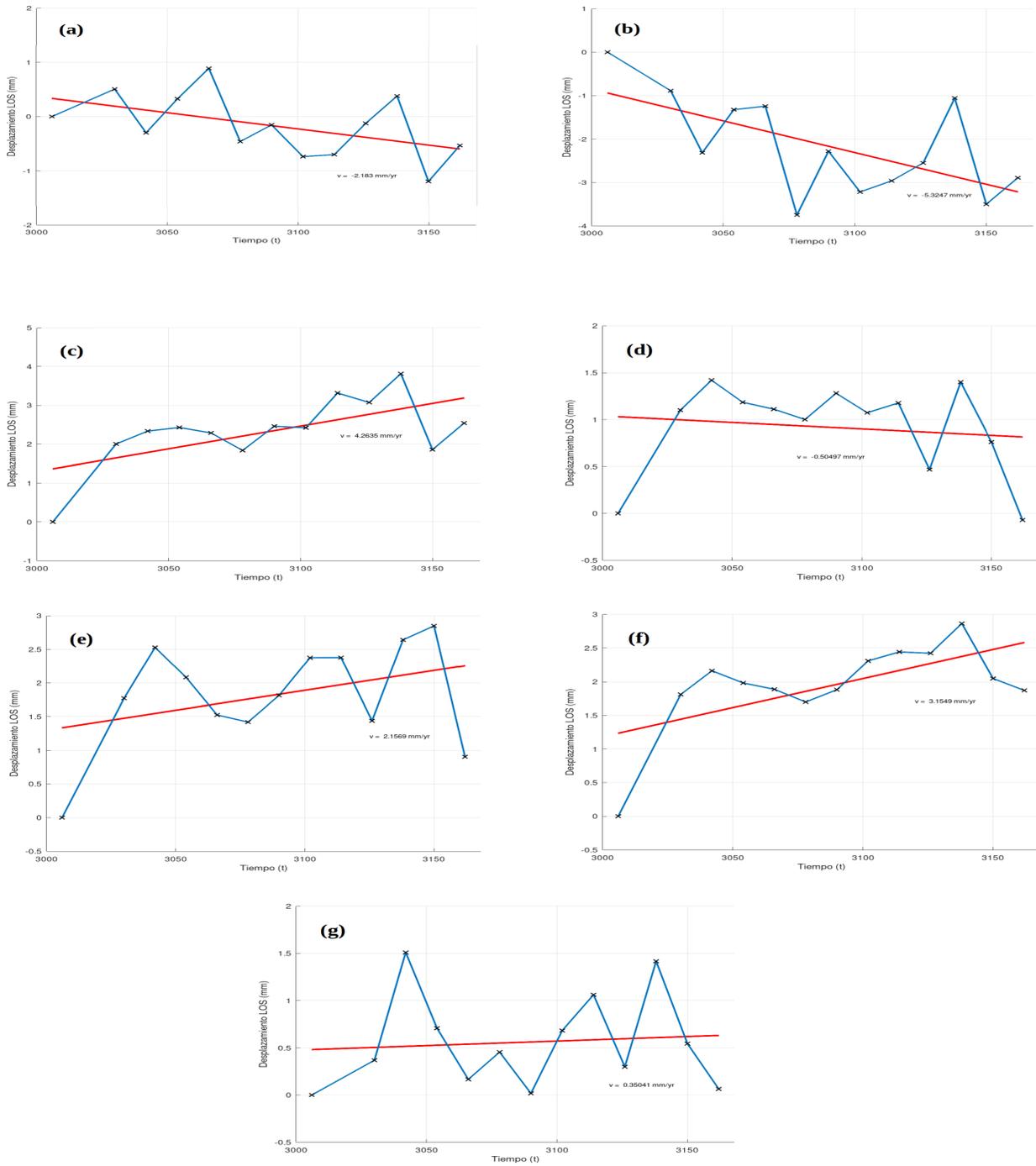


Figura 11: Series de tiempo formadas a partir de los archivos de desplazamiento generados por SBAS, para los pixeles (a) P1d, (b) P2d, (c) P3d, (d) P4d, (e) P5d, (f) P6d y (g) P7d.

Estación	Periodo	Latitud	Longitud	Height (m)	dE (mm)	dN (mm)	dU (mm)	dH (mm)
CU15	20211208 - 20221130	-12.42948	-75.03709	3048.71293	3.13	1.19	5.60	3.35
CU16	20211208 - 20221201	-12.42889	-75.03612	3011.23094	12.12	3.58	5.58	12.64
CU17	20211208 - 20221202	-12.43053	-75.03952	3223.22076	7.82	9.78	-3.43	12.52

Tabla 4: Desplazamientos totales promedio en dirección este (dE), norte (dN) y vertical (dU) estimados sobre el deslizamiento de Cuenca a partir de mediciones GPS. También se muestra el desplazamiento horizontal total (dH) promedio registrados en cada estación.

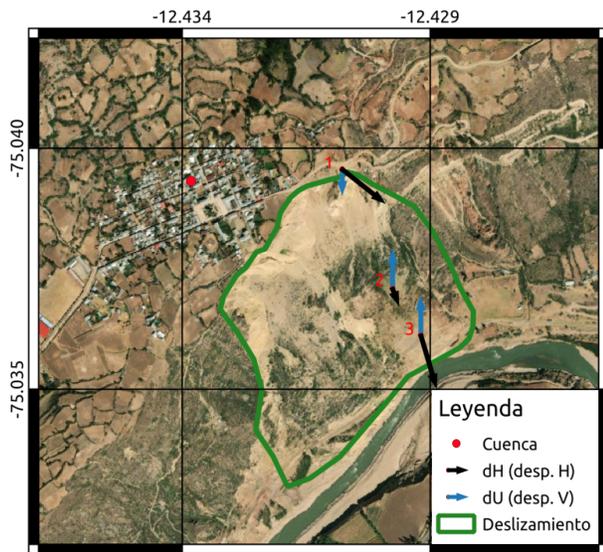


Figura 12: Desplazamientos totales horizontales (dH, negro) y verticales (dU, azul) en mm registrados por tres estaciones geodésicas: (1) CU17, (2) CU15 y (3) CU16, durante el periodo noviembre 2021 - diciembre 2022.

4.2. Discusión de resultados

Se realizó la comparación de los valores encontrados con SBAS para el conjunto de imágenes de 28 de marzo al 31 de agosto de 2022, el desplazamiento acumulado (03 de enero y 01 de diciembre de 2022) calculado a partir de datos GBSAR para la zona 6 y los desplazamientos registrados (08 de diciembre de 2021 y 02 de diciembre de 2022) por instrumentos GPS: CU15, CU16 y CU17. El resumen de los resultados obtenidos a partir de estos métodos se muestran en la **Tabla 5**.

Es importante mencionar que los resultados de desplazamiento mediante SBAS y GBSAR no tienen la misma orientación, ya que LOS1 está orientado en dirección del segmento que une el GBSAR y la zona 6, mientras que LOS2 está orientado en dirección del segmento que une el sensor SAR satelital y el punto ubicado en el instrumento GPS de interés (CU15, CU16 o CU17). Sin embargo, estos fueron empleados para comparar resultados

analizando los signos de los valores de desplazamiento, ya que estos nos indicaron si se produjo una subsidencia o levantamiento de la superficie.

Estación	GBSAR (LOS1, mm)	SBAS (LOS2, mm)	GPS			
			dE (mm)	dN (mm)	dU (mm)	dH (mm)
CU15	—	-0.06	3.13	1.19	5.60	3.35
CU16	—	2.87	12.12	3.58	5.58	12.64
CU17	-87.54	-2.79	7.82	9.78	-3.43	12.52

Tabla 5: Valores de desplazamiento encontrados mediante FDBP y SBAS, y registrados por instrumentos GPS.

De los valores mostrados en la **Tabla 5**, se menciona lo siguiente:

1. Las magnitudes de los desplazamientos obtenidas con SBAS son pequeñas y, en dos casos, representan físicamente lo mismo que lo registrado por instrumentos GPS (dU). Con SBAS, se encontraron que dos puntos GPS se alejaron (LOS2: -0.06 mm [CU15], -2.79 mm [CU17]) y uno se acercó (LOS2: 2.87 mm [CU16]) al radar satelital en dirección LOS, mientras que los instrumentos GPS mostraron que dos se acercaron y uno se alejó (dU: 5.60 mm [CU15], 5.58 mm [CU16], -3.43 mm [CU17]). El análisis de esta discrepancia no pudo verificarse debido a que no existen datos satelitales disponibles durante los meses enero, febrero y casi todo marzo de 2022; además de que los valores GPS muestran desplazamientos ocurridos durante un periodo de tiempo más largo (diciembre 2021 - diciembre 2022). Aunque se observó cierta concordancia física en dos casos, se considera que el procesamiento SBAS realizado no es totalmente fiable. Esto se debe a que no se realizaron correcciones adicionales que pueden influir en los resultados, tales como la contribución atmosférica, el cual puede corregirse mediante [39], o considerar lo mencionado por [40] y [41], donde se recomienda que el procesamiento SBAS y PS InSAR debe realizarse con una

cantidad de imágenes aceptable (> 20 (SBAS) y $> 20, 30$ (PS InSAR)).

2. Los resultados obtenidos con GBSAR fueron más coherentes. Los valores encontrados con este sistema mostró que, para el periodo comprendido entre el 03 de enero y 01 de diciembre de 2022, la zona 6 se acercó 87.54 mm al radar terrestre (por tanto, se deslizó) en promedio. Esto coincide con el análisis físico realizado a partir de las mediciones verticales registradas en la estación CU17, ya que este registró un hundimiento de -3.43 mm. Las diferencias de magnitud podrían asociarse a diversos factores. Entre ellos, se destaca que los resultados encontrados con GBSAR miden desplazamientos sobre porciones de suelo de tamaño regular (100 m x 100 m), y no sobre posiciones exactas GPS. Además, estos representan desplazamientos sobre periodos algo diferentes: 03 de enero - 01 de diciembre de 2022 para GBSAR y 08 de diciembre de 2021 - 02 de diciembre de 2022 para GPS.

En la **Figura 7**, se observó una región de mayor hundimiento en dirección LOS en la parte central superior del deslizamiento, el cual está de acuerdo con el comportamiento general de los deslizamientos. Este último es debido a que generalmente, sobre estas superficies, se observan mayores subsidencias en estas regiones.

5. Conclusiones

Los resultados anteriores permiten concluir lo siguiente:

1. Las técnicas de radar terrestre y satelital pueden emplearse para estudiar deslizamientos de tierra, sin embargo, el radar terrestre permite obtener valores de desplazamientos que se aproximan mejor a las soluciones GPS ya que, al estar más cerca del objetivo, su medida es directa y requiere aplicar menos factores de corrección que las observaciones satelitales. Esto se considera importante porque la calidad de los resultados encontrados mediante la técnica SBAS depende mucho de la aplicación varios procesos: desenvolvimiento de fase (muy dependiente del ruido presente en los interferogramas), contribución atmosférica (mayor que GBSAR porque tiene menor resolución temporal), presencia de una contribución asociada a la imposibilidad de alcanzar una línea de base cero (*zero baseline*), entre otros. Además de esos factores, también existen otros relacionados específicamente al terreno tales como el tipo de cobertura (vegetación, desértica, entre otros) y la inclinación de la pendiente del deslizamiento [42].

2. Los resultados encontrados mediante SBAS fueron más coherentes cuando se procesó el primer conjunto de imágenes (noviembre 2019 - diciembre 2021), pues se observaron zonas de mayor alejamiento en la parte superior del deslizamiento. Esto se debería a la cantidad de datos que se consideraron para el procesamiento (> 20) [41]. El procesamiento del segundo conjunto de imágenes (marzo 2022 - agosto 2022) fue realizado empleando solo 13 imágenes de radar.

3. Los desplazamientos acumulados que se obtuvieron para la zona Z6 durante el periodo 03 de enero y 01 de diciembre de 2022 mediante datos GBSAR están de acuerdo con el desplazamiento vertical de la estación geodésica CU17. Sin embargo, la magnitud de los desplazamientos (-87.54 mm) son relativamente diferentes con respecto al desplazamiento vertical de -3.43 mm registrado por el GPS. Este hecho se debería a dos factores: los desplazamientos obtenidos mediante datos GBSAR están asociados a porciones de suelo de tamaño considerable (no de un punto en específico); además, los desplazamientos adquiridos mediante FDBP y GPS fueron analizados sobre periodos de tiempo relativamente distintos. A pesar de estas ligeras diferencias, el presente trabajo ha demostrado la gran utilidad que tienen los instrumentos GBSAR para el monitoreo de deslizamientos.

6. Agradecimientos

Al Dr. Cesar Jimenez Tintaya por las recomendaciones brindadas durante el desarrollo del presente trabajo de investigación. Su constante apoyo permitió culminar el trabajo exitosamente.

Al Instituto Geofísico del Perú y a FONDECYT-ProCiencia por el financiamiento otorgado para la realización de esta investigación a través del Proyecto 048-2021-ProCiencia, denominado: "Mejoras del prototipo y determinación de los rangos óptimos de distancia al objetivo, potencia transmitida y condiciones climáticas de operación de radar GB-SAR para monitoreo de deslizamientos de tierra".

Referencias

- [1] P. Canuti, N. Casagli, L. Ermini, R. Fanti y R. Farina. Landslide activity as a geoinicator in Italy: significance and new perspectives from remote sensing. *Env. Geol.*, **45**, 907-919 (2004).
- [2] Y. Hong, R. Adler y G. Huffman. Use of satellite remote sensing data in the mapping of global landslide susceptibility. *Nat. Hazards*, **43**, 245-256 (2007).
- [3] M. Lynn y P. Bobrowsky. *The landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides*. Servicio Geológico de Estados Unidos - USGS.
- [4] L. Chang y J. Alva. *Deslizamientos y aluviones en el Perú*. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (1991).
- [5] M. Vilches. Casos históricos de movimientos en masa que causaron grandes daños en Perú. En *Taller Internacional de capacidades para mitigar los impactos de huacos en Perú, Lima y Arequipa*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET (2018).
- [6] M. Mergili, B. Frank, J. Fischer, C. Huggel y S. Pudasaini. Computational experiments on the 1962 and 1970 landslide events at Huascarán (Peru) with r.avaflow: lessons learned for predictive mass flow simulations. *Geomorphology*, **322**, 15-28 (2018).
- [7] R. Taype. Mecánica del deslizamiento de Ccochacay en el río Mantaro. *Bol. Soc. Geol. Perú*, **52**, 73-90 (1976).
- [8] INDECI. Compendio estadístico del INDECI en la preparación, respuesta y rehabilitación ante emergencias y desastres. Instituto Nacional de Defensa Civil (2012).
- [9] INDECI. Deslizamiento afecta el distrito de Cuenca, provincia Huancavelica-Huancavelica, Informe Técnico N° 119, Lima: Instituto Nacional de Defensa Civil (2014).
- [10] INDECI. Deslizamiento en el distrito de Chavín de Huantar - Ancash, Informe Técnico N° 5470: Instituto Nacional de Defensa Civil (2022).
- [11] O. Monserrat, M. Crosetto y G. Luzi. A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement. *Int. Soc. Photogramm. Remote Sens. (ISPRS)*, **93**, 40-48 (2014).
- [12] P. Rosen, S. Hensley, I. Joughin, F. Li, S. Madsen, E. Rodriguez y R. Goldstein. Synthetic aperture radar interferometry. *Proc. IEEE*, **88**(3), 333-382 (2000).
- [13] J. Pernia. Sensores espaciales para estudios ambientales, a las puertas del siglo XXI. *Rev. Forest. Venez.*, **43**(2), 207-222 (1999).
- [14] D. Tarchi, N. Casagli, R. Fanti, D. Leva, G. Luzi, A. Pasuto, M. Pieraccini y S. Silvano. Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy. *Eng. Geol.*, **68**, 15-30 (2003).
- [15] C. Luzi, C. Del Ventisette y N. Casagli. Monitoring deformation of the sciara del fuoco (Stromboli) through ground-based radar interferometry. *Acta Vulcanologica*, **22**(1), 77-84 (2010).
- [16] A. Sarries. Design and implementation of an SDR-based multi-frequency ground-based SAR system. *Tesis de doctorado*, Universidad Politécnica de Cataluña, España (2020).
- [17] P. Canuti, C. Margottini, R. Mucho, N. Casagli, G. Delmonaco, A. Ferreti, G. Lollino, G. Puglisi y D. Tarchi. Preliminary Remarks on Monitoring, Geomorphological Evolution and Slope Stability of Inca Citadel of Machu Picchu (C101-1). En K. Sassa, H. Fukuoka, F. Wang y G. Wang (Eds.), *Landslides*, 39-47, Springer (2005).
- [18] D. Tarchi, N. Casagli, S. Moretti, D. Leva y A. Sieber. Monitoring landslide displacements by using ground-based synthetic aperture radar interferometry: Application to the Ruinon landslide in the Italian Alps. *J. Geophys. Res.*, **108**(B8), 1-14 (2003).
- [19] L. De la Cruz y M. Milla. Comparison of GBSAR imaging algorithms for a landslide monitoring application. En *IEEE International Congress on Electronics, Electrical Engineering and Computing - INTERCON* (2020).
- [20] M. Rosyidi, M. Dimiyati, I. Shidiq, F. Zulkarnain, N. Rahaningtyas, R. Syamsuddin y F. Zein. Landslide surface deformation analysis using SBAS-InSAR in the Southern part of the Sukabumi area, Indonesia. *Geographia Technica*, **16**, 138-152 (2021).
- [21] M. Voge, R. Frauenfelder, K. Ekseth, M. Arora, A. Bhattacharya y R. Bhasin. The use of SAR Interferometry for landslide mapping in the Indian Himalayas. En *36th International Symposium on Remote Sensing of Environment* (2015).
- [22] A. Fiorentino, S. Charapaqui, C. De la Jara. y M. Milla. Implementation of a ground based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) for landslide monitoring: System description and preliminary results [Artículo]. En *2016 IEEE XXIII Congreso Internacional*

- de Electrónica, Ingeniería Eléctrica y Computación (INTERCON) (2016).
- [23] A. Pachay, L. García y M. Zevallos. Determinación de zonas susceptibles ante movimientos en masa utilizando metodología InSAR, Análisis Morfométrico, y el índice de estabilidad (Mohr-Coulumb). Caso: Campus de la Universidad Técnica de Manabí. Pol. Con., **6(3)**, 1776-1798 (2021).
- [24] ESA. Mission ends for Copernicus Sentinel-1B satellite, web: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/ (2022).
- [25] J. Villegas y O. Balladares. Procesamiento de datos GPS: Resultados. Proyecto: Caracterización geológica, geotécnica y monitoreo con GPS diferencial del deslizamiento del tipo rotacional aplicado en el distrito de Cuenca, provincia de Huancavelica, región Huancavelica. Mediciones 2016-2017, Informe Técnico, Lima: Instituto Geofísico del Perú (2018).
- [26] Villegas, JC., Quiroz, W., Moroccoire, K., Balladares, O. y Berduzco, M. GNSS precise measurements to quantify surface displacements in the interandean Cuenca landslide in central Peru. En preparación.
- [27] T. Herring, R. King, M. Floyd y S. McClusky. GAMIT Reference Manual GPS analysis at MIT (2015a).
- [28] T. Herring, M. Floyd, R. King y S. McCl. GLOBK reference manual, Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, web: geoweb.mit.edu/gg/ (2015b).
- [29] M. Pieraccini, G. Luzi y C. Atzeni. Terrain mapping by ground-based interferometric radar. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., **39(10)**, 2176-2181 (2001).
- [30] I. Garcia. Desplazamientos superficiales 3D del Centro de Dispersión Cerro Prieto usando InSAR. *Tesis de maestría*, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México (2021).
- [31] X. Chen, G. Tessari, M. Fabris, V. Achilli y M. Floris. Comparison between PS and SBAS InSAR techniques in monitoring shallow landslides. En K. Sassa (Ed.), *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*, 155-161, Springer (2021).
- [32] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari y E. Sansosti. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., **40(11)**, 2375-2383 (2002).
- [33] R. Lanari, F. Casu, M. Manzo, G. Zeni, P. Berardino, M. Manunta y A. Pepe. An Overview of the Small Baseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis. Pure Appl. Geophys., **164(04)**, 637-661 (2007).
- [34] S. Seppi. Uso de interferometría diferencial para monitorear deformaciones de terreno en la comuna de Corvara, provincia de Bolzano, Italia. *Tesis de maestría*, Universidad Nacional de Córdoba y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, Argentina (2016).
- [35] R. Goldstein y C. Werner. Radar interferogram filtering for geophysical applications. Geophys. Res. Lett., **25(21)**, 4035-4038 (1998).
- [36] X. Tian, M. Jiang, R. Xiao y R. Malhotra. Bias removal for Goldstein filtering power using a second kind statistical coherence estimator. Remote Sens., **10(10)**, 1-14 (2018).
- [37] D. Sandwell, X. Xiaohua, R. Mellors, M. Wei, X. Tong, K. Tymofeyeva, J. Chen y J. DeSanto. Satellite Radar Interferometry, web: <https://topex.ucsd.edu/gmtsar/downloads/> (2016).
- [38] L. De la Cruz, M. Milla y C. De la Jara. Sistema de monitoreo de deslizamientos con un radar de apertura sintética, instalado en Cuenca, Huancavelica [Presentación de avances]. Radio Observatorio de Jicamarca, Instituto Geofísico del Perú (s.f.).
- [39] GACOS. Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS), web: <http://www.gacos.net/> (s.f.).
- [40] D. Lu y D. Dzurisin. InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes. Springer (2014).
- [41] M. Vassileva, F. Giulio, P. Riccardi, D. Lecci, P. Boccardo y G. Chiesa. Satellite SAR Interferometric techniques in support to emergency mapping. Eur. J. Remote Sens., **50(1)**, 464-477 (2017).
- [42] C. Colesanti y J. Wasowski. Investigation landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry. Eng. Geol., **88** (3-4), 173-199 (2006).