

Evaluación de la cinemática del deslizamiento de Cuenca en los Andes de Perú central mediante técnicas fotogramétricas y geodésicas

Wendy Quiroz ^{*1}, Juan Villegas-Lanza ¹, Keiko Moroccore ¹, Oscar Balladares ¹, Mijaell Berduzco ¹

¹ Instituto Geofísico del Perú – IGP. Calle Badajoz N° 169, Lima (15012), Perú..

Resumen: Los deslizamientos de tierra representan un peligro importante en muchas regiones montañosas, incluidos los valles interandinos del Perú. En este estudio evaluamos la dinámica del deslizamiento de Cuenca, ubicado en Huancavelica en el centro de Perú, empleando fotogrametría y mediciones GNSS. Se ejecutaron mediciones interanuales en ocho zonas entre 2016 y 2023 para GNSS y dos campañas de levantamiento fotogramétrico en 2023 para comparar los cambios de la superficie en el tiempo. Los resultados mostraron desplazamientos del orden de los 3,7 a 11,7 cm con la técnica de nube de puntos y 2,7 a 15 cm con el análisis de los ortomosaicos, siendo concordantes entre sí. Los desplazamientos en los puntos donde se han realizado mediciones GNSS son similares en magnitud, sin embargo, difieren parcialmente en dirección. El estudio concluye que las técnicas fotogramétricas son aplicables para analizar la dinámica de deslizamientos.

Palabras clave: monitoreo de deslizamientos de tierra, GNSS, nube de puntos, fotogrametría, Cuenca (Perú).

Assessment of the kinematics of the Cuenca landslide in the central Peruvian Andes using photogrammetry and geodetic techniques

Abstract: Landslides represent a significant hazard in many mountainous regions, including the inter-Andean valleys of Peru. In this study, we evaluate the dynamics of the Cuenca landslide located in Huancavelica, central Peru, using photogrammetry and GNSS measurements. Interannual measurements were conducted at eight sites between 2016 and 2023 for GNSS, and two photogrammetric survey campaigns in 2023 to compare surface changes over time. The results show displacements ranging from 3.7 to 11.7 cm using the point cloud technique and from 2.7 to 15 cm through orthomosaic analysis, with both methods yielding consistent results. Displacements at points where GNSS measurements were taken are similar in magnitude but differ partially in direction. The study concludes that UAV techniques are applicable for analyzing landslide dynamics.

Key words: landslide monitoring, GNSS, point cloud, photogrammetry, Cuenca (Peru).

1. Introducción

Los deslizamientos de tierra son el fenómeno geológico más frecuente en el mundo y pueden causar importantes daños económicos, lesiones e incluso en algunos casos la muerte (Petley, 2012; Carrión-Mero *et al.*, 2021). En el Perú, constituyen el quinto peligro natural más común, generando

la mayoría de emergencias en los últimos 16 años (Millán-Arancibia y Lavado-Casimiro, 2023), siendo particularmente significativos para las comunidades asentadas en áreas montañosas. Por este motivo, resulta esencial abordar su análisis para caracterizar y comprender mejor la dinámica de este tipo de movimiento en masa.

To cite this article: Quiroz, W., Villegas-Lanza, J., Moroccore, K., Balladares, O., Berduzco, M. 2024. Assessment of the kinematics of the Cuenca landslide in the central Peruvian Andes using photogrammetry and geodetic techniques. *Revista de Teledetección*, 64, 33-48. <https://doi.org/10.4995/raet.2024.21785>

* Corresponding author: wquiroz@igp.gob.pe

El uso del Sistema de Navegación Global por Satélite (GNSS) en el monitoreo de deslizamientos de tierra ha sido ampliamente probado en diferentes ambientes y configuraciones geológicas, permitiendo una comprensión más precisa de la dinámica superficial (Gili *et al.*, 2000; Li, 2021; Huang *et al.*, 2023; Nikolakopoulos *et al.*, 2023). Este avance ha sido posible gracias al progreso integral de sistemas satelitales y mejoras en la instrumentación que aumentan la confiabilidad de los levantamientos. Por otra parte, la integración de diversos sensores remotos como LiDAR (*Light Detection and Ranging*), radar (*Radio Detection and Ranging*), y los sensores de imágenes satelitales ópticas, como las que proveen los satélites Landsat y Sentinel-2, mejora significativamente la información recopilada, aportando características temporales y espaciales detalladas para estudiar el movimiento de la superficie a diferentes escalas (Li *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2022; Zárate-Torres *et al.*, 2021; Nikolakopoulos *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2024). Entre ellas, las técnicas con Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) han permitido incrementar la resolución espacial de las imágenes, hasta alcanzar valores centimétricos (<10 cm), con lo cual se puede caracterizar el movimiento en superficies, siendo efectivos en la cuantificación de cambios topográficos asociados a deslizamientos, cambios morfológicos en volcanes, erosión de suelos y deslizamientos de tierra provocados por sismos (Zárate-Torres *et al.*, 2021; Nikolakopoulos *et al.*, 2023, Granados-Bolaños *et al.*, 2020, Kariminejad *et al.*, 2024, Arroyo-Solórzano *et al.*, 2022). El uso de software especializado facilita la generación de nubes de puntos, crucial para la detección de cambios morfológicos, indicativos de procesos incipientes o en curso. En este contexto, un algoritmo que se destaca es el denominado “comparación de modelo a modelo en múltiples escalas” (M3C2), introducido por Lague *et al.* (2013). Este algoritmo permite calcular distancias entre nubes de puntos 3D en distintos momentos temporales, facilitando así la estimación de cambios en un entorno tridimensional. Asimismo, a partir de los productos generados por fotogrametría como ortomosaicos y Modelos Digitales de Superficie (MDS) es posible realizar la cuantificación de cambios horizontales y verticales, mediante las técnicas de correlación de ortomosaicos y corregistro de MDS, los cuales se encuentran implementados en los softwares

Ames Stereo Pipeline y *Demcoreg*. En el presente trabajo se estudia la dinámica de movimiento del deslizamiento de tierra de la localidad de Cuenca, ubicado en los Andes de la región central del Perú, mediante la aplicación de técnicas fotogramétricas y geodésicas, enfatizando la eficacia de la fotogrametría y la necesidad de combinarla con GNSS para mejorar la precisión y fiabilidad de los resultados. Debido a la complejidad de acceso al área de estudio se implementó un sistema de monitoreo integrado, asegurando una evaluación detallada y continua de los movimientos del deslizamiento, fundamental para estrategias efectivas de mitigación y alerta temprana.

1.1. Área de estudio

El área de estudio se ubica en los Andes de la región central de Perú, en el distrito de Cuenca, específicamente en la Cordillera Oriental. La zona se considera tectónicamente activa, con alto nivel de deformación cortical debido a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana (Villegas-Lanza *et al.*, 2016). Geológicamente, se emplaza en un relleno de escombros originada por procesos de erosión, acumulación y sedimentación, con la presencia de la formación Condorsinga compuesta por rocas calizas del jurásico inferior, cubiertas por depósitos cuaternarios gravoso-arenosos, arcillo-arenosos, clastos angulosos y gravas redondeados pertenecientes a deslizamientos antiguos y eventos morrénicos (Quispesivana y Navarro, 2003). El clima varía de seco a frío en la mayor parte del año y la temperatura promedio varía entre 5 a 25 °C dependiendo de la altitud, con una temporada de lluvias intensa que incrementa el riesgo de la ocurrencia de deslizamientos. La geomorfología del área está dominada por montañas escarpadas y valles profundos, con pendientes pronunciadas y cárcavas. El río Mantaro es la principal cuenca hidrográfica de la región; de igual modo, existen puntos de afloramiento de agua en la parte alta de las laderas. El uso del suelo está dominado por actividades agrícolas y ganaderas. Esta combinación de factores tectónicos, litológicos, climáticos, geomorfológicos, hidrológicos y de uso del suelo crea un ambiente propenso a los deslizamientos, como se evidenció en el evento del 20 de enero de 2014 (Zubiate y Madera, 2014).

2. Métodos

2.1. Monitoreo GNSS

Se llevaron a cabo mediciones en el modo estático, a través de medidas temporales de campaña realizadas en septiembre 2016, octubre 2017 y noviembre 2018; posteriormente se retomaron en diciembre 2021, noviembre 2022, mayo y noviembre 2023. Se instaló una estación base continua a 5,8 km al oeste, sobre afloramiento de roca estable (latitud $-12,4480^{\circ}$, longitud $-75,0623^{\circ}$). Se instalaron ocho puntos de monitoreo GNSS de la siguiente manera: en la corona (CU17), el cuerpo (CU15) y el pie (CU16) del deslizamiento, hacia el norte (CU09 y CU18) y al extremo sur del centro poblado de Cuenca (CU07). En las estaciones CU07, CU09 y CU08 se realizaron mediciones desde 2016; las estaciones CU14 a CU18 se midieron a partir de 2021; CU16 no fue medida en noviembre de 2023. En la superficie física del suelo, se

construyeron bloques de hormigón de 0,60 m de largo y se incrustó un mástil de acero inoxidable, sobre el cual, en cada medida, se montó un adaptador de acero de 0,174 m de altura sobre el suelo para fijar la antena geodésica.

2.2. Fotogrametría aérea

Las campañas de adquisición de fotografías aéreas se llevaron a cabo en mayo y noviembre 2023; para ello se emplearon dos UAV, el Mavic 3 Enterprise y Phantom 4 Pro V2, operando a una altitud de vuelo de 80 metros sobre el suelo. La planificación de los vuelos se implementó utilizando el software *Map Pilot* para el Phantom y *DJI Fly* para el Mavic 3E, considerando un solapamiento longitudinal y transversal del 80%, y una resolución *Ground Sample Distance* (GSD) de 5 cm/píxel. Para garantizar la precisión y calidad de las correcciones y ajuste de fotos adquiridas por UAV durante las campañas, se establecieron un total de 22 puntos

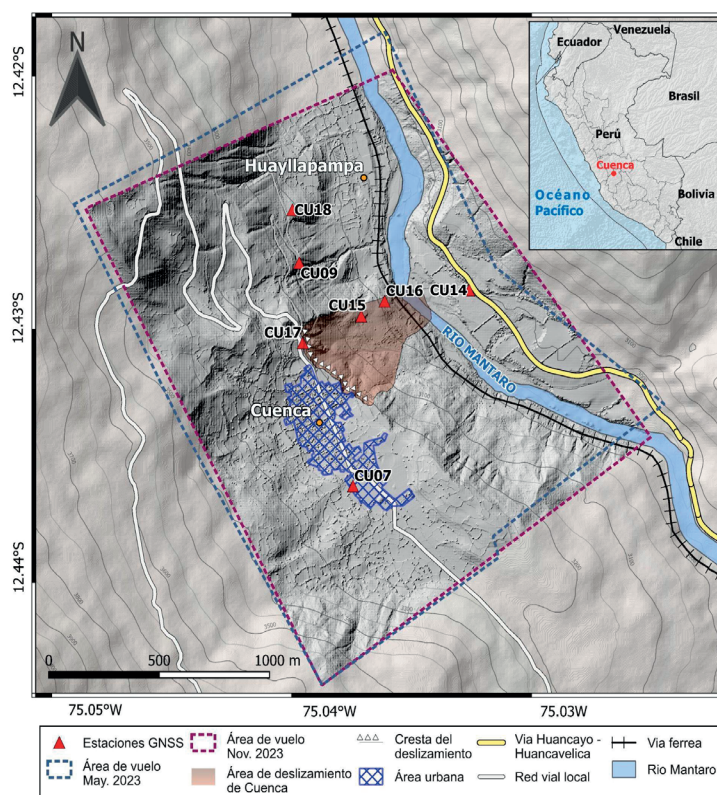


Figura 1. Ubicación del área de estudio. El polígono azul indica el área de sobrevuelo con dron realizado en mayo del 2023 y el polígono violeta, el realizado en noviembre 2023. Los triángulos rojos indican la ubicación de los puntos de monitoreo GPS, mientras que el área de deslizamiento se muestra en color marrón.

de control para la primera campaña y de 36 puntos de control para la segunda campaña. El registro de los puntos de control se realizó por el método estático rápido (Leick *et al.*, 1995; Hofmann *et al.*, 1997). La precisión de la componente horizontal de los puntos de control varía entre 8 y 21 mm, y la de la componente vertical, entre 15 y 35 mm.

2.3. Métodos de procesamiento

2.3.1. Procesamiento de datos GNSS

Las observaciones de los puntos de monitoreo geodésico se recopilaron utilizando receptores GNSS diferenciales de doble frecuencia y antenas geodésicas, en sesiones de 24 a 48 horas de duración. Posteriormente, se verificó la calidad de los datos obtenidos con el software TEQC (<https://www.unavco.org>) incluyendo estaciones de referencia de la *Internacional GNSS Service* (IGS; <http://www.igs.org/>), y órbitas precisas y efemérides de *Scripps Institution of Oceanography's Orbit and Permanent Array Center* (SOPAC) (<http://sopac.ucsd.edu/>). Para el procesamiento de los datos GPS se utilizó el software GAMIT/GLOBK (<http://geoweb.mit.edu/gg>), el cual permite reducir el efecto de errores (Gili *et al.*, 2000), y obtener coordenadas precisas en un marco de referencia definido (Herring *et al.*, 2010). Para el presente estudio se obtuvieron coordenadas en el marco de referencia del ITRF2020; posteriormente, se realizó el análisis de los desplazamientos y sus tasas en base a una estación de referencia (CU04). El valor de la resultante horizontal se calcula mediante la Ecuación 1:

$$R_H = \sqrt{(Comp\ N^2 + Comp\ E^2)} \quad (1)$$

Donde *Comp N* y *Comp E* son los desplazamientos (o las tasas) en la componente Norte y Este respectivamente.

2.3.2. Procesamiento fotogramétrico

a) Generación de Nube densa de puntos

Se realizó la reconstrucción tridimensional de la escena mediante la generación de una nube de puntos, utilizando la técnica *Structure from Motion* (SfM) (Westoby *et al.*, 2012). El flujo de trabajo seguido para la creación de la nube de puntos se basó en la documentación de Agisoft LLC, 2020. Las nubes de puntos obtenidas del deslizamiento

de Cuenca contienen 8492313 y 9461718 puntos con densidades de aproximadamente 42461 y 47308 puntos por metro cuadrado. Este nivel de detalle y manejabilidad de datos permite un análisis detallado y efectivo del deslizamiento.

b) Preprocesamiento de la Nube Densa de puntos

Se utilizó el algoritmo *Iterative Closest Points* (ICP) para registrar las nubes de puntos, obteniendo una unificación con un error medio inferior a 36 mm. El corregistro se efectuó en zonas estables, donde no se anticiparon desplazamientos del terreno, como áreas con topografía uniforme, pendientes suaves, suelos compactos y sin signos evidentes de erosión. La selección de estas áreas como referencia permite una alineación correcta de las nubes de puntos, minimizando los errores de alineación. Esto garantiza que las variaciones observadas reflejan cambios reales en el terreno, eliminando imprecisiones. La cohesión en las zonas de superposición confirma la consistencia espacial de los datos, validando el registro. Esta correspondencia fue fundamental para detectar cambios significativos en el área de estudio, diferenciando entre intervenciones humanas y evoluciones naturales. Posteriormente, se realizó el proceso de limpieza minuciosa de datos, eliminando *outliers* y ruido, preservando la integridad de los datos y mejorando las capacidades analíticas para evaluar cambios.

c) Generación de Modelos Digitales de Elevación y ortomosaico

Para la generación del MDS en Agisoft, la nube de puntos se somete a una triangulación y rasterización, empleando la técnica de triangulación de Delaunay. Para crear el ortomosaico, las imágenes se rectifican con el MDS para eliminar la distorsión del relieve, usando ecuaciones de colinealidad (*Algorithms Used in Photoscan*, 2011); las versiones recientes de Agisoft permiten generar MDS y ortomosaicos a partir de mapas de profundidad, lo cual permite disminuir el tiempo de procesamiento y recursos computacionales. Los resultados obtenidos en esta investigación incluyen dos Modelos Digitales de Superficie (MDS) y dos ortomosaicos, con resoluciones espaciales de 30 cm/píxel y 5 cm/píxel, respectivamente. Se reporta un error horizontal de 1 cm y un error vertical de 0,8 cm en los datos, obtenidos a partir del cálculo con los residuos de ajuste del bloque fotogramétrico con

los puntos de control. Se realizó un recorte del área desplazada que corresponde a un polígono de 400×500 m (Figura 1).

2.3.3. Métodos de comparación

Se presenta una metodología para determinar el desplazamiento del deslizamiento de Cuenca, comparando dos nubes de puntos densas, pares de ortomosaicos y MDS obtenidos en diferentes periodos de tiempo mediante levantamientos fotogramétricos.

a) M3C2

La estimación de los desplazamientos mediante el algoritmo M3C2, implementado en *CloudCompare*, permite medir la distancia entre puntos adyacentes en dos conjuntos de datos de nubes de puntos obtenidos en diferentes periodos, facilitando la detección precisa de cambios en la superficie sin la necesidad de construir modelos o interpolar modelos de elevación digital (DEM) (Gojcic *et al.*, 2021). Para cada distancia estimada, el algoritmo M3C2 facilita el cálculo de la Incertidumbre de Distancia. Por consiguiente, se considera que un cambio en la distancia es estadísticamente significativo únicamente si excede el umbral establecido por el *LoD* del 95%, un valor que se deriva mediante la aplicación de la Ecuación 2:

$$LoD_{95\%} = \pm 1,96 \times \left(\sqrt{\frac{\sigma_1(d^2)}{n_1} + \frac{\sigma_2(d^2)}{n_2}} + reg \right) \quad (2)$$

Donde $LoD_{95\%}$ es el nivel de detección; $\sigma_1(d)$ y $\sigma_2(d)$ son la desviación estándar de las distancias de cada nube, a escala d , medida a lo largo de la dirección normal; n_1 y n_2 son el número de puntos en cada nube a esa escala; y *reg* es el error de corrección entre las dos épocas.

El M3C2 no solo mide la magnitud del desplazamiento, sino también la dirección, con distancias firmadas que pueden ser positivas o negativas según la dirección relativa entre los puntos. Aunque la precisión de las mediciones puede verse afectada por la rugosidad, los datos atípicos y el espaciado de los puntos (Lague *et al.*, 2013), el método M3C2 ha demostrado ser particularmente útil en el monitoreo de deslizamientos de tierra, permitiendo la detección de cambios rápidos y evaluación de desplazamientos (DiFrancesco *et al.*, 2020).

b) Correlación de ortomosaicos

El software *Ames Stereo Pipeline* (ASP) (Beyer *et al.*, 2018) permite obtener información de la superficie de la Tierra a partir de imágenes ópticas. La correlación permite calcular correspondencias entre píxeles de imágenes estéreo, generando un mapa de disparidad. El método empleado es la coincidencia de bloques, que se lleva a cabo moviendo una ventana rectangular de la imagen izquierda sobre una región de búsqueda en la imagen derecha. La mejor coincidencia se determina aplicando la correlación cruzada normalizada, que es robusta frente a variaciones de iluminación y contraste. Este método proporciona estimaciones de disparidad con valores enteros, que luego se refinan para mejorar la precisión. Este software presenta limitaciones en la correlación de imágenes cuando las superficies de estudio no poseen textura o presentan patrones repetitivos como nieve o agua.

c) Corrección de MDS

El método de Nuth y Kääb (2011) implementado en el software *Demcoreg* (Shean *et al.*, 2016) permite corregir desplazamientos horizontales entre dos MDS al analizar la relación entre las diferencias de elevación, la pendiente y el aspecto del terreno. Este método identifica los desplazamientos horizontales sistemáticos que causan grandes diferencias de elevación en terrenos empinados, calculando y aplicando las correcciones necesarias mediante un análisis de regresión ajustando las coordenadas del MDS desplazado para alinearlo con el MDS de referencia. Esta técnica permitió estimar los cambios verticales a partir de la corrección del desfase horizontal entre ambos MDS para el análisis de deslizamientos de tierra en Cuenca, asegurando una alineación precisa para los MDS utilizados.

A partir de los cambios verticales estimados con el corrección de MDS, se realizó el cálculo del volumen desplazado. La diferencia vertical en cada punto de la superficie se multiplicó por el área de cada celda del MDS, permitiendo obtener el volumen de material desplazado por celda. Los volúmenes individuales se sumaron para obtener el volumen total del material desplazado. Esta técnica se aplicó para estimar el volumen desplazado entre los años 2011 (empleando ALOS PALSAR-MDS) y 2023 (utilizando MDS generado por dron).

3. Resultados

3.1. Desplazamiento en puntos de monitoreo GNSS

El desplazamiento total se calculó restando las coordenadas iniciales de las coordenadas finales (primera campaña y última campaña) después de realizar el ajuste de las coordenadas con respecto a la estación de referencia CU04. Posteriormente, se calculó la tasa de desplazamiento para cada componente, donde los valores positivos indican desplazamientos hacia el este, el norte y levantamiento, mientras que los valores negativos indican desplazamientos hacia el sur, el oeste y hundimiento. En la en la Tabla 1 y en la Figura 2 se muestran los resultados de los desplazamientos horizontales y verticales.

Tabla 1. Resumen de desplazamientos totales y velocidades por componente para cada punto de monitoreo.

Punto GNSS	Desplazamiento total por componente en [mm]			Tasa de desplazamiento por componente en [mm/año]		
	dN	dE	dU	vN	vE	nU
CU07	18,1	15,4	-41,3	2,7	2,3	-6,2
CU08	25,4	25,9	-74,4	11,8	12,1	-34,6
CU09	6,7	1,6	16,3	0,9	0,2	2,3
CU14	-1,6	-2,3	17,4	-0,8	-1,2	8,8
CU15	1,8	9,1	-21,4	1,3	6,4	-15,2
CU16	8,8	9,8	-84,6	6,2	6,9	-59,2
CU17	11,4	8,5	-9,0	5,4	4,4	-4,6
CU18	8,6	2,7	-177,7	4,4	1,4	-90,9

El análisis de los resultados por componente, sobre el deslizamiento, indica predominio de movimiento en dirección este, principalmente en los puntos CU15 y CU16 con valores del orden de 9,5 mm; a diferencia de CU17 cuyo valor es 11,4 mm en la componente norte. Estos valores son consistentes en dirección con CU08 y CU07, cuyos valores son de 15 y 25 mm respectivamente. Hacia el norte, la dirección predominante en CU09 y CU18 es en la componente norte presentando valores de 6 y 8,6 mm, respectivamente. Se puede observar que existe un cambio gradual en la dirección de los desplazamientos en dirección norte, a medida que se aleja del deslizamiento.

En la componente vertical, se observa movimientos hacia abajo (subsistencia) en todos los puntos

medidos, excepto en CU09. El valor más alto se presentó en CU16 de -84,6 mm, seguido de CU15 con -21,4 mm y CU17 con -9,0 mm; valores acordes en CU08 con -74,7 mm. Se aprecia la tendencia del deslizamiento de seguir el movimiento hacia abajo desde la corona hacia el pie, e indica la mayor actividad en zonas próximas al río (zona de acumulación). Al sur y al norte del deslizamiento, los máximos movimientos verticales que presentaron CU07 y CU18 fueron de -41,3 y -177,6 mm respectivamente indicando actividad en cada estación.

Sobre el deslizamiento, resalta el aumento de movimiento en la horizontal, entre 9 a 14 mm, y tasas entre 6,5 y 9,2 mm/año durante el periodo de 2021 a 2023; las cuales son mayores, en comparación, en otras estaciones de monitoreo con tasas menores a 4,6 mm/año. El aumento del movimiento en la componente vertical al norte del deslizamiento, sugiere que la zona activa se extiende en dicha dirección identificando, además, dos zonas con geodinámica diferente.

Los resultados en CU14 muestran valores de -2,3 mm en ambas componentes (este y norte), y en la vertical de 20 mm, encontrándose dentro del margen de error del método; asimismo, su velocidad horizontal resultante es poco significativa, por lo que se considera una zona estable.

3.2. Desplazamientos fotogramétricos

3.2.1. Desplazamientos Horizontales

Los resultados obtenidos para la componente horizontal, presentados en la Figura 3, muestran desplazamientos entre 2,7 a 15 cm con la técnica ASP (desplazamientos a partir de la diferencia de dos ortomosaicos) y de 3,7 a 11,7 cm con la técnica M3C2 (desplazamientos determinados mediante nubes de puntos). En la zona del escarpe principal del deslizamiento, los vectores presentan magnitudes de 5 a 9 cm en dirección sureste según la técnica ASP, mientras que la técnica de M3C2 reporta vectores de 4 a 11 cm en dirección sureste y de 5 a 8 cm hacia el noreste. El mayor desplazamiento en este sector, reportado por ambas técnicas (8 a 11 cm), se localiza cerca de los puntos de control geodésico CU17 y CU08, en el intervalo de alturas de 3100 a 3125 metros. En la zona media, ambas técnicas muestran una

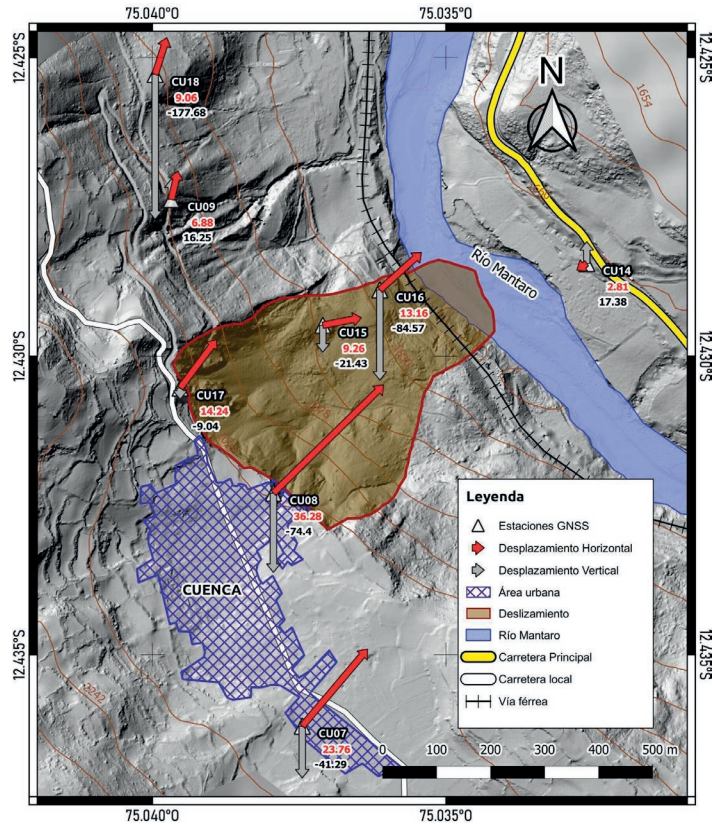


Figura 2. Mapa de vectores de desplazamiento horizontal resultante (vectores color rojo) y desplazamiento vertical (vectores color gris) de los puntos de monitoreo geodésicos del deslizamiento de Cuenca. El campo de desplazamiento está en función de la estación de referencia CU04 ubicada a 3 km al este de la localización de Cuenca.

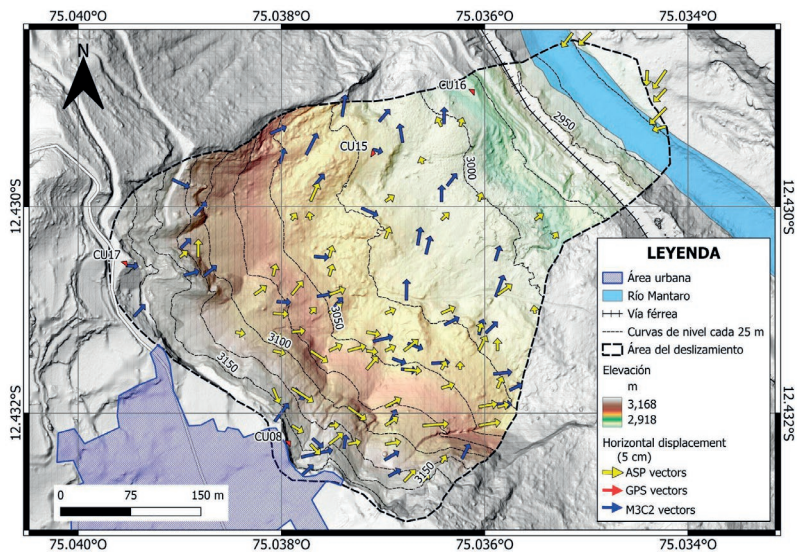


Figura 3. Desplazamiento horizontal del deslizamiento de Cuenca en mayo y noviembre de 2023. Los vectores azules representan desplazamientos obtenidos con el algoritmo M3C2, los vectores amarillos con ASP y los vectores rojos a mediciones obtenidas por GPS.

distribución de vectores con magnitudes entre 5 a 8 centímetros y orientaciones opuestas (sureste y noreste), con los mayores desplazamientos (8 cm) en el intervalo de alturas de 3025 a 3100 metros.

Finalmente, la zona de acumulación ha presentado cambios significativos en el paisaje debido a actividades antrópicas (habilitación de la vía ferroviaria). Debido a esto, las nubes de puntos e imágenes de ortomosaico no se lograron correlacionar adecuadamente, por lo que no se reportan valores en este sector. Al frente del deslizamiento, cruzando el río Mantaro, la comparación de ortomosaicos reporta desplazamientos entre 5 a 10 cm hacia el suroeste, siguiendo la dirección de la pendiente del terreno.

3.2.2. Desplazamientos verticales

Los resultados obtenidos para la componente vertical con las técnicas M3C2 y Demcoreg revelan cambios significativos en el volumen del terreno. Los valores positivos reflejan un aumento de material, mientras que los negativos indican una pérdida. En la Figura 4, estos cambios se visualizan en forma de vectores dirigidos hacia arriba y hacia abajo, utilizando la técnica M3C2 en un rango de -3 a 7 cm y con la técnica Demcoreg en

un rango de -10 a 8 metros. Una escala de colores de naranja a azul subraya la importancia de los cambios ocurridos.

En la zona del escarpe principal del deslizamiento de Cuenca, se ha registrado una pérdida de material de hasta 5 metros debido al movimiento de un bloque a través de un surco causado por erosión del agua; este sector presenta una pérdida de material entre 1 a 58 cm. Contrariamente, la zona central del deslizamiento muestra un leve incremento de hasta 5 cm, resultado del depósito de material desprendido de la zona de escarpe. En la zona de acumulación, los cambios son más notables: las pérdidas de material llegan hasta 10 metros y las acumulaciones hasta 3,5 metros, reflejando una actividad significativa de erosión o desplazamiento. Estos cambios están vinculados a movimientos de tierra recientes durante los trabajos de mantenimiento en la construcción de la vía ferroviaria Huancayo – Huancavelica (Figuras 4 y 5).

3.2.3. Cambios morfológicos y cálculo de volúmenes

El análisis del volumen reveló una pérdida de material de aproximadamente 2663 879,5 m³ en áreas elevadas y un incremento de 3736,7 m³ en zonas

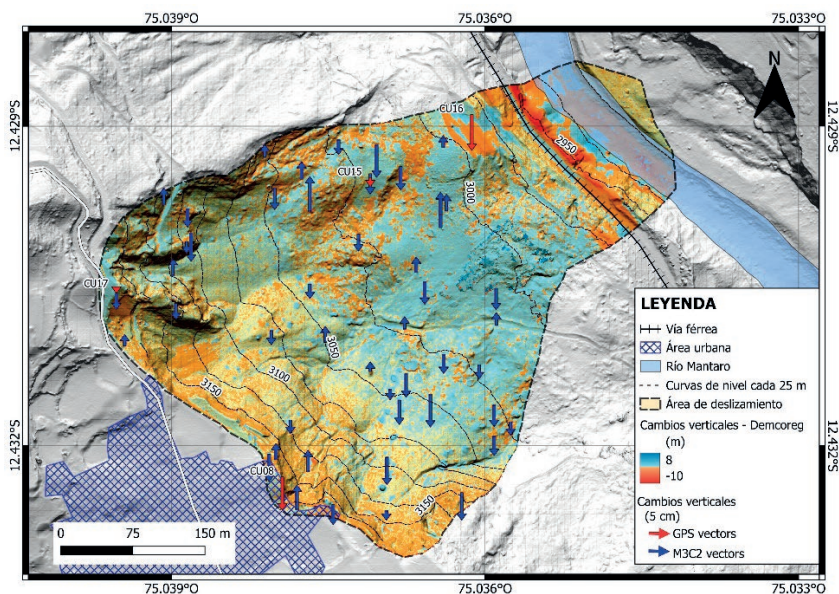


Figura 4. Desplazamiento vertical del deslizamiento de Cuenca en mayo y noviembre de 2023. Los vectores azules representan desplazamientos obtenidos con M3C2 y los vectores rojos, mediciones GPS. Los colores de fondo indican acumulación (azul) y pérdida (rojo) de material estimados con la técnica Demcoreg.

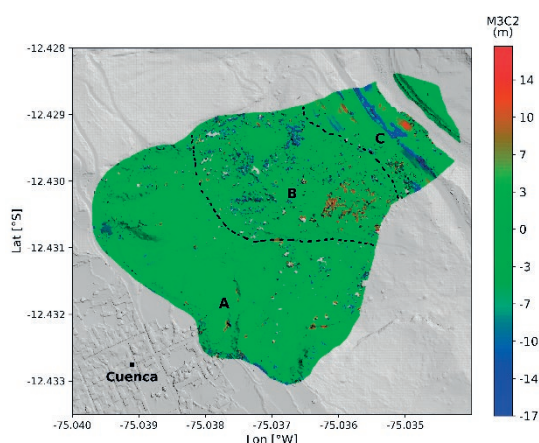


Figura 5. Visualización del deslizamiento en Cuenca a través de una nube de puntos codificada por colores, utilizando el método M3C2 para estimar magnitudes de desplazamientos totales. Las letras A, B y C corresponden a las partes alta, media y baja, respectivamente.

bajas (Figura 6), resultando en una disminución neta de 984 420,89 m³. Esta pérdida se atribuye principalmente a intervenciones antropogénicas, como la limpieza del río Mantaro y a procesos naturales como la erosión eólica y fluvial. En la Figura 6, se pueden observar los perfiles A y B, que muestran el desplazamiento del material desde la parte alta hacia la zona baja.

Los resultados contrastan con estudios previos de Vivanco y Gómez (2016), que reportaron un volumen desplazado de 10 millones m³; esta discrepancia puede atribuirse a diferencias metodológicas, periodos de estudio distintos, grado de compactación del material y al relleno subsiguiente sobre la zona desplazada. Los resultados de esta investigación son más confiables, ya que se basan en un modelo reciente para el cálculo de volumen y tienen una desviación estándar de 7 m, lo que indica la precisión de las mediciones.

3.2.4. Análisis de la Incertidumbre

La evaluación de la incertidumbre en la zona de estudio se llevó a cabo calculando la desviación estándar en un área estable con una pendiente de 15° y 22 ha de extensión. En la Figura 7 se muestran los histogramas de las componentes X e Y, y se observan distribuciones centradas alrededor del valor cero, con una desviación estándar de 0,025 m, lo cual indica una alta precisión y ausencia de desplazamientos significativos en el terreno. Este resultado es consistente con otros estudios similares que estiman la incertidumbre entre un quinto y la mitad del tamaño del píxel (Lacroix *et al.*, 2015; Delacourt *et al.*, 2004; Berthier *et al.*, 2005).

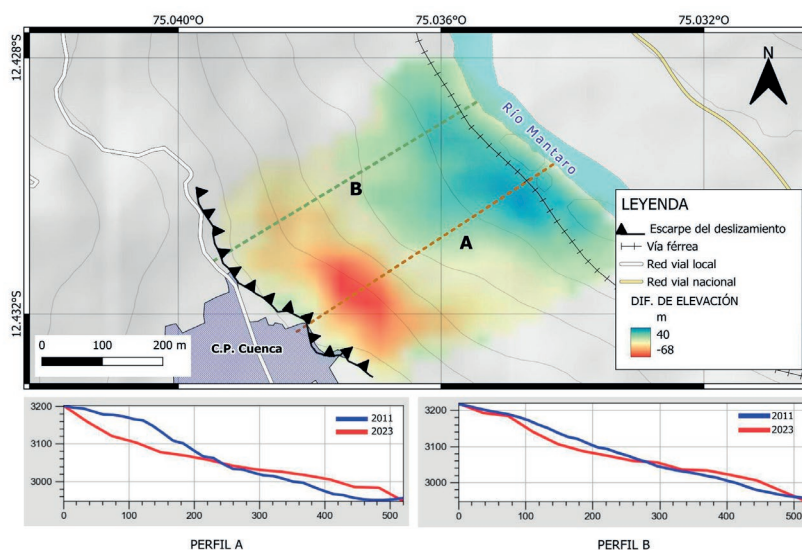


Figura 6. Cambios morfológicos del terreno en el deslizamiento entre el 2011 - 2023, obtenidas con los modelos ALOS PALSAR (2011) y el modelo generado por imágenes de dron (2023). Las áreas rojas indican pérdida de material, mientras que las azules, incremento. Los perfiles A y B, en la parte inferior, ilustran estos cambios.

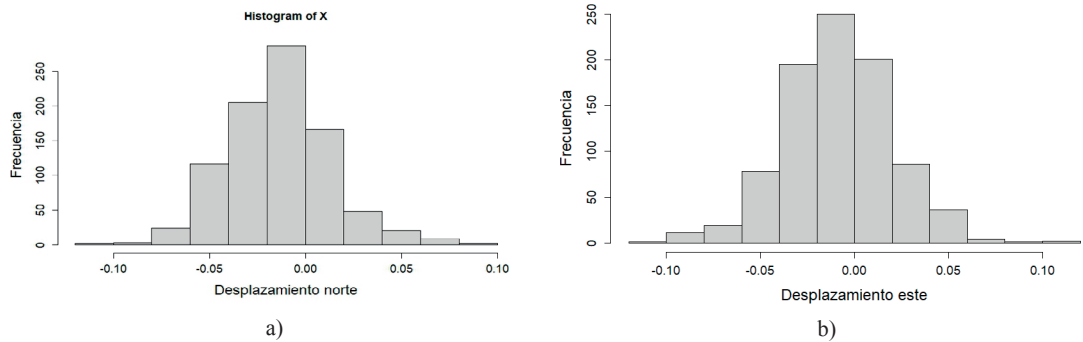


Figura 7. Análisis de desviación estándar. Distribución de las componentes de desplazamiento norte (a) y este (b) para el área estable (en metros).

La precisión de los desplazamientos obtenidos con el algoritmo M3C2 se determinó mediante el cálculo de la incertidumbre. En la Figura 8 se muestra la distribución de la incertidumbre y se observa que esta varía según su ubicación, en la parte alta oscila entre 0,003 y 0,06 m; en la parte media, varía entre 0,002 y 0,16 m; y en la parte baja, se sitúa entre 0,003 y 0,16 m. Estos valores reflejan la complejidad del terreno y las condiciones del terreno específicas de cada área. En la parte media, la vegetación influye en la variabilidad, mientras que en la parte baja, las alteraciones antrópicas aumentan la incertidumbre. La parte alta, con menor incertidumbre, sugiere condiciones más favorables para obtener mediciones precisas.

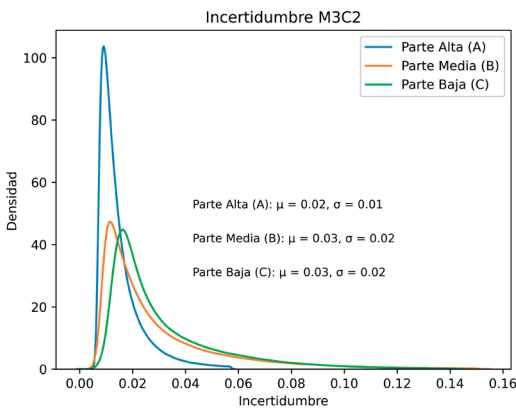


Figura 8. Distribución de la incertidumbre asociada a los desplazamientos obtenidos con el algoritmo M3C2 para diferentes secciones del deslizamiento (en metros). La incertidumbre es menor en la Parte Alta ($\mu=0,02$, $\sigma=0,01$) y aumenta ligeramente en la Parte Media y Baja ($\mu=0,03$, $\sigma=0,02$), (Figura 5)

3.3. Análisis de mecanismos externos detonantes de deslizamientos

3.3.1. Sismicidad

Se realizó el análisis de la distribución espacial y temporal de la actividad sísmica registrada desde 1986 al 2023 en un radio de 50 km por el Instituto Geofísico del Perú (<https://www.datosabiertos.gob.pe/>), visitado el 15 de marzo de 2024), con la finalidad de evaluar alguna correlación temporal y/o espacial con la ocurrencia de deslizamientos (Figura 9). De manera general se observa que la ocurrencia de sismos en dicho sector es menor en comparación con la que se registra en la zona de subducción. Se observan solamente cuatro sismos superficiales (0-60 km) con magnitudes de hasta 4,0 Mw, probablemente asociadas a la reactivación de fallas activas o a la interacción entre la base de la corteza y el manto. Los demás eventos son de mayor profundidad (>60 km) y sus magnitudes oscilan entre 4,1 a 5,6 Mw. El análisis temporal no muestra relación con la ocurrencia de los deslizamientos ocurridos.

3.3.2. Precipitación

En la Figura 10 se muestra el registro de la lluvia acumulada por mes para el periodo de agosto de 2012 a marzo de 2015, y de agosto de 2021 a diciembre de 2023. Para el primer periodo, la lluvia acumulada previo al 20 de enero de 2014 registró un total de 153,7 mm en 30 días. Estos valores superan el umbral de 100,3 mm sugerido por Damian y Huaman (2016) y de 128,7 mm según Caine, (1980), y habrían sido la causa principal del deslizamiento ocurrido en 2014. Durante el segundo

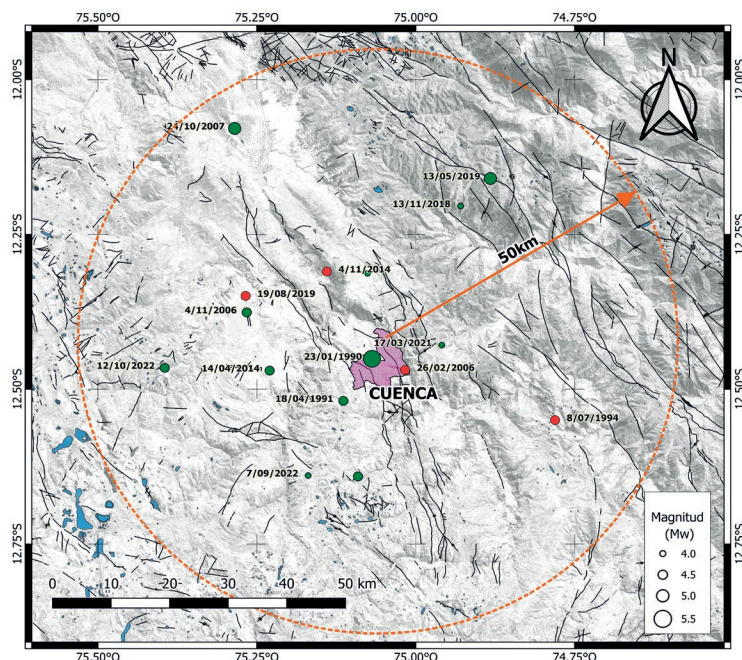


Figura 9. Distribución espacial de los sismos registrados en Cuenca para el periodo 1986-2023 en un radio de 50 km, con centro en el deslizamiento de Cuenca. Los círculos de color rojo corresponden a sismos superficiales (Prof. <60 km) y los verdes a intermedios (Prof. 60 - 350 km).

periodo, el área de estudio experimentó precipitaciones con registros de lluvias de 57,8 mm, 24,0 mm, 38,2 mm y 76,8 mm acumulados. A pesar que en febrero de 2023 se alcanzó un valor acumulado de 135,5 mm, (88% del total de lluvia

acumulada respecto al de 2014) no se generó un deslizamiento de magnitud similar al de 2014.

La evaluación de ambos mecanismos permite confirmar que en enero de 2014, el deslizamiento fue causado por la infiltración de agua de lluvia

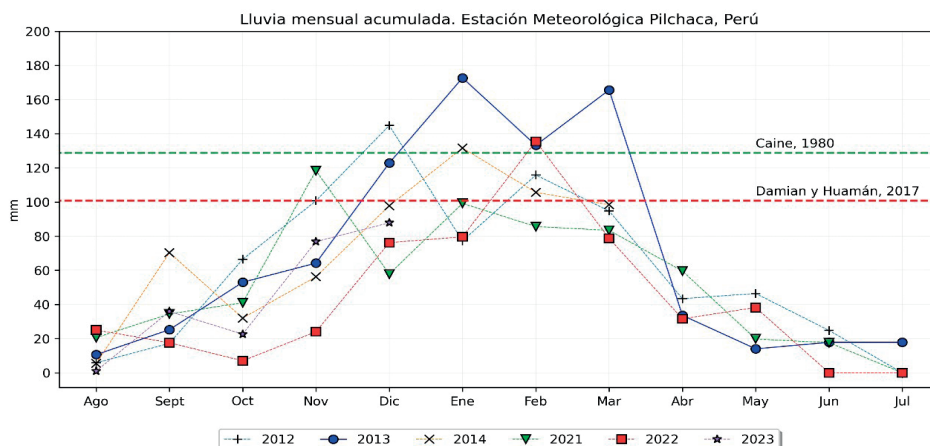


Figura 10. Lluvia acumulada por mes registrada en la estación meteorológica Pilchaca (Huancavelica), a 6 km al noreste de la zona de deslizamiento. Datos obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI (<https://www.senamhi.gob.pe>, visitada el 12 de marzo de 2024). La línea horizontal discontinua indica umbrales de lluvia acumulada.

y no por actividad sísmica. Sin embargo, es necesario considerar parámetros importantes como la intensidad, la duración y frecuencia de lluvia como condiciones antecedentes que humedecen y desestabilizan el terreno una vez el umbral es superado. Por otro lado, las precipitaciones sugieren acción erosiva superficial, recargando puntos de afloramiento en la parte alta y sobre el escarpe, además de cambios en las dimensiones en las cárcavas, como las halladas por técnicas de nube de puntos.

4. Discusión

Los resultados obtenidos mediante la comparación de las nubes de puntos densas y ortomosaicos revelan un proceso dinámico de la superficie en el deslizamiento de cuenca. La pérdida de material, evidenciada por desplazamientos negativos en las zonas de cárcavas (Figura 5), destaca la acción erosiva del agua sobre un terreno frágil. Los canales erosivos desarrollados de hasta 0,5 m de ancho y 1 m profundidad, sugieren una rápida respuesta del paisaje a los procesos hidrológicos (Smith y Vericat, 2015). Los desplazamientos horizontales hacia el sureste (Figura 3), perpendicular a las cárcavas, indicarían un ensanchamiento de estas. La erosión pluvial actúa como un agente principal en la evolución y expansión de las cárcavas (Dietrich et al., 2003) y su ensanchamiento puede indicar una intensificación gradual del deslizamiento y desestabilización de la pendiente (Yang y Mei, 2021; Kang et al., 2019).

Sorprendentemente, en las zonas próximas a las cárcavas se identificaron valores positivos de desplazamiento (Figura 5), lo que podría interpretarse como material *in situ* que no fue transportado en dirección al río o posiblemente la acumulación de detritos debido a la rugosidad del terreno. Este fenómeno podría estar relacionado con procesos de acumulación influenciados por las condiciones del tipo de suelo y la pendiente o la obstrucción del flujo de detritos, lo que requiere una exploración más detallada en futuros estudios (Iverson, 2012). Ambos métodos de correlación muestran un buen acuerdo, validando la consistencia de los resultados para este sector.

Las áreas con vegetación presentaron variabilidad en los patrones de desplazamiento, reflejando el ciclo de vida de la vegetación con zonas de

crecimiento y secado. Los valores negativos sugieren un declive en la masa vegetal, mientras que los positivos un crecimiento. Estos resultados coinciden con investigaciones previas sobre la influencia de la cobertura vegetal en la morfodinámica de deslizamientos (Greenway, 1987; Greenwood et al., 2004). Un elemento morfológico de interés es un montículo irregular localizado en la zona de acumulación del deslizamiento el cual presenta un desplazamiento horizontal de 4 cm por el método de ortomosaicos y de 7 cm por la nube de puntos. La calidad de los datos en este sector fue baja debido a cambios significativos, donde la vegetación (árboles de eucalipto, arbustos) fue cubierta por material deslizado. Este montículo podría estar funcionando como una barrera física, modulando el desplazamiento descendente de material.

Además, se detectaron alteraciones antrópicas en la zona de la banqueta (cerca de la vía férrea y el río). La literatura sugiere que las intervenciones humanas pueden tanto exacerbar como mitigar los riesgos geológicos (Froude y Petley, 2018; Sassa et al., 2020). Ambas técnicas presentan una buena correlación en general, sin embargo, se ha encontrado discrepancias en la zona comprendida entre las cotas 3000 a 3050 m, donde los desplazamientos por nube de puntos presentan una mayor magnitud (5 cm a 7 cm) respecto a los obtenidos por ortomosaicos (2,5 cm a 7 cm). Esto puede estar asociado a la mayor densidad de puntos y precisión en la detección de cambios importantes en la nube de puntos, así como a posibles errores en la resolución de los ortomosaicos en áreas con alta variabilidad topográfica.

El análisis del cambio volumétrico utilizando modelos de elevación de ALOS PALSAR durante un periodo de doce años y la fotogrametría en un periodo de seis meses permite una comparación entre diferentes escalas temporales de monitoreo. El primer periodo presenta una tendencia de disminución en el volumen desplazado, el cual está influenciado por factores climáticos, geológicos y antropogénicos a largo plazo. Mientras que el segundo periodo de análisis de los últimos seis meses del 2023 reveló una adición de material de 31 965,0 m³ y una remoción de 30 193,0 m³; para este cálculo se consideró un filtro de vegetación para minimizar su efecto. La asimetría en los volúmenes de material añadido y removido refleja

procesos activos y posiblemente asincrónicos de aporte y erosión en el deslizamiento.

5. Conclusiones

Las técnicas de nube de puntos y ortomosaicos permiten caracterizar la dinámica del deslizamiento de Cuenca con una buena correlación, indicando la pérdida de material en el sector de cárcavas y sugiriendo una intensificación gradual del deslizamiento asociado a las precipitaciones. Aunque existen variaciones menores entre los resultados de ambas técnicas, la incertidumbre es mínima y ambas presentan una consistencia adecuada. Los desplazamientos reportados no representan un riesgo inmediato; sin embargo, el monitoreo continuo es crucial para detectar cualquier posible intensificación de la actividad.

Las técnicas de nube de puntos y ortomosaicos se correlacionan parcialmente con las mediciones GPS. Si bien se observa similitud en la magnitud de los desplazamientos, ambas técnicas presentan variaciones en la dirección de desplazamiento horizontal en los puntos CU15 y CU17, las cuales estarían asociadas a errores sistemáticos o limitaciones específicas en cada metodología. Para mejorar la correlación, se recomienda mejorar la calidad de las imágenes en ortomosaicos, ajustar los algoritmos de la nube de puntos y densificar la red de monitoreo GPS sobre el deslizamiento para una comparación más precisa.

Las metodologías de nube de puntos y ortomosaicos ofrecen ventajas importantes en comparación con otras técnicas geodésicas como el GPS. Entre estas ventajas se incluyen una alta resolución espacial y la capacidad de cubrir grandes áreas de manera rápida y accesible. Sin embargo, presentan desafíos significativos, como la susceptibilidad a las condiciones ambientales, la necesidad de una correlación precisa de las imágenes y la logística necesaria para la adquisición de las mismas. Además, el procesamiento de datos exige conocimientos técnicos especializados y puede ser costoso. A pesar de estos retos, ambas técnicas siguen siendo herramientas valiosas para el monitoreo y la gestión de riesgos geológicos, destacándose la importancia de su uso complementario.

La zona con peligro potencial de deslizamiento corresponde a la zona de cárcavas, donde se han

reportado los desplazamientos más significativos del terreno (10 cm), influenciados por la acción erosiva del agua y precipitaciones entre 38,2 y 76,8 mm. Asimismo, se reporta un ensanchamiento de cárcavas que puede estar asociado con la intensificación gradual del deslizamiento.

Finalmente, los resultados obtenidos evidencian la complementariedad con otras técnicas de teledetección para el estudio de la dinámica de los deslizamientos en los Andes del Perú

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) por el financiamiento para la elaboración del presente estudio de investigación como parte del Convenio 048-2021 con el Instituto Geofísico del Perú.

Referencias

- Algorithms used in Photoscan. 2011. Agisoft. Recuperado 15 de abril de 2024, de <https://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=89.0>
- Arroyo-Solórzano, M., Quesada-Román A., Barrantes-Castillo. 2022. Seismic and geomorphic assessment for coseismic landslides zonation in tropical volcanic contexts. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, Springer; *International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, 114(3), pages 2811-2837, December. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05492-8>
- Benz, U. C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., Heynen, M. 2004. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(3), 239-258. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2003.10.002>
- Berthier, E., Vadon, H., Baratoux, D., Arnaud, Y., Vincent, C., Feigl, K., Rémy, F., Legrésy, B. 2005. Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery. *Remote Sensing of Environment*, 95(1), 14-28. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.005>
- Beyer, R. A., Alexandrov, O., McMichael, S. 2018. The Ames Stereo Pipeline: NASA's Open Source Software for Deriving and Processing Terrain Data. *Earth and Space Science*, 5(9), 537-548. <https://doi.org/10.1029/2018ea000409>

- Caine, N. 1980. The rainfall intensity - duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 62(1–2), 23–27. <https://doi.org/10.1080/04353676.1980.11879996>.
- Carrión-Mero, P., Montalván-Burbano, N., Morante-Carballo, F., Quesada-Román, A., Apolo-Masache, B. 2021. Worldwide Research Trends in Landslide Science. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 9445. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189445>
- Damian, R., Huaman, H. 2016. *Estimación de umbrales de precipitación, para un sistema de alerta temprana en deslizamiento de laderas, en el distrito de Cuenca, provincia y región de Huancavelica*. Universidad Nacional de Huancavelica.
- Delacourt, C., Allemand, P., Casson, B., Vadon, H. 2004. Velocity field of the “La Clapière” landslide measured by the correlation of aerial and QuickBird satellite images. *Geophysical Research Letters*, 31(15). <https://doi.org/10.1029/2004gl020193>
- Dietrich, W.E., Bellugi, D.G., Sklar, L.S., Stock, J.D., Heimsath, A.M. and Roering, J.J. 2003. In: *Geomorphic transport laws for predicting landscape form and dynamics*. American Geophysical Union, Washington D.C., 135, 2. <https://doi.org/10.1029/135GM09>.
- DiFrancesco, P.M., Bonneau, D., Hutchinson, D.J., 2020. The Implications of M3C2 Projection Diameter on 3D Semi-Automated Rockfall Extraction from Sequential Terrestrial Laser Scanning Point Clouds. *Remote Sensing*, 12, 1885. <https://doi.org/10.3390/rs12111885>
- Froude, M.J., Petley, D. 2018 Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- Gao, B.C., 1996. NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gili, J.A., Corominas, J., Rius, J. 2000. Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. *Engineering Geology*, 55(3), 167–192. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00127-1)
- Gojic, Z Schmid, L Wieser, A. 2021. Dense 3D displacement vector fields for point cloud-based landslide monitoring. *Landslides*. 18, 3821–3832. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01761-y>
- Granados-Bolaños, S., Quesada-Román A., Alvarado GE. 2020. Low-cost UAV applications in dynamics tropical volcanic landforms. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 410, 107143. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107143>
- Greenway, D.R. 1987. Vegetation and slope stability. In M.G. Anderson K.S. Richards (Eds.), *Slope Stability* (pp. 187–230). New York: Wiley.
- Greenwood, J.R., Norris, J.E., Wint, J. 2004. Assessing the contribution of vegetation to slope stability. *Geotechnical Engineering*, 157, GE4, 199–208. <https://doi.org/10.1680/geng.2004.157.4.199>
- Herring, T.A., King, R.W. McClusky, S.C. 2010 GAMIT Reference Manual, GPS Analysis at MIT, Release 10.4. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusset Institute of Technology, Cambridge, USA.
- Hofmann et al. 1997. *GPS:Theory and Practice*. 4th revised ed., Springer Wien New York 389p.
- Huang, G., Du, S., Wang, D. 2023. GNSS techniques for real-time monitoring of landslides: a review. *Satellite Navigation*, 4(1). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1186/s43020-023-00095-5>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (INGEMMET), 2014. *Inspección Técnica Geológica en el Centro Poblado de Cuenca, Región Huancavelica, provincia de Huancavelica y distrito de Cuenca*. LIMA: INGEMMET, Informe Técnico A6645, 31p.
- Iverson, R.M. 2012. Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches. *Journal of Geophysical Research*, 117(F3), F03006. <https://doi.org/10.1029/2011jf002189>
- Kang, Y., Lu, Z., Zhao, C., Zhang, Q., Kim, J., Niu, Y. 2019. Diagnosis of Xinmo (China) Landslide Based on Interferometric Synthetic Aperture Radar Observation and Modeling. *Remote Sensing*, 11(16), 1846. <https://doi.org/10.3390/rs11161846>
- Kariminejad, N., Jafari, M., Domazetović, F., Quesada-Román, A. 2024: An Overview of the Importance of DEM Resolution in Soil Erosion Assessment, *Papers in Applied Geography*, <https://doi.org/10.1080/23754931.2024.2341165>
- Kumar, V., Jamir, I., Sundriyal, Y., Havenith, H.B., Gupta, V., Melo, R., Chauhan, N., Gupta, S.K., Rana, N. 2022. Landslide scaling relationship and its seismic-climatic implications, Himalaya, *10th International Conference on Geomorphology*, Coimbra, Portugal, 12–16 Sep 2022, ICG2022-1. <https://doi.org/10.5194/icg2022-1>

- Lacroix, P., Berthier, E., Maquerhua, E. T. 2015. Earthquake-driven acceleration of slow-moving landslides in the Colca valley, Peru, detected from Pléiades images. *Remote Sensing of Environment*, 165, 148-158. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.010>
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J. 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 82, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>
- Leick, A., Li, J., Beser, J., Mader, J. 1995. Processing GLONASS carrier phase observations - theory and first experience -, Proc. ION GPS-95, Palm Springs, pp. 1041-1047.
- Li, B., Jiang, W., Li, Y., Luo, Y., Qian, H., Wang, Y., Jiao, Q., Zhang, Q., Zhou, Z., Zhang, J. 2021. Monitoring and analysis of Woda landslide stability (China) combined with InSAR, GNSS and meteorological data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/nhess-2021-101>
- Li, Y. 2021. Analysis of GAMIT/GLOBK in high-precision GNSS data processing for crustal deformation. *Earthquake Research Advances*, 1(3), 100028. <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2021.100028>
- Millán-Arancibia, C., Lavado-Casimiro, W. 2023. Rainfall thresholds estimation for shallow landslides in Peru from gridded daily data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(3), 1191–1206. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1191-2023>
- Nikolakopoulos, K.G., Kyriou, A., Koukouvelas, I.K., Tomaras, N., Lyros, E. 2023. UAV, GNSS, and InSAR Data Analyses for Landslide Monitoring in a Mountainous Village in Western Greece. *Remote Sensing*, 15, 2870. <https://doi.org/10.3390/rs15112870>
- Nuth, C., Kääb, A. 2011. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*, 5(1), 271-290. <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>
- Petley, D. 2012. Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40(10), 927–930. <https://doi.org/10.1130/G33217.1>
- Pohl, C., Van Genderen, J.L. 1998. Review article multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 19(5), 823-854. <https://doi.org/10.1080/014311698215748>
- Quispesivana, L., Navarro, P. 2003. Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Guadalupe(28-l), Huancapi (28-ñ), Chincheros (28-o), Castrovirreyana (27-m), San Miguel (27-o), Tupe (26-l), Conaica (26-m), Huarochirí (25-k), Yauyos (25-l) y Huancayo (25-m), Escala 1:100,000 - (Boletín: Serie A Carta Geológica) INGEMMET, Lima, Perú.
- Sassa, K., Mikoš, M., Sassa, S., Bobrowsky, P.T., Takara, K., Dang, K. 2020. Understanding and reducing landslide disaster risk: volume 1 *Sendai landslide partnerships and Kyoto Landslide Commitment, part III landslide-induced tsunamis*. Springer Nature. pp 295-412. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-60196-6>
- Shean, D.E., Alexandrov, O., Moratto, Z.M., Smith, B.E., Joughin, I.R., Porter, C., Morin, P. 2016. An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very-high-resolution commercial stereo satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 116, 101-117. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012>
- Smith, M.W., Vericat, D. 2015 From Experimental Plots to Experimental Landscapes: Topography, Erosion and Deposition in Sub-Humid Badlands from Structure-from-Motion Photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 1656-1671. <https://doi.org/10.1002/esp.3747>
- Villegas-Lanza, J.C., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire-Chira Nocquet, J.M. 2016. Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. *Journal of Geophysical Research*, 121, <https://doi.org/10.1002/2016JB013080>
- Vivanco, S., Gómez, J. 2016. Caracterización Geológica-Geotécnica y Monitoreo Geodésico (DEM) del deslizamiento rotacional en el centro Poblado de Cuenca, Distrito de Cuenca, Provincia Huancavelica, región Huancavelica. *INGEMMET. Congreso Peruano de Geología*, 18, Resúmenes, 2016, Perú. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG18-168.pdf>
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Yang, Y., Mei, G. 2021. Deep Transfer Learning Approach for Identifying Slope Surface Cracks. *Applied Sciences*, 11(23), 11193. <https://doi.org/10.3390/app112311193>

- Zárate-Torres, B.A., El Hamdouni, R., Fernández-del Castillo, T. 2021. GNSS and RPAS integration techniques for studying landslide dynamics: Application to the areas of Victoria and Colinas Lojanas, (Loja, Ecuador). *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2021, 1-36. <https://doi.org/10.5194/nhess-2021-32>
- Zhou, J., Jiang, N., Li, C., Li, H. 2024. A landslide monitoring method using data from unmanned aerial vehicle and terrestrial laser scanning with insufficient and inaccurate ground control points, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.12.004>
- Zubiate, M., Madera, F. 2014. *Inspección técnica geológico en el centro poblado de Cuenca: Región Huancavelica, provincia Huancavelica y distrito Cuenca* (Informe técnico A6645). INGEMMET, Lima, Perú.