



APORTES DE LA TELEDETECCIÓN EN LA GESTIÓN DE RIESGO DE DESASTRE: DETECCIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA EN EL VALLE DEL COLCA – AREQUIPA, SERIES TEMPORALES DE 40 AÑOS

Gael Araujo^{1,2}, Pascal Lacroix², Swann Zerathe² & Lionel Fidel¹

¹ Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - INGEMMET, Lima, Perú, ² Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, ISTERRE, Grenoble, France.

Resumen: La ocurrencia de movimientos en masa provocó parte de las pérdidas económicas y humanas más catastróficas del Perú. La teledetección ha demostrado su capacidad para detectar y caracterizar movimientos en masa en un área amplia, en particular mediante el uso de algoritmos de detección de cambios para la identificación de movimientos rápidos. Por lo tanto, la detección de movimientos en masa se convirtió en una herramienta importante para contribuir a la gestión del riesgo de desastres a escala nacional.

No existen técnicas comunes para detectar movimientos de diferente velocidad simultáneamente. En este estudio enfocamos nuestra atención en la detección de movimientos en masa de velocidad rápida y lenta a través de series temporales de 40 años, como resultado de la generación de Modelos de Elevación Digital (DEM) en el valle del Colca - Sur de Perú.

Abstract: The occurrence of landslides in mountainous areas of Peru provoked part of the worst catastrophic economic and human losses in the country. Remote sensing has proven its ability to detect and characterize landslides over a wide area, in particular using change detection algorithms for rapid landslide detection or correlation of optical images for slow-moving landslides detection. Thus detection of landslides became an important tool to contribute to the disaster risk management at the country scale.

No common techniques exist to detect both phenomena simultaneously. In this study we focus our attention on the detection and

characterization of rapid and slow landslides based on time-series of Digital Elevation Models (DEM) in southern Peru.

Palabras Clave: Teledetección, Movimientos en Masa, Gestión de Riesgo de Desastre

Keywords: Remote Sensing, Landslides, Disaster Risk Management

1. Introducción

El origen y reactivación de movimientos en masa sobre los Andes peruanos montañosos, tectónicos y volcánicos, combinados con sus efectos de erosión, causaron parte de los peores escenarios de desastres naturales con pérdida de infraestructura, vidas humanas y centros arqueológicos importantes. Dos de los eventos históricos más representativos son la avalancha de rocas y el flujo de hielo del Nevado Huascarán – Yungay en 1970 con 6000 víctimas (Evans et al., 2007), el flujo de detritos en Chavín de Huantar – Ancash en 1945 más de 500 víctimas (Valderrama Murillo & Fidel Smoll, 2008), Inundaciones, deslizamientos y caída de rocas en el fenómeno ‘El Niño Costero’ en 2017 con 162 personas fallecidas, 500 heridas y 19 desaparecidas a nivel nacional (INDECI, 2017). Desde el año 2000, el INGEMMET ha inventariado insitu más de 35000 peligros geológicos a nivel nacional.

La teledetección es una herramienta única para la detección y caracterización de movimientos en masa. Los estudios anteriores sobre la detección de movimientos en masa se llevaron a cabo de manera diferente para movimientos en masa de movimiento lento (<100 m / año) que para

movimientos en masa rápidos (\sim m / min). La identificación de movimientos en masa lentos – horizontales se limita al uso de imágenes ópticas y lo movimiento rápidos – verticales al uso de imágenes de radar. Sin embargo, la técnica de detección de cambios de imágenes ópticas sucesivas ha comprobado su efectividad para detectar movimientos lentos (por ejemplo, Guzzetti et al., 2012) y rápidos (por ejemplo, Lacroix et al., 2013). La comparación de DEM sucesivos ha mostrado la posibilidad de detectar fenómenos rápidos y lentos. De hecho, el monitoreo de la masa glaciaria se lleva a cabo de manera regular utilizando series de tiempo de DEM satelitales (p. Ej., Berthier et al. 2007; Brun et al. 2017).

- Caracterización del área de estudio:

El valle del Colca es uno de los atractivos turísticos más importantes del Perú (Zavala B., 2012) y uno de los más incisivos del mundo, está ubicado en el sur del Perú (Arequipa), con orientación NW-SE y altitudes que oscilan entre 1500 y 6050 msnm. Geológicamente el área de estudio fue cubierto por sedimentos lacustres y flujos volcánicos producto del represamiento del valle del Colca debido al colapso del flanco norte del volcán Hualca Hualca entre 1.36 y 0.61 Myr (Thouret, et al.2007; Marino et al.2010). Los sedimentos aluviales y lacustres pobremente consolidados que llenan el valle del Colca, conducen a una ocurrencia permanente de movimientos en masa (Zavala et al., 2013) (figura 1), con grandes eventos de movimiento desencadenados durante la temporada de lluvias entre diciembre y marzo (Lacroix et al., 2015).

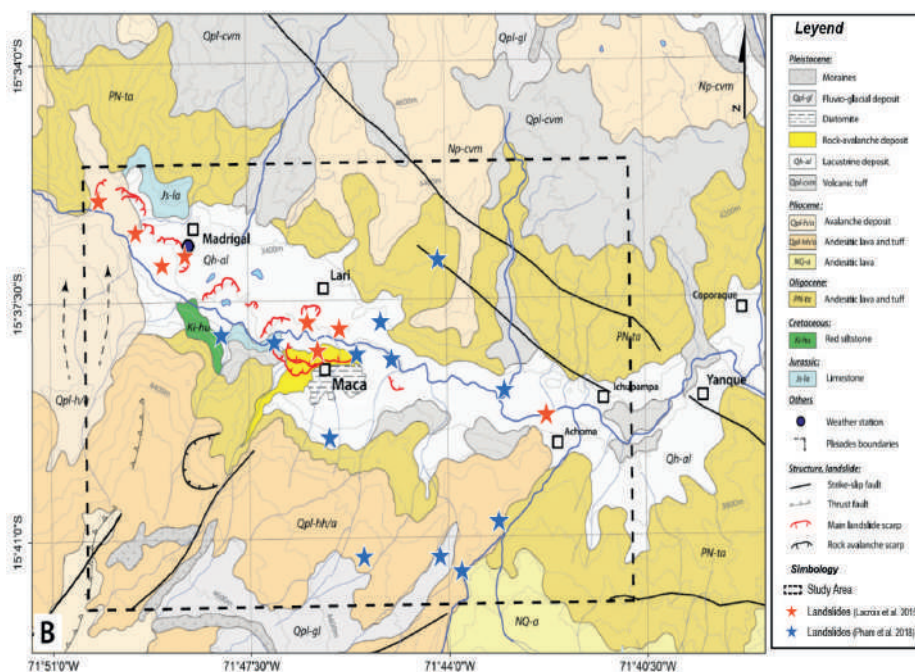


Figura 1: Geología del Valle del Colca

- Datos y Metodología

Datos:

En este estudio se utilizaron 8 imágenes estereo, 1 procedente del satélite KH9 adquirido el 29 de mayo de 1978 y 7 imágenes de las Pléyades pancromáticas estereo ópticas adquiridas entre el 15 de marzo de 2013 y el 13 de mayo de 2017, sobre un área común de 210 km² a lo largo del valle del Colca.

La reconstrucción de DEM a través de los satélites KH9 y Pléyades se utilizó para generar series temporales de 40 años y poder detectar y estimar el volumen de deslizamientos, siguiendo la

metodología de estudios glaciares (p. Ej., Berthier et al. 2014; Narama et al. 2010; Pieczonka et al. 2013) y con fines de cambios geomorfológicos - geodinámicos (p. Ej., Stumpf et al., 2014; Lacroix et al., 2015, Lacroix 2016).

Metodología:

Sobre la base de las imágenes ópticas estereoscópicas, se calcularon 8 DEM, con el software de código abierto de la NASA Ames Stereo Pipeline (ASP) (Shean et al., 2016). 7 DEM se derivaron de adquisiciones de imágenes de Pléyades con una resolución de 2 m y un DEM de 1978 utilizando el satélite KH9 fue calculado por A. Dehecq (JPL) a 24 m de resolución.

En este estudio se realiza la (1) Generación de DEMs, (2) Corrección de DEMs, (3) detección de movimientos en masa y (4) Fotointerpretación de Orto-fotos generadas.

- Resultados

1. Validación de DEMs: La validación de DEMs se da a través de la estimación de errores o cálculo de la desviación estándar. Las incertidumbres estimadas de cada DEM mediante el cálculo de la desviación estándar muestran valores entre 0,58 m y 0,81 m para los DEM Pléiades y 3,26 m para el DEM KH-9 1978 (Tabla 1). Las incertidumbres de los DEM de Pléiades son similares a las obtenidas en estudios anteriores de movimientos en masa y glaciares mediante el uso de estéreo-pares de Pléiades (Berthier et al. 2014; Lacroix et al. 2015).
2. El uso de 7 DEMs de diferenciación generados a través de imágenes ópticas de satélite entre el 29/05/1978 y el 13/05/2017 (ver sección 3.3.1), me permitió detectar 55 movimientos en masa a lo largo del Valle del Colca, con valores de desplazamientos verticales que van desde -65. m a 65 m (figura 2). De los 55 movimientos detectados, 35 son movimientos lentos y 20 son movimientos rápidos.
3. La zona más activa del área de estudio muestra la relación de desplazamiento entre los deslizamientos de Lari (L5) y Maca (L1), además de la influencia que su movimiento causó en el cambio geomorfológico del cauce del río Colca (Figura 3A). Cambios geomorfológicos causados por el avance de la masa desplazada a ambos flancos del valle en 40 años de evolución, además de reactivaciones en la parte baja del deslizamiento en el 2017 (Figura 3B).

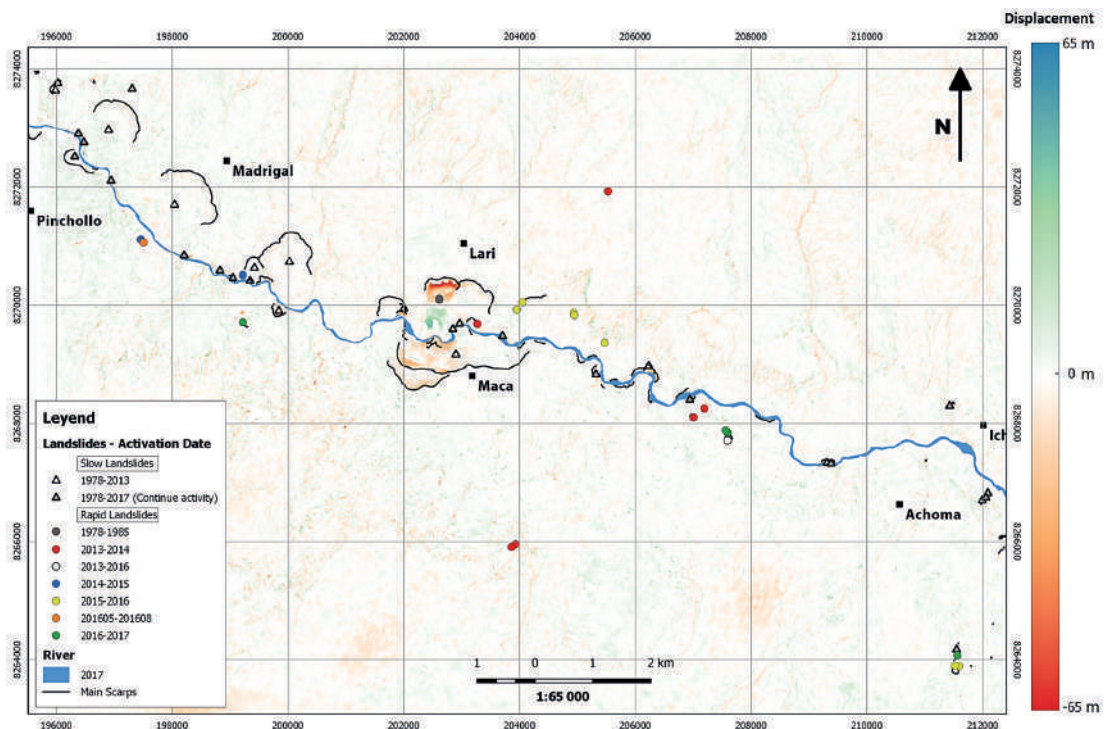


Figura 2: Mapa de desplazamientos y movimientos en masa detectados entre 1978 y 2017

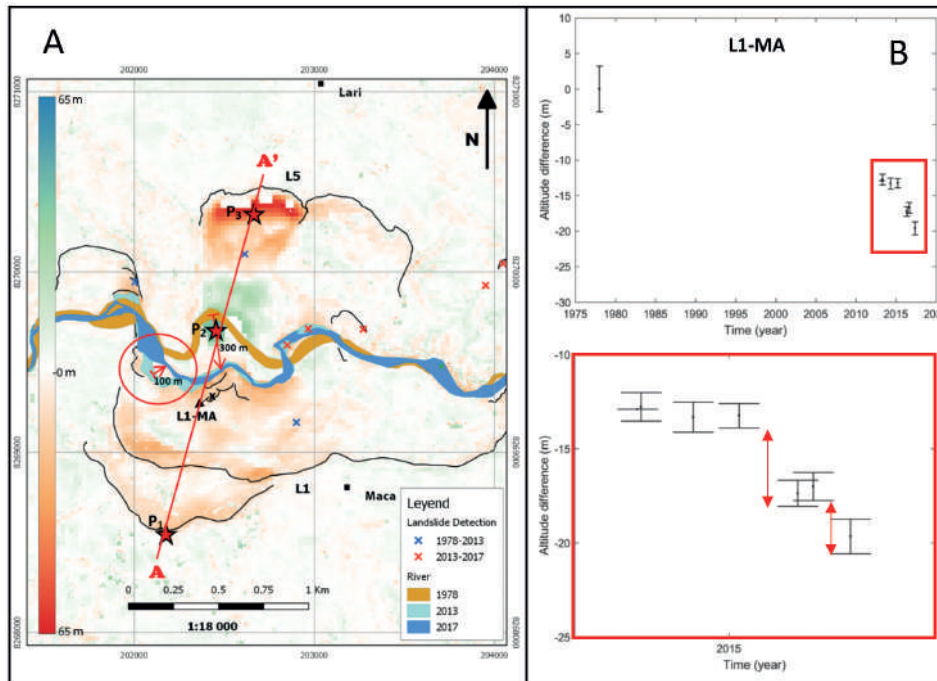


Figura 3: 3A. Zonas más activa del área de estudio. 3B. Series temporales de L1-MA

2. Discusión

Los 55 movimientos en masa lentos y rápidos detectados por desplazamientos verticales a través de técnicas de diferenciación DEMs están más que duplicando el número de movimientos en masa detectados en estudios previos utilizando campo de desplazamiento horizontal, a través de sensores remotos durante 28 años de evolución (p. Ej., Lacroix, et al. 2015; Bontemps et al. 2018, Pham et al. 2018). Esto resalta los beneficios de la serie temporal de análisis de movimiento vertical, así como el mayor tiempo de análisis evaluado en este estudio (40 años) junto con un análisis de ventana de tiempo corto entre 2013 y 2017 que permite la detección de movimientos rápidos a lo largo del Valle del Colca.

3. Conclusiones

El campo de desplazamiento vertical calculado a partir de la diferenciación de DEM, permitió detectar 55 deslizamientos de tierra entre 1978 y 2017: 35 deslizamientos rápidos y 20 deslizamientos lentos identificados por su comportamiento gradual y su identificación de las series temporales. El 85% de ellos se distribuyen a lo largo del Valle del Colca y el 15% de ellos a

más de 3 km de los límites del Valle del Colca.

4. Contribuciones técnicas y científicas

La técnica de sensores remotos 'Diferencia de DEMs' fue aplicada por primera vez para detección de movimientos lentos y rápidos. La buena resolución de los DEMs generados (2m) permite identificar valores de desplazamiento temporal con un error bajo. Esta técnica contribuye con la gestión de riesgo de desastre por que permitirá detectar, monitorear y predecir futuros movimientos en masa a escala amplia.

5. Referencias bibliográficas

- Berthier, E., Y. Arnaud, R. Kumar, S. Ahmad, P. Wagnon, and P. Chevallier. 2007. 'Remote Sensing Estimates of Glacier Mass Balances in the Himachal Pradesh (Western Himalaya, India)'. *Remote Sensing of Environment* 108(3):327–38.
- Bilberto Zavala and Lucille Tatard. 2012. 'Evaluación de la seguridad física del distrito de Maca - AREQUIPA'. *Technical Report* A6628:
- Bontemps, Noélie, Pascal Lacroix, and Marie-Pierre Doin. 2018. 'Inversion of Deformation Fields Time-Series from Optical Images, and Application to the Long Term Kinematics of Slow-Moving Landslides in Peru'. *Remote Sensing of Environment* 210:144–58.

- Brun, Fanny, Etienne Berthier, Patrick Wagnon, Andreas Kääh, and Désirée Treichler. 2017. 'A Spatially Resolved Estimate of High Mountain Asia Glacier Mass Balances from 2000 to 2016'. *Nature Geoscience* 10(9):668–73.
- Evans Stephen G., Lionel Fídel Smoll, Juan Zegarra Loo. Los movimientos en masa de 1962 y 1970 en el Nevado de Huascarán, Valle del río Santa, Cordillera Blanca, Peru. Movimientos en Masa en la Región Andina. 386 - 404
- Guzzetti, Fausto, Alessandro Cesare Mondini, Mauro Cardinali, Federica Fiorucci, Michele Santangelo, and Kang-Tsung Chang. 2012. 'Landslide Inventory Maps: New Tools for an Old Problem'. *Earth-Science Reviews* 112(1–2):42–66.
- Lacroix, Pascal. 2016. 'Landslides Triggered by the Gorkha Earthquake in the Langtang Valley, Volumes and Initiation Processes'. *Earth, Planets and Space* 68(1):46.
- Lacroix, Pascal, Etienne Berthier, and Edu Taipe Maquerhua. 2015. 'Earthquake-Driven Acceleration of Slow-Moving Landslides in the Colca Valley, Peru, Detected from Pléiades Images'. *Remote Sensing of Environment* 165:148–58.
- Pieczonka, Tino, Tobias Bolch, Wei Junfeng, and Liu Shiyin. 2013. 'Heterogeneous Mass Loss of Glaciers in the Aksu-Tarim Catchment (Central Tien Shan) Revealed by 1976 KH-9 Hexagon and 2009 SPOT-5 Stereo Imagery'. *Remote Sensing of Environment* 130:233–44.
- Valderrama, Patricio & Lionel Fidel, 2008. Origen y dinámica del aluvión de 1945 en el complejo arqueológico de Chavín de Huantar. Sociedad Geológica del Perú.4p