

# MONITOREO GPS Y SATELITAL DEL DESLIZAMIENTO DE MACA (COLCA)

Pascal Lacroix<sup>1</sup>, Edu Taipe<sup>2</sup>, Swann Zerathe<sup>1</sup>, E. Berthier<sup>3</sup>, Bertrand Guillier<sup>1</sup>, Lionel Fidel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ISTerre/IRD, Av. de la piscine, Grenoble  
<sup>2</sup> INGEMMET, Av. Canadá, San Borja, Lima  
<sup>3</sup> Legos, av. Edouard Belin, Toulouse

## RESUMEN

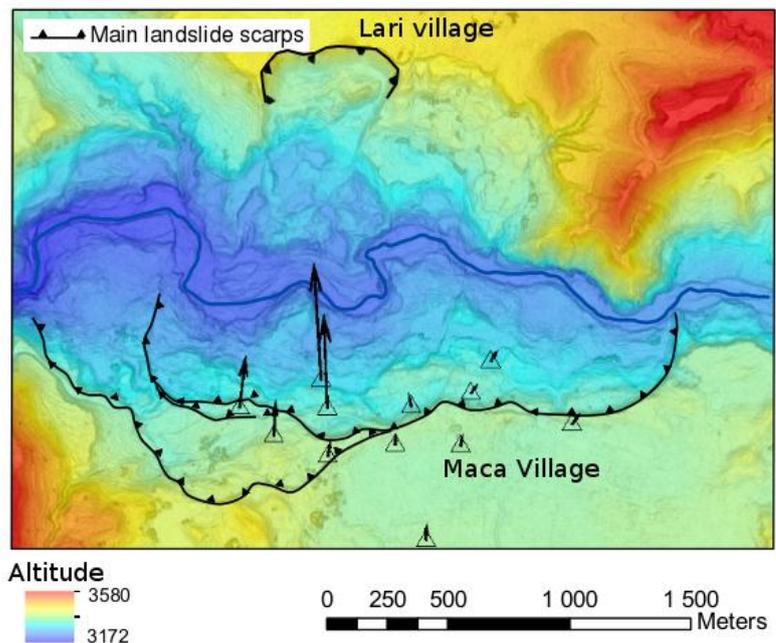
El deslizamiento de Maca, ubicado al orillas del río Colca en la región Arequipa, afecta directamente a un pueblo de 800 habitantes, a la carretera usada por el turismo (160 000 visitantes en 2009), y a los andenes pre-incaicos [Fidel y Zavala, 1994]. En Febrero y Julio 2013, sismos superficiales (Mw 5.4 y 5.7), con epicentros localizados a 10-15 km de la zona de estudio, destruyeron un parte del pueblo y reactivaron el movimiento. Después de los sismos de Febrero, el gobierno regional de Arequipa pidió al INGEMMET una evaluación de la seguridad física de la zona [Zavala et al., 2013], la cual concluye que el pueblo es inhabitable. Siguiendo este primer trabajo, presentamos en este estudio los resultados del monitoreo geodésico de la zona, realizados entre 2011 y 2014, con el objetivo de mejorar la caracterización del deslizamiento y de sus detonantes.

Se realizaron varias mediciones geodésicas, que comprenden: (1) 11 campañas de mediciones GPS entre noviembre 2011 y diciembre 2013, (2) la instalación de un GPS permanente en diciembre del 2012, (3) 3 adquisiciones de imágenes ópticas del satélite Pleiades. A partir de estas imágenes satelitales, se construyó un Modelo de Elevación de Terreno preciso (2 m de resolución, precisión de 70 cm). Este modelo muestra el gran impacto del río en la dinámica del deslizamiento. En particular, el análisis del modelo de elevación muestra que el movimiento tiene como origen el desvío del río Colca por el deslizamiento de Lari al frente de Maca. Usando la correlación óptica de las imágenes satelitales, se calculó el campo de velocidad de deslizamiento para la zona de Maca, este campo de velocidades, permitió delimitar con precisión la zona de deslizamiento rápido (velocidad del movimiento >50 cm/año), que cubre una superficie de 0.6 km<sup>2</sup>. Finalmente el monitoreo GPS muestra el control principal de la lluvia en el movimiento. Este monitoreo demuestra que el movimiento de Maca es una zona muy interesante para estudiar los mecanismos de deformación de los deslizamientos asociados a la lluvia y los sismos.

## INTRODUCCIÓN

El deslizamiento de Maca está ubicado en la vale del Colca a 70 km al norte de Arequipa. Es un deslizamiento antiguo, de tipo rotacional que afecta directamente al pueblo de Maca (800 habitantes), a la carretera usada por el turismo (160 000 visitantes en 2009), y a los andenes pre-incaicos [Fidel y Zavala, 1994].

El 23 Julio 1991, un sismo superficial (5.4 mb), localizado a 8 km al Sur de la zona de estudio [Antayhua et al., 2002], reactivó el deslizamiento, provocando un hundimiento de cerca de 2 m de la carretera que une Maca con Cabanaconde [Bulmer et al., 1999]. Este sismo también causó la muerte de 14 personas. El 22 y 23 Febrero 2013, sismos de



**Figura 1.** Modelo de Elevación a 2 m de resolución, conseguido con el satellite Pleiades, de la zona de Maca. Los puntos GPS están indicados con triángulos.

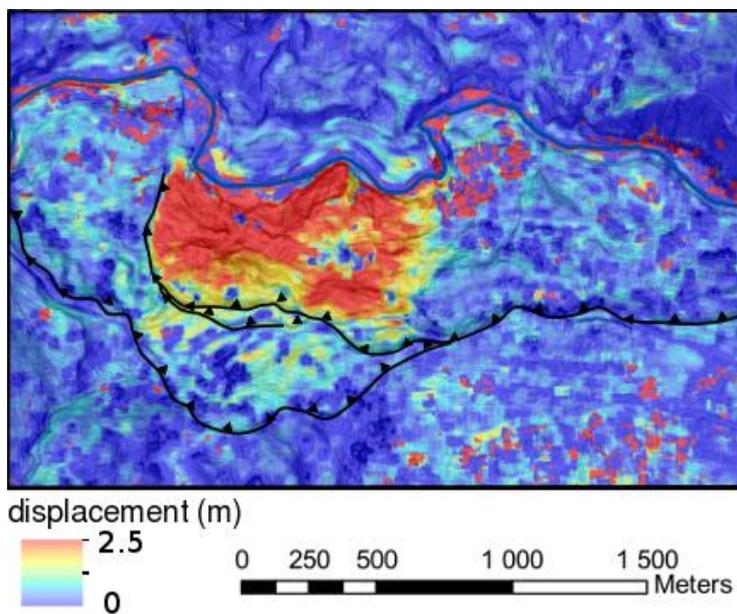
magnitud Mw5.4, localizados a 10 km al sur de Maca destruyeron de nuevo una parte del pueblo, aunque no hubo hundimiento notable en la carretera. El 17 Julio 2013, un otro sismo superficial de magnitud Mw5.7, localizado a 15 km al oeste de Maca, destruyo algunas casas y provocó la aceleración del deslizamiento. Después de los sismos de Febrero de 2013, el INGEMMET, a solicitud del gobierno regional de Arequipa, prepara un informe técnico sobre la seguridad física de la zona [Zavala et al., 2013], y en base a este documento se toma la decisión de reubicar el pueblo.

Parte de este informe se desarrolló sobre el estudio geodésico [Lacroix et al., 2012], que consistía en el monitoreo de la zona durante el periodo de octubre del 2011 a diciembre del 2012. Los resultados, muestran que el movimiento es controlado por la cantidad de lluvia, y que el movimiento 2011-2012 fue el más fuerte observado en los últimos 12 años, debido a que este periodo fue uno con alta precipitación en la región (780 mm contra 500 mm en promedio). Este estudio sugiere también que existe un umbral de lluvia para activar el movimiento. Finalmente, este estudio no pudo concluir sobre el tema de la estabilidad del pueblo debido en una serie temporal demasiado corta en comparación con la incertidumbre de las mediciones GPS. Entonces, los objetivos del presente estudios son (1) caracterizar la cinemática de toda la zona de Maca incluyendo el pueblo, (2) estudiar el origen del movimiento, (3) caracterizar los detonantes del movimiento.

Para alcanzar estos objetivos, mostramos en este estudio los resultados del monitoreo geodésico sobre 2 años y medio y de un procesamiento de imágenes satelitales Pleiades de alta resolución (70 cm).

## LOS DATOS

Entre noviembre 2011 y diciembre 2013, se realizaron 11 campañas temporales de medidas geodésicas usando GPS de doble frecuencia. Las mediciones se realizaron durante un período de 2 horas. La posición de los puntos fueron calculados con el método GAMIT/GLOBK [Herring et al., 2010] con una precisión de 5 mm en la horizontal y 1 cm en vertical. En diciembre del 2012, se instaló un GPS de doble frecuencia de manera permanente en el deslizamiento, con registro cada 15 s.



**Figura 2.** Desplazamiento (15/03/2013-29/07/2013) conseguido por correlación de imágenes Pleiades.

Finalmente, hubo adquisiciones de imágenes satelitales de alta resolución (70 cm) Pleiades en marzo, abril y julio de 2013 [Lacroix et al., 2014]. Dos de estas adquisiciones fueron realizados en modo estereo, de manera que permitieron la construcción de modelos de elevación precisos (2 m de resolución horizontal, 70 cm de resolución vertical) (Figura 1), usando el método RPC [Fraser et al., 2006]. Las imágenes fueron ortorectificadas usando el modelo de elevación. La precisión de la ortorectificación fue estimada en 20 cm. Las imágenes multi-temporales fueron procesadas con una correlación frecuencial [Leprince et al., 2007]. Esta correlación permitió conseguir un campo de velocidad para el periodo 21/03/2013-29/07/2013 sobre toda la zona, con una precisión de 30 cm [Lacroix et al., 2014], (Figura 2).

## INTERPRETACIÓN

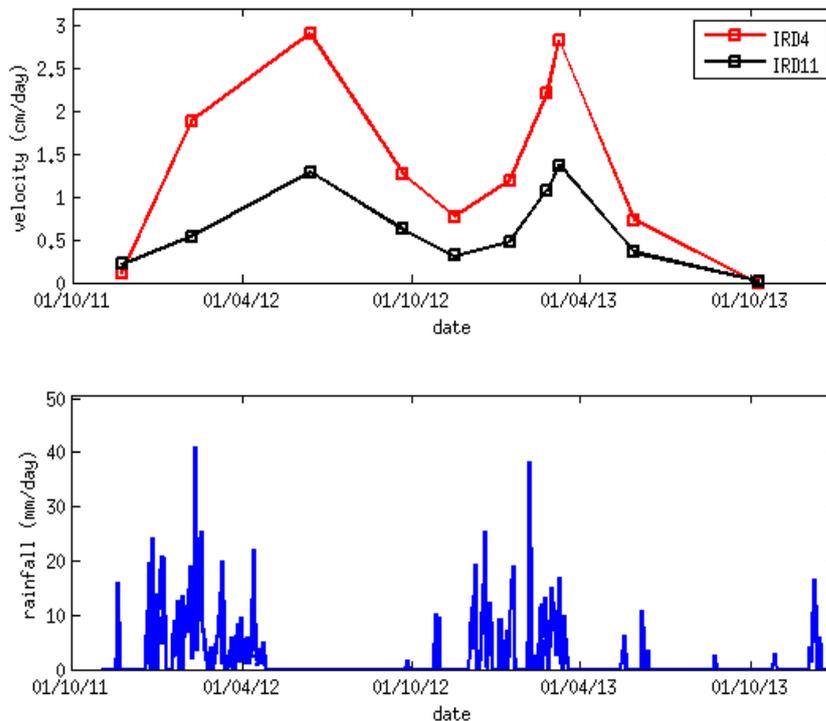
Usando el modelo de elevación, las estructuras principales de la zona (escarpes, “ridges”, etc.) fueron mapeadas. Este mapeo, pone énfasis en la complejidad del movimiento, en particular, muestra que el río Colca modela las formas de los escarpes en la parte baja del movimiento. El campo de velocidad (Figura 2) muestra un incremento de la velocidad en 4 meses de 10 cm al nivel de la carretera y de 3 m

al nivel del río. Estas dos observaciones sugiere la influencia principal del río en el desarrollo del deslizamiento.

El campo de velocidad y el modelo de elevación también muestran que frente a Maca, el movimiento de Lari es mucho menos activo, y seguramente más antiguo. En efecto, las estructuras muestran un antiguo flujo que se dividió en dos partes, desviando el río y formando los 2 meandros de la zona (Figura 1). El desplazamiento del deslizamiento de Maca es el más grande al nivel de estos meandros, debido a la erosión del río. Entonces, proponemos que el deslizamiento de Maca fue iniciado por el desvío del río Colca producto del deslizamiento de Lari.

El campo de velocidad también muestra una zona de deslizamiento más rápido (velocidades de más de 50 cm en 4 meses), bien delimitada por escarpas principales. Esta zona cubre una superficie de 0.6 km<sup>2</sup>. Las escarpas y contra-escarpas, así como los movimientos verticales de los GPS, muestran un movimiento rotacional. En la parte del pueblo, la precisión de 15 cm del campo de velocidad Pleiades es mayor que el desplazamiento, y impide medir un movimiento. Sin embargo, los 2 años de monitoreo GPS muestran movimientos de casi 4 cm en 2 años al nivel de la plaza de arma de Maca, es decir más que el error de la medida GPS (5 mm). En cambio, el punto más al Este del pueblo no se mueve y los desplazamientos calculados están dentro del margen de error del GPS. Esta observación sugiere que el pueblo está dentro del área del deslizamiento.

El monitoreo durante 2 años (Figura 3) muestra que la dinámica del deslizamiento está influenciada por la lluvia, con un ciclo anual de la velocidad vinculado con el ciclo de la lluvia. Estos 2 años de monitoreo también permiten comparar los años 2011-2012 y 2012-2013. Durante los periodos 2011-2012 y 2012-2013 se registraron precipitaciones de 780 mm y 570 mm respectivamente en la estación meteorológica de Madrigal<sup>1</sup>. En el mismo tiempo el punto de mayor deformación se movió 7 m en 2011-2012 contra 3 m en 2012-2013. Esto confirma la suposición precedente [Zavala et al., 2013] que el movimiento no es lineal con la lluvia, y que existe umbral de activación. Se nota también, que la velocidad del movimiento al final del año 2012 es más importante que al final de los otros años (2011 y 2013) de menor intensidad de lluvia. Este sugiere que el deslizamiento de Maca actúa como una reserva de agua. Un monitoreo del nivel del agua subterránea debe ser instalado en el futuro para estudiar la relación lluvia/movimiento.



**Figura 3.** Serie temporal de velocidades de 2 puntos GPS (arriba) y lluvia registrada a la estación meteorológica de Madrigal (abajo).

<sup>1</sup> <http://www.senamhi.gob.pe/>

Finalmente, el GPS permanente muestra una serie temporal muy peculiar durante el sismo de Cabanaconde (Mw5.7, 17/07/2013, d=20km). De hecho, el GPS muestra un movimiento co-sísmico de 2 cm seguido por una relajación post-sísmica de 8 cm en 6 semanas. Esto sugiere que la dinámica del deslizamiento puede ser afectada por sismos por largos tiempos, y no solamente durante el sismo como se había previsto en modelos clásicos [Newmark, 1965]. Este comportamiento es muy similar a una falla tectónica [Chlieh et al., 2004]. Entonces, estas observaciones demuestran que los deslizamientos son buenos análogos de las fallas activas sismo-tectónicas.

## CONCLUSIONES

Este estudio, siguiendo un trabajo de monitoreo de 3 años en la zona de Maca, permitió caracterizar la superficie de la zona activa de Maca, el origen del movimiento y los detonantes principales del movimiento. La zona la más activa (movimientos superior a 50 cm entre Marzo 2013 y Julio 2013) mide 0.6 km<sup>2</sup>. Esta zona es caracterizada por escarpes delimitados por el río, y sugiere que la erosión del río es el principal detonante del movimiento. Proponemos que el desvío del río por el deslizamiento de Lari, al frente de Maca, es el origen de la inestabilidad y por ende del deslizamiento de Maca.

El movimiento es temporal con una casi estabilidad en la época seca, y velocidades de al menos 3 cm por día durante la época de la lluvia. También el monitoreo confirma que existen umbral de lluvia para la activación del movimiento. Los sismos actúan como un motor secundario del movimiento. Así presentamos una de las primeras observaciones de la reactivación de un deslizamiento por un sismo. Este estudio confirma que la zona de Maca presenta un interés científico importante para el estudio del impacto de los sismos y de la lluvia sobre la dinámica de los deslizamientos.

## REFERENCIAS

1. Antayhua, Y., Tavera, H., Bernal, I., Palza, H. & Aguilar, V. (2002). Localización hipocentral y características de la fuente de los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998) región del Volcán Sabancaya (Arequipa). Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, V. 93, 63-71.0
2. Bulmer MH, Johnston A, Engle F, Salas (1999), Seismically triggered slope failures in the Colca valley, southern Peru. EOS Trans, vol H41A-07, p S127
3. Chlieh M. et al., (2004), Crustal deformation and fault slip during the seismic cycle in the North Chile subduction zone, from GPS and InSAR observations, Geoph. Journ. Int., 158 (2), 695–711.
4. Fraser CS, Dial G, Grodecki J (2006), Sensor orientation via RPCs. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60(3):182–194
5. Fidel L. y Zavala B. (1994), Estudio Geodinámico de la cuenca del río Camaná-Majes (Colca), departamento de Arequipa. Dirección de Geotecnia, INGEMMET, Bol No. 14, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica. Lima, Perú.
6. Herring T, King R, McClusky S (2010), GAMIT reference manual: GPS analysis at MIT, release 10.4
7. Lacroix P., J. Marino, E. Taipe, M. Wathelet, L. Tatar, B. Guillier, F. Bondoux, B. Zavala, P. Valderrama, L. Fidel, J.-C. Gomez, E. Norabuena (2012), Caracterización de los procesos sísmicos y gravitacional sobre el deslizamiento de Maca (Colca), Congreso de Geología Peruano, Sept 2012, Lima.
8. Lacroix P., E. Taipe, E. Berthier (2014), Validation of Pleiades products for landslide studies: Application to the Maca landslide, Peru, Pleiades Days 2014 Symp., Abril 2014, Toulouse.
9. Leprince S, Ayoub F, Klingert Y, Avouac JP (2007), Co-registration of optically sensed images and correlation (COSI-Corr): an operational methodology for ground deformation measurements. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International, IEEE, p 1943-1946,
10. Newmark NM (1965), Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique 15(2):139 159
11. Zavala B., J. Marino, P. Lacroix, E. Taipe, C. Benavente et al. (2013), Evaluación de la seguridad física del distrito de Maca, Informe técnico N° A6628, INGEMMET, Abril 2013.