

TIPOLOGÍA Y CINÉTICA DEL DESLIZAMIENTO REINA DEL CISNE (CUENCA) A PARTIR DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS, GPS, ESCÁNER LÁSER TERRESTRE Y ENSAYOS GEOTÉCNICOS DEL SUELO.

TPOLOGY AND KINETICS OF THE REINA DEL CISNE LANDSLIDE (CUENCA) FROM AERIAL PHOTOGRAPHS, GPS, TERRESTRIAL LASER SCANNER AND GEOTECHNICAL SOIL TESTS.

ACERO, PAIWA PACCHA¹; CALDAS, MATEO ANDRES¹; MEJIA, PAOLA¹; PESÁNTEZ, PAMELA CAROLINA¹; PIEDRA, ROSA ELIZABETH¹; MOROCHO, CARLOS VILLIE²; ACOSTA, ENRIQUE ALFREDO¹

¹ UNIVERSIDAD DE CUENCA, Dpto. Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Av. 12 de Abril y Agustín Cueva Ciudadela, 010203 Cuenca, Ecuador. enrique.acosta@ucuenca.edu.ec, paccha.acero16@ucuenca.ec, mateo.caldas@ucuenca.ec, paola.mejiaa28@ucuenca.ec, pamea.pesantez@ucuenca.ec, elizabeth.piedrao@ucuenca.ec

² UNIVERSIDAD DE CUENCA Dpto. de Ciencias de la Computación, Facultad de Ingeniería, Av. 12 de Abril y Agustín Cueva Ciudadela. villie.morocho@ucuenca.edu.ec

Recibido: 28 de julio de 2017 / Aceptado: 19 de noviembre de 2017

RESUMEN

En marzo de 2017 se desencadenó el deslizamiento de la ladera ubicada en el sector Reina del Cisne (Cuenca) a raíz del corte que se le aplicó a la ladera para la construcción de una pequeña vía de acceso a una casa. El deslizamiento está condicionado por la litología de la ladera (arenas principalmente) y su elevada pendiente (hasta 40 °). Desde marzo hasta de junio de 2017, período analizado en este trabajo, el deslizamiento ha provocado daños estructurales parciales o totales en viviendas, daños en un campo de cultivo y el taponamiento total de la vía que lo desencadenó. Las visitas de campo desde el mes de marzo'17 y la comparación con CloudCompare de las nubes de puntos obtenidas con escáner láser terrestre en los meses de mayo y junio de 2017, han puesto de manifiesto la alta actividad de este deslizamiento. Se ha analizado tridimensionalmente una vivienda afectada y ésta ha experimentado hundimiento y basculamiento hacia ladera abajo con desplazamientos puntuales de hasta 91 cm en 20 días.

Palabras Clave: Deslizamiento, Reina del Cisne, Cuenca, escáner láser terrestre, LiDAR terrestre, daño estructural en vivienda, CloudCompare.

ABSTRACT

In March 2017 the Reina del Cisne (Cuenca) landslide was triggered by a hillslope cut for the construction of a small access road to a house. The landslide is conditioned by the lithology of the slope (mainly sands) and its high slope (up to 40 °). From March to June 2017, the period analyzed in this work, the landslide has caused partial to total structural damages in some houses, scarp in a crop field and the total blockage of the road that triggered it. Field visits since March'17 and the comparison of the point clouds obtained with terrestrial laser scanner in May and June 2017, carried out with CloudCompare, have revealed the high activity of this slip. An affected house has been analyzed in 3D and it has experienced downhill sinking and tilting with local displacements of up to 91 cm in 20 days.

Keywords: Landslide, Reina del Cisne, Cuenca, terrestrial laser scanner, TLS, terrestrial LiDAR, structural damage in housing, CloudCompare.

INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daños en las propiedades, por valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb & Harrod, 1989). En la ciudad de Cuenca, el elevado precio del suelo en la zona llana y urbana está condicionando que el crecimiento de la ciudad se dirija hacia las empinadas laderas que la rodean. Numerosos sectores de estas laderas experimentan deslizamientos y flujos que afectan a viviendas e infraestructuras, como es el caso del sector Reina del Cisne, Trigales Altos, Nuevos Horizontes, La Unión, Jaime Roldós, Jesús del Gran Poder, Carmen de Guzho, Universidad del Azuay, San Joaquín alto, subida a Quinta Chica, etc.

El mapeo y monitoreo de deslizamientos constituye una herramienta fundamental para la planificación urbana frente a este tipo de riesgo. El mapeo y monitoreo de deslizamientos puede llevarse a cabo mediante técnicas clásicas de topografía in situ como el *GPS diferencial* o la *estación total* (González-Zúñiga, 2010) al control de movimientos en laderas inestables, aplicados al deslizamiento traslacional ubicado en el Eje Vial 35 a la altura de la población de Santiago, Km 35+000 de la vía Loja-Cuenca (Ecuador combinada con *fotogrametría* (Bitelli et al., 2004a; Brückl et al., 2006; Mora et al., 2003; Niethammer et al., 2010), o mediante sensores activos como el *RADAR* (Bardi et al., 2014; Martire et al., 2016; Ventisette et al., 2014), o el *escáner láser* (Chen et al., 2014; Eeckhaut et al., 2011; Schulz, 2007; *headscarps, and denuded slopes in Seattle, Washington. Four times more landslides were mapped than by previous efforts that used aerial photographs. The mapped landforms (landslides, headscarps, and denuded slopes* Barbarella, 2013; Bitelli et al., 2004; Conner & Olsen, 2014; Du & Teng, 2007; Hernández et al., 2012; Teza et al., 2007; Teza et al., 2008; Travelletti & Oppikofer, 2008; Travelletti et al., 2014; Wang et al., 2011) *thanks to significant development in last years, are comparable surveying techniques to generate - without object contact and with a precision commensurate with scale - Digital Terrain Models (DTMs.*

El objetivo de este trabajo es caracterizar la tipología y cinética del deslizamiento situado en una ladera empinada de las afueras de Cuenca (sector Reina del Cisne) que está afectando a un grupo de viviendas y a una vía.

ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada en los andes del sur del Ecuador, en la provincia del Azuay, al sur de la ciudad de Cuenca (Figura 1), en el sector Reina del Cisne de la parroquia Paccha con coordenadas UTM zona 17s, 726.775m E y 9.679.327 m N y a 2.600 msnm. Se trata de una zona con pendientes medias a altas, cubierta por tres tipos de vegetación principales: eucalipto, maíz choclo y pasto kikuyo.

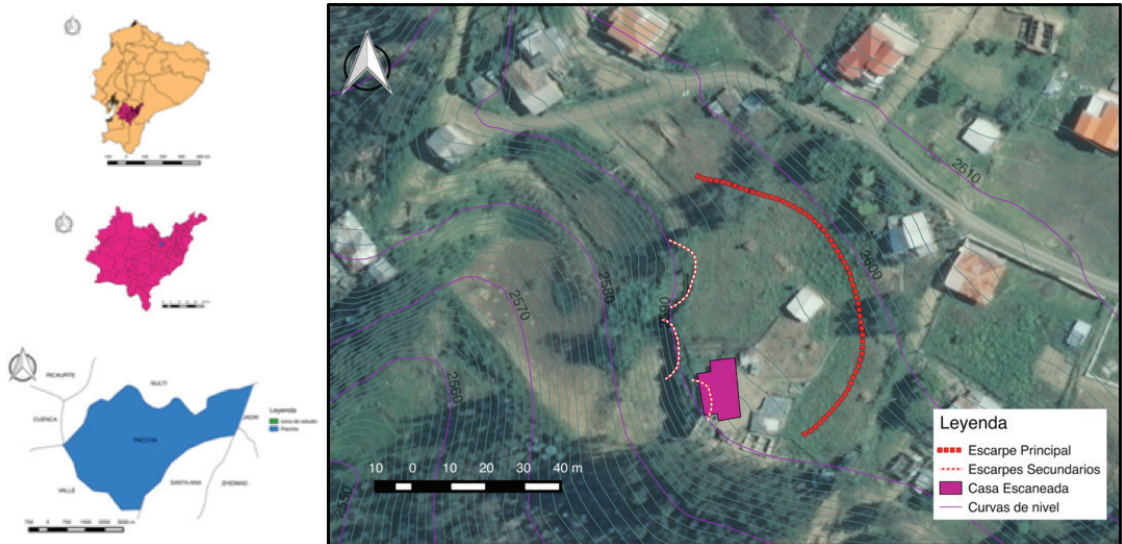


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio (ortofoto y curvas de nivel del año 2008, aún no hay evidencias del deslizamiento).

El clima es “templado interandino” con temperaturas medias de 10-15 °C con precipitaciones anuales de 700 a 1.200 mm (Figura 2) y distribución bimodal con un máximo en marzo y otro en diciembre (Figura 3). El período seco corresponde a los meses de junio, julio y agosto (de Cuenca I.M., 2011).

NIVELES DE PLUVIOSIDAD EN LA ESTACION BASE DE UCUBAMBA DE ETAPA DGA PERIODO 2000 - 2009													
AÑO/ MES	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	Pluviosidad anual (mm)
2000	33,9	143	155	142	144,6	51	30,7	26,4	135,7	19,2	20,3	83,3	985,1
2001	92,7	60,4	157,7	61,2	59,9	44,7	12,9	15,8	38,7	24	73,6	124,8	766,4
2002	49,6	28,1	91,1	105	62,3	29,9	32,1	20,9	12	199,9	101,3	73,5	805,7
2003	39,4	53,4	130,2	111,4	67,5	41,2	25,7	4,8	59,6	66,6	140,5	88	828,3
2004	24,5	83,4	42,1	115	65,5	25,5	36,5	6,5	30	67,5	212	110,5	819
2005	41,5	126,5	305,5	108,5	54,5	54	15	7	3,5	176	61	226	1179
2006	44	10,5	169,5	152	32	30,5	9	21,5	26	85,5	8,5	108	697
2007	42,5	22,5	144,5	157	40,5	84	13	34,5	24	38,5	19	83,5	703,5
2008	41,5	126,5	14,5	5	118,7	45,3	18	27,6	63,4	62,5	129	76	728
2009	48,5	56,5	140	144,5	66	59	9,5	6,5	36,5	40	66,8	60	733,8
Promedio de pluviosidad de los meses en	45,81	71,08	135,01	110,16	71,15	46,51	20,24	17,15	42,94	77,97	83,2	103,36	

Figura 2. Precipitación en la parroquia de Paccha, período 2000-2009 (de Cuenca I.M., 2011).



Figura 3. Distribución de la precipitación mensual promedio, período 2000-2009 (de Cuenca I.M., 2011).

En cuanto a la geología, en la zona de estudio aflora la Formación Azogues (Figura 4), que consiste en una secuencia típicamente clástica de areniscas de grano medio a grueso color café amarillento con alternancias de capas de lutitas, limolitas y escasos conglomerados. Recientes dataciones de trazas de fisión determinan que son del Mioceno medio (Baldock, 1982). Las areniscas están medianamente fracturadas y las juntas cerradas a abiertas, rellenas de arena y bordes rugosos deleznable. Las tobas y limolitas se presentan muy fracturadas con juntas cerradas a abiertas < 10mm, con relleno limo arenoso y bordes suaves y oxidados. Presentan una permeabilidad media a alta por fracturación. Los desprendimientos y deslizamientos son típicos de esta formación, especialmente en laderas empinadas. Los deslizamientos involucran principalmente a la facie fina incompetente en condiciones saturadas (de Cuenca I.M., 2011).

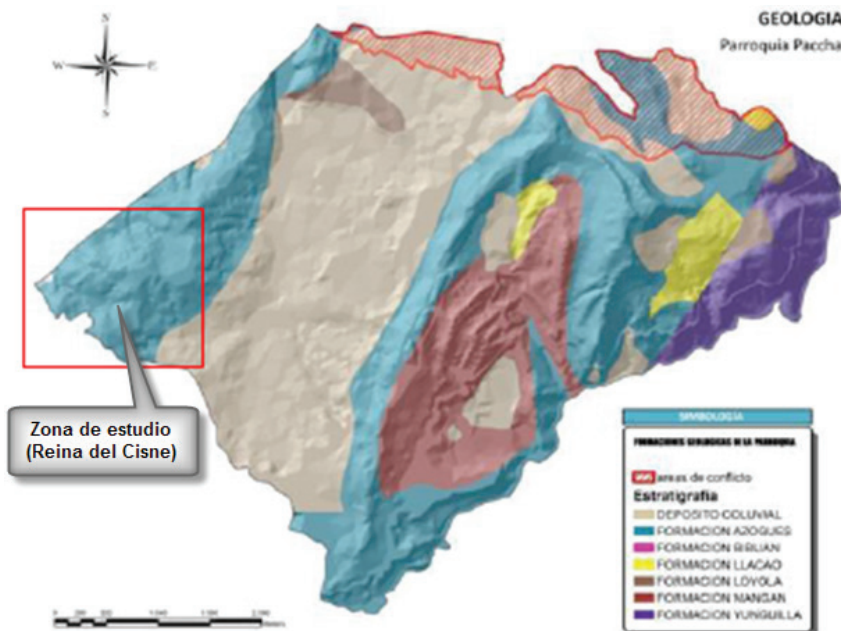


Figura 4. Mapa geológico de la parroquia Paccha (de Cuenca I.M., 2011).

Para determinar algunas propiedades físicas y mecánicas del suelo de la Formación Azogues en la zona de estudio, se han realizado algunos ensayos geotécnicos en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Cuenca, concretamente: densidad, humedad, granulometría, límites de Atterberg, expansión libre y controlada. No se han realizado ensayos de resistencia al corte por la imposibilidad de conseguir muestras profundas del suelo. La muestra se ha tomado junto a la vivienda escaneada y junto a un escarpe secundario del deslizamiento (Figura 5A). Se trata de suelo residual, una arena limosa (SM según el SUCS) con una humedad natural del 24% en el mes de junio y una gravedad específica (Gs) de 2,55. El suelo tiene un porcentaje de expansión de 0,025% produciendo una presión de hinchamiento de 14,27 kPa (0,15 kg/cm²) (Figura 5G y 5H).

Desde el punto de vista antrópico, se trata de una zona de viviendas dispersas ubicadas a unas decenas de metros de una vía lastrada principal (Figura 1). Este sector de Reina del Cisne carece de red de alcantarillado. Según los moradores, en el invierno de 2015 aparecieron pequeñas grietas en el terreno que sólo se agrandaban en épocas de fuertes lluvias. Se había formado un deslizamiento latente y lento. Sin embargo, la situación cambia en marzo de 2017, mes de máxima precipitación (Figura 3), cuando una vecina, sin ningún tipo de estudio ni permiso decide abrir un pequeño camino para acceder desde la vía principal hasta su casa, situada al suroeste de la zona estudiada. Para poder construir la vía fue necesario realizar un considerable corte en la empinada ladera. Este corte transformó pocos días después al deslizamiento latente y lento en un deslizamiento activo y rápido.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para cartografiar el deslizamiento se han consultado los pares estereoscópicos disponibles en el Instituto Geográfico Militar (IGM) correspondientes a vuelos de los años 1963, 1977, 1988 y 2008. Durante ese período de tiempo (1963-2008) la zona de estudio ha permanecido completamente estable. Al no disponer de un vuelo reciente, posterior a marzo de 2017, fecha en la que se desencadenó el deslizamiento, la cartografía de sus cicatrices y de la masa deslizada se ha realizado con un GPS de mano con cámara de fotos georreferenciada.

Para caracterizar la tipología y cinética del deslizamiento se ha recorrido a pie todo el deslizamiento y se han tomado medidas del escarpe principal desde marzo hasta junio de 2017. También se ha utilizado un escáner láser terrestre FARO 3D X130 para monitorear en mayo y junio de 2017 un sector de la masa deslizada en el que existe una vivienda que muestra importantes daños y deformaciones. Este LiDAR terrestre tiene un alcance de 130 m, una precisión de ± 2 mm, dispara un láser infrarrojo en forma de onda y calcula la distancia a los objetos en función del desfase de dicha onda en el instante de salida y de regreso al sensor. Para este tipo de levantamientos a distancias cortas, este tipo de escáner láser basado en el desfase de onda es más productivo que los escáneres basados en pulsos de láser, los cuales calculan la distancia a los objetos en función del tiempo de vuelo del láser. Esto implica que son más lentos, pero alcanzan mayores distancias.

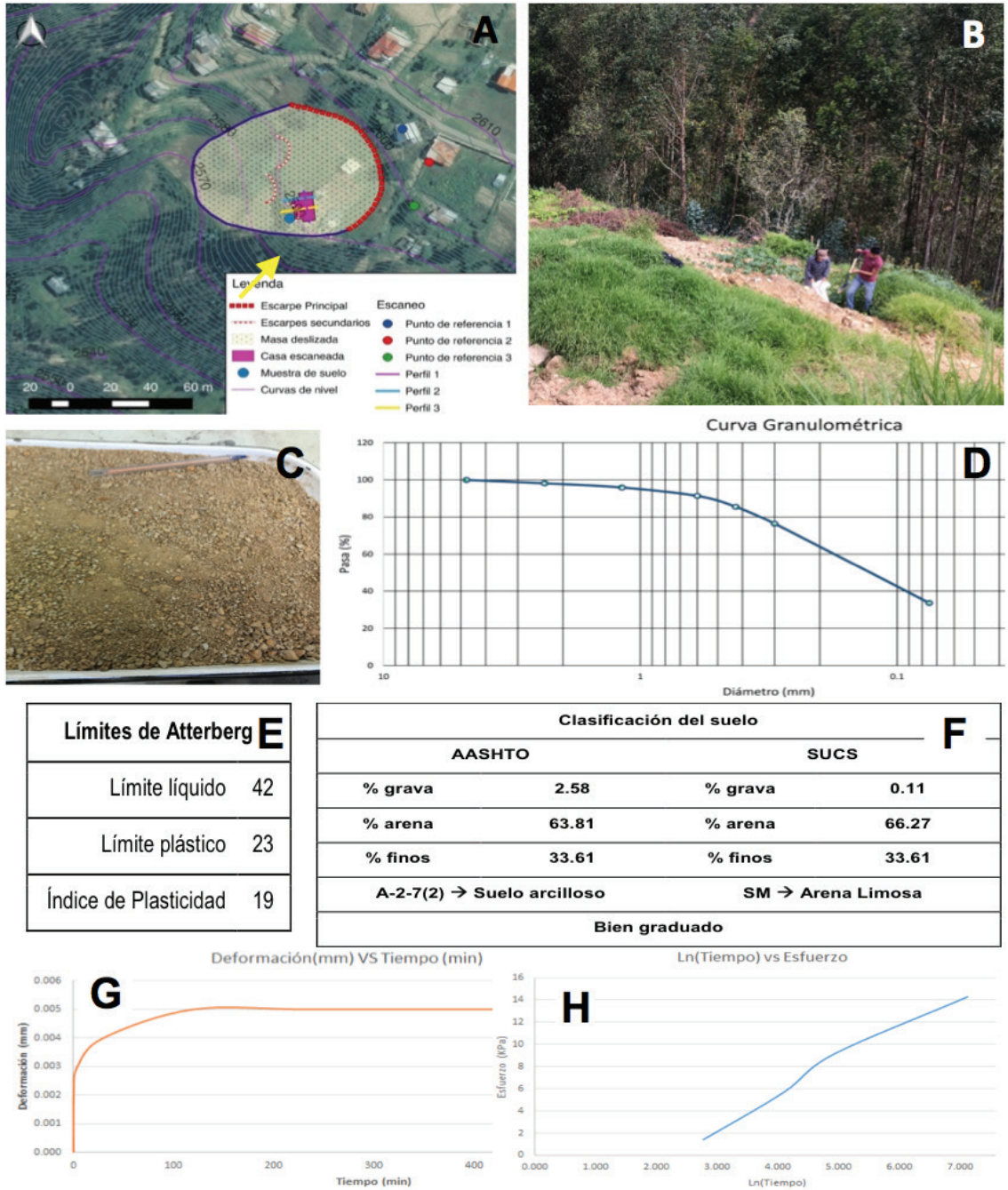


Figura 5. Muestra de suelo. A: Mapa de ubicación del punto de extracción. B: Foto del sitio. C: Muestra seca del suelo. D: Curva granulométrica. E: Límites de Atterberg. F: Clasificación AASHTO y SUCS. G: % de expansividad. H: Presión de hinchamiento.

Los 17 escaneos individuales de la vivienda, internos y externos, se han unido entre sí mediante el software FARO Scene utilizando referencias, concretamente esferas de 140 mm, cuadros tipo *checkerboard* y planos de la vivienda. La distancia entre escaneos siempre ha sido inferior a 15 m, así todas las referencias utilizadas para unir los escaneos han recibido el suficiente número de impactos del láser como para ser utilizadas para dicho fin. Para alinear y comparar en CloudCompare las nubes de puntos de ambas fechas se utilizaron 3 puntos de referencia estáticos, es decir, situados fuera de la zona deslizada (Figura 5A). Finalmente, con AutoCAD Civil 3D se han generado tres perfiles de la casa, dos de ellos en el sentido del movimiento y uno en sentido transversal. En cada perfil se han superpuesto ambas nubes de puntos para ilustrar y cuantificar las deformaciones que ha experimentado la vivienda en el periodo de tiempo analizado y establecer relaciones entre dichas deformaciones y el movimiento del terreno en este sector de la masa deslizada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 6 se muestran fotografías de la evolución del escarpe principal del deslizamiento y del talud del camino de acceso en los meses de marzo, abril y junio de 2017. Como se puede apreciar, en junio el camino ya ha sido totalmente taponado por el deslizamiento. El escarpe principal del deslizamiento ha pasado de 0,45 m en marzo a 1,6 m en junio. La Figura 7 ilustra la tasa de desplazamiento vertical del escarpe principal del deslizamiento en este mismo periodo. Se puede observar que la tasa o pendiente de la recta disminuye considerablemente a partir de mayo, que es cuando también disminuyen las precipitaciones.

La unión de escaneos para formar cada una de las dos nubes de puntos fue satisfactoria. En la Figura 8 podemos ver que el error promedio en ambas fechas ha sido de sólo 1,4 mm.

La alineación de las dos nubes masivas de puntos de mayo y junio de 2017 se realizó utilizando tres puntos fuera de la zona deslizada (Figura 5A). El resultado de esta alineación ha revelado que el deslizamiento se ha movido significativamente en 20 días. En la Figura 9 podemos apreciar que un sector de losa de la vivienda escaneada, cerca de un escarpe de deslizamiento secundario, se ha desplazado 28 cm ladera abajo. La Figura 10 muestra una porción de la losa de la vivienda escaneada que se ha desplazado 91 cm ladera abajo. En la Figura 11 se aprecia un tanque de agua, situado en pleno deslizamiento secundario, que se ha desplazado 81 cm ladera abajo y se ha basculado ligeramente.

La estructura de la vivienda ha sufrido desplazamientos mucho más pequeños que la losa, probablemente porque se encuentra por encima de esta cicatriz secundaria del deslizamiento y porque su estructura es más compleja que la de la losa. Para visualizar mejor estos desplazamientos de la vivienda se han realizado un perfil transversal y dos perfiles longitudinales de la vivienda. La ubicación de dichos perfiles puede verse en la Figura 12. Las Figura 14, 15, 16 muestran dichos perfiles en las fechas de mayo y junio, y la superposición entre ambos.

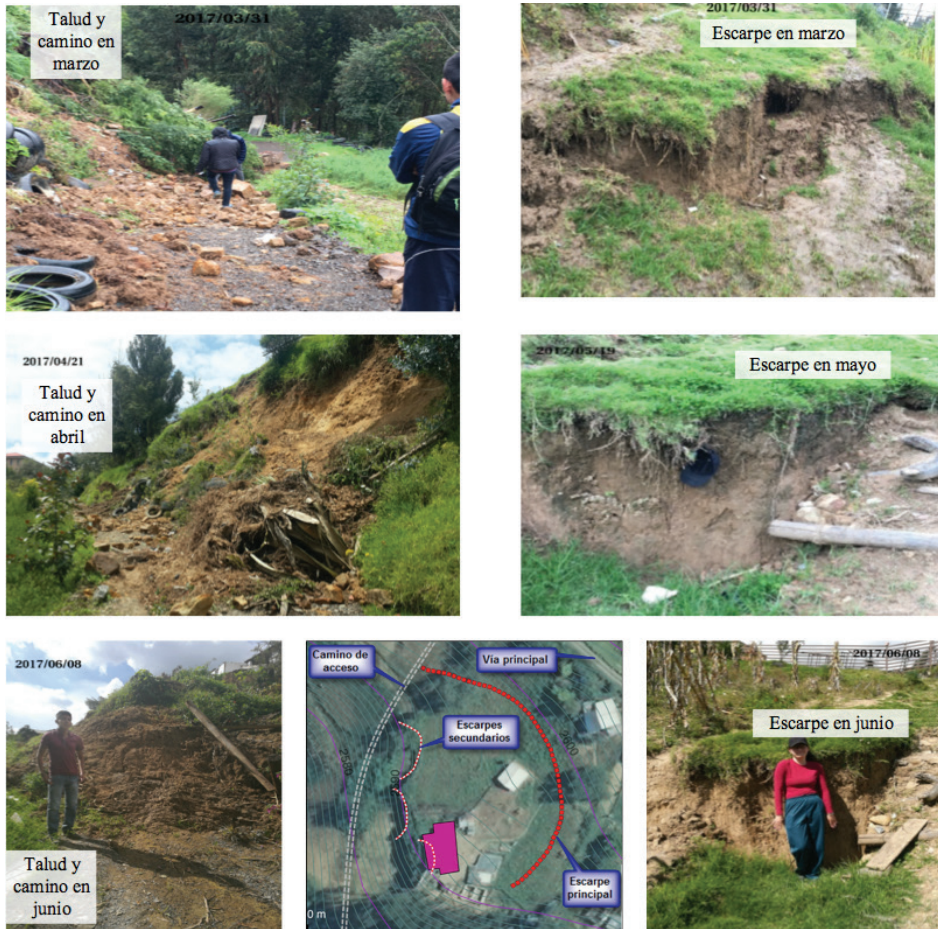


Figura 6. Evolución del escarpe principal del deslizamiento y del talud del camino de acceso desde la vía principal hasta una vivienda.

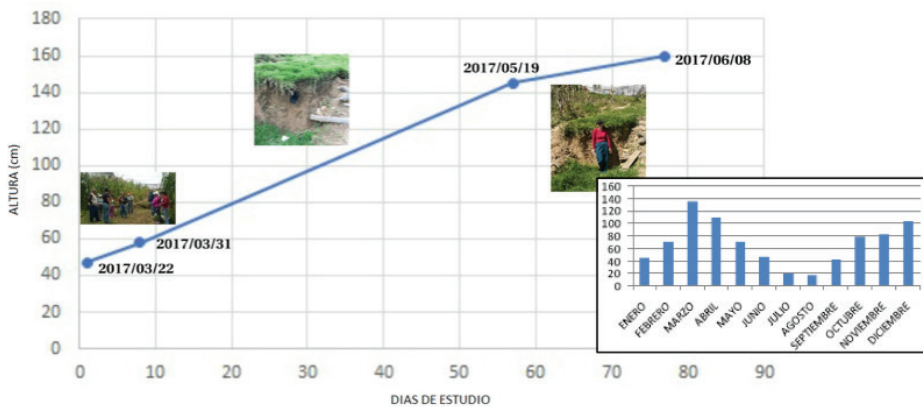


Figura 7. Evolución de la altura del escarpe principal del deslizamiento entre marzo y junio de 2017.

Administrador de escaneos Resultados del escaneo Tensiones de puntos de escaneo							Administrador de escaneos Resultados del escaneo Tensiones de puntos de escaneo						
Jerarquía completa							Jerarquía completa						
Agrupamiento/...	Agrupamiento/...	Meda [mm]	< 4 mm [%]	Superposici...	Puntos utiliza...	Detalles	Agrupamiento/...	Agrupamiento/...	Meda [mm]	< 4 mm [%]	Superposici...	Puntos utiliza...	Detalles
R_Csne.1_E...	R_Csne.1_Ext...	9.995	30.8	26.3	9377		RC2.Int_Scan_004	RC2.Int_Scan_006	5.995	42.4	53.4	19942	
R_Csne.1_E...	R_Csne.1_Ext...	5.624	29.4	57.8	19338		RC2.Int_Scan_005	RC2.Int_Scan_006	5.337	29.4	30.9	19337	
R_Csne.1_E...	R_Csne.1_Ext...	5.199	39.6	21.9	4397		RC2.Int_Scan_007	RC2.Int_Scan_006	3.195	39.6	78.8	9744	
R_Csne.1_E...	R_Csne.1_Ext...	4.398	42.6	53.7	26744		RC2.Ext_Scan_005	RC2.Int_Scan_006	4.139	23.7	26.3	50335	
R_Csne.1_E...	R_Csne.1_Ext...	4.298	45.9	53.2	19900		RC2.Ext_Scan_005	RC2.Int_Scan_007	4.298	45.2	57.8	9377	
R_Csne.1_E...	R_Csne.1_Ext...	3.229	60.0	78.8	50335		RC2.Int_Scan_007	RC2.Ext_Scan_006	3.257	57.5	42.6	5400	

Estadísticas generales		Estadísticas generales	
Meda:	[mm]	Meda:	[mm]
1.4571	[mm]	1.4571	[mm]

Figura 8. Media de errores en mm al unir los escaneos de mayo (izquierda) y junio (derecha).



Figura 9. A: El recuadro rojo indica una porción de losa de la vivienda afectada por un deslizamiento secundario. B: Ese sector de la losa se ha desplazado 28 cm entre el escaneo de mayo (amarillo) y el de junio (RGB).

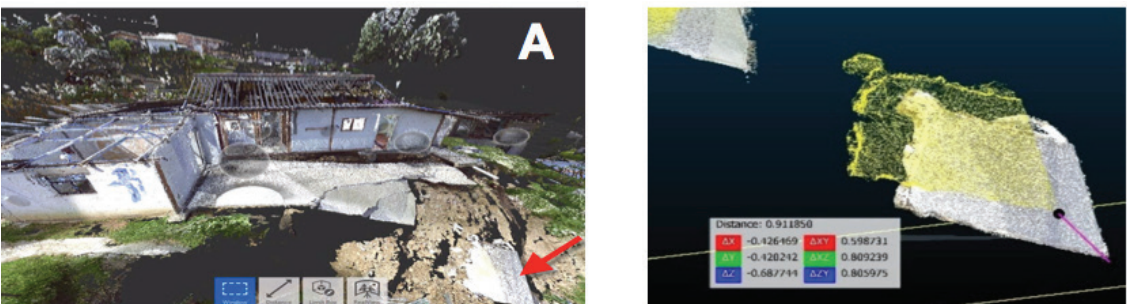


Figura 10. A: La flecha roja indica un trozo de losa en el deslizamiento secundario. B: El trozo de losa se ha desplazamiento de 91 cm entre mayo (amarillo) y junio (RGB).

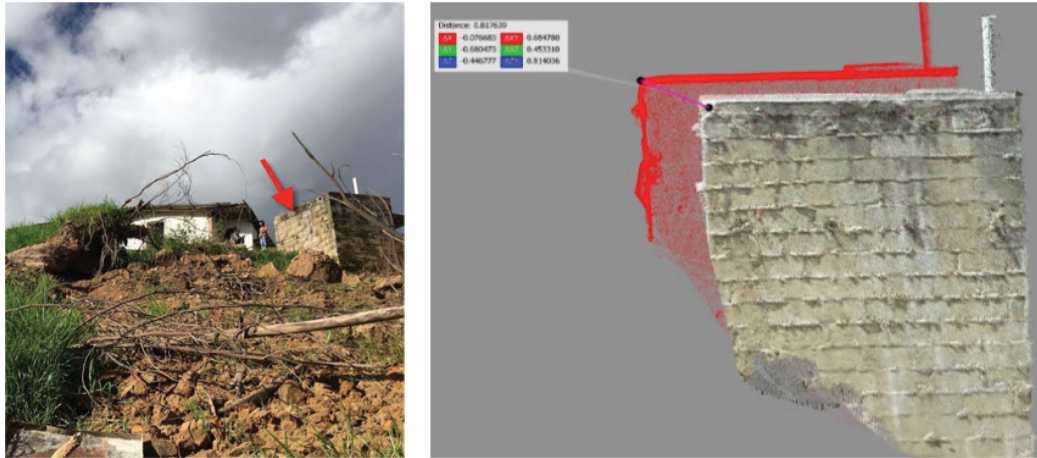


Figura 11. A: Tanque de agua afectado por un deslizamiento secundario. La flecha roja indica la cara analizada. B: Desplazamiento de 0,81 m entre mayo (rojo) y junio (RGB).

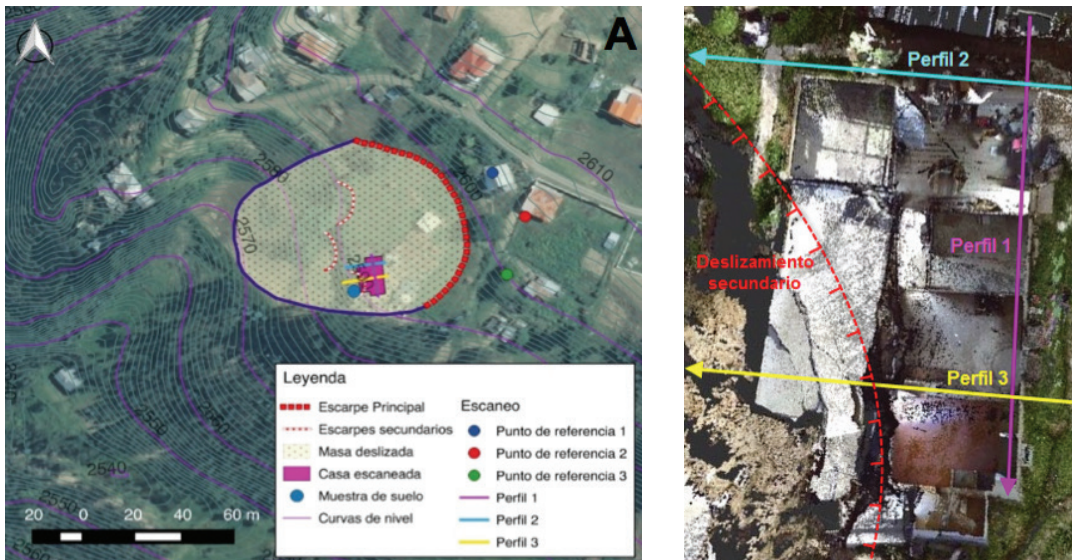


Figura 12. A: Mapa general del deslizamiento y la ubicación de los perfiles de la vivienda escaneada. B: Ubicación detallada del perfil transversal (1) y de los perfiles longitudinales (2 y 3).

En el perfil 1, el transversal (Figura 14), se aprecia un notable basculamiento del terreno y la casa hacia la izquierda, hacia el norte. Esto puede deberse a que el extremo norte de la casa está más cerca del eje de la gran masa deslizada (Figura 12A), donde normalmente la velocidad del deslizamiento es mayor. La deformación por flexión ha creado una leve convexidad en el terreno y en la estructura, con el punto más alto en la abscisa 13.00 m. Estos esfuerzos provocan que la estructura de la casa presente grietas por quebranto, más anchas en la parte superior (Figura 13), por ejemplo, la situada en la abscisa 6.00 (Figura 14A). En la Figura 14D podemos apreciar que entre mayo y junio el terreno y la estructura se ha hundido unos 10 cm por el lado izquierdo (norte) y ha permanecido igual

por el lado derecho (sur), lo cual confirma que la gran masa deslizada se está moviendo más rápido por su eje longitudinal y más lentamente por los flancos, donde se sitúa la casa analizada.

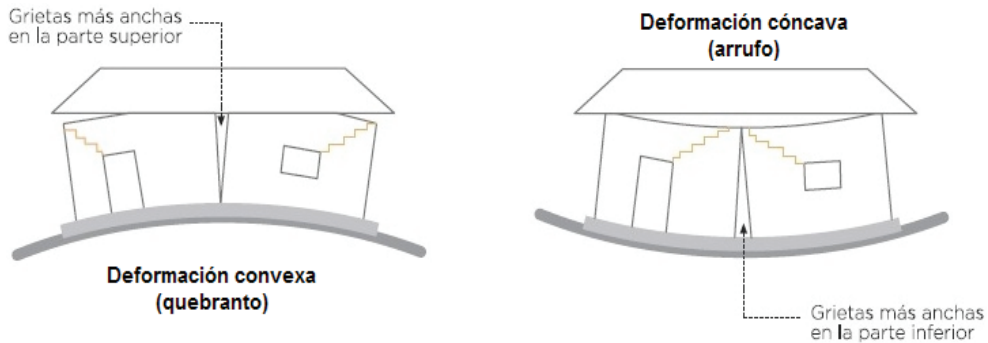


Figura 13. Grietas en una casa por quebranto y por arrufo (Tomada de <http://www.raizcimentaciones.es>).

En el perfil 2, longitudinal (Figura 15), se puede notar la inclinación que presenta la casa hacia la derecha, hacia el deslizamiento secundario. Éste está provocando la pérdida de soporte de la casa. En la Figura 14D podemos comprobar que la mitad izquierda de la casa (desde la abscisa 2.00 hasta el tabique de la abscisa 7.00 m) ha experimentado un hundimiento de hasta 20 cm (abscisa 2.00) en 20 días. Sin embargo, la mitad derecha de la casa no parece haber experimentado movimiento vertical pero sí horizontal, concretamente unos 15 cm hacia el deslizamiento secundario. Si observamos este tabique de la abscisa 7.00 en la planta de la casa (Figura 12B), vemos que se alinea con otra zona de debilidad estructural, concretamente la unión entre la casa y la losa del lado oeste.

El perfil 3, longitudinal (Figura 16), muestra cómo la casa se inclina y se desplaza hacia la dirección del deslizamiento, provocando que la losa vaya desprendiéndose de la casa con gran rapidez. En la parte horizontal de la losa se aprecian desplazamientos de unos 25 cm en 20 días, en vertical y en horizontal, respectivamente. En la parte baja de la ladera se aprecian desplazamientos horizontales de 1 m y hundimientos de más de 1 m. En la casa, la habitación del sofá ha experimentado desplazamientos verticales mucho menores pero el desplazamiento horizontal también ha sido de unos 20-25 cm.

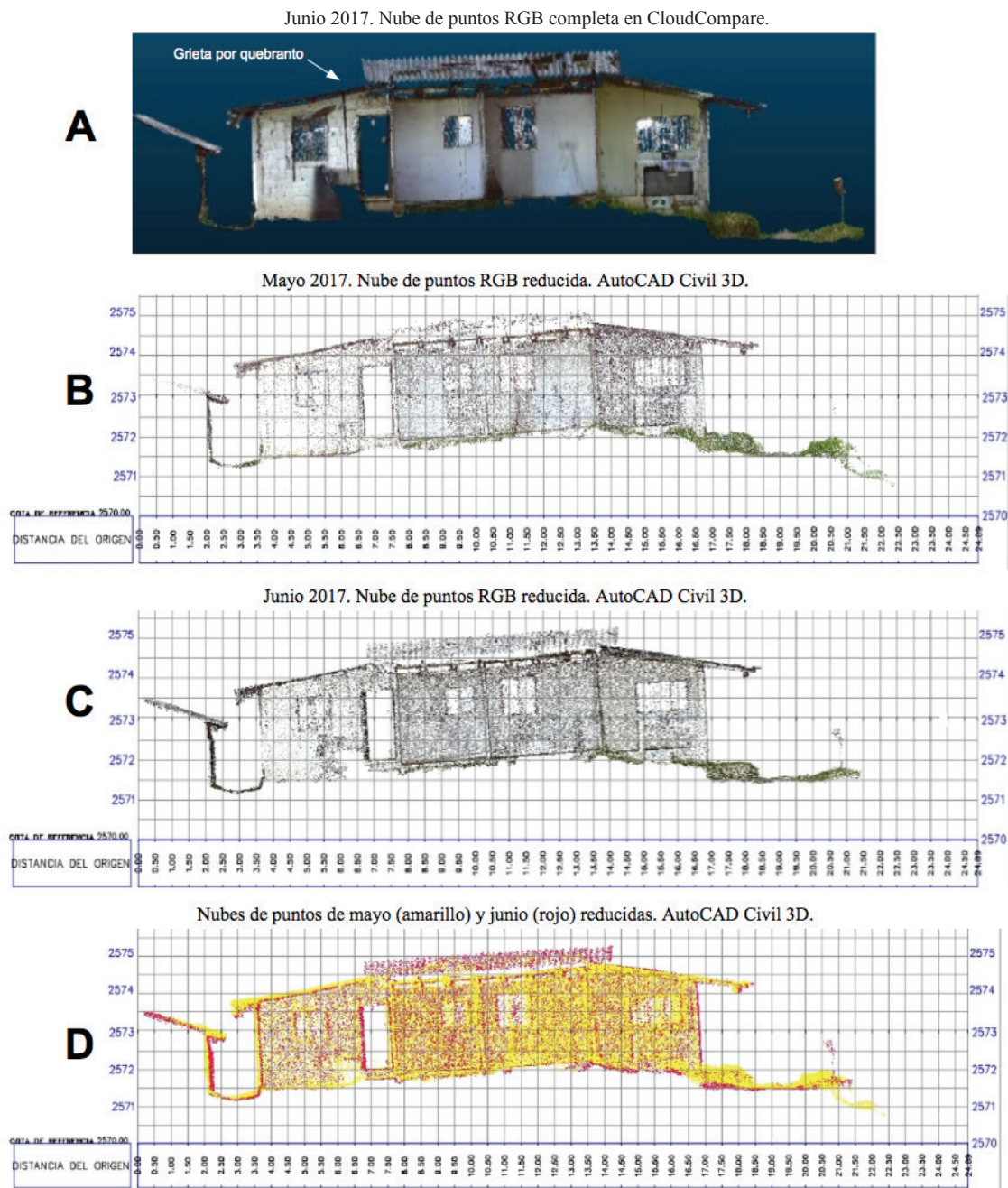


Figura 14. Perfil 1 (transversal) en mayo, junio y comparación de ambos.

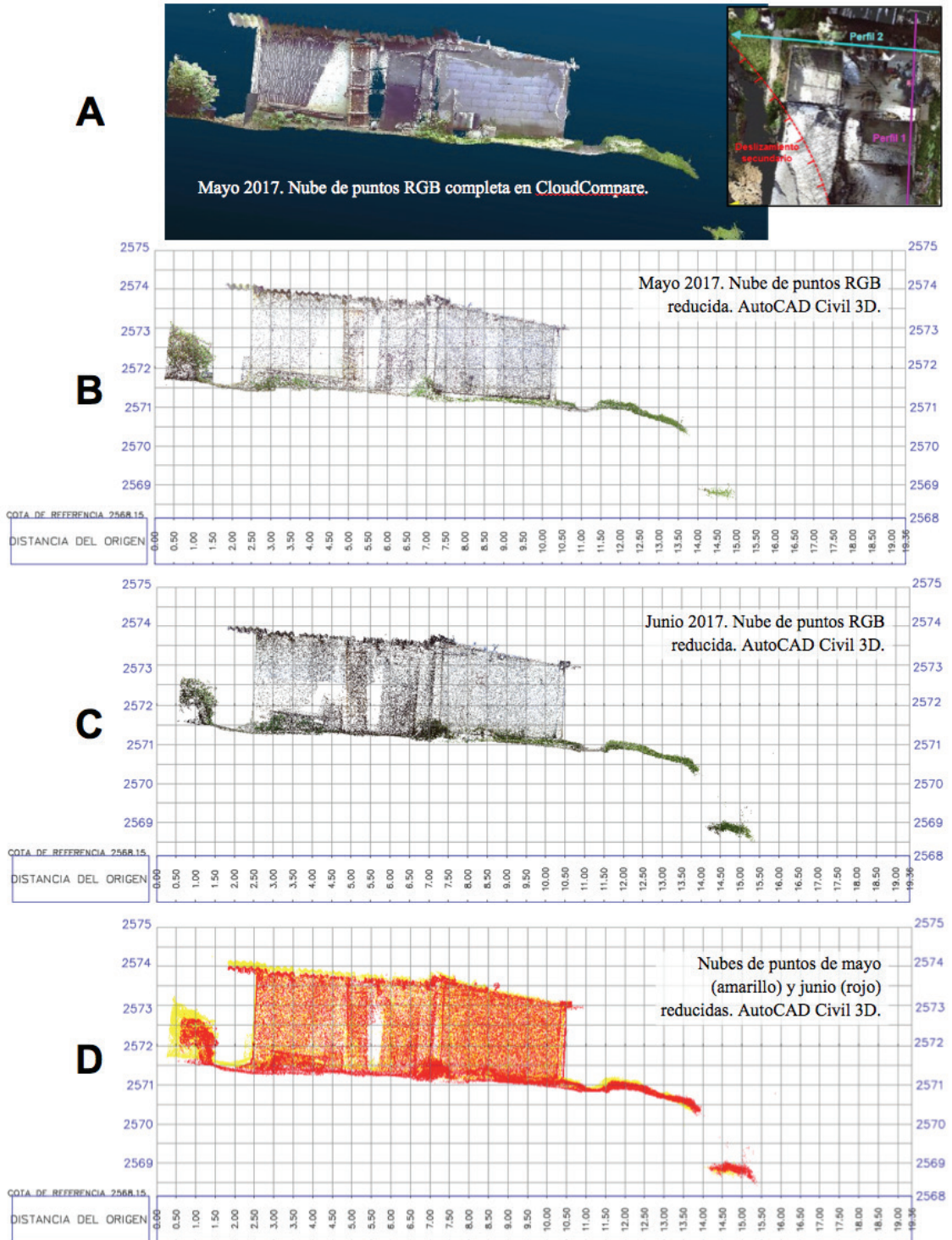


Figura 15. Perfil 2 (longitudinal) en mayo, junio y comparación de ambos.

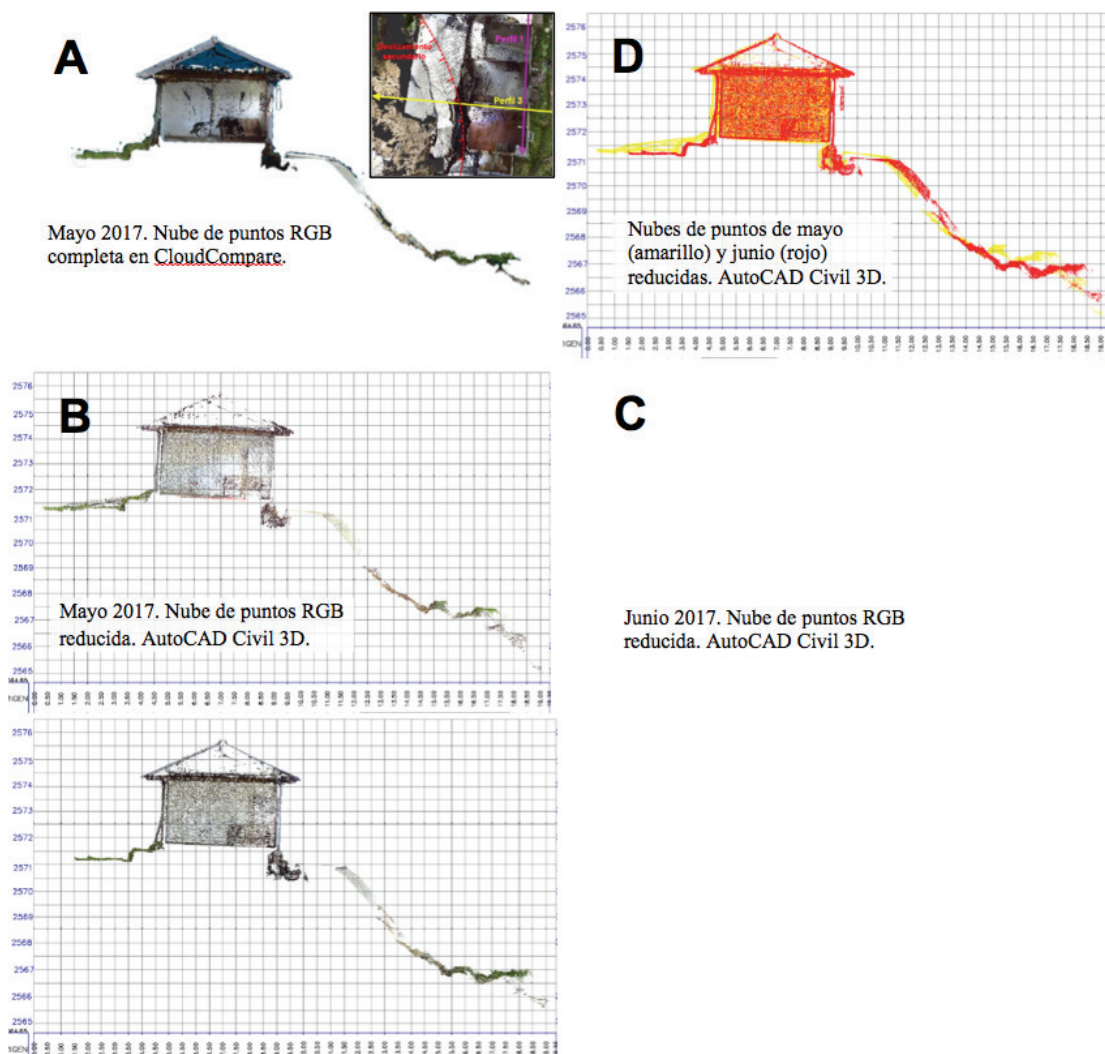


Figura 16. Perfil 3 (longitudinal) en mayo, junio y comparación de ambos.

CONCLUSIONES

Según las entrevistas realizadas a los moradores, el deslizamiento comenzó en el invierno de 2015 como un deslizamiento latente y lento que se reactivaba sólo en épocas de abundantes precipitaciones. El corte a la ladera para la construcción de un camino de acceso en marzo de 2017, precisamente el mes más lluvioso, transformó a este deslizamiento latente y lento en un deslizamiento muy activo y rápido. Desde el 19 de mayo hasta el 8 de junio de 2017, época seca, se han registrado movimientos de hasta 1 m. Además, en sólo un mes, esta nueva versión del deslizamiento ha obligado a evacuar una vivienda por las importantes deformaciones que su estructura ha experimentado.

En virtud de la forma en herradura del escarpe principal del deslizamiento, su verticalidad, la ausencia de deformación en las casas situadas cerca del escarpe principal, las importantes deformaciones en la casa situada en la zona media-baja de la masa deslizada, así como el abombamiento de la ladera en la parte baja de la masa deslizada, podemos concluir que se trata de un típico deslizamiento rotacional. Las grietas de quebranto observadas en el perfil transversal de la casa analizada sugieren que las mayores velocidades de desplazamiento de la gran masa deslizada se dan a lo largo de su eje central. En los dos perfiles longitudinales de la casa no se observa esta diferencia de desplazamientos porque el perfil 3, el más alejado del eje de la masa deslizada, está también afectado por un pequeño deslizamiento superficial secundario.

Los ensayos geotécnicos han revelado que el suelo residual de la Formación Azogues es ligeramente expansivo, aunque no lo suficiente como para deformar las viviendas del lugar (no se han observado daños en ninguna de las casas fuera de la zona deslizada). Sin embargo, los ciclos de expansión y contracción junto con la alta permeabilidad de esta Formación sí pueden contribuir a la profundización de la meteorización de estas areniscas, disminuyendo así su resistencia al cortante y haciéndolas propensas a los deslizamientos.

Está previsto continuar con el monitoreo y análisis estructural de edificios de este sector durante el próximo semestre con el apoyo fundamental de las imágenes aéreas de un dron. De esta manera se conseguirá monitorear el deslizamiento completo y sus alrededores.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Energía y al Laboratorio de Topografía de la Universidad de Cuenca por el préstamo del escáner láser y del GPS. Al Instituto Geográfico Nacional (IGM) por proporcionarnos las fotografías aéreas de 1963, 1977, 1988 y 2008. A la Fundación Red CEDIA por su apoyo al desarrollo de las IDEs académicas en Ecuador por medio del GT-IDE.

REFERENCIAS

- Baldock, J. W. (1982). *Geology of Ecuador: explanatory bulletin of the national geological map of the Republic of Ecuador; 1: 1,000, 00 scale 1982*. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos, Dirección General de Geología y Minas.
- Barbarella, M. (2013). Monitoring of large landslides by Terrestrial Laser Scanning techniques: field data collection and processing. *European Journal of Remote Sensing*, 126–151. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20134608>
- Bardi, F., Frodella, W., Ciampalini, A., Bianchini, S., Ventisette, C. Del, Gigli, G., ... Casagli, N. (2014). Integration between ground based and satellite {SAR} data in landslide mapping: The San Fratello case study. *Geomorphology*, 223, 45–60. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.06.025>
- Bitelli, G., Dubbini, M., & Zanutta, A. (2004a). Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B5), 246–251.
- Bitelli, G., Dubbini, M., & Zanutta, A. (2004b). Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *Photogrammetry, Remote Sensing*

- and *Spatial Information Sciences*, 1–6. <https://doi.org/10.1.1.1.9772>
- Brabb, E. E., & Harrod, B. L. (1989). Landslides: extent and economic significance. Proceedings of the 28th International Geological Congress: Symposium on Landslides.
- Brückl, E., Brunner, F. K., & Kraus, K. (2006). Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data. *Engineering Geology*, 88(3), 149–159.
- Chen, W., Li, X., Wang, Y., Chen, G., & Liu, S. (2014). Forested landslide detection using LiDAR data and the random forest algorithm: A case study of the Three Gorges, China. *Remote Sensing of Environment*, 152, 291–301. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.004>
- Conner, J. C., & Olsen, M. J. (2014). Automated quantification of distributed landslide movement using circular tree trunks extracted from terrestrial laser scan data. *Computers & Geosciences*, 67, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.02.007>
- de Cuenca, I. M. (2011). Plan de Desarrollo y Ordenamiento territorial del cantón Cuenca. *Municipalidad de Cuenca*, 98–99.
- Du, J.-C., & Teng, H.-C. (2007). 3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation. *Automation in Construction*, 16(5), 657–663. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.11.002>
- Eeckhaut, M. Van Den, Poesen, J., Gullentops, F., Vandekerckhove, L., & Hervás, J. (2011). Regional mapping and characterisation of old landslides in hilly regions using LiDAR-based imagery in Southern Flanders. *Quaternary Research*, 75(3), 721–733. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2011.02.006>
- González-Zúñiga, J. C. (2010). Monitorización de deslizamientos de ladera mediante estación total y GPS diferencial. Aplicación al deslizamiento del kilómetro 35+000 de la vía Loja-Cuenca (Ecuador), 71. Retrieved from <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/handle/28000/1686>
- Hernández, M. a., Pérez-García, J. L., Fernández, T., Cardenal, F. J., Mata, E., López, A., ... Mozas, A. (2012). Methodology for landslide monitoring in a road cut by means of terrestrial laser-scanning techniques. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 39(September), 21–26. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84924281191&partnerID=tZOtx3y1>
- Martire, D. Di, Tessitore, S., Brancato, D., Ciminelli, M. G., Costabile, S., Costantini, M., ... Calcaterra, D. (2016). Landslide detection integrated system (LaDIS) based on in-situ and satellite {SAR} interferometry measurements. *CATENA*, 137, 406–421. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.002>
- Mora, P., Baldi, P., Casula, G., Fabris, M., Ghirotti, M., Mazzini, E., & Pesci, A. (2003). Global Positioning Systems and digital photogrammetry for the monitoring of mass movements: application to the Ca'di Malta landslide (northern Apennines, Italy). *Engineering Geology*, 68(1), 103–121.
- Niethammer, U., Rothmund, S., James, M. R., Travelletti, J., & Joswig, M. (2010). UAV-based remote sensing of landslides. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(Part 5), 496–501.
- Schulz, W. H. (2007). Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records, Seattle, Washington. *Engineering Geology*, 89(1), 67–87. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.019>
- Teza, G., Galgaro, A., Zaltron, N., & Genevois, R. (2007). Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach. *International Journal of Remote Sensing*, 28(16), 3425–3446.

- Teza, G., Pesci, A., Genevois, R., & Galgaro, A. (2008). Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanning and strain field computation. *Geomorphology*, 97(3), 424–437. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.09.003>
- Travelletti, J., Malet, J.-P., & Delacourt, C. (2014). Image-based correlation of Laser Scanning point cloud time series for landslide monitoring. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 32(0), 1–18. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243414000804>
- Travelletti, J., & Oppikofer, T. (2008). Monitoring landslide displacements during a controlled rain experiment using a long-range terrestrial laser scanning (TLS). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2007(July), 1–6. Retrieved from http://eost.u-strasbg.fr/omiv/Publications/Travelletti_2008_ISPRS.pdf
- Ventisette, C., Righini, G., Moretti, S., & Casagli, N. (2014). Multitemporal landslides inventory map updating using spaceborne {SAR} analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 238–246. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.02.008>
- Wang, G., Philips, D., Joyce, J., & Rivera, F. (2011). The integration of TLS and continuous GPS to study landslide deformation: a case study in Puerto Rico. *Journal of Geodetic Science*, 1(1), 25–34.