

Análisis geométrico de derrumbamiento basado en plataformas DRON y procesado mediante Sistema de Información Geográfica: Talud Xunqueira, España

Geometric landslide analysis based on UAV platforms and Geographical Information System Processing: Xunqueira slope, Spain



Rabie El Bardai¹, Susana Lagüela-López^{2,3}, David Roca², Higinio González-Jorge²

¹ Department of Geology, University of Abdelmalek Essaâdi. BP 2121, Tetouan (Morocco)

² Applied Geotechnologies Research Group. University of Vigo. Rúa Maxwell s/n, Campus Lagoas-Marcosende, 36310 Vigo (Spain)

³ Department of Cartographic and Terrain Engineering. University of Salamanca. Polytechnic School of Ávila. Calle Hornos Caleros, 50. 05003 Ávila (Spain)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7972> | Recibido: 22/02/2016 • Aceptado: 06/06/2016

ABSTRACT

- The geometry of landslide and subsidence events is important regarding the evaluation of their causes and the optimal decision making towards an effective reconstruction of the structure. Thus, different approaches have been taken for the measurement of geometry following advances in technology. In this paper, an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is used for the acquisition of geometrical information, while GIS processing is applied to the geomorphological analysis of landslides in a slope built for the construction of a road in Ourense, Northwest of Spain. The main advantage of the use of UAV is the high resolution data that can be provided by these platforms, due to the possibility of flying closer to the target than other aerial platforms. Consequently, these platforms are validated for the study of land movements of local scale, with the generation of surface roughness and flow direction maps with the data acquired.
- **Keywords:** slope stability, point clouds, UAV, landslide, GIS.

RESUMEN

La geometría de fenómenos de deslizamiento y subsidencia del terreno es importante para la evaluación de sus causas y para la toma de decisiones óptimas de cara a la reconstrucción efectiva de la estructura. Por tanto, diferentes alternativas se han desarrollado en el tiempo para la medición de geometrías conforme a los avances tecnológicos. En este artículo, un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) es empleado para la adquisición de información geométrica, mientras que el procesado SIG se aplica al análisis geomorfológico de deslizamientos de tierra en un talud construido en una carretera en Ourense, Noroeste de España. La principal ventaja del uso del VANT es la información de alta resolución que puede ser adquirida desde estas plataformas, dada la posibilidad de volar más cerca de zonas de interés que desde otras plataformas aéreas. Por tanto, estas plataformas se validan para el estudio de movimientos de tierra a escala local, con la generación de rugosidad de superficie y de dirección de flujo a partir de los datos adquiridos.

Palabras clave: estabilidad de taludes, nube de puntos, VANT, desprendimiento, SIG.

1. INTRODUCCIÓN

Eventos como deslizamientos del terreno tienen un efecto importante en la seguridad de los habitantes del área, así como en su desarrollo socioeconómico [1]. Además de los efectos en las

vidas y en la rutina de la zona, los fenómenos de deslizamiento del terreno pueden afectar también a símbolos identificativos de la zona como el patrimonio histórico [2], causando un daño importante a la identificación histórica de las sociedades afectadas. Por tanto, con el objetivo de minimizar el efecto en la sociedad de los deslizamientos de terreno y otros fenómenos análogos, el conocimiento de su ocurrencia y el análisis de sus causas son esenciales de cara a optimizar la toma de decisiones con respecto a la realización de actuaciones de seguridad y restauración, así como de reorganización de las zonas habitadas afectadas. La gestión de los deslizamientos del terreno se realiza de diferentes maneras según el país. Por ejemplo, en los casos de Italia y Reino Unido, se emplean bases de datos espaciales locales [3], las cuales, en el caso del Reino Unido, se enriquecen de aportaciones de los usuarios a través de redes sociales [4].

Una de las principales causas de los deslizamientos del terreno son los cambios en el uso y la cobertura del mismo, especialmente en aquellos casos relacionados con el uso mediante actividades humanas, tanto la expansión urbana como la realización de explotaciones agrícolas [1, 5]. Por este motivo, una de las primeras fuentes de información para el estudio de estos eventos es la imagen satelital, con grandes capacidades para la observación de la Tierra y el monitorizado del terreno [6, 7]. Los últimos avances en la resolución tanto especial como temporal de estos sensores han permitido el alcance de nuevos objetivos en este campo [8].

Las limitaciones del uso de imagen satelital para la observación de la Tierra en condiciones atmosféricas no favorables ha provocado el uso de sensores Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar, SAR) [9, 10], que presentan ventajas con respecto de la cobertura espacial, así como de las resoluciones espacial y temporal [11], con respecto de los sensores de imagen (cámaras). Cuando la localización es muy específica y requiere mayor resolución espacial que la proporcionada desde satélite, se puede recurrir al uso conjunto de SAR terrestre y espacial [12] para un análisis profundo del evento.

Los sensores SAR terrestres pueden ser usados para monitorizado de deslizamientos de tierras [13], en conjunto con los sistemas de escaneado láser terrestre (Terrestrial Laser Scanning, TLS) [14]. Las ventajas de los TLS son su flexibilidad en la resolución temporal, su mayor resolución espacial, que alcanza milímetros, y el hecho de que la vegetación no limita la detección de los movimientos del terreno [15].

Sin embargo, el uso exclusivo de sensores terrestres requiere la realización de una campaña de adquisición y la dedicación del

tiempo asociado para evitar tener información detallada del talud pero escasa de la cuenca circundante. Por este motivo, se recurre a los vehículos aéreos para aligerar el proceso de adquisición de datos, ya que estos pueden adquirir información de las superficies superior e inferior del talud simultáneamente. Así, la información aérea sirve de complemento a la información de TLS, el cual puede adquirir la forma del talud con gran precisión y resolución. La referencia [16] evalúa el uso de imágenes aéreas como complemento de medidas con TLS, mientras que [17] presenta una revisión de las capacidades del LiDAR, tanto terrestre como aéreo, para el estudio de deslizamientos del terreno. En el caso de [18], los datos adquiridos, tanto aéreos como terrestres, son imágenes, mientras que el LiDAR sólo se usa desde tierra.

Dados estos factores, los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) aparecen como la solución para la adquisición de información con alta resolución espacial tanto del talud como de las superficies circundantes, debido a su capacidad para volar cerca de estos elementos. De este modo, se pueden generar modelos digitales de elevación de alta resolución (High-Resolution Digital Elevation Models, HRDEM) a partir de imágenes adquiridas desde plataformas VANT [19]; además, la disponibilidad de información visible de las imágenes hace posible el análisis de los materiales que se deslizaron y de las fracturas y fallas del terreno [20] que pudieran tener influencia en el evento. Otra ventaja de este tipo de plataformas es la posibilidad de obtener información de zonas de interés de peligroso o difícil acceso [21].

En este artículo, la información en formato imagen adquirida desde una plataforma VANT se procesa automáticamente para la generación del HRDEM de un talud en el que han tenido lugar dos deslizamientos de terreno, en diferentes posiciones. De este modo, es posible realizar el análisis geométrico de los deslizamientos a partir de las imágenes adquiridas con VANT. Así, se valida el uso de este tipo de plataformas para la adquisición de datos para el estudio geométrico de deslizamientos del terreno y otros eventos similares.

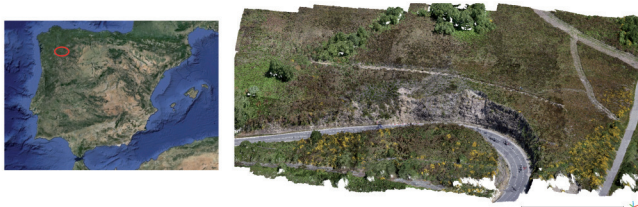


Figura 1. Localización de los deslizamientos

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. CASO DE ESTUDIO

El área escogida como caso de estudio se encuentra en una carretera en las coordenadas 42°17'41"N, 7°35'19"O (Ourense, NO España), con un talud de 8 metros a un lado y una superficie de rellano plana al otro. El talud en estudio sufrió dos deslizamientos del terreno diferentes después de un período lluvioso en la primavera del año 2013. Su localización se muestra en la Fig. 1.

La geología del área de estudio está formada por pizarras fracturadas, sobre las que se colocaron capas sedimentarias [22]. En Galicia, las pizarras y los esquistos fueron desarrollados en el Paleozoico (542-229 Maños) [23]. Sin embargo, la mayoría de los elementos morfológicos observables en la actualidad se formaron en el Cenozoico [24, 25]. Desde la emersión de los territorios gallegos, estos han sido erosionados principalmente mediante procesos fluviales, marinos y glaciales [26]; además, el territorio de Galicia

está afectado por varias fracturas que provocan el debilitamiento del material rocoso [27], especialmente en el caso de pizarras y esquistos, por su propia naturaleza exfoliable.

En relación con esto, la hidrología del área es un factor de influencia para la ocurrencia de fenómenos de deslizamiento del terreno: el área pertenece a una Cuenca hidrográfica que se extiende hacia el este de la carretera, con una topografía que favorece la acumulación de agua consistente en un área plana en el medio de pendientes descendentes. Este hecho es especialmente importante dada la climatología del área, perteneciente al clima Mediterráneo continental. Esto implica que la diferencia de temperaturas entre verano e invierno está en torno a los 18°C, con precipitaciones importantes entre 400 y 600 mm de lluvia al año, concentrada en otoño y primavera [28].

En concreto, el período anterior a los deslizamientos ha sufrido dos períodos continuos de lluvia de 15 días de duración cada uno, con precipitaciones medias de 7.2 L/m² y 4.4 L/m², respectivamente. El primer período fue el más severo, con valores máximos de lluvia de 33.8 y 18 L/m² en días consecutivos. Entre dichos períodos de lluvia, hubo un período de 16 días de sequía, aunque con una humedad relativa y temperatura medias de 60% y 11°C respectivamente, que no favorecieron el secado del terreno. La principal causa fue el elevado contraste térmico durante el día y la noche, en las que se alcanzaron temperaturas por debajo de 0 °C.

2.2. DESCRIPCIÓN DEL VANT Y METODOLOGÍA

La plataforma aérea usada para la realización de los vuelos en el estudio del área después de los deslizamientos de terreno ha sido proporcionada por HiSystems GmbH (Mikrokopter). Se trata de una plataforma con 8 rotores, de nombre Okto XL (Fig. 2). La elección de la misma ha sido motivada por los siguientes factores:

Alta carga de pago, de hasta 2 kg, que amplía la variedad de sensores a portar.

Robustez ante fallos gracias a los 8 rotores, de modo que es posible el vuelo después del fallo de 1 o 2 de ellos.

Maniobrabilidad.

El chasis de la plataforma está formado por tubos de sección cuadrada de aluminio, y una base formada por placas de fibra de carbono. El sistema funciona con ocho motores sin escobillas MK-3638, que permiten el desplazamiento tanto a izquierda como a derecha mediante la rotación correspondiente de las hélices, del tipo APC Slow Fly 12x3.8. Los motores se controlan de tal manera que las velocidades de rotación pueden establecerse de manera independiente para cada uno de ellos.

El control de la plataforma se realiza mediante el Control de Vuelo, una placa con un acelerómetro de tres ejes, un giróscopo de tres ejes, y un sensor de presión. Estos sensores tienen la función principal de calcular la altura y orientación de la plataforma, así como de mejorar su estabilidad y facilitar su control. Asimismo, la placa Navi Control dispone de un compás magnético y de un módulo GPS LEA-6H, mediante el cual se envía información al Sis-



Figura 2. Oktokopter XL equipado con la cámara Sony NEX7. La antena blanca pertenece al GPS usado para control del vuelo

tema de Control de Vuelo para afinar la posición medida por los sensores internos.

La adquisición de datos, en forma de campaña fotogramétrica, se realiza con una cámara Sony NEX7 montada en la plataforma. Esta cámara es escogida por su estabilidad, proporcionada por un sensor CMOS APS-C de 24.3MP, además de por su resolución: 6000x4000 pix. La distancia focal de la cámara es de 16mm, con un tamaño de pixel de 4µm. El control de la cámara es manual, de modo que el operador de la plataforma configura la adquisición (apertura de la lente, velocidad del shutter, enfoque) previamente al comienzo del vuelo. La principal ventaja de este modo de configuración es que permanece constante para todas las imágenes adquiridas durante un mismo vuelo.

El gimball de la cámara en la plataforma está giroestabilizado, permitiendo el giro de la cámara en 2 ejes, vertical y horizontal, siendo posible la adquisición de las imágenes desde puntos de vista oblicuo y cenital. En los casos de análisis de deslizamientos de terreno en un talud, se escoge el punto de vista cenital, con el objetivo de obtener información en el plano horizontal, con el mismo ángulo entre la cámara y las superficies que aparecen en las imágenes.

El vuelo fue realizado con una altura de vuelo media de 74m, cubriendo un área de 266x150m2 con 265 imágenes. Se establece esta configuración de vuelo para optimizar la adquisición de datos; pero en todos los casos debe prestarse atención a cumplir la normativa nacional de vuelo del país en el que se realice. En el caso específico de España, la normativa establece que el operador no debe perder la línea de vision con el VANT, estando a una distancia máxima del mismo de 500m, y una altura de vuelo máxima de 120m para el tipo de plataforma empleado en el estudio. Deben tenerse en cuenta otros factores tales como las condiciones meteorológicas, ya que, aunque la adquisición fotogramétrica tiene mejores resultados con cielos cubiertos, no se recomienda el vuelo del VANT en ocurrencia de precipitaciones. Las limitaciones con respecto de la velocidad del viento también son importantes, siendo 25 km/h el límite general de velocidad de racha con el que los VANT pueden volar.

Las imágenes adquiridas son sometidas a un proceso automático de orientación y registro basado en la extracción y búsqueda de correspondencia de puntos de control mediante el descriptor SIFT, de modo que se calcula la posición y orientación de la cámara para la adquisición de cada imagen. Este conocimiento permite el cálculo de las coordenadas tridimensionales de cada punto del terreno presente en más de 2 imágenes, mediante su cálculo a través del ajuste de mínimos del trazado de rayos. Las coordenadas GPS medidas durante el vuelo son introducidas en el procesado para la corrección de las posibles desviaciones.

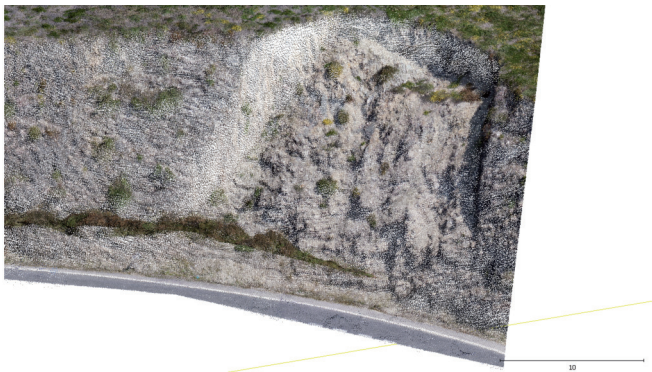


Figura 3. Detalle de la nube de puntos del deslizamiento del talud generada con las imágenes adquiridas con la cámara Sony Nex7 montada en la plataforma aérea Oktokopter XL

Estos principios fotogramétricos se aplican al procesado de las imágenes y cálculo de las coordenadas tridimensionales de cada píxel a través del software Agisoft PhotoScan [29], resultando en la generación de una nube de puntos, en la que cada punto se corresponde con un píxel de las imágenes [30]. Este proceso es conocido como "dense matching", y se basa en la ecuación proyectiva (Eq. 1):

$$x_k = C(D(R_i(X_k - S_i)))$$
 (1)

Donde x_k es la proyección en la imagen del punto X_k , R_i es la matriz de rotación, y S_i son los parámetros de orientación de la cámara en el momento de la adquisición. C y D son la matriz de la cámara y los parámetros de orientación interna (distancia focal, distorsiones radial y tangencial), respectivamente.

Asimismo, la información RGB contenida en las imágenes también se traspassa a la nube de puntos, enriqueciendo su interpretación. La nube de puntos generada a partir de las imágenes adquiridas desde VANT presenta una densidad de puntos de 1322 puntos/m2 (Fig. 3), con una resolución de 0.02 m/pix y un error de 0.66 pix.

Se emplearon ocho puntos de control para la georreferenciación de la nube de puntos, marcados con placas rectangulares de dimensiones 0.20x0.20 m, situados en parejas en los bordes superior e inferior del talud, en diferentes posiciones. Las coordenadas del centro de los puntos de control fueron medidas con un GPS Trimble R8, en el Sistema de referencia ETRS89, proyección UTM29N. La precisión en la medida de los puntos de control es de 0.015m en X e Y (plano horizontal), y 0.025m en Z (precisión vertical). Así, el error final de posicionamiento en la nube de puntos es de 0.32m, o 0.00009pix (Tabla 1).

PUNTO	X ERROR (m)	Y ERROR (m)	Z ERROR (m)	ERROR (m)	ERROR (pix)
1	-0.133	-0.037	0.078	0.159	0.000107
2	-0.093	-0.129	0.047	0.166	0.000110
3	0.106	0.000	0.052	0.119	0.000099
4	-0.037	0.245	0.072	0.258	0.000066
5	0.135	0.156	0.561	0.598	0.000094
6	-0.334	-0.097	-0.065	0.353	0.000123
7	-0.014	0.261	0.083	0.274	0.000085
8	-0.118	-0.312	0.098	0.348	0.000074
TOTAL	0.151	0.186	0.210	0.319	0.000097

Tabla 1. Puntos de control

A continuación, la nube de puntos generada se procesa para la generación de un Modelo Digital de Superficies (MDS), pasando de un conjunto de puntos individuales a un modelo sólido continuo [31]. El MDS se genera mediante la triangulación de la nube de puntos, resultando en una resolución de 0.1666 m/pix con una densidad de puntos de 36.034 points/m2.

El MDS se convierte a su vez en un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) mediante la rasterización del primero con el método de vecinos naturales o natural neighbor. Este método genera una malla regular sobre el MDS, y calcula el valor de elevación de cada celda a partir de los valores de elevación de los puntos contenidos por la celda y sus puntos cercanos. El valor de cada celda se interpola aplicando un peso al valor de cada punto en función de sus áreas de influencia. [32] presenta una explicación más detallada del método. De este modo, evitando la introducción de distorsión geométrica, la precisión del MDS es del orden de 0.32m.

2.3. PROCESADO DE DATOS MEDIANTE SIG

El análisis espacio-morfológico del área en estudio se realiza con un Sistema de Información Geográfica, SIG. En este caso, se emplea el software ArcGIS®, debido a la idoneidad de sus herramientas disponibles para el objeto del estudio.

El estudio comienza con la extracción de secciones del MDE y de sus derivados, centradas en las posiciones de los deslizamientos. Esta operación se realiza con el objetivo de reducir el tiempo de los geoprosesos posteriores, y por tanto hacer el análisis de datos más asequible. Se utiliza la barra de herramientas 3D Analyst para crear perfiles a partir de las secciones del MDE: se crearon 6 perfiles del primer deslizamiento del talud, y 5 perfiles para el segundo (Fig. 4). Tanto el MDE como los perfiles se emplearon para el análisis de la geometría de los deslizamientos, usando la herramienta Spatial Analyst.

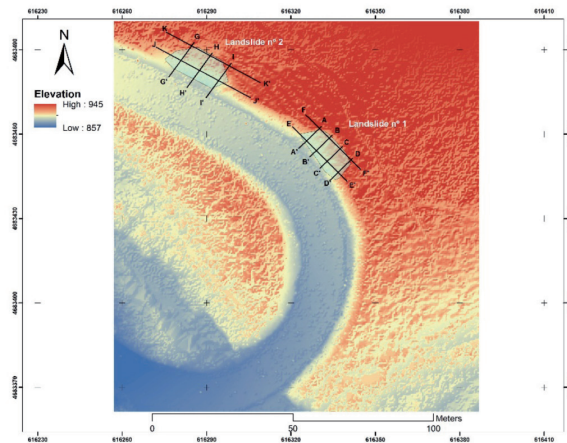


Figura 4. Perfiles verticales y horizontales extraídos para el análisis de los dos deslizamientos del talud en estudio

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 COMPARACIÓN ENTRE PERFILES TOPOGRÁFICOS DEL MDE

La Fig. 5 muestra dos grupos de perfiles topográficos de las áreas en las que han ocurrido deslizamientos del terreno. Los perfiles verticales AA', BB', CC' y DD' cruzan la zona de deslizamiento número 1 (164 m²) y el GG', HH' y II' cruzan la zona del número 2 (192 m²). Por otra parte, los perfiles horizontales EE' y FF' corresponden a la zona 1, mientras que JJ' y KK' lo hacen a la zona 2 (Fig. 6). Todos los perfiles comienzan y terminan en zonas no dañadas. De esta forma, los MDE generados permiten la generación de perfiles topográficos de alta resolución, donde se pueden detectar movimientos del terreno por debajo de 2 m.

En relación a esto, el análisis de los perfiles en la Fig. 6 muestra deslizamientos del terreno en la dirección Oeste, apareciendo pérdida del terreno a la izquierda del gráfico. Esta conclusión se alcanza después de comparar los perfiles desde la parte superior a la parte inferior del corte del talud, FF' frente a EE', y KK' frente a JJ'.

3.2. ALGORITMO DE DIRECCIÓN DEL FLUJO

El agua es uno de los mecanismos de activación más frecuentes en un deslizamiento de terreno, ya que reduce la fricción entre la base de roca y el sedimento superficial, lo que conjuntamente con la gravedad produce la caída de material colina abajo. Debido a la importancia del agua en los eventos de deslizamiento del terreno, el algoritmo D8 ha sido aplicado para estimar la dirección

del flujo. Se ha elegido este algoritmo debido a su simplicidad y capacidad para proveer una buena estimación de los resultados. Este algoritmo se basa en la existencia de ocho direcciones válidas de flujo, relacionadas con las ocho celdas adyacentes a cada celda del talud por las que circula el flujo de agua. Esta aproximación se refiere comúnmente al "modelo de flujo de ocho direcciones (D8)". El modelo sigue una metodología como la presentada en [33]. De forma particular, los resultados del "modelo de flujo D8" son representados por la Eq. 2, consistiendo en el cálculo de la

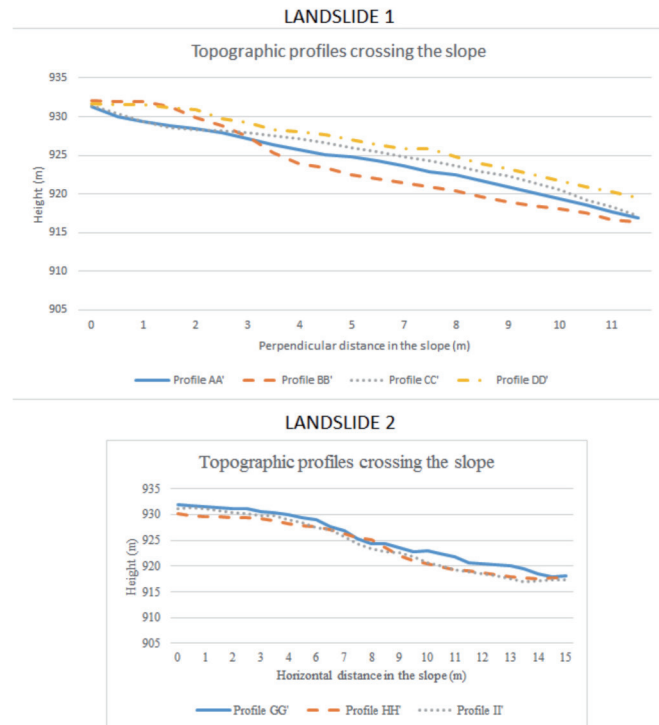


Figura 5. Perfiles topográficos en los dos deslizamientos del terreno

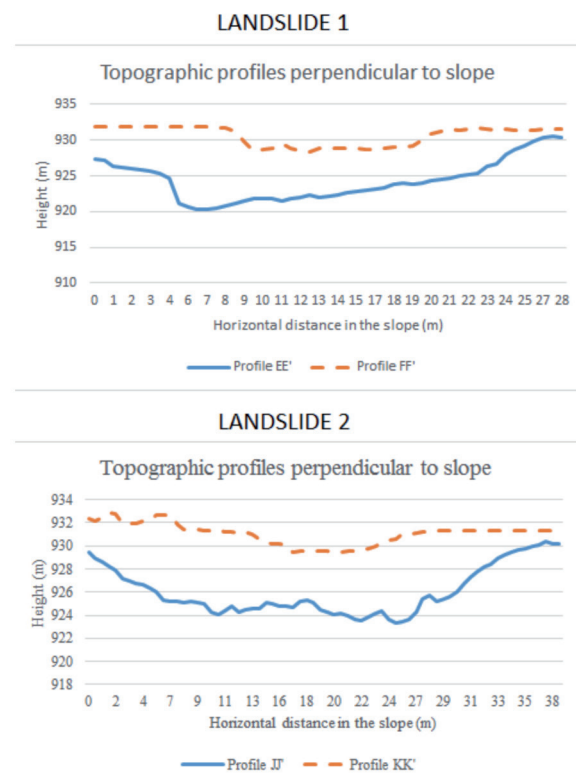


Figure 6. Perfiles topográficos a lo largo de los dos deslizamientos del terreno

máxima pendiente en la vecindad de cada punto bajo estudio. Si cada punto está rodeado por 8 vecinos (considerando una matriz 3x3 de puntos donde el punto bajo estudio ocupa la posición central), el gradiente S_{D8} se define como la máxima diferencia de altura, $Z_9 - Z_i$, entre el punto bajo estudio (subíndice 9) y cada uno de sus vecinos (subíndice i).

$$S_{D8} = \text{Max}_{i=1,8} \frac{Z_9 - Z_i}{h\phi(i)} \quad (2)$$

Donde $h\phi(i)$ presenta un valor de 1 para los vecinos E, S, O y N (correspondientes a $i=2, 4, 6$ and 8 , respectivamente) y un valor de $\sqrt{2}$ para los vecinos NE, SE, SO y NO (esto es, $i=1, 3, 5$ and 7).

La Fig. 7 muestra la dirección del flujo de agua en base a un código de colores. La dirección preferente del primer deslizamiento es SO, mientras que el segundo deslizamiento no sigue esta dirección de forma tan precisa. La dirección del flujo en el segundo deslizamiento es muy similar a la dirección del flujo en la llanura cercana, y en ambos casos, se conduce el flujo de agua a la carretera, siguiendo la curva presente y continuando hacia el Oeste. El agua proviene del NE hacia el SO y una vez que alcanza la carretera sigue ese camino. Por este motivo, los taludes situados en la cara Norte de la carretera presentan una gran probabilidad de deslizamiento debido al flujo de agua, siendo mucho mayor que los taludes localizados en las caras Sur u Oeste. La Fig. 8 muestra una interpretación detallada de la relación entre la dirección del flujo y el deslizamiento.

3.3. RUGOSIDAD Y PENDIENTE DE LA SUPERFICIE

Se ha llevado a cabo un análisis de la rugosidad y pendiente de la superficie para maximizar la explotación de la información disponible.

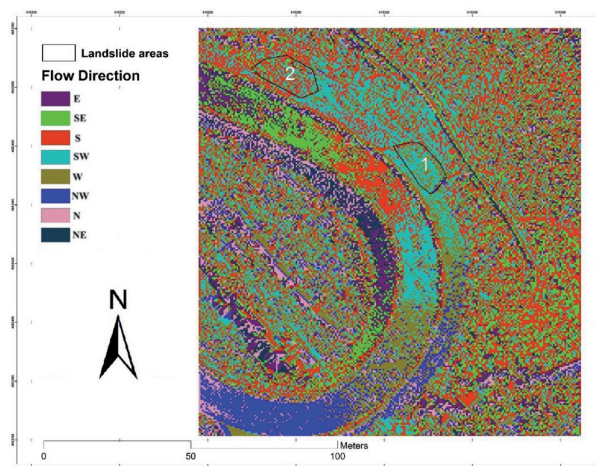


Figura 7. Resultados del algoritmo D8 aplicado al MDE del área. Los dos deslizamientos bajo estudio se señalan con un polígono

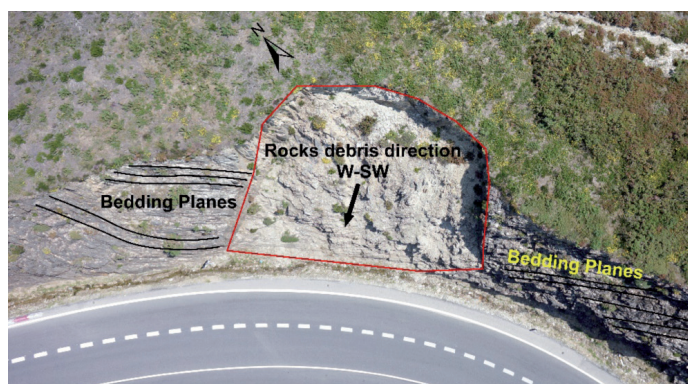


Figura 8. Interpretación de la morfología del deslizamiento 1

La Fig. 9 muestra un análisis de las pendientes en el área del deslizamiento. El código de colores desde el amarillo al azul oscuro representa valores de pendiente creciente, en grados. Los alrededores de la zona de estudio y la propia carretera son prácticamente planos, mientras que los taludes más verticales se encuentran en los laterales de la carretera. En estas zonas la inclinación es mayor de 60° (representada por el color azul oscuro). Sin embargo, en las zonas con deslizamiento, la inclinación se reduce a 40 - 60 grados, siendo según parece este ángulo el que muestra la estabilidad adecuada para el material. Entonces, se puede concluir, que la acción humana en la construcción de la carretera ha creado pendientes de mayor verticalidad que lo adecuado para la composición de materiales del talud. Si no se realizan actuaciones complementarias a nivel constructivo, los taludes no pueden mantener su verticalidad por encima de 60 grados.

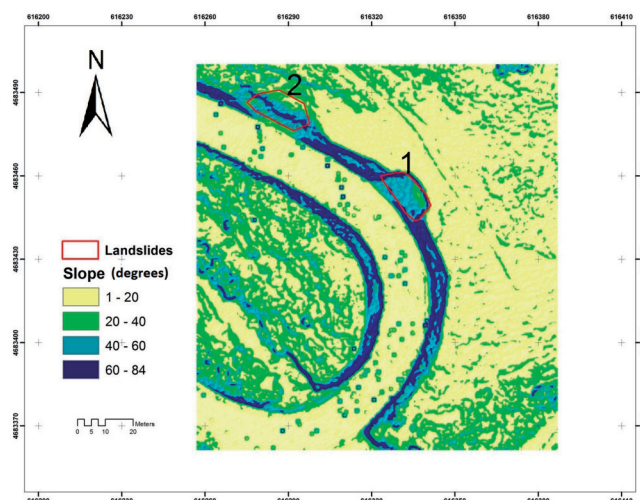


Figura 9. Análisis de pendiente en la zona de los deslizamientos. Los taludes más pronunciados aparecen en los laterales de la carretera

La rugosidad superficial en los taludes ha sido también analizada para caracterizar los deslizamientos a través del cálculo del desplazamiento medio de los valores de elevación de los planos de ajuste de las superficies.

$$R = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |h_n| \quad (3)$$

Donde N es el número de píxeles en relación al camino, tamaño 3×3 , y h_n es la diferencia de elevación entre el pixel n -ésimo en relación al camino y los valores correspondientes.

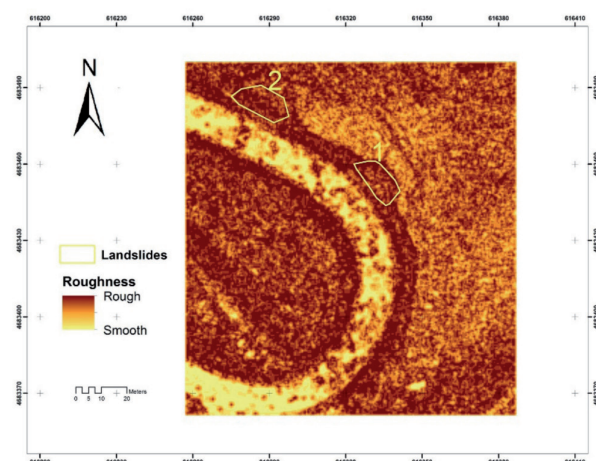


Figura 10. Mapa de rugosidad superficial del área bajo estudio

La Fig. 10 muestra los mapas de rugosidad basados en la aplicación de la Ecuación 3 para las áreas mostradas en la Fig. 9, aplicado al MDE. La rugosidad se muestra como una rampa de colores, donde los tonos claros representan superficies suaves y los tonos oscuros representan zonas rugosas.

Como se muestra en la Fig. 10, las zonas con deslizamientos se caracterizan por altos valores de rugosidad debido a la fuerte pendiente. La transición entre un nivel de elevación y el siguiente es continua. Este gráfico resulta muy útil para identificar características relativas a la rugosidad de escala elevada, aunque se debe resaltar que los taludes con rampas suaves aparecerán como terreno irregular.

4. CONCLUSIONES

Este artículo presenta la aplicación de datos geomáticos adquiridos a partir de una plataforma aérea no tripulada para el análisis geométrico de deslizamientos de terreno en un talud de una carretera. Las imágenes adquiridas a partir de una plataforma tipo VANT se procesan empleando técnicas fotogramétricas para la generación de una nube de puntos del área bajo estudio, permitiendo un posterior análisis tridimensional. El análisis de los datos se lleva a cabo en un sistema SIG, que aparece como una herramienta útil para el estudio a través de la generación de mapas temáticos, como mapas de rugosidad o de dirección de flujo.

En el caso de estudio particular, los mapas de dirección de flujo fueron obtenidos utilizando el modelo de flujo basado en las 8 direcciones, que identifica las áreas del talud con una mayor pendiente descendiente. Entonces, el flujo de agua aparece como la causa del deslizamiento. En comparación con la resolución de los datos adquiridos a partir de un avión, los VANT permiten generar conjuntos de datos de alta resolución y resultan de gran ayuda para este tipo de estudios. Además, la rugosidad superficial y los mapas de pendiente dan una idea de la continuidad entre los diferentes niveles de elevación. En consecuencia, los datos obtenidos a partir de los VANT son adecuados para la identificación de características de rugosidad de escala elevada y muestran potencia para diferenciar zonas de fallo del talud.

Por consiguiente el estudio llevado a cabo en este artículo valida el uso de plataformas aéreas no tripuladas para el análisis geométrico de taludes, lo que requiere una elevada resolución espacial y permite focalizar el análisis a escala local. Aunque los VANT solo pueden adquirir información sobre la superficie, el conocimiento superficial de la geometría es esencial para la realización de un análisis completo de estabilidad. Además, la inversión económica requerida para la adquisición de un VANT se está viendo cada vez más reducida por los avances en esta tecnología. La principal limitación del procedimiento es la extensión de los estudios que se pueden realizar utilizando una plataforma VANT, lo que obliga a la realización de varios vuelos si el análisis requiere trabajar con una zona de gran extensión.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Hamdan, F. Intensive and extensive disaster risk drivers and interactions with recent trends in the global political economy, with special emphasis on rentier states. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, pp. 273-289, 2015. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2014.09.004

[2] Alcaraz, A, Krol B, van Western C. Analysing the possible impact of landslides and avalanches on cultural heritage in Upper Svaneti, Georgia. *Journal of Cultural Heritage*, 13(4), pp. 453-461, 2012. DOI: 10.1016/j.culher.2012.01.012

[3] Ciampalini A, Raspini F, Bianchini S, Frodella W, et al. The landslide geodatabase of the Messina Province: a tool in the civil protection emergency cycle. *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, 35, pp. 70-73, 2015.

[4] Pennington C, Freeborough K, Dashwood C, Dijkstra T, Lawrie K. "The national landslide database of Great Britain: acquisition, communication and the role of social media". *Geomorphology*, 249, pp. 44-51, 2015. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.03.013

[5] Promper C, Puissant A, Malet JP, Glade T. Analysis of land cover changes in the past and the future as contribution to landslide risk scenarios. *Applied Geography*, 53, pp. 11-19, 2014. DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.05.020

[6] Siyahghalati S, Saraf AK, Pradhan B, Jebur M, Tehrany M. Rule-based semi-automated approach for the detection of landslides induced by 18 September 2011 Sikkim, Himalaya, earthquake using IRS LISS3 satellite images. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(1), p. 326-344, 2016. DOI: 10.1080/19475705.2014.898702

[7] Stumpf A, Malet J, Allemand P, Ulrich P. Surface reconstruction and landslide displacement measurements with Pleiades satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 95, pp. 1-12, 2014. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.05.008

[8] Scaioni M, Longoni L, Melillo V, Papini M. Remote sensing for landslide investigations: an overview of recent achievements and perspectives. *Remote Sensing*, 6(10), pp. 9600-9652, 2014. DOI: 10.3390/rs6109600

[9] Colesanti C, Wasowski J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry. *Engineering Geology*, 88, pp. 173-199, 2006. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.09.013

[10] Schlogel R, Doube C, Malet J, Masson F. Landslide deformation monitoring with ALOS/PALSAR imagery: A D-InSAR geomorphological interpretation method. *Geomorphology*, 231, pp. 314-330, 2015. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.11.031

[11] Lazecky M, Canaslan F, Hlavacova I, Gurboga S. Practical application of satellite-based SAR interferometry for the detection of landslide activity. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, pp. 613-618, 2015. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.113

[12] Strozzi T, Rietz H, Wegmuller U, Papke J et al. Satellite and terrestrial Radar Interferometry for the measurement of slope deformation. *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation*, pp. 161-165, 2015.

[13] Tarchi D, Casagli N, Fanti R, Leva D, Luzi G, Pasuto A, Pieraccini M, Silvano S. Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy. *Engineering Geology*, 68-1, pp. 15-30, 2003. DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00196-5

[14] Prokop A, Panholzer H. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, pp. 1921-1928, 2009.

[15] Barbarella M, Fiani M. Landslide monitoring using terrestrial laser scanner: georeferencing and canopy filtering issues in a case study. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(B5), pp. 157-162, 2012.

[16] Bitelli G, Dubbini M, Zanutta A. Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *Proceedings of the XX ISPRS Congress, Commission V, WG V/2*, 2015.

[17] Jaboyedoff M, Oppikofer T, Abellán A, Derron M, Loye A, Metzger R, Pedrazzini A. Use of LiDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, 2010. DOI: 10.1007/s11069-010-9634-2.

[18] Rothmund S, Niethammer U, Malet J, Joswig M. Landslide surface monitoring based on UAV and ground-based images and terrestrial laser scanning: accuracy analysis and morphological interpretation. *First Break*, 31(89), pp. 81-87, 2013.

[19] Kung O, Strecha C, Beyeler A, Zufferey J, Floreano D, Fua P, Gervais F. The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. *UAVg 2011: Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics*.

[20] Walter M, Niethammer U, Rothmund S, Joswig M. Joint analysis of the Super-Sauze (French Alps) mudslide by nanoseismic monitoring and UAV-based remote sensing. *First Break*, 27(8), pp. 75-82, 2009.

[21] Niethammer U, James M, Rothmund S, Travelletti J, Joswig M. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and Results. *Engineering Geology*, 128, 2-11, 2012. DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.03.012.

[22] IGME. Instituto Geológico y Minero de España: <http://info.igme.es/cartografia/geologico1000.asp>. Last visit: 09/03/2015

[23] Johnston S, Gutiérrez-Alonso G. The North American Cordillera and West European Variscides: contrasting interpretations of similar mountain systems. *Gondwana Research*, 17, pp. 516-525, 2010.

[24] De Vicente G, Vegas R. "Large-scale distributed deformation controlled topography along the Western Africa-Eurasia limit: tectonic constraints". *Tectonophysics*, 474, pp. 124-143, 2009.

[25] Martín-González F. Cenozoic activity in a Variscan basement: evidence from geomorphological markers and structural mapping (NW Iberian Massif). *Geomorphology*, 107(3), pp. 210-225, 2009.

[26] Vidal-Romani J, Vaquero M, Sanjurjo J. Granite landforms in Galicia. *Landscapes and Landforms of Spain, World Geomorphological Landscapes*, DOI: 10.1007/978-94-017-8628-7_4.

[27] Yepes J, Vidal-Romani J. Morphogenesis of the Ourense plains (NW of Spain). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 28, pp. 263-283, 2003.

[28] Meteogalicia: <http://www.meteogalicia.es/web/index.action>. Last visit: 16/02/2016

[29] Agisoft Photoscan: <http://www.agisoft.com>

[30] Rodríguez-González P, González-Aguilera D, López-Jiménez G, Picón-Cabrera I. Image-based modelling of built environment from an Unmanned Aerial Vehicle. *Automation in Construction*, 48, pp. 44-52, 2014. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.08.010

[31] Oliveira F, Piteri M, Meneguette M. Developing an open-source software system for the digital terrain model based on TIN. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 20(1), pp. 117-131, 2014. DOI: 10.1590/S1982-21702014000100008

[32] Sibson, R. A brief description of natural neighbor interpolation. Chapter 2 on Interpolating Multivariate Data. New York: John Wiley & Sons, 21-36, 1981.

[33] Jensen S, Domingue J. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), pp. 1593-1600, 1988.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Agencia Gallega de Innovación (Xunta de Galicia) y al Ministerio de Economía y Competitividad (Gobierno de España) el soporte financiero dado a través de los proyectos (IN852A 2014/58) y las becas (FPDI-2013-17516). Todos los programas están cofinanciados por el Fondo Europeo para el Desarrollo Regional (FEDER). Este trabajo también ha sido financiado por el proyecto Europeo: Erasmus Mundus Action 2 Partnership Lot 2 – Erasmus Mundus Green IT for the Benefit of Civil Society, código de proyecto 2012-2625/001-EMA2, coordinado por la Universidad de Vigo.