

## **METODOLOGÍA PARA MEJORAR EL ANÁLISIS DE DATOS SATÉLITE RADAR EN EL ESTUDIO DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA: SIERRA DE TRAMUNTANA (MALLORCA)**

**Silvia BIANCHINI<sup>1,2</sup>, Gerardo HERRERA<sup>2</sup>, Rosa M. MATEOS<sup>3</sup>, Inmaculada GARCÍA-MORENO<sup>4</sup>, Silvia BIANCHINI<sup>1,2</sup>, Oscar MORA<sup>5</sup>, Ciscu SANCHEZ<sup>5</sup>, Marga SANABRIA<sup>2</sup>, Mayte LÓPEZ<sup>2</sup>, Jose Antonio MERODO<sup>2</sup>, Mario HERNÁNDEZ<sup>2</sup>, Joaquin MULAS<sup>2</sup>**

1 Earth Sciences Department, University of Firenze, Via G. La Pira 4, 50121, Florence, Italy.

2 Geohazards InSAR laboratory (InSARlab). Geohazards group. Geoscience Research dept., Geological Survey of Spain (IGME); C/. Alenza 1;28003 Madrid, Spain.

3 Geological Survey of Spain (IGME). Urb. Alcázar del genil, 4. Edificio Zulema, bajos. 18006 , Granada, Spain.

4 Geological Survey of Spain (IGME). Avda. Ciudad Querétaro s/n. 07007 Palma de Mallorca, Spain. E-mail: inmaculada.garcia@igme.es.

5 Altamira Information, C/. Còrsega 381-387; 08037 Barcelona, Spain. E-mail: geraint.cooksley@altamira-information.com

### **RESUMEN**

*En el presente trabajo se presenta una metodología para mejorar el análisis de datos de desplazamientos de la superficie del terreno obtenidos mediante técnicas de interferometría diferencial avanzada (A-DInSAR) en el estudio de movimientos del terreno. En particular, se ha realizado un análisis de los movimientos del terreno con distintos satélites en la Sierra de Tramuntana (Mallorca). La metodología propuesta consta de tres partes principales. En la primera se propone un modelo previo al procesado DInSAR que determina cuales son las zonas idóneas para estimar desplazamientos del terreno. En la segunda parte, se propone un modelo posterior al procesado DInSAR en el que se proyecta el vector de desplazamiento obtenido en la línea de vista (LOS) de los distintos satélites, en función de la geometría del terreno. Así mismo se propone un método para determinar los rangos de estabilidad de los desplazamientos observados, Finalmente se realiza una validación de los datos de desplazamiento post-procesados para identificar movimientos de ladera activos y actualizar el inventario de los deslizamientos en la zona de estudio.*

### **1. INTRODUCCIÓN**

El desarrollo de las técnicas de interferometría rádar diferencial avanzada (A-DInSAR) en las últimas décadas, así como la disponibilidad de imágenes SAR de diferentes satélites, ha determinado que estas técnicas sean una herramienta muy utilizada para la detección y monitorización de desplazamientos superficiales asociados a movimientos del terreno (Singhroy et al., 1998; Farina et al., 2006).

En particular, el uso de las técnicas de interferometría multi-temporal PSI (Persistent Scatterer Interferometry) permiten mejorar la medición del desplazamiento lento de la superficie del terreno y minimizar las fuentes de error asociadas a las condiciones atmosféricas y a la decorrelación espacial (Ferretti et al., 2001). No obstante, las técnicas PSI también tienen algunas limitaciones, los puntos de medida, llamados PS (Persistent Scatterer) solo miden en una dirección a lo largo de la línea de vista del satélite (LOS, Line Of Sight). Este supone que cuando se trabaja en deslizamientos, solo se puede medir una parte del movimiento real. Por este motivo, al utilizar imágenes radar satélite adquiridas en órbitas ascendentes y descendentes para medir un mismo deslizamiento, el desplazamiento observado tendrá signo contrario y diferente valor, ya que no se tiene en cuenta la orientación de la pendiente respecto al ángulo de adquisición del satélite.

En este trabajo, nos centramos en el procesado de los satélites ALOS (banda L), ERS y ENVISAT (banda C), COSMO-SKYMED (banda X) en la Sierra de Tramuntana de Mallorca, que constituye la principal alineación montañosa de la isla, con una amplia gama de movimientos de ladera, siendo los más frecuentes los desprendimientos de rocas y, en menor medida, los deslizamientos de tierras. Se han mejorado metodologías propuestas en trabajos recientes, tales como las relativas al pre-procesado (Colombo et al., 2006, Notti et al., 2010, Cascini et al., 2010) y las relacionadas con el post-procesado (Colesanti and Wasosky 2006, Cascini et al. 2010, Meisina et al., 2008). El objetivo es proporcionar criterios comunes y generales para el análisis de datos SAR obtenidos de sensores satélite diferentes. Los datos PS han permitido mejorar el inventario pre-existente de los movimientos de ladera en la Sierra de Tramuntana (Mateos, 2006), confeccionando mapas de actividad de los deslizamientos y de otras probables áreas inestables posiblemente afectadas por movimientos lentos.

## **2. AREA DE ESTUDIO**

La isla de Mallorca presenta diferentes dominios geomorfológicos, destacando la Sierra de Tramuntana en el sector noroccidental de la isla. La abrupta topografía de esta cadena montañosa, ligado a su complejidad geológica y a las características climáticas de la región, determina una intensa dinámica de laderas con la consecuente ocurrencia de movimientos de diversas tipologías (Mateos y Azañón, 2005; Mateos, 2006). El inventario de movimientos de ladera en la Sierra de Tramuntana pone de manifiesto más de 200 eventos constatados desde el siglo XVII (Mateos, 2006). Los procesos más frecuentes son los desprendimientos de rocas, interceptando en numerosas ocasiones la red viaria de la Tramuntana. Los deslizamientos también hacen acto de presencia, y suelen afectar a los afloramientos de materiales blandos, concretamente a las arcillas yesíferas del Keuper (Triásico superior), que afloran ampliamente en el Valle de Sóller y en su prolongación hacia el noreste, donde se asienta la localidad de

Fornalutx.

### 3. DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos de partida del trabajo son: (i) los desplazamientos del terreno (puntos PS) estimados a partir del procesado PSI de las imágenes radar (Tabla 1) de los satélites ALOS (banda L), ERS y ENVISAT (banda C) y COSMO-SKYMED (CSK) (banda X); (ii) los datos geomorfológicos, las ortofotos de la area de estudio y los datos derivados desde el Modelo de Elevación Digital del terreno (Fig.1.a).

	ALOS	ENVISAT	ENVISAT	ERS 1/2	CSK
Band	L	C	C	C	X
Geometry	Ascending	Ascending	Descending	Descending	Descending
Temporal interval	01/01/2007-28/06/2010	22/11/2003-19/05/2010	19/08/2003-19/05/2009	13/06/1992-07/11/2000	18/05/2012-30/08/2012
Incidence angle	39	22	22	23	30
Track angle	346	345	194	194	193
Repeat cycle (days)	46	35	35	35	8

**Tabla 1. Diferentes satélites utilizados y sus parámetros**

La metodología propuesta consta de tres partes (Fig. 1). Primero, se propone un modelo previo al procesado PSI que determina cuales son las zonas idóneas para detectar puntos PS a través del cálculo de dos índices, RI y LU, relacionados con los parámetros de adquisición del satélite, la topografía y los usos del suelo. De esta manera se puede determinar de antemano qué satélite es el idóneo para nuestra zona de estudio (Fig. 2b). En la segunda parte (Fig. 2c) se propone un modelo posterior al procesado PSI en el que se proyecta el vector de desplazamiento medido en la línea de vista de los distintos satélites (VLOS) a lo largo de la línea de máxima pendiente local (VSLOPE). Posteriormente, se propone un método para determinar los rangos de estabilidad de la velocidad de los desplazamientos observados. En la tercera parte, se combinan los datos radar post-procesados con el inventario de deslizamientos disponible en la zona de estudio, generando un mapa de áreas activas (Fig. 1d). Todo ello ha sido comprobado y validado con un inventario de daños disponible así como con trabajos de campo realizados en febrero de 2013.

### 4. PRE-PROCESADO

Antes de explotar los datos PS de desplazamiento, hemos aplicado dos modelos que tienen en cuenta la geometría del radar y las características de la ladera (relieve y uso del suelo) para predecir cuál es la densidad de PS esperable en la zona de estudio. Para ello se han calculado los índices RI y LU basados en Notti et al., (2010). El índice RI se ha calculado mediante la ecuación:

$$R = -\sin(S \cdot \sin(A - \omega) - \alpha) \quad (1)$$

Donde S y A son la pendiente y la orientación,  $\omega$  es el ángulo del satélite con el norte y  $\alpha$  es el ángulo de incidencia. R varía desde el valor máximo +1, cuando la idoneidad del área para ser investigada por el satélite es buena, a un valor negativo cuando hay efectos de *shadow* o *layover* que impiden una correcta visibilidad del área de estudio; R tiene un valor de 0 cuando el área está afectada por efecto del *foreshortening*.

El índice LU está relacionado con la tipología del uso del suelo. Para calcular este índice, las categorías del Corine Land Cover de las Islas Baleares se han dividido en cinco clases en función de la capacidad teórica del terreno para reflejar la señal radar. Las cinco clases son: (i) tejidos urbanos o áreas con estructuras artificiales; (ii) roquedos, talus y espacios con vegetación escasa; (iii) cultivos y terrenos principalmente agrícolas; (iv) bosques; (v) agua. En general, la banda L (ALOS), debido a su mayor capacidad de penetración, permite obtener en zonas desfavorables una mayor densidad de PS que las otras bandas (i.e. zonas vegetadas).

## 5. POST-PROCESADO

La proyección de la velocidad estimada en la línea de vista del satélite ( $V_{LOS}$ ) a lo largo de la línea de máxima pendiente ( $V_{SLOPE}$ ) permite corregir la distorsión geométrica introducida por el modo de adquisición de los datos del satélite (orientación de la LOS) respecto a la topografía local de la zona estudiada (pendiente y orientación de la ladera). Para realizar esta proyección se ha utilizado la ecuación propuesta por Colesanti & Wasoski (2006) y Cascini et al. (2010):

$$V_{SLOPE} = V_{LOS} / C \quad (2)$$

Donde el coeficiente C representa la fracción del desplazamiento real que puede ser medido por el satélite, y depende del ángulo formado entre la línea de máxima pendiente y la línea de vista del satélite (LOS). La Fig. 2 muestra la utilidad de este procedimiento para el deslizamiento de Estellencs, cuya orientación es NW. Las estimaciones de  $V_{LOS}$  realizadas a partir de imágenes del satélite ALOS adquiridas en geometría ascendente revelan un movimiento positivo (levantamiento), que se corrige mediante el cálculo de  $V_{SLOPE}$ , resultado un movimiento negativo en el sentido de la máxima pendiente (NW), tal y como se deduce de la observaciones realizadas en el campo.

A continuación se presentan dos criterios para determinar los rangos de estabilidad de

$V_{LOS}$  y  $V_{SLOPE}$ , dado que las distribuciones de ambas poblaciones de PS son diferentes (Fig. 2).

Para  $V_{LOS}$ , el umbral de estabilidad se determina con  $\pm$  la desviación estándar  $\sigma$ , utilizando múltiplos de  $\sigma$  para las otras clases de velocidad.

Sin embargo, para  $V_{SLOPE}$ , el umbral de estabilidad se basa en un porcentaje de la población de PS (68%) que tiene la misma distancia con respecto al cero (Herrera et al., 2013), utilizando para las otras clases los valores 10 y 16 mm/año. Siendo estos últimos los umbrales propuestos por Mansour et al. (2012) para indicar la velocidad de un deslizamiento a la que pueden ocurrir daños, y los propuestos por Cruden & Varnes (1996) para clasificar deslizamientos extremadamente lentos y muy lentos.

## 6. ELABORACION DEL MAPA DE ACTIVIDAD DE LOS DESLIZAMIENTOS

El objetivo de la elaboración de los mapas de actividad es detectar áreas anómalas caracterizadas por una alta concentración de PS que indiquen desplazamiento.

El análisis PSI de las imágenes satélite disponibles en banda C, L, X en toda la Sierra de Tramuntana se ha comparado con el inventario de deslizamientos, realizando trabajo de campo adicional en Febrero 2013. De esta manera se ha mejorado el inventario pre-existente, que contenía 210 deslizamientos, añadiendo 5 movimientos no cartografiados y modificando los límites a otros 5 (Fig. 3). Tan solo en el 18% de los 215 deslizamientos cartografiados, no se ha detectado ningún PS (punto de medida radar). De esta manera, en el restante 82% de los deslizamientos sí que se han podido determinar los valores promedio de  $V_{SLOPE}$ ,  $V_{LOS}$ , RI y LU para todos los PS incluidos en cada deslizamiento, obteniendo de esta manera los mapas de actividad de los deslizamientos (Fig. 4).

## 7. DISCUSION Y CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una metodología para mejorar el análisis de datos SAR multi-banda aplicados al estudio de los movimientos de ladera. De esta manera las estimaciones de los desplazamientos del terreno obtenidos mediante técnicas PSI se pueden utilizar para confeccionar mapas de actividad de deslizamientos. La metodología consta de tres partes.

En el pre-procesado PSI, se determinan cuáles son las zonas idóneas para estimar desplazamientos del terreno desde el punto de vista de los distintos sensores satélite disponibles, la topografía y los usos del suelo. En la Sierra de Tramuntana, el análisis del índice RI revela que dada la orografía de la zona de estudio el 78% del área es idónea para ALOS, el 60% para CSK, el 22% para ERS, y 21% para ENVISAT ya sean en órbita descendente o ascendente. En cuanto a la evaluación del índice LU, se observa que los roquedos con vegetación escasa tienen la mayor densidad de puntos PS, especialmente con datos ALOS debido a su mayor capacidad de penetración en zonas vegetadas.

En el post-procesado PSI, en primer lugar se han resuelto las distorsiones geométricas introducidas por cada satélite mediante la proyección de  $V_{LOS}$  a lo largo de la línea de máxima pendiente ( $V_{SLOPE}$ ), observando no obstante, una marcada reducción de la población PS: desde un 55% con ALOS a un 73% con CSK. Posteriormente se han

propuesto rangos de estabilidad de la velocidad con un criterio común. De esta manera los rangos de estabilidad varían desde  $\pm 0.5$  mm/año (ERS/ENVISAT) hasta  $\pm 5.4$  mm/año (CSK). Esta gran variabilidad (1000% aprox.) demuestra la necesidad de aplicar un criterio común para tratar conjuntos de datos tan diferentes como en este caso. Los datos de ERS/ENVISAT cubren 7-8 años, mientras que CSK solo cubre 3 meses.

La combinación de los datos radar junto con el inventario de deslizamientos pre-existente y el trabajo de campo realizado, ha permitido detectar 5 movimientos no cartografiados previamente, y redefinir los límites cartografiados de 5 otros deslizamientos.

Finalmente los PS incluidos dentro de los deslizamientos se han utilizado para calcular los valores promedio de RI, LU, VLOS y VSLOPE. Se han fijado los valores de velocidad 10 y 16 mm/año para elaborar el mapa de actividad de los deslizamientos de la Sierra de Tramuntana, en la que por ejemplo hay 39 movimientos muy lentos detectados por datos ALOS, susceptibles de producir daños en las estructuras e infraestructuras. Este trabajo se ha financiado mediante el proyecto europeo EC-GMES-FP7 DORIS (Ground Deformation Risk Scenarios: an Advanced Assessment Service), Grant Agreement n°242212.

#### REFERENCIAS

- Bianchini, S., Cigna, F., Righini, G., Proietti, C., Casagli, N., 2012. *Landslide HotSpot Mapping by means of Persistent Scatterer Interferometry*. Environmental Earth Sciences, vol. 67(4), pp. 1155-1172, ISSN:1866-6280.
- Cascini, L, Fornaro, G, Peduto, D., 2010. *Advanced low- and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales*. Eng Geol 112:29-42
- Colesanti, C. and Wasowski, J., 2006, *Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry*. Eng Geol 88:173-199.
- Colombo A, Mallen L, Pispico R, Giannico C, Bianchi M, Savio G., 2007. *Mappatura regionale delle aree monitorabili mediante l'uso della tecnica PS*. Proceedings of 10° National Conference ASITA, Bolzano, Italy, 14-17 November 2006.
- Cruden D.M. & Varnes D.J., (1996), Landslide types and processes. Turner A.K. & Schuster R.L. (Eds), Landslides: Investigation and Mitigation: Sp. Rep. 247, Transportation Research Board, National research Council, National Academy Press, Washington, DC, 36-75
- Farina P., Colombo D., Fumagalli A., Marks F., Moretti S., (2006), Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. Engineering Geology, 88, 200-217.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. *Permanent Scatterers in SAR Interferometry*. IEEE Trans Geosci Remote Sens 39(1):8-20.
- Gelabert, B., Sabat, F., Rodríguez-Perea, A., 1992. *A structural outline of the Serra de Tramuntana of Mallorca (Balearic Islands)*, Tectonophysics 203:167-183.
- Herrera, G., F Gutiérrez, JC García-Davalillo, J Guerrero, D Notti, JP Galve, JA Fernández-Merodo, G Cooksley., 2013. *Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees, 128:31-43*.

- Mantovani F., Soeters R., Van Western C.J. (1996) *Remote Sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe*. *Geomorphology*, 15, pp. 213-225.
- Mateos R.M., Azañón J.M. (2005) Los movimientos de ladera en la Sierra de Tramuntana de la Isla de Mallorca: tipos, características y factores condicionantes. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 18 (1-2): 89-99.
- Mateos R.M. I. García- Moreno, G. Herrera and J. Mulas (2011) Damage caused by recent mass-movements in Majorca (Spain), a region with a high risk due to tourism. Catani F., Meisina C., Zucca F., Notti D., Colombo A., Cucchi G., Giannico C., and Bianchi M., (2008), *Geological Interpretation of PSInSAR Data at Regional Scale Sensors*, 8(11), 7469-7492.
- Notti D., Davalillo J.C., Herrera G., and Mora O., (2010), Assessment of the performance of X-band satellite radar data for landslide mapping and monitoring: Upper Tena Valley case study, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1865-1875.
- Singhroy, V., Mattar, K. & Gray, A. 1998. Landslide character-ization in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images. *Adv. Space Res.* 21(3): 465-476

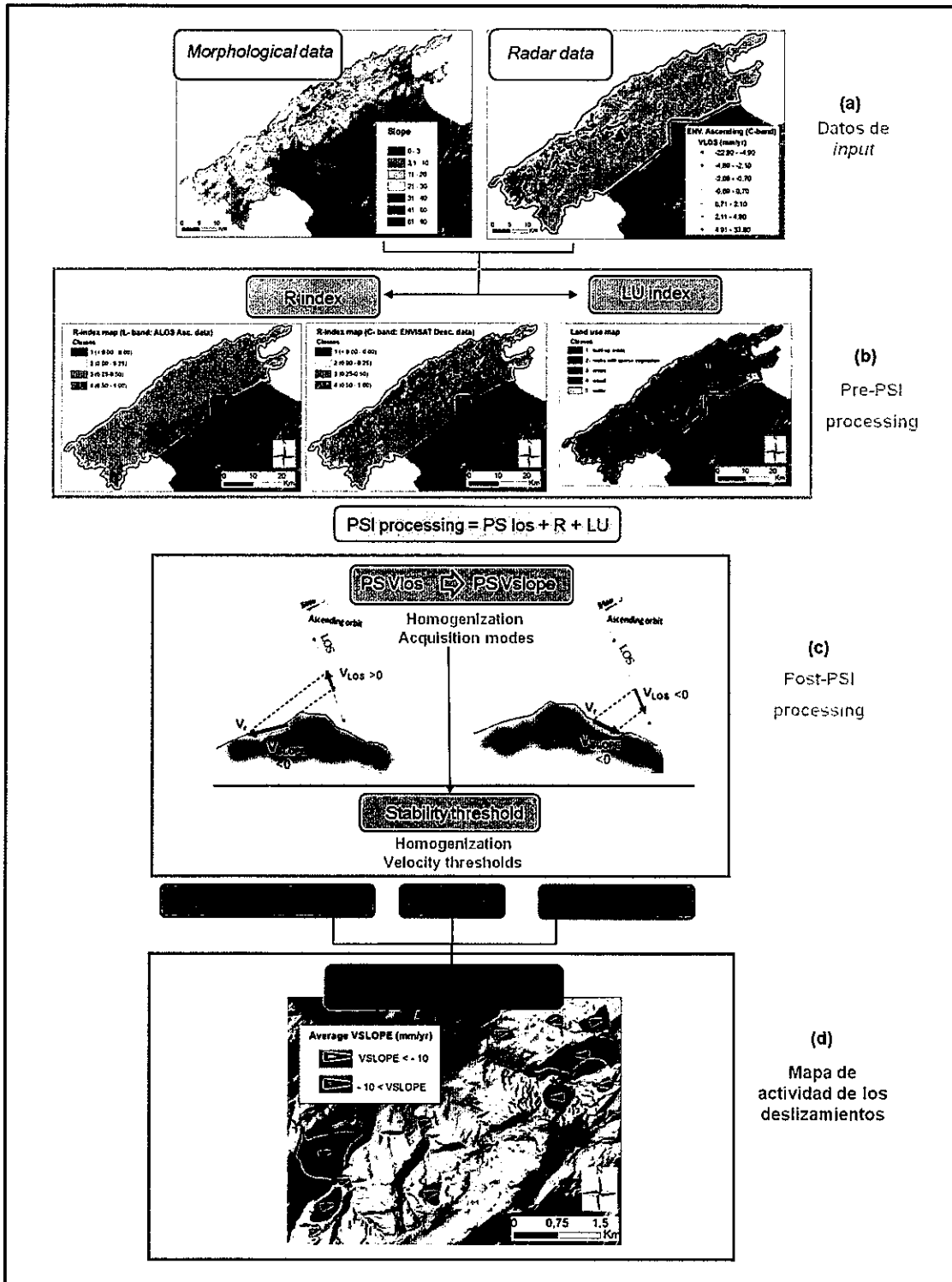


Fig. 1. Metodología



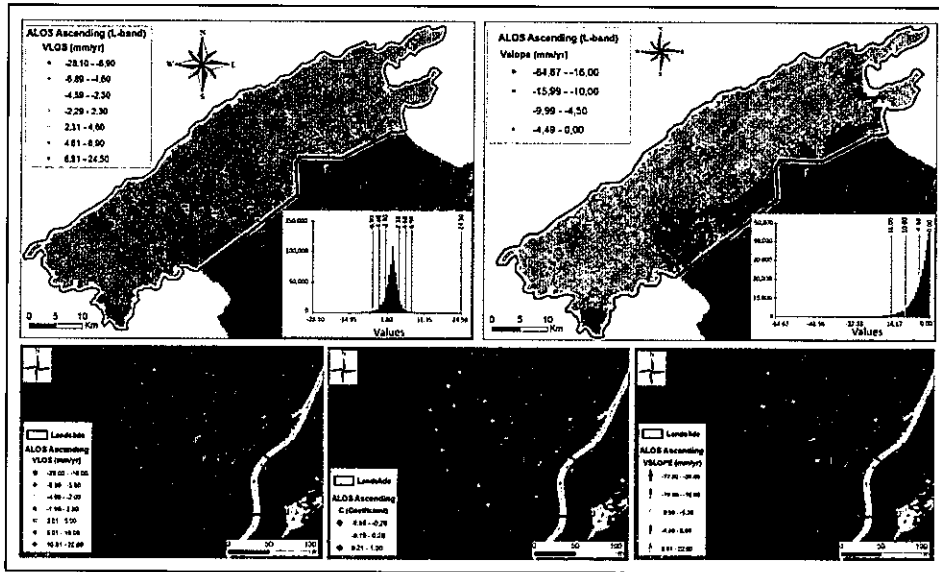


Fig. 2 – Clasificación de los rangos de estabilidad y ejemplo de proyección a lo largo de la pendiente

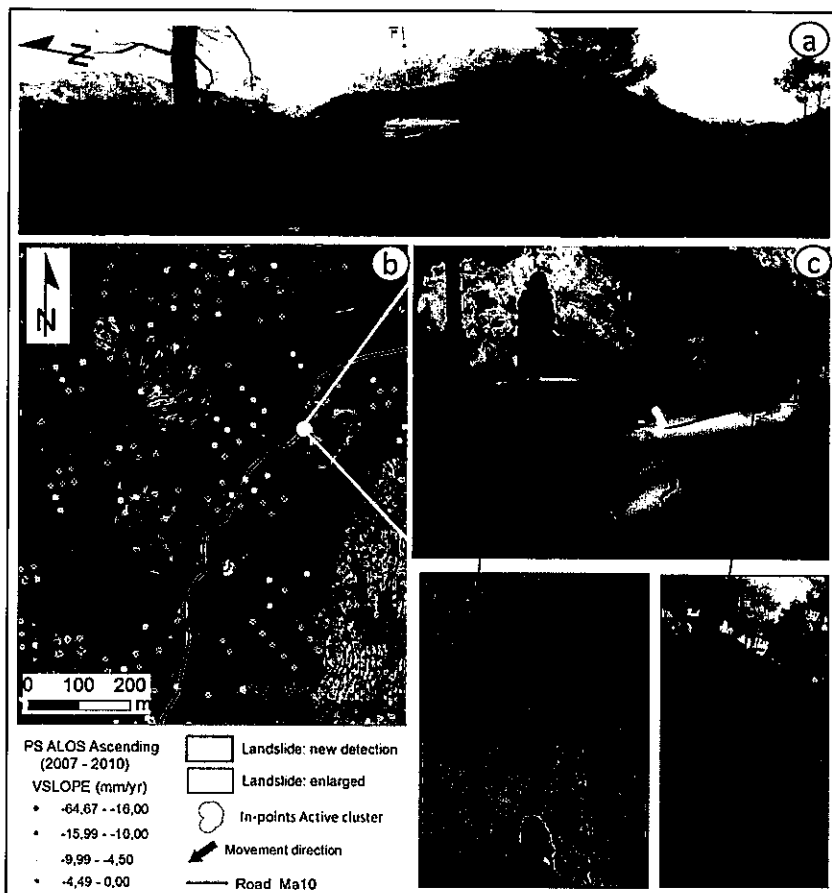
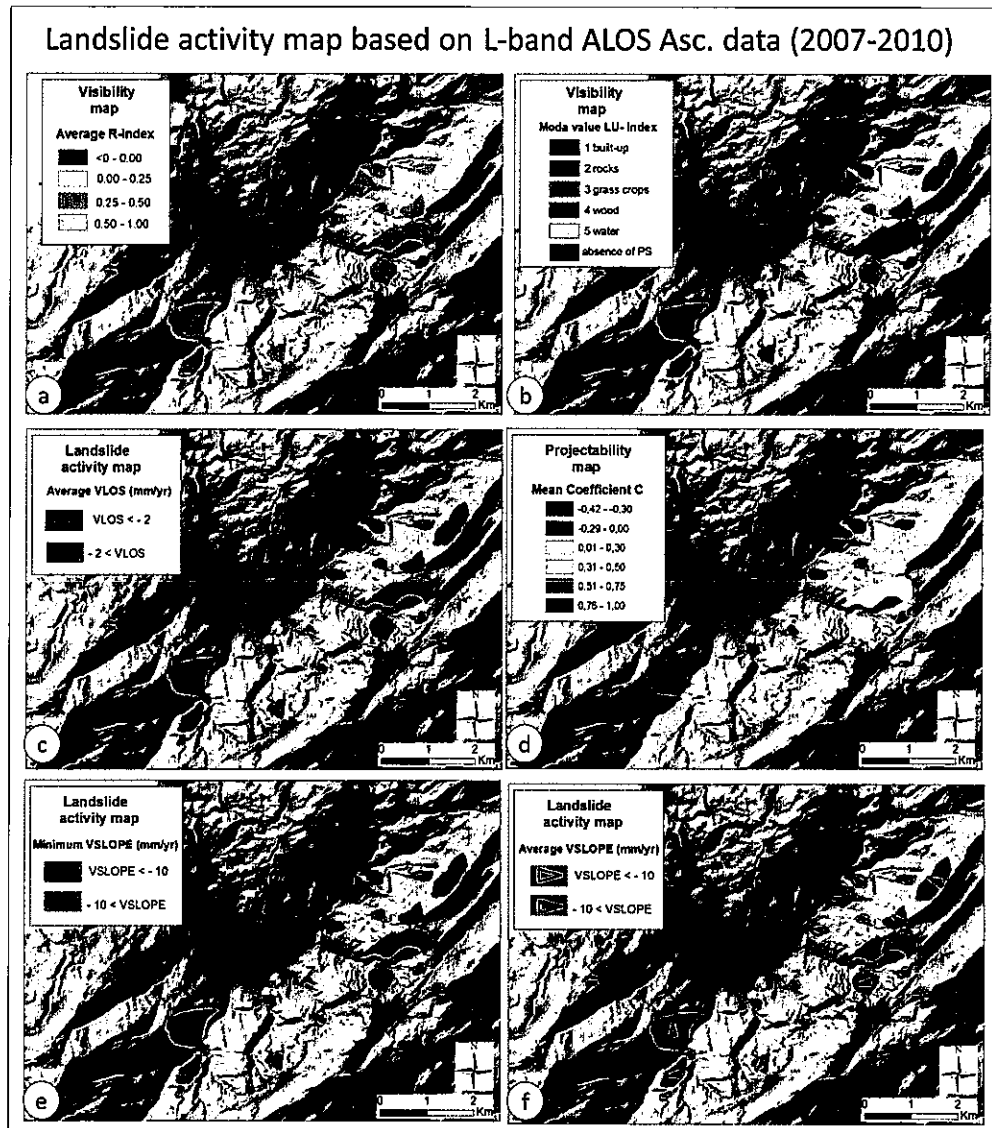


Fig. 3 – Trabajo de campo y actualización del mapa de deslizamientos



Fi. 4 – Mapa de actividad de los deslizamientos: (a) Índice R; (b) Índice LU, (c) Promedio VLOS; (d) Coeficiente C de la proyección VSLOPE; (e) Mínimo VSLOPE; (f) Promedio VSLOPE