

Deliverable E 2.1.1: Informe técnico sobre los inventarios de movimientos de ladera – Arruda dos Vinhos Test Site (Portugal)

Informe del GT2 - Actividad 2.1: Cartografía de susceptibilidad/peligrosidad

Due date of deliverable: 30/09/2020

Actual submission date: 30/09/2020

Lead contractor for this deliverable: IGOT-ULISBOA

Autores

José Luís Zêzere, Ricardo Garcia, Sérgio Oliveira, Susana Pereira, Pedro Pinto Santos, Raquel Melo, Eusébio Reis



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. TIPOS DE MOVIMIENTO DE LADERA	5
2.1. DESABAMIENTO (<i>fall</i>)	6
2.2. DERRUMBE (<i>topple</i>)	6
2.3. DESLIZAMIENTO (<i>slide</i>)	7
2.4. FLUJO (<i>flow</i>)	9
3. INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA EN LA CUENCA DEL RÍO GRANDE DA PIPA	10
3.1. INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA	10
3.2. MÉTODOS UTILIZADOS EN EL INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA	11
3.2.1. TRABAJO DE CAMPO	11
3.2.2. FOTOINTERPRETACIÓN DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS Y ORTOFOTOMAPAS	14
3.2.3. OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN	20
2. RESULTADOS	22
3. CONCLUSIONES	27
4. REFERENCIAS	28

1. INTRODUCCIÓN

El GT2 se basa en el desarrollo de herramientas cartográficas de prevención de riesgos para su aplicación en la ordenación del territorio y la planificación de emergencias. Las principales herramientas a desarrollar incluyen la creación y actualización de cartografía de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo asociada a las regiones costeras del SUDOE, adaptada a los diferentes escenarios futuros de riesgo previstos por el cambio climático.

La Actividad 2.1 - Cartografía de susceptibilidad/peligros, del GT 2 del proyecto RISKCOAST, tiene como objetivo producir cartografía de susceptibilidad para los peligros relevantes en cada región costera del SUDOE identificada a partir de los estudios e inventarios obtenidos en el GT 1, utilizando métodos estadísticos y/o deterministas.

El objetivo principal de este informe técnico (E.2.1.1) es definir el conjunto de procedimientos necesarios para el inventario y análisis de las ocurrencias de movimientos de ladera en el área de estudio del SUDOE de la cuenca del Río Grande da Pipa (RGP) (Fig. 1), una de las principales amenazas geomorfológicas que afectan al área de estudio (Garcia y Oliveira, 2020).

La coordinación del GT2 está asegurada por el equipo IGOT-ULISBOA que establece los procedimientos metodológicos para la producción de herramientas cartográficas de prevención de riesgos. La aplicación de estas metodologías a las diferentes áreas de estudio es desarrollada por cada uno de los beneficiarios que participan en el GT2. El equipo del IGOT-ULISBOA asegura a cada uno de los beneficiarios el apoyo técnico necesario para la aplicación de las metodologías propuestas.

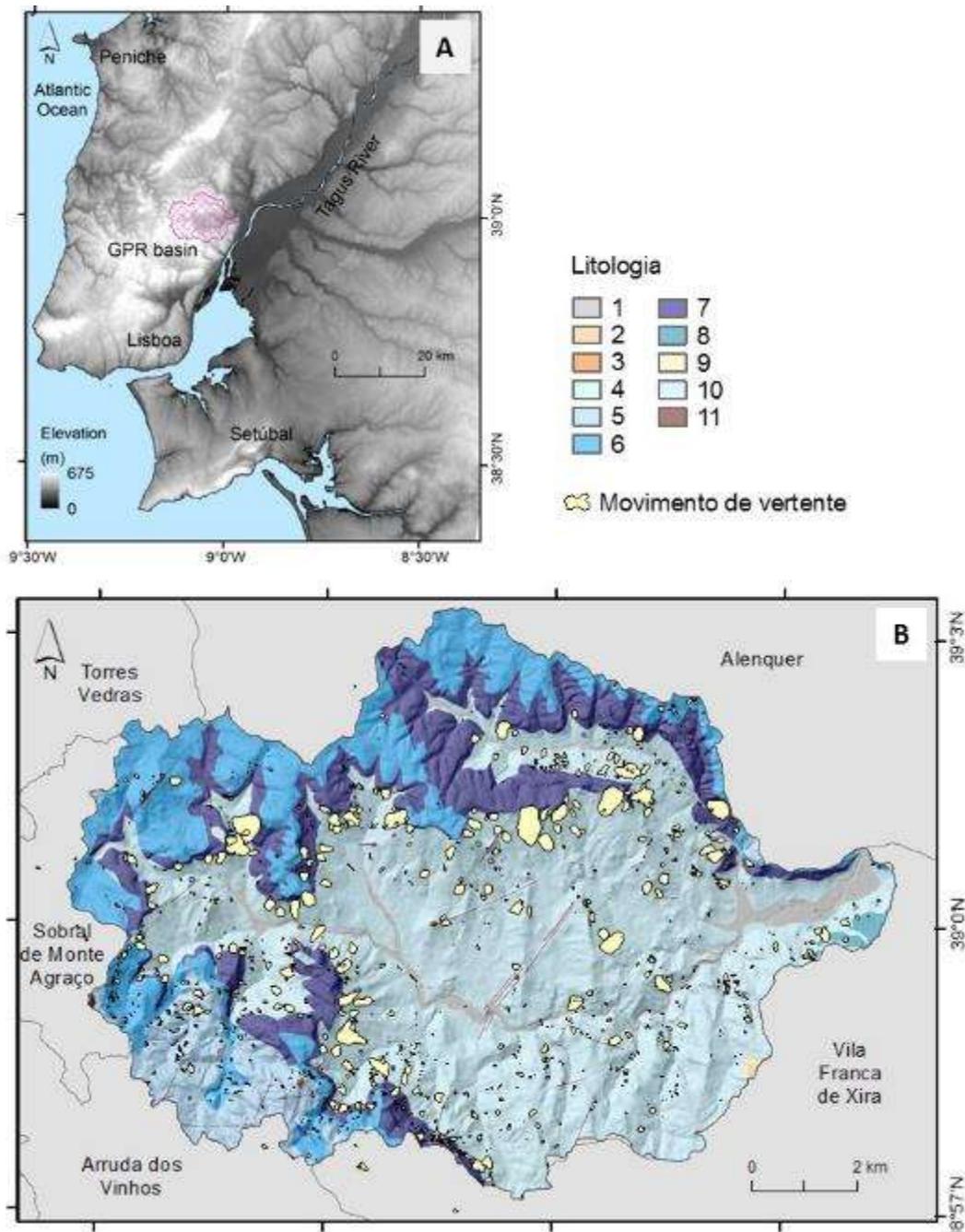


Figura 1 - Entorno geográfico de la cuenca del Río Grande da Pipa (RGP) (A). Distribución de las diferentes unidades litológicas en la zona de estudio. (B): 1 - Aluvión; 2 - Caliza con intercalaciones; 3 - Conglomerados, areniscas y arcillas; 4 - Areniscas, margas y calizas; 5 - Calizas y margas; 6 - Arcillas, areniscas, margas y calizas; 7 - Calizas coralinas; 8 - Calizas; 9 - Arcositos; 10 - Margas, arcillas y areniscas; 11 - Filones y masas.

2. TIPOS DE MOVIMIENTO DE LADERA

La clasificación de los movimientos de ladera adoptada se basa en la propuesta de Cruden y Varnes (1996).

Desde el punto de vista de su alcance, los movimientos de ladera (*landslides*) corresponden al término más restringido de movimientos de masas. Esta hipótesis excluye del análisis para la zona de estudio de la cuenca del RGP los movimientos del suelo que implican hundimientos (subsistencia, asentamientos), los fenómenos que implican expansión-retracción en suelos arcillosos y los movimientos asociados al hielo y la nieve.

Así, a efectos de inventario de ocurrencias, se considera la clasificación de movimientos de ladera propuesta por Cruden y Varnes (1996): desabamiento (*fall*), derrumbe (*topple*), deslizamiento (*slide*), propagación lateral (*lateral spread*) y flujo (*flow*).

La clasificación de estos movimientos de ladera también tiene en cuenta: i) la profundidad de la superficie de ruptura, definiéndose como superficiales los movimientos de ladera con profundidad de superficie de ruptura <3 m y profundos aquellos con profundidad de superficie de ruptura >3 m; y ii) el tipo de material afectado (roca, detritos o suelo).

La clasificación del tipo de material en el que se producen los movimientos de ladera se adaptó de Varnes (1978), que define tres clases de materiales: (i) roca - roca dura o firme, intacta e in situ, antes de la ocurrencia del movimiento; (ii) detritos - suelo desde una perspectiva ingenieril, generalmente superficial, con un porcentaje significativo de material grueso (20-80% de los fragmentos mayores de 2 mm); (iii) suelo - suelo desde una perspectiva ingenieril, que incluye una amplia tipología de materiales, desde arenosos hasta arcillas altamente plásticas, donde el porcentaje de material menor de 2 mm es cercano al 80%.

2.1. DESABAMIENTO (*fall*)

Un desabamiento de tierra (Fig. 2) corresponde a un "desplazamiento de tierra o roca de forma abrupta, a lo largo de una superficie donde los movimientos tangenciales son nulos o reducidos". El material se mueve predominantemente por el aire, cayendo, rebotando o rodando" (WP/WLI, 1993b: 6-2). Suelen ser movimientos extremadamente rápidos, desde la ruptura inicial hasta el momento de inmovilización de la masa desplazada (Flageollet y Weber, 1996), y pueden progresar hasta la caída libre si las pendientes por debajo de las masas de suelo o roca que se van a desprender superan los 70°. Entre este umbral y los 45°, tiende a producirse el rebote y en pendientes inferiores a los 45° las partículas de suelo o roca adquieren trayectorias dominadas por el rodamiento (Cruden y Varnes, 1996).



Figura 2 – Desabamientos superficiales que afectan a la cornisa tallada en la formación caliza Amaral, subcuenca del río Salema, en el emplazamiento de la cantera MOTA-ENGIL (Casal do Tojal). (A) Colapso de columnas, según Hantz et al., 2003,; (B) colapso con atrapamiento de bloques por la vegetación en la base de la cornisa. Fonte: Oliveira (2012).

2.2. DERRUMBE (*topple*)

El derrumbe se caracteriza por una "rotación de una masa de suelo o roca, desde un punto o eje situado por debajo del centro de gravedad de la masa afectada" (WP/WLI, 1993b: 6-2). En este tipo de movimiento de ladera, la descompresión de los efectos de la erosión en la ladera y el desarrollo de un conjunto de grietas de tracción suelen ser requisitos esenciales (Dikau et al., 1996b). Los

derrumbes pueden evolucionar hacia deslizamientos o desabamientos, dependiendo de la geometría de la masa inestabilizada, la geometría de la superficie de desprendimiento (separación) y la orientación y extensión de las discontinuidades cinemáticamente activas (Cruden y Varnes, 1996). En cuanto a su velocidad, ésta puede ser muy variada y difícil de determinar.

2.3. DESLIZAMIENTO (*slide*)

Un deslizamiento de tierra es un "movimiento de suelo o roca que se produce predominantemente a lo largo de planos de ruptura o zonas relativamente estrechas de intensa deformación tangencial" (WL/WLI, 1993b: 6-2). El volumen de material desplazado tiende a aumentar con la distancia desde la zona de ruptura inicial y puede deslizarse más allá del límite aguas abajo del plano de ruptura cubriendo la superficie topográfica original, que pasa localmente la superficie de separación (Cruden y Varnes, 1996).

a) Deslizamiento rotacional

El deslizamiento rotacional (Fig. 3) se produce a lo largo de superficies de ruptura curvas y cóncavas y principalmente en materiales homogéneos (aunque es raro en el entorno litológico de medios perfectamente isotrópicos) (Cruden y Varnes, 1996). En este tipo de deslizamientos pueden producirse descensos verticales bruscos de material, inmediatamente aguas abajo de la cicatriz principal (cabeza del deslizamiento) con la parte superior de la masa desplazada inclinada aguas arriba (Cruden y Varnes, 1996), formando taludes.



Figura 3 – Deslizamiento rotacional profundo en Zibreira de Fetais, Casal do Nogueira (subcuenca de Zibreira) que afecta a las formaciones de caliza Amaral y marga Abadía. Fonte: Oliveira (2012)

b) Deslizamiento traslacional (superficie de rotura plana)

Los deslizamientos traslacionales (Fig. 4) están asociados a una superficie de ruptura plana o muy ligeramente ondulada. Se caracteriza por un ángulo de cizallamiento bajo, generalmente paralelo a la superficie topográfica original, y su forma en el plano tiende a ser cercana a un rectángulo o triángulo (Ibsen et al., 1996b). Su desplazamiento generalmente va más allá de la superficie de ruptura, cubriendo aguas abajo la superficie topográfica original (Cruden y Varnes, 1996). Los deslizamientos traslacionales suelen ser el resultado del contacto entre la masa rocosa y los niveles de suelo residual o transportado (Cruden y Varnes, 1996).



Figura 4 – Deslizamiento traslacional superficial (A-dos-Arcos – Louriceira de Baixo). Fonte: Oliveira (2012)

2.4. FLUJO (flow)

Un flujo (Fig. 5) corresponde a un "movimiento espacialmente continuo en el que las superficies de tensión tangencial son efímeras y a menudo no se conservan". La distribución de velocidades en la masa desplazada se asemeja a la de un fluido viscoso" (WP/WLI, 1993b: 6-2). En los deslizamientos, las tensiones se distribuyen por toda la masa afectada, lo que conduce, generalmente, a una gran deformación interna de los materiales y a la existencia de velocidades diferenciadas, casi siempre más altas cerca de la superficie (Carson y Kirkby, 1975; Bromhead, 1992 en Zêzere, 1997). La transición de desprendimiento a escorrentía depende en muchos casos del contenido de agua en el suelo (pérdida de cohesión), de la movilidad (pendientes muy pronunciadas) y de la evolución del movimiento (Cruden y Varnes, 1996). La escorrentía puede ocurrir en laderas abiertas o surgir canalizada, puede extenderse por varios kilómetros antes de depositar la carga sólida, y puede operar en pulsos resultantes de la movilización periódica de material o por la formación y posterior ruptura de presas formadas por los escombros (Cruden y Varnes, 1996).

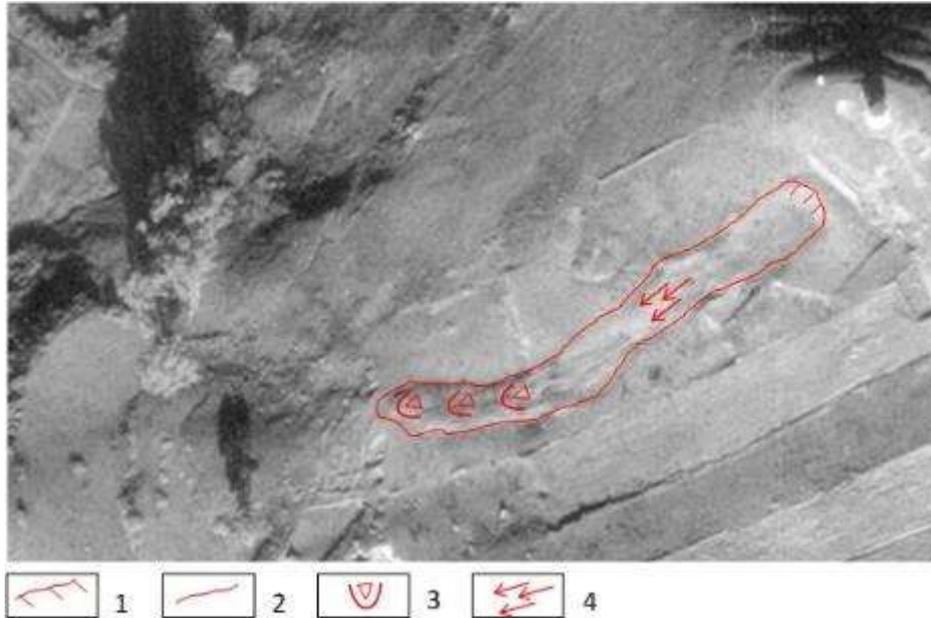


Figura 5 – Flujo de lama, vista de la fotografía aérea del 8 de diciembre de 1983 (Sky Mill). (1) Cicatriz principal; (2) Límite del material deslizado; (3) Borde y lengua de acumulación; (4) Sector preferente de transporte. Fuente: Oliveira (2012).

3. INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA EN LA CUENCA DEL RÍO GRANDE DA PIPA

3.1. INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA

La elaboración de un inventario de movimientos de ladera para la cuenca del RGP tenía como objetivo principal la definición de un inventario geomorfológico de base multitemporal. Para ello, se utilizaron encuestas sistemáticas y reconocimientos de campo, apoyados por la cartografía geomorfológica de la inestabilidad en fotografías aéreas y ortofotomapas a escala 1:2.000. También se utilizaron referencias bibliográficas, la interpretación geomorfológica de un modelo numérico de elevación (NEM), modelos de relieve superpuestos y altimetría a escala 1:10.000..

3.2. MÉTODOS UTILIZADOS EN EL INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA

3.2.1. TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo incluyó el estudio geomorfológico sistemático de los movimientos de ladera para toda la zona de la cuenca del RGP, apoyado por la cartografía en ortofotomapas a escala 1:10 000, con una resolución de 0,5 m reproducida a la escala de referencia 1:2000. Para ello, la zona de estudio se dividió en subcuencas y éstas se seccionaron en rectángulos de aproximadamente 0,44 km² (501 mapas de 800 m x 550 m) (Fig. 6).

Un procedimiento habitual en el uso de ortofotomapas es la consideración de una imagen base (Walstra *et al.*, 2007). Esto garantiza que la información añadida a los ortofotomapas está corregida geoméricamente, lo que facilita las comparaciones entre mapas/ ortofotomapas de diferentes épocas. En el caso de los ortofotomapas, la cartografía puede presentar una ligera exageración en los errores verticales y minimizar los errores planimétricos. Para ello se determinó que la imagen base corresponde al ortofotograma elaborado por el Instituto Geográfico Portugués (IGP, actual Dirección General del Territorio), con fecha de 2004.

El trabajo de campo se realizó entre marzo de 2006 y finales de 2009, aunque de forma discontinua. Además, se realizaron varias salidas de campo de reconocimiento e inventario, hasta el día de hoy, tras episodios de lluvia que superaron los umbrales críticos regionales (intensidad/duración) definidos para la estación udométrica de São Julião do Tojal (por ejemplo, Zêzere *et al.*, 2008).

Factores como la variación en el momento en que se realizó la encuesta, las diferencias en el estado fenológico de las plantas, la humedad del suelo o la época del año, resultaron fundamentales para la identificación y la cartografía de algunos movimientos

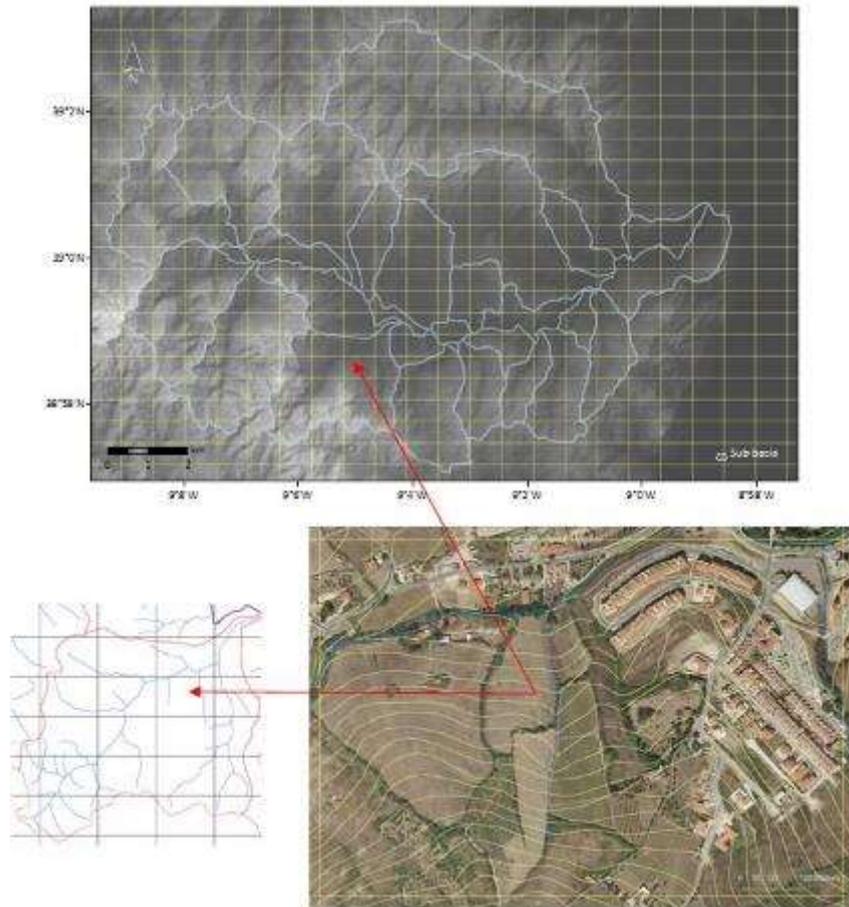


Figura 6 – Seccionamiento de la cuenca del RGP en hojas de campo a escala 1:2000 y extracto de mapa de campo (ampliación de ortofoto y altimetría a escala 1:10 000). Fuente: Oliveira (2012).

En la zona de estudio hay más de 400 registros de daños en carreteras y edificios relacionados con la ocurrencia de movimientos de ladera superficiales y profundos. Estos daños estructurales/no estructurales en elementos construidos (por ejemplo, casas, carreteras), así como otros registros de deformación en elementos naturales (Fig. 7), jugaron un papel fundamental en la identificación y delimitación de los movimientos de ladera en la zona de estudio. La razón está relacionada con la existencia de un régimen de precipitaciones caracterizado por una gran irregularidad interanual, con más de una docena de años entre eventos de inestabilidad provocados por precipitaciones de relevancia regional. De este modo, el inventario de los movimientos de ladera se ve dificultado por la ausencia de cicatrices "frescas", grietas de tracción en zonas

deformadas, flancos o límites de movimientos de ladera bien conservados.



Figura 8 – Daños estructurales o tipos de deformación utilizados para definir y delimitar los diferentes tipos de movimientos de ladera en la cuenca del RGP. (A) Fractura oblicua en viviendas; (B) Fracturas con desplazamiento horizontal; (C) Inclinación de viviendas; (D) Fractura vertical en viviendas; (E) Desconexión en muros limitadores de la propiedad; (F) Fractura vertical de muros; (G) Fractura vertical de muros con traslación; (H) Deformación brusca de muros y pavimentos; (I) Inclinación de árboles; (J) Fracturas y deformación de pozos; (K) Fractura parabólica en carretera; (L) Fractura de carretera con desconexión; (M) Fractura perpendicular a la dirección de la carretera; (N) Fractura paralela a la carretera; (O) Fractura transversal en pavimento. Adaptado de Oliveira et al. (2015).

La identificación de la fecha de ocurrencia fue uno de los principales problemas encontrados en el inventario de los movimientos de ladera identificados mediante el trabajo de campo. En la Fig. 8 se representa un extracto de un mapa de campo con el estudio geomorfológico realizado y la respectiva fotografía de campo. A cada movimiento de ladera se le asignó un código (ID), se completó un informe de campo simplificado y se realizó la respectiva documentación fotográfica.



Figura 8 – Extracto del mapa de campo y de la respectiva vista panorámica de la zona inestabilizada. Subcuenca del Zibreira - Cuenca del Río Grande da Pipa. Fonte: Oliveira (2012).

3.2.2.FOTOINTERPRETACIÓN DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS Y ORTOFOTOMAPAS

Las fotografías aéreas corresponden a la principal fuente de información utilizada para cartografiar la ubicación, el tipo y la causa de los movimientos de ladera (Brabb, 1991). Las técnicas de extracción de información relevante de las fotografías aéreas se basan en dos principios fundamentales: el análisis cualitativo apoyado en la Fotointerpretación Aérea (API - Aerial Photo-interpretation), sin que las fotografías hayan sido corregidas geométricamente; la fotointerpretación y el análisis cuantitativo

apoyado en la aplicación de técnicas fotogramétricas (e.g. Wolf, 1983; Zanutta et al., 2006; Walstra *et al.*, 2007a).

La metodología utilizada en la zona de estudio se basó esencialmente en la interpretación monoscópica de ortofotomapas y fotografías aéreas, recurriendo siempre que fue necesario a la validación estereoscópica de los movimientos de ladera, cuando se utilizaron fotografías aéreas. Las formas naturales tienden a seguir una configuración distinta de las formas culturales (humanas), que suelen ser geométricas, con líneas rectas, ángulos agudos y formas regulares (Aber *et al.*, 2010) y, por tanto, distinguibles. En el caso de la interpretación monoscópica, la presencia de sombras ayuda a la fotointerpretación mediante la percepción de la profundidad. Las imágenes sin sombras suelen ser más difíciles de interpretar, aunque el exceso de sombras puede oscurecer y disminuir el contraste de los elementos de interés (Aber *et al.*, 2010).

Para la elaboración de los inventarios de movimientos de ladera de la cuenca del RGP, se utilizó un conjunto de documentos en formato digital que se enumeran y describen en la Tabla 1.

Tabla 1 – Documentos digitais (ortofotomapas e coberturas de fotografias aéreas) utilizados para fotointerpretação de movimentos de vertente na bacia do RGP.

Designação	Data	Tipo de Documento	Entidade	Escala	DF	Formato
Voo 1983 (Vale do Tejo)	08-13 Dez1983	Fotografia Aérea pancromática	FAP	1:15 000	UAg 1023 151,99	Digital
Voo 1989 (Península de Lisboa)	02 Mai1989	Fotografia Aérea pancromática	FAP	1:15 000	UAg 1071 152,31	Digital
Voo 1989 (Península de Lisboa)	15 Mai1989	Fotografia Aérea pancromática	FAP	1:15 000	UAg 1203 151,99	Digital
Orto 2004	2003	Ortofotomapa COR	CMAV	1:10 000	-----	Digital
Orto 2005	2004	Ortofotomapa COR	IGP	1:10 000	-----	Digital
Orto 2007	2007	Ortofotomapa COR	IGP	1:10 000	-----	Digital
Orto 2012	2012	Ortofotomapa COR	IGP	1:10.000	-----	Digital

- Georreferenciación de fotografías aéreas

Ante la imposibilidad de utilizar técnicas fotogramétricas para procesar la información observada en las fotografías aéreas, se adoptó un procedimiento que garantizara, por un lado, la correcta identificación de los movimientos y, por otro, que la transferencia de la información a formato digital estuviera acompañada de los menores errores posibles (georreferenciación y corrección parcial de la deformación asociada a la proyección central de las fotografías). La experiencia adquirida con el trabajo de campo permitió identificar la mayoría de los movimientos sin utilizar la estereoscopia, en particular en el vuelo de 1983.

El proceso de georreferenciación se realizó con ArcGIS v9.3.1® y consistió en tres etapas distintas: posicionamiento, triangulación y corrección geométrica. En la primera etapa de posicionamiento, se identificó previamente un conjunto de puntos de control en la imagen de referencia (en este caso, el mapa ortofotográfico IGP de 2004) con correspondencia en la fotografía aérea a georreferenciar (Fig. 9). En esta etapa inicial, un número mínimo de 10 puntos distribuidos espacialmente era suficiente para orientar la fotografía y fijarla a las coordenadas del mapa de ortofotos.



Figura 10 – Puntos de control (+ rojo) en la fotografía aérea y su correspondencia en la imagen de referencia, el mapa de ortofotos IGP de 2005. Fuente: Oliveira (2012).

En la segunda etapa de triangulación, la malla de puntos de control se amplía en función del número de movimientos identificados y de la rugosidad topográfica (pendiente, mando y forma de la

pendiente). El *software* del SIG permite ajustar los datos a una función polinómica, de primer, segundo o tercer orden, pero el mejor ajuste se consiguió mediante una transformación Spline. Este tipo de transformaciones se basa en un método de interpolación que estima los valores a través de una función matemática que minimiza la curva global de la superficie, dando como resultado una superficie suavizada que pasa exactamente por los puntos considerados.

La Fig. 10 muestra la ubicación de los 92 puntos de control utilizados en la georreferenciación de una de las fotografías aéreas del vuelo de 1983 (Fig. 11). Para cada movimiento se consideraron un mínimo de cuatro puntos, referidos a los límites de la propiedad donde se produce la inestabilidad, y este número puede aumentar para movimientos mayores y para zonas muy empinadas o accidentadas.

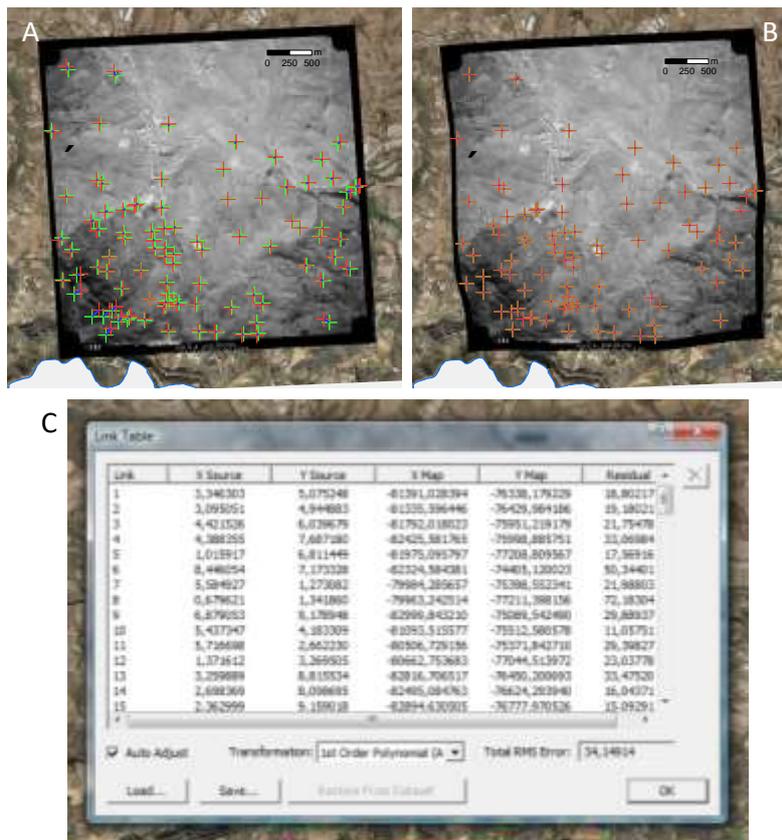


Figura 10 – Proceso de georreferenciación de las fotografías aéreas a través de una red de puntos de control basada en las coordenadas de cada punto en la imagen "fotografía aérea" y en la imagen de referencia "mapa ortofotográfico". A) Distribución de puntos de control, cada par de verde y rojo con signo + representa los errores de posicionamiento de la fotografía aérea en

relación con la imagen de referencia; B) Imagen ajustada mediante la aplicación de la función spline (los residuos en este caso son 0 m); C) matriz de errores antes de la aplicación de la función Spline. Fuente: Oliveira (2012).

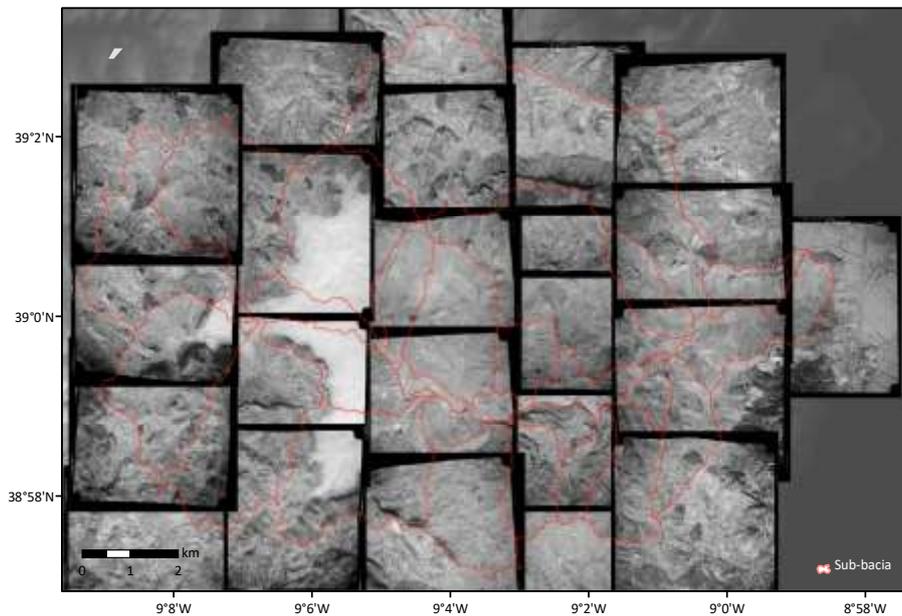


Figura 11 – Mosaico de fotografías aéreas creadas para el vuelo de 1983 en la zona de la cuenca del Río Grande da Pipa. Fuente: Oliveira (2012).

Como información auxiliar a la fotointerpretación, se utilizó la superposición altimétrica a escala 1:10 000. La presencia de elementos lineales o circulares que pueden confundirse fácilmente con las cicatrices de los movimientos de ladera puede validarse superponiendo las curvas de nivel y verificando la concordancia con el elemento identificado. Si un elemento lineal, que puede interpretarse como parte de una cicatriz, está alineado paralelamente a la línea de mayor pendiente de la ladera, se trata con toda seguridad de un barranco (Fig. 12).



Figura 12 – Exemplos de “falsos” elementos lineares que podem ser confundidos na fotointerpretação monoscópica com movimentos de vertente. Neste caso, pela sobreposição da altimetria facilmente se atribui o seu significado a processos de ravinamento. Fonte: Oliveira (2012).

- Inventario basado en la fotointerpretación de ortofotomapas

La interpretación de mapas ortofotográficos para la elaboración de inventarios de movimientos de ladera ha ganado protagonismo en los últimos tiempos debido a la facilidad con la que se obtienen, por la calidad de la imagen y por el hecho de que las imágenes ya están ortorectificadas. En el caso de la cuenca del RGP se utilizaron cuatro ortofotomapas de diferentes fechas (2003, 2004, 2007 y 2012).

La fotointerpretación dio como resultado la identificación de un número bastante reducido de movimientos de ladera (Fig. 13), debido principalmente a que corresponden a imágenes alejadas en el tiempo de las fechas de los principales eventos de inestabilidad regional con expresión en la zona de estudio. Estos movimientos de ladera se validaron posteriormente mediante el trabajo de campo.



Figura 13 – Ejemplo de un movimiento de ladera identificado a través de la fotointerpretación de un mapa ortofotográfico. Fuente: Oliveira (2012).

3.2.3. OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN

El inventario de movimientos de ladera tuvo en cuenta otras fuentes de información cartográfica y documental que ayudaron a hacer más completo el inventario de la cuenca del RGP.

La interpretación topográfica a partir de mapas de curvas de nivel, pendientes o mapas de relieve sombreado (*shaded relief*) constituye una técnica fundamental, junto con la fotointerpretación, en la determinación de la inestabilidad a escala regional y local (Wills y McCrink, 2002). En este sentido, se exploró el Modelo Numérico de Elevación (NEM), el mapa topográfico (altimetría a escala 1:10 000) y el modelo de relieve sombreado (*hillshade* con un acimut de 315° N y un ángulo de 45°) (Fig. 14).

Las fuentes documentales resultaron especialmente interesantes en el sentido de que permitieron redibujar algunos de los movimientos previamente cartografiados con el trabajo de campo (Fig. 15), cuyas marcas de inestabilidad estaban degradadas. Los tipos de documentos consultados fueron documentos académicos, informes y mapas de campo, y fotografías antiguas de campo.



Figura 14 – Modelo Numérico de Elevación (A), relevo sombreado (hillshade)(C) y mapa topográfico (D) utilizados en la identificación del movimiento de la pendiente (B). Fuente: Oliveira (2012).



Figura 15– Fuente de los movimientos de ladera a partir de fotografías (adaptadas de Matos, 2008) (A) o de la cartografía geomorfológica detallada (Machado, 1991) (B).

2. RESULTADOS

En la cuenca del Rio Grande da Pipa (RGP), se inventariaron 1434 movimientos de ladera (Fig. 16) que corresponden a un área total inestabilizada de 6.484.402,1 m², cerca del 5,9% del área de estudio (aproximadamente 110,6 km²) y una densidad de 13 movimientos de ladera/km². La densidad expresada por el área inestabilizada es de 58.629 m²/km². El tamaño medio de los movimientos cartografiados fue de 4.698 m², y el tamaño máximo y mínimo de los movimientos inventariados fue de 262.194 m² y 6,6 m², respectivamente.

Del análisis de la Fig. 16 se infiere la presencia de un cinturón de deformación, donde se producen preferentemente deslizamientos rotacionales, generalmente profundos y de mayores dimensiones. Los límites superior y exterior de este cinturón coinciden genéricamente con el contacto entre dos unidades litológicas: aguas arriba calizas coralinas compactas y aguas abajo un complejo de arcillas y margas con gruesas intercalaciones calcáreas (>800 m) (cf. Fig. 1).

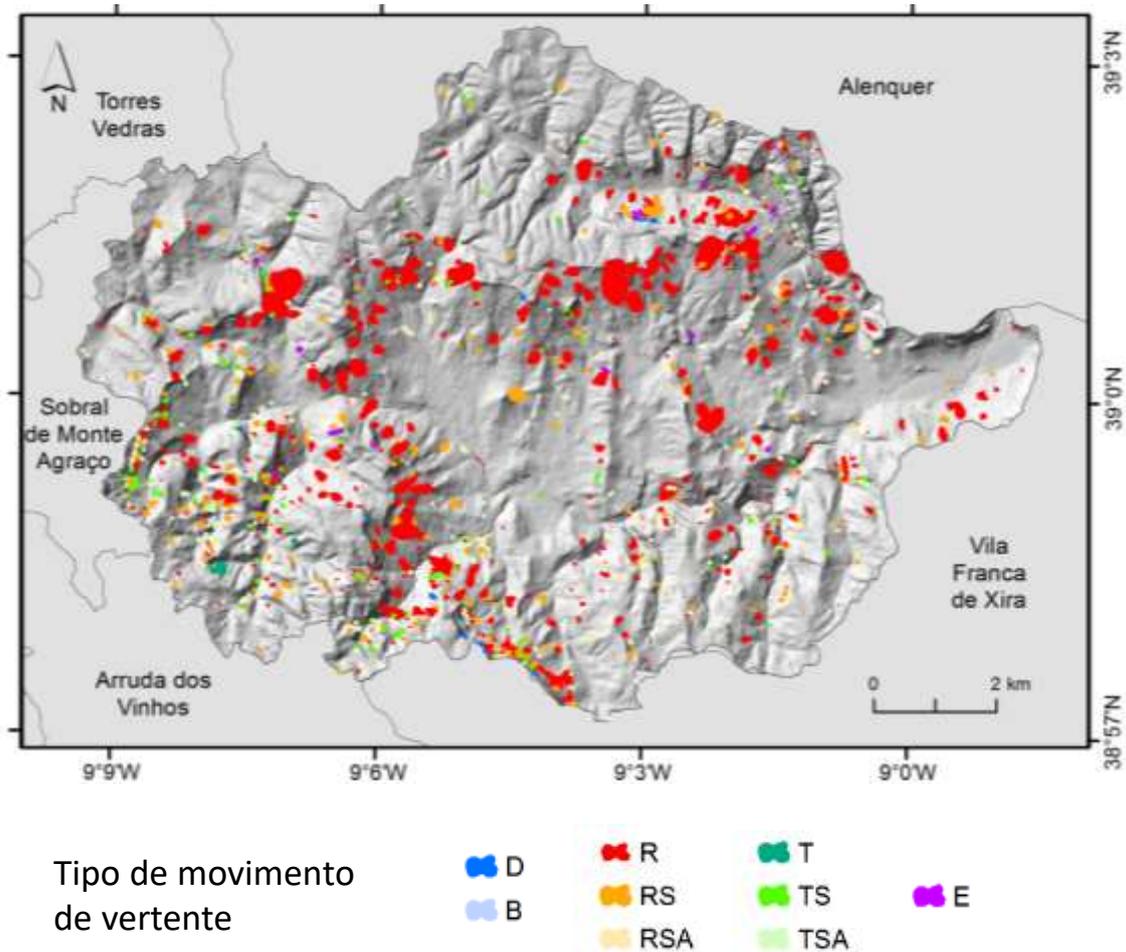


Figura 16 – Inventario de los 1434 movimientos de ladera, separados por tipo de movimiento. D) desabamiento; B) derrumbe; R) deslizamiento rotacional profundo; RS) deslizamiento rotacional superficial; RSA) deslizamiento rotacional superficial en talude antrópico; T) deslizamiento traslacional profundo; TS) deslizamiento traslacional superficial; TSA) deslizamiento traslacional superficial en talude antrópico; E) flujo.

Las figuras 17 y 18 muestran el peso relativo de cada tipo de movimiento de ladera en el conjunto de movimientos de ladera inventariados, en términos de número y de superficie inestable, respectivamente. El cuadro 2 sistematiza las características morfométricas y la densidad de los movimientos de ladera en la zona de estudio por tipo de movimiento de ladera.

Los deslizamientos rotacionales en su conjunto (R, RS y RSA) representan el 69% del total de la inestabilidad ocurrida en la cuenca, destacando los deslizamientos rotacionales profundos (R) con el 39,9% del número de ocurrencias. Los deslizamientos

rotacionales superficiales (RS) representan alrededor del 18,5% del número total de ocurrencias y los deslizamientos rotacionales superficiales que se originan en taludes antropogénicos (carreteras, caminos) (RSA) representan el 10,5% de los movimientos de ladera identificados en la cuenca del RGP. Los deslizamientos traslacionales superficiales (TS) también están bien representados en número, con un 11,4% del total de ocurrencias y los deslizamientos traslacionales superficiales en taludes construidos (TSA), con un 15,2% del total de ocurrencias. Los restantes tipos de movimiento de ladera no superan el 4,5% del total de ocurrencias (D, B, T, E) (Figura 17; Tabla 2).

En cuanto al área de inestabilidad, los deslizamientos rotacionales en su conjunto son responsables del 98% del área de inestabilidad en la cuenca del RGP (Fig. 18), correspondiendo el 93,1% a deslizamientos rotacionales profundos (R).

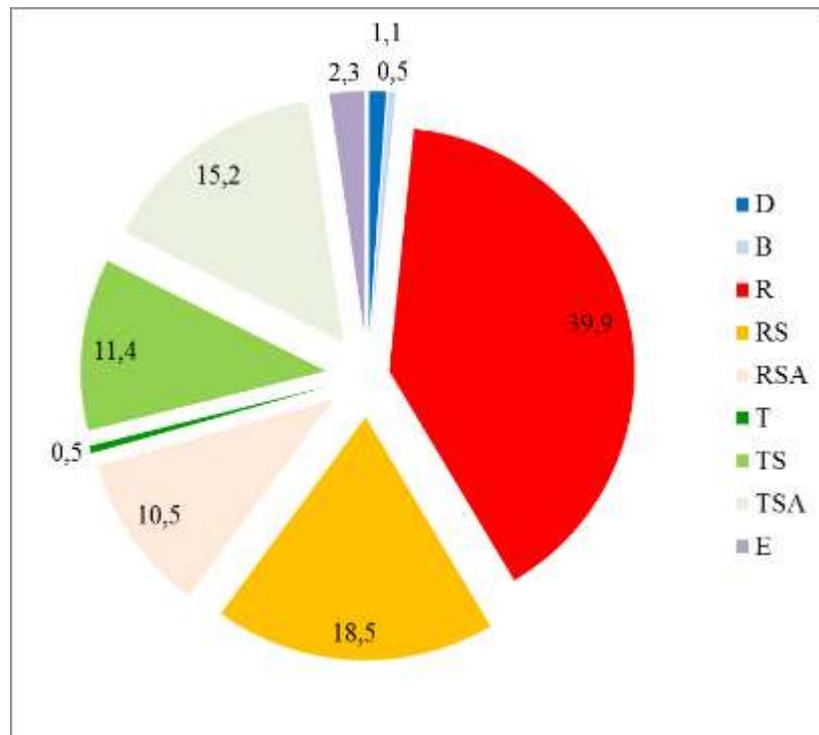


Figura 17 – Frecuencia relativa (%) del número de movimientos de ladera por tipo de movimiento. D) desabamiento; B) derrumbe; R) deslizamiento rotacional profundo; RS) deslizamiento rotacional superficial; RSA) deslizamiento rotacional superficial en talude antrópico; T) deslizamiento traslacional profundo; TS) deslizamiento traslacional superficial; TSA) deslizamiento traslacional superficial en talude antrópico; E) flujo

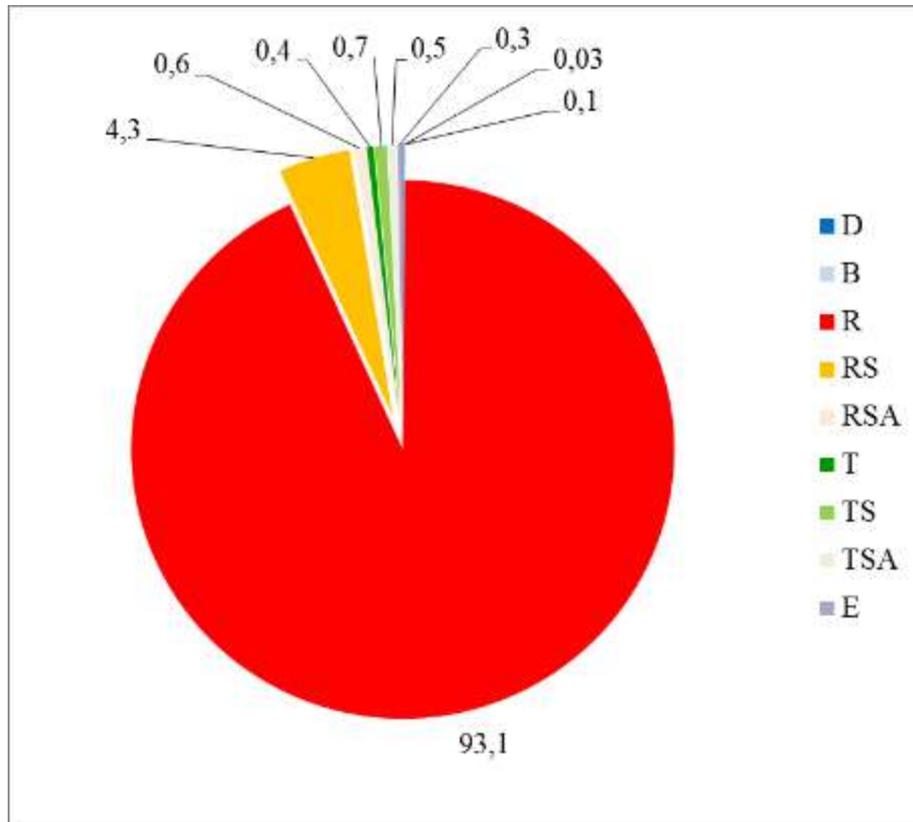


Figura 18 – Frecuencia relativa de la zona inestable por tipo de movimiento de ladera (%). D) desabamiento; B) derrumbe; R) deslizamiento rotacional profundo; RS) deslizamiento rotacional superficial; RSA) deslizamiento rotacional superficial en talude antrópico; T) deslizamiento traslacional profundo; TS) deslizamiento traslacional superficial; TSA) deslizamiento traslacional superficial en talude antrópico; E) flujo

Tabla 2 – Principales características morfométricas y de densidad de los diferentes tipos de movimientos de ladera inventariados en la cuenca del Río Grande da Pipa.

	D	B	R	RS	RSA	T	TS	TSA	E	TOTAL
# mov. vertente	16,0	7,0	572	266	151,0	7,0	164,0	218,0	33,0	1434
# mov. vertente/km ²	0,1	0,1	5,2	2,4	1,4	0,06	1,5	2,0	0,3	13
Área total (m ²)	5814,0	1774,6	6034204	277399	41618,8	26463,7	46164,3	31930,4	19033,2	6484402,1
Área total (m ²)/km ²	52,6	16,0	54558,8	2508,1	376,3	239,3	417,4	288,7	172,1	58629,3
Área mínima (m ²)	34,8	28,2	46,4	33,9	7,7	272,6	12,4	6,6	46,5	6,6
Área máxima (m ²)	1232,0	1149,3	262194,4	14720,3	1837,0	15689,5	2815,2	2926,0	2892,6	262194,4
Área média (m ²)	363,4	253,5	10969,4	1090,1	275,6	3780,5	281,5	146,5	576,8	4698,2
Desvio padrão (m ²)	334,5	371,7	22742,3	1519,4	315,0	5054,9	354,6	295,2	617,8	15203,8

3. CONCLUSIONES

La cuenca del Río Grande da Pipa corresponde, desde el punto de vista geomorfológico, a una de las zonas con mayor propensión a la ocurrencia de movimientos de ladera, tanto a nivel regional como nacional. Un contexto geológico dominado por la presencia de rocas blandas de gran deformabilidad y rocas dúctiles más resistentes, estructuras plegadas o monoclinales y pendientes moderadas favorece la aparición de las manifestaciones de inestabilidad.

En la zona de estudio se inventariaron más de 1400 movimientos de ladera mediante trabajo de campo y fotointerpretación. Afectan a una superficie superior a 6 km² y su densidad es de 13 movimientos de ladera/km². Los deslizamientos rotacionales representan casi el 70% de las manifestaciones de inestabilidad, y el 98% de la superficie inestabilizada, más de la mitad de los cuales son deslizamientos rotacionales profundos, y son responsables de altos niveles de daños en carreteras y edificios. Los deslizamientos superficiales (rotacionales y traslacionales) que se producen en laderas naturales y terraplenes representan los tipos de movimiento de ladera más frecuentes en la cuenca (55% de los casos). Los flujos, los desahucios y los derrumbes tienen una expresión reducida en la zona de estudio.

Los productos cartográficos basados en la aerofotogrametría, la teledetección y la cartografía topográfica básica, verificados por el trabajo de campo, son herramientas esenciales en el inventario de los procesos de movimiento de laderas.

Se han realizado inventarios de movimientos de ladera para otras áreas de estudio en Portugal en el proyecto RISKCOAST y siguen un enfoque similar al caso de estudio presentado en este informe, debidamente adaptado a su contexto geomorfológico.

4. REFERENCIAS

Aber, J.S.; Marzloff, I.; Ries, J. B. (2010) – Small-format aerial photography. Principles, techniques and geosciences applications. Elsevier.

Brabb. E.E. (1991) The world landslide problem. Episodes, 14-1: 52-61.

Cruden, D. M.; Varnes, D. J. (1996) – Landslide types and processes in Turner, A. K.; Schuster, R. L. (Eds.), Landslides investigation and mitigation. Transportation Research Board. National Academic Press, Washington D. C.. Special Report 247: 36 – 75.

Dikau, R.; Brunnsden, D.; Schrott, L.; Ibsen, M.-L. (Eds.) (1996a) - Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes. John Wiley & Sons, Chichester.

Dikau, R.; Schrott, L.; Dehn, M, (1996b) - Topple in Dikau, R.; Brunnsden, D.; Schrott, L.; Ibsen, M.-L. (Eds.), Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes. John Wiley & Sons, Chichester: 29 - 41.

Guzzetti, F. (2005) – Landslide hazard and risk assessment – concepts, methods and tools for the detection and mapping of landslides, for landslides susceptibility zonation and hazard assessment, and for landslide risk evaluation. Dissertação de doutoramento apresentada à Mathematchinaturwissenschaftlichen Fakultät da Rheinischen Friedrich-Wilhelms, Universidade de Bona.

Guzzetti, F.; Cardinali, M.; Reichenbach, P.; Carrara, A. (2000) – Comparing landslide maps: A case study in the Upper Tiber River Basin, Central Italy. Environmental Management. 25(3): 247-263.

Guzzetti, F.; Mondini, A. C.; Cardinali, M.; Fiorucci, F.; Santangelo, M.; Chang, K. T. (2012) - Landslide inventory maps: new tools for and old problem. Earth-Science Reviews. 112: 42 - 66. doi: 10.1016/j.earscirev.2012.02.001

Hantz, D.; Vengeon, J.M.; Dussauge-Peisser, C. (2003) – An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. Natural Hazard and Earth System Sciences. 3:1-9.

Ibsen, M.-L.; Brunsden, D.; Bromhead, E.; Collison, A. (1996b) – Slab slide in Dikau, R.; Brunsden, D.; Schrott, L.; Ibsen, M.-L. (Eds.) *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. John Wiley & Sons, Chichester. 78-84.

IGS-WP/WLI – International Geotechnical Societies e Working Party on World Landslide Inventory (1990) - A suggested method for reporting a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. 41: 5 – 12.

Machado, M. J. (1991) - Contribuição para o estudo da bacia-vertente do Rio Grande da Pipa. Universidade de Lisboa.

Matos, L. M. P. de (2008) – Estabilidade de taludes em rochas silto-argilosas – Técnicas de remediação para roturas superficiais. Dissertação de mestrado em Geologia, especialização em Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território, apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Parise, M. (2001) – Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. *Physics and Chemistry of the Earth*. 26(9): 697-703.

Rib, H. T.; Liang, T. (1978) - Recognition and identification, in Schuster, R. L. and Krizek, R. J. (Eds.) *Landslide Analysis and Control*, National Academy of Sciences, Transportation Research Board Special Report 176, Washington, 34–80

Soeters, R.; van Westen, C. L. (1996) – Slope instability recognition, analysis, and zonation in Turner, A. K.; Schuster, R. L. (Eds.), *Landslides investigation and mitigation*. Transportation Research Board. National Academic Press, Washington D. C.. Special Report 247: 129 – 177.

van Westen, C. J.; van Asch, T. W. J.; Soeters, R. (2006) - Landslide hazards and risk zonation - why is it still so difficult?. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 65: 167 – 184.

Varnes, D. J. (1978) – Slope movement types and processes in Schuster, R. L.; Krizek, R. J. (Eds.) *Landslides analysis and control*. Transportation Research Board Special Report. Washington D. C. 176: 11 – 33.

Varnes, D. J.; International Association of Engineering Geology – Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes (1984) – Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. UNESCO, Paris.

Walstra, J.; Chandler, J.H.; Dixon, N.; Dijkstra, T.A. (2004) – Extracting landslide movements from historical aerial photographs in Lacerda, W.; Ehrlich, M.; Fontoura, S.; Sayão, A. (Eds.) Landslides: Evaluation and Stabilization. Vol. I. Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides, A.A. Balkema Publishers, Leiden: 843-850.

Walstra, J.; Dixon, N. & Chandler, J.H. (2007a) – Historical aerial photographs for landslide assessment: two case histories. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrology. Geological Society of London. 40: 315-332.

Walstra, J.; Chandler, J.H.; Dixon, N. & Dijkstra, T.A. (2007b) – Aerial photography and digital photogrammetry for landslide monitoring in Teeuw, R.M. (Ed.) Mapping Hazardous Terrain using remote sensing. Geological Society, London, Special publications, 283: 53-63.

Wills, C. J.; McCrink, T. P. (2002) – Comparing landslide inventories: The map depends on the method. Environmental & Engineering Geoscience. The Geological Society of America. Vol. VIII-4: 279-293.

Wolf, P.R. (1983) Elements of Photogrammetry, with air photo interpretation and remote sensing. Second edition, McGraw-Hill Book Company, New York.

WP/WLI – (International Geotechnical Societies) Working Party on World Landslide Inventory, UNESCO (1993a). A suggested method for describing the activity of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. 47: 53-57.

WP/WLI – (International Geotechnical Societies) Working Party on World Landslide Inventory, UNESCO (1993b). Multilingual landslide glossary. International Geotechnical Societies .

Zanutta, A.; Baldi, P.; Bitelli, G.; Cardinali, M.; Carrara, A. (2006) – Qualitative and quantitative photogrammetric techniques for multi-temporal landslide analysis. Annals of Geophysics. 49(4/5): 1067-1080.

Zêzere, J. L. (1997) – Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa. Dissertação de doutoramento em Geografia Física apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. Lisboa.