

## **VULNERABILIDAD DE EDIFICIOS FRENTE A DESLIZAMIENTOS Y DESPRENDIMIENTOS**

**O. Mavrouli**

Department of Earth Systems Analysis  
Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC)  
University of Twente, Países Bajos

### **RESUMEN**

*Los daños causados a edificios por inestabilidades de taludes son fenómenos frecuentes que conllevan pérdidas importantes. En la presente comunicación se exponen los principales aspectos de la vulnerabilidad de edificios frente a deslizamientos y desprendimientos rocosos. Se revisan las herramientas y los métodos existentes para la evaluación de la vulnerabilidad haciendo énfasis en los avances de los últimos años. Al final se presenta una metodología analítica para la evaluación de la vulnerabilidad de mamposterías ante impactos de bloques de rocas y el cálculo de curvas de fragilidad.*

### **1. INTRODUCCIÓN**

Los daños a edificios por inestabilidades de taludes son fenómenos frecuentes en España y en todo el mundo. Dos ejemplos de este último año son los edificios afectados en Alcalá del Júcar en la provincia de Albacete, y en Alcañiz en Zaragoza, por deslizamientos de roca y de tierra, respectivamente. La previsión de pérdidas por estos fenómenos en España para el periodo 1986-2016 se estimó, para una hipótesis de riesgo medio, en más de 4500 millones de euros (Ayala-Carcedo et al. 1987), una parte de las cuales se atribuye a desperfectos y colapsos de edificios. A escala global, las pérdidas por daños a edificios implican zonas enteras afectadas por deslizamientos como en la caso reciente del desastre de Mocoa, Colombia (UN 2017). La expansión demográfica en las zonas montañosas y el desarrollo de complejos turísticos y residenciales en zonas caracterizadas por inestabilidades de terreno, tienen como resultado un aumento del riesgo y de las pérdidas potenciales. La Figura 1 presenta edificios dañados por diferentes tipos de deslizamientos/desprendimientos.



Figura 1 Edificios dañados por (a) desprendimientos rocosos en Nepal 2015, (b) corrientes de derrubios en California EU 2010 (fuente USGS), y (c) deslizamiento rotacional en el Reino Unido 1993 (fuente BGS)

La dificultad para establecer estas metodologías está relacionada con la variabilidad de las acciones que pueden afectar una estructura, y que dependen por el tipo de deslizamiento, su magnitud e intensidad, tal como la tipología y resistencia de la estructura y su interacción con la masa de suelo/roca.

Debido a las incertidumbres epistémicas y aleatorias que están relacionadas con estos parámetros, la evaluación de vulnerabilidad de edificios en zonas afectadas por deslizamientos y desprendimientos rocosos no es trivial (Reichenbach et al. 2005, Roberds 2005). En este sentido, la vulnerabilidad de un edificio, en términos de daño esperado ante un escenario de peligro, puede variar mucho. La escasez de datos que refieren a la intensidad de los fenómenos en eventos reales y la dificultad para reconstruir estos eventos con precisión, complican más estas estimaciones.

Para poder incorporar la variación de las pérdidas potenciales en la evaluación cuantitativa del riesgo por deslizamientos y desprendimientos, necesitamos metodologías que asocien el tipo y la intensidad de las acciones inducidas por estos con los daños esperados. Mientras IUGS

(1997) and Hollenstein (2005) destacaban la falta de estas metodologías, los avances relacionados con la caracterización y el análisis de deslizamientos/desprendimientos durante los últimos años, han permitido recopilar datos más detallados sobre la ocurrencia e intensidad de los fenómenos y asociarlos con desperfectos observados en edificios. De tal manera, las evaluaciones de vulnerabilidad basadas en criterio experto han sido gradualmente sustituidas por análisis de evidencias de daños en eventos reales, a veces incluyendo información cuantitativa sobre el tamaño y la intensidad, de las características de las estructuras y del daño causado.

Trabajos recientes sobre la vulnerabilidad de edificios a deslizamientos/desprendimientos emplean los avances en las tecnologías de teledetección, como el láser escáner terrestre, los modelos 3D por fotogrametría, o las imágenes satelitales, para caracterizar los daños y, en una segunda fase, asociarlos con la intensidad de los fenómenos de inestabilidad y calcular curvas de vulnerabilidad/fragilidad. Asimismo, el número de trabajos sobre el análisis de daños a partir de métodos numéricos se ha extendido. La interacción de suelo/roca con las estructuras por impacto se está estudiando en detalle y se contrasta con modelos experimentales.

En esta comunicación se presentan las herramientas y los métodos que actualmente se usan para evaluar la vulnerabilidad ante varios tipos de inestabilidad de taludes, para diversas escalas de análisis, y se destacan algunos de los avances de los últimos años.

## **2. VULNERABILIDAD Y DAÑOS A EDIFICIOS AFECTADOS POR DESLIZAMIENTOS Y DESPRENDIMIENTOS**

La definición de vulnerabilidad varía según el marco conceptual. Desde la perspectiva de las ciencias naturales, la vulnerabilidad se define como el grado de pérdida de un elemento o un grupo de elementos, en este caso situados en un área (potencialmente) afectada por deslizamientos/desprendimientos. Para una propiedad, la pérdida corresponde al coste de la reparación o sustitución, con respecto a su valor total. Así, la vulnerabilidad toma valores entre 0 (sin daño) y 1 (colapso total) (UNDRO 1984).

Fuchs et al. (2007), Tapsell et al. (2010) y Ciurean et al (2017) presentaron diversas definiciones de vulnerabilidad, según la escala y el objetivo del análisis. La vulnerabilidad se puede expresar en términos del nivel de daño esperado, desde daño ligero y no estructural hasta colapso total de un edificio.

Sin embargo, las escalas que se usan para la descripción de daños por deslizamientos/desprendimientos varían, y en algunos casos corresponden a las mismas escalas de daño y estados límite que se emplean para evaluar el daño sísmico. La Escala Europea Macrosísmica (European Macroseismic Scale 1998) es la más común. Alexander (1986) propuso una escala ordinal con siete niveles de daño, y asoció cada nivel con una serie de parámetros estructurales (rotura, distorsión, rotación, estado de cimentación), indicando para cada nivel los requerimientos de reparación y/o evacuación. La vulnerabilidad hace referencia

no solo al grado de la pérdida sino también a la propensión de un elemento a padecer una cierta pérdida, para una cierta intensidad del fenómeno. En este sentido, la vulnerabilidad ante deslizamientos se puede expresar por la ecuación (1) (Einstein 1998).

$$V_L = P(D_L \geq 0|L), \quad (0 \leq D_L \leq 1) \quad (1)$$

Los modelos de riesgo y sus respectivos enfoques metodológicos para la vulnerabilidad se pueden clasificar en cualitativos (Cardinali et al. 2002, Maquaire et al. 2004), semi-cuantitativos y cuantitativos. Los métodos semi-cuantitativos como los modelos de indicadores, son flexibles y pueden ser fácilmente entendidos por los responsables (Ciurean et al. 2013). Su limitación es que no siempre asocian los niveles de daño con la intensidad del fenómeno de manera cuantitativa. Los métodos cuantitativos suelen aplicarse a escala local y permiten la incorporación de incertidumbres, sean aleatorias o epistémicas. Sus resultados sirven además para la Evaluación Cuantitativa del Riesgo (ECR).

Los descriptores cuantitativos más comunes que se usan para la vulnerabilidad física de las estructuras son (a) los índices y matrices de daño/vulnerabilidad, los cuales proporcionan el nivel de daño observado/esperado para una determinada intensidad del peligro (Leone et al. 1996); (b) las curvas de vulnerabilidad, las cuales matemáticamente expresan la relación entre intensidad y nivel promedio de daño esperado (Papathoma-Köhle et al., 2012); y (c) las curvas de fragilidad que proporcionan la probabilidad condicional de exceder un cierto nivel de daño para una determinada intensidad del peligro (Mavrouli et al. 2014).

Dado que expresan la vulnerabilidad en términos probabilistas, las curvas de fragilidad incorporan las incertidumbres relacionadas con la evaluación del daño. Inicialmente se aplicaron para la vulnerabilidad sísmica (e.g. ATC 1985, Shinozuka et al. 2000, Cornell et al. 2002, Nielson and DesRoches 2007, Porter et al. 2007) y posteriormente se adaptaron a deslizamientos y desprendimientos (Mavrouli et al. 2014).

Los matrices de daño/vulnerabilidad y las curvas de vulnerabilidad/fragilidad se calculan por el análisis estadístico de daños y pérdidas, evaluados por criterio experto, procedentes de datos empíricos o modelos analíticos.

El tipo de deslizamiento/desprendimiento y la tipología de los edificios son parámetros clave para la evaluación de las pérdidas. Cruden y Varnes (1996) clasificaron los daños observados en edificios situados en áreas afectadas por inestabilidad de taludes según la velocidad del movimiento. Aquí, para presentar las metodologías para la evaluación cuantitativa de daños en edificios, clasificamos las inestabilidades de taludes en deslizamientos lentos y rápidos: corrientes de derrubios y desprendimientos rocosos. Para cada tipo, tanto la velocidad, como el material movilizado y la mecánica del movimiento varían.

Respecto a la tipología de los edificios, los parámetros principales que determinan la vulnerabilidad estructural de un edificio ante un deslizamiento/desprendimiento son su sistema

estructural, las propiedades de los materiales y las dimensiones de los elementos estructurales, el nivel de cumplimiento con las normas de diseño, la cimentación, el estado de mantenimiento, la calidad de la construcción, el número de plantas, y las aperturas en la superficie exterior como zonas débiles (van Westen 2008, Vega y Hidalgo 2016). Las acciones de un deslizamiento/desprendimiento sobre un edificio y su intensidad dependen de la ubicación geográfica del edificio sobre el área afectada por el deslizamiento/desprendimiento (escarpe, zona de transporte, pie del talud, zona de deposición, y distancia de los límites del deslizamiento). Otro parámetro importante es el punto o el área de aplicación de las fuerzas inducidas por el deslizamiento/desprendimiento sobre el edificio y su importancia para la estabilidad general del edificio. Dichas áreas son las superficies externas de la estructura (incluyendo elementos estructurales y no estructurales), el techo y la cimentación.

Para análisis a escalas menores, es posible asumir que eventos de magnitud similar producen el mismo nivel de daño. Sin embargo, para escalas más detalladas (a nivel del edificio), debe considerarse el punto de impacto sobre elementos clave para la estabilidad del edificio (p.ej. las columnas), especialmente cuando los impactos se deben a deslizamientos rápidos (corrientes de derrubios o bloques de roca). Esto se aplica en especial para estructuras de pórticos, donde el daño de una columna puede desencadenar una cascada de roturas. Las mamposterías tienen menor potencial de colapso progresivo por su sistema híper-estático. Asimismo, para impactos de suelo/roca sobre los elementos exteriores de un edificio la “jerarquía de las resistencias” entre los elementos estructurales y no estructurales y la absorción de la energía de impacto de forma proporcional, afectarán el daño producido.

Mientras la mayoría de las pérdidas estructurales ocurren por movimientos de masa rápidos, como las corrientes de derrubios o los desprendimientos rocosos, los efectos adversos de los deslizamientos lentos sobre los edificios pueden ser también importantes (Mansour et al. 2011). Los daños en este caso se deben a los desplazamientos acumulativos permanentes (absolutos o diferenciales) del edificio a causa de los desplazamientos del terreno. El estado de las tensiones y deformaciones como resultado de la deformación del terreno dependen en primer lugar, por la tipología de la cimentación (zapatas aisladas, zapatas corridas, losas, pilotes). Para similares deformaciones en el terreno, los daños se manifiestan menos en estructuras flexibles que en estructuras más rígidas, por el hecho de que las estructuras flexibles pueden tolerar un cierto nivel de deformación manteniendo su funcionalidad (AGS 2007). Por lo contrario, las cimentaciones rígidas permiten la rotación del edificio como un cuerpo rígido, y por lo tanto, suelen ser menos vulnerables que las cimentaciones flexibles (Bird et al. 2006).

Cada deslizamiento actúa sobre un edificio con una cierta combinación de tensiones. Estas dependen del tipo de movimiento del deslizamiento (rotacional, translacional, flujo o impacto). Burland y Wroth (1975) clasificaron la deformación de una cimentación por asentamientos en reducción y compresión, asentamientos, asentamientos diferenciales, inclinación, rotación, rotación relativa, deformación angular y deflexión relativa. Estas deformaciones se aplican de igual forma para deslizamientos, y se añade la pérdida de soporte por socavación (frecuente para edificios situados en la cresta de los deslizamientos).

No obstante el daño y las fisuras suelen concentrarse en las conexiones entre elementos estructurales y en las zonas débiles como aperturas de puertas y ventanas, como para edificios afectados por subsidencia (Institution of Structural Engineers 1994, Audell 1996). Los desplazamientos pueden ser verticales y/u horizontales por lo que el patrón de las tensiones es extremadamente complicado (Cooper 2008). Los daños en la infraestructura que rodea un edificio (p. ej. calzada) puede ser indicativo de la dirección e intensidad del movimiento. Palmisano et al. (2015) presentaron una metodología para valorar los daños de mamposterías y estructuras de hormigón armado por deslizamientos lentos, basado en el análisis del patrón de las grietas. Su aplicación en una zona de estudio en los Apeninos de Italia demostró que los edificios situados en la cresta de los deslizamientos o cerca de ella, resultan más afectados que los que están dentro del cuerpo del deslizamiento.

### **3. METODOS PARA LA EVALUACION CUANTITATIVA DE LA VULNERABILIDAD**

Actualmente, no existen metodologías unificadas para la evaluación y clasificación cuantitativa de la vulnerabilidad de edificios frente a diversos tipos y magnitud/intensidad de deslizamientos/desprendimientos (Crozier y Glade 2005). Los métodos y las escalas para valorar el daño y la vulnerabilidad no son estandarizados (Galli y Guzzetti 2007), especialmente en áreas extensas (Cardinali et al. 2002, Reichenbach et al. 2005).

Los modelos que se usan para evaluar los niveles de daño se pueden clasificar en heurísticos, empíricos y analíticos (por análisis de procesos y modelos físicos).

Los métodos heurísticos proporcionan valores discretos de vulnerabilidad para diversos tipos de deslizamientos y un rango de intensidades. Bell y Glade (2004) propusieron valores para tres niveles de magnitud de corrientes de derrubios y desprendimientos rocosos. Guillard-Gonçalves et al. (2012) propusieron valores para grandes deslizamientos. Estos valores tienen en cuenta daños estructurales y no estructurales y son proporcionales a la pérdida económica observada/anticipada.

Durante los últimos años se ha notado un incremento en el registro de daños posterior a los desastres y por consiguiente también en los trabajos sobre la vulnerabilidad de edificios sometidos a movimientos de masa los cuales requieren datos empíricos. Aquí se destacan algunos de ellos.

Mansour (2011) presentó 22 casos históricos de deslizamientos lentos a escala global que afectaron asentamientos urbanos. Su análisis confirmó que la extensión del daño depende de la deformación acumulada y la velocidad del movimiento, la cual en aquel caso variaba entre 5 mm y 9 m al año. Los desplazamientos y su velocidad se midieron por técnicas que incluyen inclinómetros, extensómetros, medidas de topografía de superficie, evidencias

geomorfológicas, así como el uso de tecnologías de percepción remota tales como radares de apertura sintética (SAR), radares de apertura sintética interferométricos (InSAR), radares de apertura sintética para interferometría diferencial (DinSAR) y escáners láser terrestres (TLS). Una descripción detallada de los métodos de percepción remota se puede encontrar en Casagli et al. (2017). Mansour (2011) clasificó el daño observado en 4 categorías (menor, moderado, mayor y severo) y asoció cada nivel con el desplazamiento anual del deslizamiento. Consideró también el desplazamiento acumulado como parámetro adicional para predecir el daño, aunque sea difícil evaluarlo por la falta común de registros históricos. Sin embargo, para algunos deslizamientos lentos el potencial de aceleración repentina resultaría en un incremento substancial de la vulnerabilidad (Petley and Allison, 1997).

Cabe remarcar la ampliación de la aplicación de las tecnologías de percepción remota, que hasta ahora servían para la monitorización de taludes, a la monitorización de deformaciones y desplazamientos de estructuras afectadas por deslizamientos. Las tecnologías InSAR y DinSAR permiten superar las limitaciones de cobertura de las técnicas tradicionalmente utilizadas para la monitorización. Casagli et al. (2017) destacaron el uso de imágenes satelitales de alta resolución para la evaluación post-desastre de los daños. Estas imágenes pueden servir para mejorar el conocimiento sobre la vulnerabilidad de los edificios.

Los sensores SAR tienen la capacidad de seguir los patrones de desplazamiento en el tiempo y alcanzan precisiones sub-centimétricas (Bianchini et al. 2015, Nicodemo et al. 2016, Ferlisi et al. 2015). Ciampalini et al. (2014) superpusieron imágenes radar al mapa de edificios en una municipalidad en Italia, para producir un mapa con las velocidades de deformaciones en los edificios para un período de 10 años. Además establecieron umbrales de deformación para marcar la estabilidad/inestabilidad de estos edificios. Para la zona de estudio, estos umbrales son  $\pm 1.5$  mm/año para la banda C y de  $\pm 2$  mm/año para la banda X. Con el fin de proporcionar datos a la administración local y facilitar las operaciones de emergencia para una zona de alta importancia histórica y cultural, Nolesini et al. (2016) usaron PS-InSAR para detectar deformaciones estructurales de una muralla con precisión milimétrica y Termografía Infrarroja (IRT) para evaluar el estado de las grietas en su interior. Frattini et al. (2013) midieron con PS-InSAR los desplazamientos del terreno para un deslizamiento en los Alpes y encontraron valores de hasta 200 mm/año. Clasificaron el daño manifestado en los edificios de la zona según la Escala Europea Macrosísmica 1998 y encontraron que aumenta proporcionalmente con los desplazamientos del terreno. Peduto et al. (2016, 2017) centraron la misma técnica en edificios para obtener los asentamientos diferenciales de aquellos. Contrastaron estos resultados con el registro de daños obtenidos por inspección visual de los edificios (Remondo 2005) y propusieron curvas de fragilidad para los edificios de mampostería con cimentaciones superficiales de la zona, en función de los desplazamientos diferenciales en la parte superior de los edificios. Sin embargo, el intervalo de monitorización es una limitación de las imágenes satelitales para la detección de altas velocidades de deformación.

La recopilación de datos por inspección post-desastre (Fuchs et al. 2007, Totschnig et al. 2011, Pappathoma-Köhle et al. 2012, Pingue et al. 2011, Toyos et al. 2003) ha facilitado el cálculo de

curvas de vulnerabilidad para edificios afectados por corrientes de derrubios, en función de la altura del flujo, su velocidad y/o presión, y la altura de los depósitos, por análisis estadístico. Hu et al. (2012), estudiaron edificios de la ciudad de Zhouqu, en China del oeste, y encontraron que para una presión de impacto de 90 kPa, la destrucción de los edificios es extensa. En la mayoría de estos casos no se tiene en cuenta la tipología de las estructuras.

La transferencia de estos resultados a otras zonas requiere datos para las características de los procesos y la intensidad de los fenómenos (Douglas 2007, Jakob et al. 2012, Lo et al., 2012). Ettinger et al. (2016) calcularon la vulnerabilidad en términos de la probabilidad de que un edificio padezca un cierto nivel de daño por regresión logística para edificios afectados por corrientes de derrubios en Perú, en 2013. La probabilidad se calculó en función de la altura del flujo. Se han tenido en cuenta factores como la tipología estructural (elementos de hormigón armado y mamposterías), número de plantas y superficie construida. Jakob et al. (2012) propusieron niveles de daño estructural y no estructural en función de un índice que describe la intensidad de los corrientes de derrubios y que es proporcional a la fuerza de impacto sobre los edificios. Para un análisis más detallado, Li et al. (2015) propusieron un modelo cuantitativo de vulnerabilidad que involucra la intensidad del flujo (velocidad y altura), y la resistencia de las estructuras, que depende por la profundidad de la cimentación, el sistema estructural, el estado de conservación y su altura.

Menos trabajos existen sobre desprendimientos de rocas por el carácter geográfico más local de las consecuencias. Agliardi et al. (2009) calcularon una curva sigmoidea para la previsión de los daños de edificios impactados por bloques de roca, en función de la energía cinética de los bloques, mediante un análisis retrospectivo de un evento en Italia. Grant et al. (2015) incorporaron el uso de lidar aéreo para construir Modelos Digitales de Elevación de edificios afectados por desprendimientos rocosos inducidos por la secuencia de terremotos de 2010/11 en Canterbury (Christchurch, Nueva Zelanda). Asumieron que la distancia de la penetración de los bloques de roca en el interior de los edificios es indicativa de las consecuencias, y encontraron que su relación con la intensidad (calculada por análisis retrospectivo) se ajusta bien a una ley potencial.

Eidsvig et al. (2014) por otro lado, centraron su trabajo en las incertidumbres asociadas a estas estimaciones y propusieron el uso de intervalos de confianza y de probabilidades de distribución de daños para incorporarlas y expresarlas mediante curvas de fragilidad. Uzielli et al. (2008) y Kaynia et al. (2008), derivaron valores de vulnerabilidad con un planteamiento de primer orden segundo momento (FOSM) teniendo en cuenta la variabilidad de los datos de entrada relacionados con la susceptibilidad de las estructuras y la intensidad de los fenómenos.

Una limitación de los métodos basados en daños empíricos es que se pueden aplicar exclusivamente al análisis de escenarios similares a los observados. Cuando alguna de las condiciones de entrada respecto a las características del deslizamiento/desprendimiento o de los edificios cambia, la extrapolación de los valores de vulnerabilidad es dudosa. Los modelos analíticos ofrecen la posibilidad de modelar un gran abanico de escenarios de riesgo, y sirven



para el desarrollo de curvas de vulnerabilidad/fragilidad. Son más bien aplicables a escala local.

El uso de modelos analíticos para modelar el comportamiento de edificios afectados por deslizamientos es menos frecuente, aunque existen numerosos trabajos en campos científicos semejantes. Las acciones sobre la cimentación de edificios afectados por deslizamientos lentos presentan una cierta similitud con aquellas producidas por subsidencia y construcción de túneles a edificios adyacentes. Existen varios estudios numéricos y experimentales al respecto (Giardina et al 2010, Boscardin y Cording 1989, Selby 1999, Burland 1995, Portioli and Cascini 2016, Franzius 2003).

La aplicación de modelos analíticos para el cálculo de vulnerabilidad distingue entre tipos estructurales. Fotopoulou y Pitilakis (2013) desarrollaron una metodología analítica para curvas de fragilidad de edificios de hormigón armado en zonas afectadas por deslizamientos inducidos por terremoto, que son aplicables a una variedad de tipos de suelo, taludes y edificios. Negulescu and Foerster (2010) propusieron también curvas de fragilidad para edificios de hormigón armado sujetos a asentamientos diferenciales por deslizamientos, a partir del análisis estadístico de resultados obtenidos por análisis estructural.

La mayoría de los trabajos existentes, analíticos y experimentales (y su acoplamiento) referidos al comportamiento de estructuras frente a impactos por deslizamientos rápidos, se centran más en las estructuras de protección (galerías, muros, barreras...) y menos en elementos estructurales característicos de edificios comunes. Ejemplos de esto son los estudios de Volkwein et al. 2011, Calvetti et al. 2011, y de Lambert y Bourrier 2013, sobre impactos de desprendimientos de rocas sobre elementos estructurales. Las fuerzas de las corrientes de derrubios sobre una estructura consisten en impactos, fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas. La evaluación de las presiones de impacto sobre las estructuras es el objetivo principal de los análisis numéricos. Hasta donde saben los autores, los modelos numéricos para la simulación de los daños en estructuras por corrientes de derrubios y el cálculo de curvas de fragilidad a base de estos, son escasos.

Mavrouli y Corominas (2010) y Mavrouli et al. (2016) calcularon curvas de fragilidad para edificios de hormigón armado y mamposterías sometidas a impactos de rocas, mediante modelos analíticos (ver párrafo 4). Biagi et al. (2017) propusieron un árbol de eventos, con lo cual calculan la probabilidad de ocurrencia de un cierto nivel de daño para edificios de hormigón armado. Su aplicación incluye la evaluación del comportamiento de los edificios por análisis estructural según Bertrand et al. (2015). En ambos estudios, se tiene en cuenta la importancia de los elementos clave para el desencadenamiento de un colapso progresivo.

#### **4. CURVAS DE FRAGILIDAD DE EDIFICIOS FRENTE A IMPACTOS DE BLOQUES DE ROCA**

La investigación de la vulnerabilidad de edificios a impactos de bloques de roca presenta dos

peculiaridades técnicas respecto a otros peligros naturales como los terremotos. Primero, debido a la alta velocidad de las acciones durante el impacto, el comportamiento de los elementos de una estructura involucra muchas incertidumbres, algunas de las cuales son la fuerza máxima aplicada sobre el elemento impactado, el tipo de rotura, y la resistencia de materiales bajo condiciones de impacto. Para eventos grandes o para impactos en dirección vertical sobre el techo de edificios, el daño producido es muy alto. Sin embargo, para eventos de tamaño pequeño o moderado, los daños pueden variar (Figura 2). Para estudiarlo en detalle se requieren métodos avanzados de simulación numérica, en combinación con los resultados experimentales.



Figura 2. Variación del daño en edificios por desprendimientos rocosos: daños locales (c,d,f), daño extenso (a), y colapsos (b, e)

Actualmente, la investigación de la vulnerabilidad de edificios frente a impactos de bloques de rocas, no tiene como objetivo la mitigación del riesgo por el refuerzo estructural de aquellos, sino que pretende anticipar el daño para diferentes escenarios de riesgo con el objetivo de cuantificar las consecuencias. Asimismo, la vulnerabilidad de los edificios frente a

desprendimientos, expresada en términos cuantitativos y en función de la intensidad de un desprendimiento, es una medida objetiva para introducir en los análisis de coste/beneficio, con el objetivo de evaluar la eficiencia de las medidas de protección y la reducción del riesgo que se haya conseguido.

Mavrouli y Corominas (2010) desarrollaron un procedimiento analítico de cálculo de la vulnerabilidad (curvas de fragilidad) para edificios de hormigón armado de una y dos plantas. Este procedimiento integra la probabilidad de impacto contra un elemento estructural determinado y un índice de daño que es función de la energía cinética del bloque desprendido. La metodología tiene en cuenta las características cinemáticas de los bloques, su tamaño y la probabilidad de impacto sobre elementos estructurales clave para la estabilidad general del edificio. La vulnerabilidad obtenida es de tipo probabilístico y es directamente integrable en el esquema de ECR mediante la elaboración de curvas de fragilidad.

Aquí presentamos un método de cálculo de curvas de fragilidad para mamposterías ante impactos de bloques de roca. La metodología implica los siguientes pasos:

- 1) Cálculo analítico de los daños en una mampostería por impacto de un bloque de roca;
- 2) Creación de una base de datos de daños para un abanico de escenarios, en función de cuatro variables: tamaño y velocidad del bloque, ancho y resistencia en tracción del muro;
- 3) Cálculo de las curvas de fragilidad (análisis probabilístico), teniendo en cuenta ciertos rangos de entrada para estas cuatro variables.

Explicamos a continuación cada uno de estos pasos.

1) El proceso analítico para el cálculo de daños se describe con detalle en Mavrouli et al. (2016). Incluye tres etapas:

- (i) Cálculo de las acciones por impacto de un bloque de roca sobre una mampostería, en términos de fuerzas (Mavrouli et al. 2016): Calculamos las fuerzas de impacto durante la interacción de un bloque de roca con una mampostería por un modelo numérico. Se utilizó el Método de Partículas y Elementos Finitos (PFEM) (Idelsohn et al. 2004, Oñate et al. 2004). Calculamos las fuerzas de impacto para un muro con un cierto ancho y altura, fijado en su base y apoyado en su otro fin. La mampostería y el bloque se asumen continuos e isotropos. El material para la mampostería se asume elástico, y sus propiedades son el Módulo de Elasticidad, el coeficiente de Poisson y la densidad. El bloque de roca tiene forma circular y también se asume elástico, y se describe por su Módulo de Elasticidad, el coeficiente de Poisson y la densidad. En la Figura 3 se puede ver un ejemplo de este tipo de configuración. El bloque tiene un radio de 1 m y velocidad inicial 5 m/s. Las fuerzas de impacto y los desplazamientos se calculan para cada paso del análisis. De tal manera se pueden extraer los valores máximos de las fuerzas de contacto e importarlas al modelo en el paso (ii).
- (ii) Modelación del comportamiento de la mampostería frente al impacto por un bloque:

Simulamos la mampostería en tres dimensiones por el Método de Elementos Finitos. La longitud de la pared es 6 m y su altura 3 m. Las propiedades del material son iguales que en el (i). La resistencia en compresión y en tracción se calcula por las recomendaciones de Euro-código 6, CEN. Puesto que la resistencia de la mampostería es un parámetro con alto grado de incertidumbre, incorporamos su variabilidad en el análisis probabilístico del paso 3. Las máximas fuerzas por el impacto se aplican como fuerzas pseudo-estáticas externas sobre el muro y se distribuyen sobre el área que corresponde a las dimensiones del bloque de roca, en el centro del muro. El resultado de (ii) es el estado tensional en el muro, el cual se exporta al paso (iii).

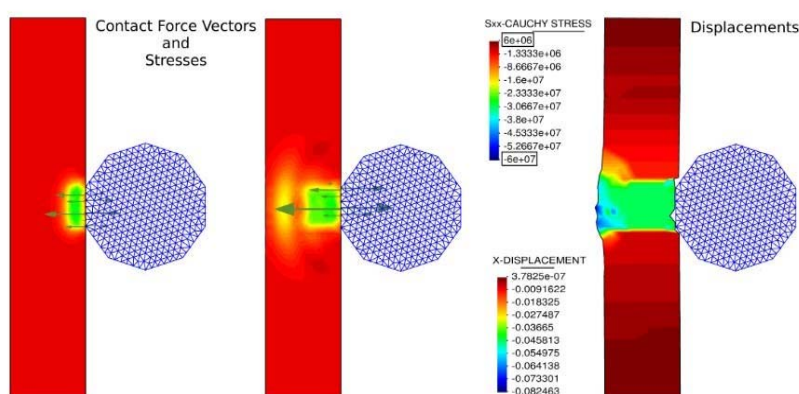


Figura 3. Tensiones de contacto y desplazamientos horizontales. Impacto de un bloque esférico sobre un muro (hipótesis de daño isotrópico) con una velocidad inicial de 5 m/s, para varios pasos del análisis (modificado de Mavrouli et al. 2014)

(iii) Cuantificación del daño: Utilizamos el criterio Von Mises modificado, desarrollado para mamposterías por Syrmakizis y Asteris (2001). Según este criterio, la curva de rotura se forma por cuatro superficies, cada una de las cuales representa un cierto estado de tensiones biaxiales (tensión-compresión, tensión-tensión, compresión-compresión, compresión-tensión). El análisis de roturas se aplica a cada elemento del modelo de elementos finitos. Los resultados representan de manera gráfica las áreas donde se manifiesta el daño (Figura 2). Este se cuantifica en términos de un índice de daño ID (Ecuación 2):

$$ID = \frac{\text{Area con daño}}{\text{Area total del muro}} \quad (2)$$

2) En este paso creamos una base de datos para los daños que se anticipan para una mampostería de ciertas características, que está sujeta a impactos de bloques de distintos tamaños y velocidades. La base de datos consiste en los valores de ID, variando los parámetros iniciales: tamaño y velocidad del bloque de roca, ancho y resistencia en tracción del muro. Los rangos de variación se resumen en la Tabla 1.

	Resistencia tracción muro	Ancho muro	Velocidad bloque roca	Volumen bloque roca
Rango	0.1-0.6 Mpa	0.4-1 m	1-30 m/s	1-20 m <sup>3</sup>
Incremento	0.2 MPa	0.1 m	5 m/s	5 m <sup>3</sup>

Tabla 1. Rango de valores para las variables del modelo

3) En tercer lugar, desarrollamos una herramienta para el cálculo de curvas de fragilidad para una mampostería ante impactos de rocas (herramienta RockDamage - disponible en [www.rockrisk.upc.edu](http://www.rockrisk.upc.edu)). Las curvas de fragilidad se calculan por el análisis estadístico de los valores del ID provenientes de la base de datos, a partir de un rango de valores que el usuario de la herramienta introduce para las cuatro variables mencionadas anteriormente. El cálculo de las curvas de fragilidad, se realiza por (Figura 4):

- Definición por el usuario del valor mínimo, máximo y promedio del tamaño y velocidad de los bloques de roca que se anticipan, del ancho y de la resistencia en tracción del muro.
- Generación de muestras aleatorias para cada uno de estos parámetros, que siguen la distribución normal y los valores mínimos, máximos y promedios definidos por el usuario.
- Generación de combinaciones aleatorias de estos parámetros, como parte de una simulación Monte Carlo.
- Evaluación del ID para cada una de las combinaciones, consultando la base de datos del paso 2.
- Definición de los umbrales del ID para establecer los niveles de daño (ligero, moderado, alto).
- Cálculo de la probabilidad de exceder un cierto nivel de daño para bloques con una energía cinética, que depende de la velocidad y tamaño del bloque. Esta probabilidad se calcula por el número de combinaciones, con una cierta energía cinética, que resultan en un ID que corresponde a un cierto nivel de daño, entre el número total de las combinaciones con esta energía cinética. Se calculan las probabilidades para valores discretos de la energía cinética y tres niveles de daños (bajo, moderado, alto).
- Cálculo de la gráfica de las curvas de fragilidad a partir de los valores de las probabilidades.

Un ejemplo de curvas de fragilidad se ve en la Figura 5. Para este ejemplo, el rango de los datos de entrada y su valor promedio son: ancho de muro: 0.4 -1 m (0.8 m), resistencia en tracción del muro 0.1 – 0.4 MPa (0.3 MPa), velocidad de los bloques 1 – 20 m/sec (15 m/sec), y volumen de los bloques de roca 1 – 20 m<sup>3</sup>. Para los niveles daño se asumen los siguientes valores del ID: nivel bajo 5-15, nivel moderado 15-30, nivel alto >30.

La metodología tal como está desarrollada, asume impactos solamente en el centro de la mampostería y no asume variación del punto de impacto. Aunque algunos eventos reales manifiestan daños que tienen la misma forma que los daños calculados (Mavrouli et al. 2016), se requiere validación más extensa de las curvas de fragilidad calculadas.

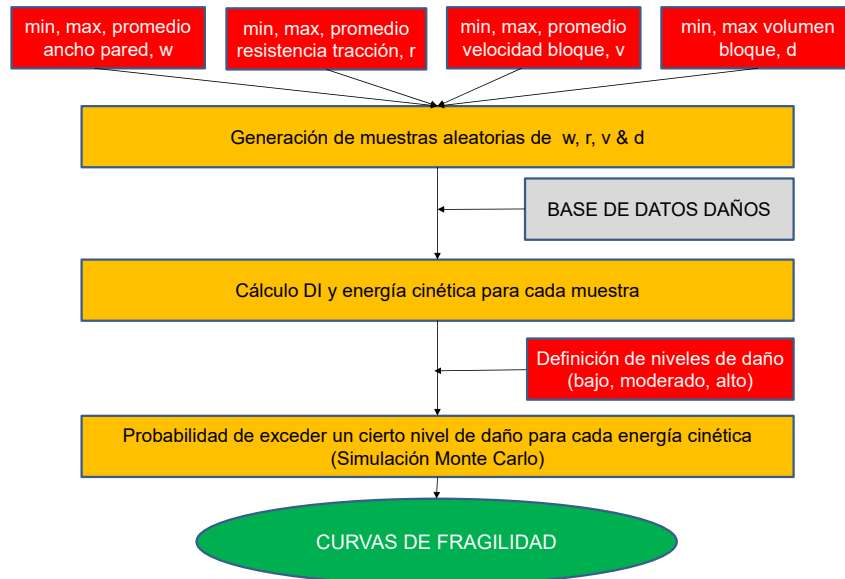


Figura 4. Proceso para el cálculo de las curvas de fragilidad

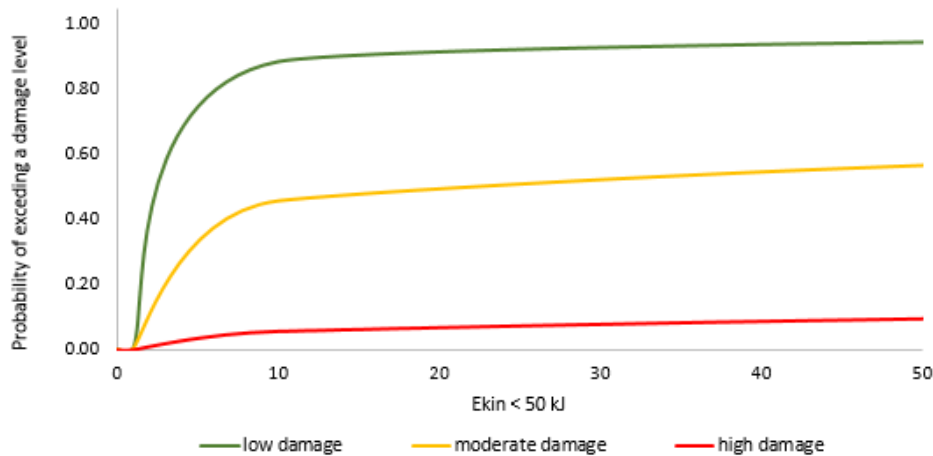


Figura 5. Ejemplo de curvas de fragilidad para una mampostería frente a impactos por bloques de rocas

## 5. COMENTARIOS FINALES/CONCLUSIONES

En los últimos años, los trabajos de investigación sobre la vulnerabilidad de edificios en zonas de deslizamientos/desprendimientos han incrementado. Esto está relacionado con el registro sistemático de daños posterior a los desastres.

Los descriptores cuantitativos para la vulnerabilidad asocian el nivel de daño con la intensidad de los fenómenos. El uso de tecnologías de percepción remota como los métodos SAR, ofrecen información de alta resolución sobre las deformaciones del terreno, que al contrastarse con inspecciones visuales de los edificios, proporcionan datos sobre la vulnerabilidad de éstos. Cabe destacar la ampliación de la aplicación de las tecnologías de percepción remota, que hasta ahora servían para la monitorización de taludes, a la monitorización de deformaciones y desplazamientos de estructuras afectadas por deslizamientos. Asimismo, los datos obtenidos por DinSAR (Radar de apertura sintética para interferometría diferencial), teniendo resolución sub-centimétrica, permiten registrar deformaciones en la superficie de edificios situados en zonas de deslizamientos y usarlas para la evaluación de su vulnerabilidad para deslizamientos lentos. Sin embargo, el intervalo de monitorización es una limitación de las observaciones por satélite para la detección de altas velocidades de deformación.

El uso de láser escáner terrestre en combinación con la reconstrucción tridimensional de objetos por fotogrametría, puede facilitar el registro, la cuantificación de daños en estructuras afectadas por deslizamientos rápidos y la detección de cambios.

El número elevado de incertidumbres asociadas a estos fenómenos dificultan la transferencia de los resultados de vulnerabilidad en zonas concretas a otros casos. Un primer paso para el cálculo de curvas de fragilidad para aplicación general sería la caracterización de los patrones de daño y la estandarización de escalas de daño.

El contraste de inspecciones in situ de los edificios con observaciones de daño por métodos de percepción remota (verticales y oblicuas) y métodos analíticos ayuda a entender la vulnerabilidad de los edificios en zonas afectadas por deslizamientos. Los estudios experimentales, que todavía son escasos para elementos estructurales de edificios comunes, también. En este sentido, hacen falta estudios multi-disciplinarios.

Todavía resulta difícil anticipar los daños no estructurales, que aunque no son fundamentales para la estabilidad de los edificios, conllevan un riesgo alto en términos de pérdida económica.

Para deslizamientos rápidos la importancia de un desencadenamiento de roturas se tiene que tener en cuenta para la evaluación de los daños.

La investigación de la vulnerabilidad de edificios frente a impactos por deslizamientos rápidos tiene como objetivo anticipar el daño para diferentes escenarios de riesgo para cuantificar sus consecuencias. Asimismo, la vulnerabilidad de los edificios frente a impactos de suelo/roca, expresada en términos cuantitativos y en función de la intensidad del fenómeno, es una medida objetiva para introducir en los análisis de coste/beneficio, con el objetivo de evaluar la eficiencia de las medidas de protección y la reducción del riesgo que se haya conseguido.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto Rockrisk (BIA2013-42582-P) y RockModels (BIA2016-75668-P, AEI/FEDER, UE), financiado por el Ministerio Español de Economía y Competitividad del Gobierno de España mediante las ayudas correspondientes al Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia, Subprograma Estatal de Generación de Conocimiento, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016 y 2017-2019 respectivamente.

## REFERENCIAS

- Agliardi, F., Crosta, G.B. and Frattini, P., 2009. Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), p.1059.
- AGS, 2007. Guideline for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Journal Australian Geomechanics Society* 42:1
- ATC, 1985. Earthquake damage evaluation data for California (ATC-13) Appl. Technology Council, Redwood City California
- Audell, H.S., 1996. Geotechnical nomenclature and classification system for crack patterns in buildings. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2(2), pp.225-248.
- Ayala, F.J., Elizaga, E. and González de Vallejo L.I. (1987) “Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España” Serie Geológica Ambiental; IGME. Madrid. 91 pp y mapas.
- Bell, R. and Glade, T., 2004. Quantitative risk analysis for landslides? Examples from Bıldudalur, NW-Iceland. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4(1), pp.117-131.
- Bertrand, D., Kassem, F., Delhomme, F., Limam, A., 2015. Reliability analysis of an RC member impacted by a rockfall using a nonlinear SDOF model. *Eng Struct* 89:93-102
- Bianchini, S., Pratesi, F., Nolesini, T. and Casagli, N., 2015. Building deformation assessment by means of persistent scatterer interferometry analysis on a landslide-affected area: the Volterra (Italy) case study. *Remote Sensing*, 7(4), pp.4678-4701.
- Bird, J.F., Bommer, J.J., Crowley, H. and Pinho, R., 2006. Modelling liquefaction-induced building damage in earthquake loss estimation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(1), pp.15-30.
- Boscardin, M.D. and Cording, E.J., 1989. Building response to excavation-induced settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(1), pp.1-21.
- Burland, J.B., 1995. Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation. Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- Burland, JB & CP Wroth 1975. Settlement of buildings and associated damage. Building Research Establishment Report CP 33/75
- Calveti, F., 2011. Rockfall shelters covered by granular layers: Experiments and design approach. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(sup1), pp.73-100.
- Carcedo, F.J.A., 1987. Impacto Económico Y Social de Los Riesgos Geológicos en España: The Economic and Social Impact of the Geological Hazards in Spain; with English Summary. Instituto Geológico y Minero de España.
- Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F. and Reichenbach, P., 2002. Landslide hazard map for the Upper Tiber River basin. CNR, Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, Publication, (2116).
- Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F. and Reichenbach, P., 2002. Landslide hazard map for the Upper Tiber River basin. CNR, Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche,



- Publication, (2116).
- Casagli, N., Frodella, W., Morelli, S., Tofani, V., Ciampalini, A., Intrieri, E., Raspini, F., Rossi, G., Tanteri, L. and Lu, P., 2017. Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning. *Geoenvironmental Disasters*, 4(1), p.9.
- Ciampalini, A., Bardi, F., Bianchini, S., Frodella, W., Del Ventisette, C., Moretti, S. and Casagli, N., 2014. Analysis of building deformation in landslide area using multisensor PSInSAR™ technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, pp.166-180.
- Ciurean, R.L., Hussin, H., van Westen, C.J., Jaboyedoff, M., Nicolet, P., Chen, L., Frigerio, S. and Glade, T., 2017. Multi-scale debris flow vulnerability assessment and direct loss estimation of buildings in the Eastern Italian Alps. *Natural Hazards*, 85(2), pp.929-957.
- Ciurean, R.L., Hussin, H., van Westen, C.J., Jaboyedoff, M., Nicolet, P., Chen, L., Frigerio, S. and Glade, T., 2017. Multi-scale debris flow vulnerability assessment and direct loss estimation of buildings in the Eastern Italian Alps. *Natural Hazards*, 85(2), pp.929-957.
- Ciurean, R.L., Schröter, D. and Glade, T., 2013. Conceptual frameworks of vulnerability assessments for natural disasters reduction (pp. 3-32). INTECH Open Access Publisher.
- Cornell, C.A., Jalayer, F., Hamburger, R.O. and Foutch, D.A., 2002. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines. *Journal of Structural Engineering*, 128(4), pp.526-533.
- Crozier, M.J. and Glade, T., 2005. Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. *Landslide hazard and risk*, pp.1-40.
- Cruden, D.M. and Varnes, D.J., 1996. Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. Transportation research board special report, (247).
- De Biagi, V., Napoli, M.L. and Barbero, M., A quantitative approach for the evaluation of rockfall risk on buildings. *Natural Hazards*, pp.1-28.
- Douglas, J., 2007. Physical vulnerability modelling in natural hazard risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(2), pp.283-288.
- Eidsvig, U.M., McLean, A., Vangelsten, B.V., Kalsnes, B., Ciurean, R.L., Argyroudis, S., Winter, M.G., Mavrouli, O.C., Fotopoulou, S., Pitilakis, K. and Baills, A., 2014. Assessment of socioeconomic vulnerability to landslides using an indicator-based approach: methodology and case studies. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 73(2), pp.307-324.
- Einstein, HH, 1998. Special lecture: landslide risk assessment procedure. In Bonnard C (ed.) *Landslides*. A.A. Balkema Publisher, Rotterdam pp 1075-1090.
- Ettinger, S., Mounaud, L., Magill, C., Yao-Lafourcade, A.F., Thouret, J.C., Manville, V., Negulescu, C., Zuccaro, G., De Gregorio, D., Nardone, S. and Uchuchoque, J.A.L., 2016. Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *Journal of Hydrology*, 541, pp.563-581.
- European macroseismic scale 1998. European Seismological Commission. Grünthal, G. (ESC)
- Ferlisi, S., Peduto, D., Gullà, G., Nicodemo, G., Borrelli, L. and Fornaro, G., 2015. The use of DInSAR data for the analysis of building damage induced by slow-moving landslides. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2* (pp. 1835-1839). Springer International Publishing.
- Fotopoulou, S.D. and Pitilakis, K.D., 2013. Vulnerability assessment of reinforced concrete buildings subjected to seismically triggered slow-moving earth slides. *Landslides*, 10(5), pp.563-582.
- Franzius, J.N., 2003. Behavior of building due to tunnel induced settlement (Doctoral dissertation, PHD thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine).
- Frattini, P., Crosta, G.B. and Allievi, J., 2013. Damage to buildings in large slope rock instabilities monitored with the PSInSAR™ technique. *Remote Sensing*, 5(10), pp.4753-4773.
- Fuchs, S., Heiss, K. and Hübl, J., 2007. Towards an empirical vulnerability function for use in debris

- flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(5), pp.495-506.
- Galli, M. and Guzzetti, F., 2007. Landslide vulnerability criteria: a case study from Umbria, Central Italy. *Environmental management*, 40(4), pp.649-665.
- Giardina, G., Hendriks, M.A. and Rots, J.G., 2010. Numerical analysis of tunnelling effects on masonry buildings: the influence of tunnel location on damage assessment. In *Advanced Materials Research* (Vol. 133, pp. 289-294). Trans Tech Publications.
- Grant, A., Wartman, J., Massey, C.I., Olsen, M.J., Motley, M.R., Hanson, D. and Henderson, J., 2015, December. Vulnerabilities to Rock-Slope Failure Impacts from Christchurch, NZ Case History Analysis. In *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Guillard-Gonçalves, C., Zêzere, J.L., Pereira, S. and Garcia, R.A.C., 2016. Assessment of physical vulnerability of buildings and analysis of landslide risk at the municipal scale: application to the Loures municipality, Portugal. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 16, pp.311-331.
- Hollenstein, K., 2005. Reconsidering the risk assessment concept: Standardizing the impact description as a building block for vulnerability assessment. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5(3), pp.301-307.
- Hu, K.H., Cui, P. and Zhang, J.Q., 2012. Characteristics of damage to buildings by debris flows on 7 August 2010 in Zhouqu, Western China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(7), p.2209.
- Idelsohn, S.R., Oñate, E. and Pin, F.D., 2004. The particle finite element method: a powerful tool to solve incompressible flows with free surfaces and breaking waves. *International journal for numerical methods in engineering*, 61(7), pp.964-989.
- Institution of Structural Engineers, 1994. Subsidence of low rise buildings. The Institution of Structural Engineers. London.
- International Union of Geological Sciences, IUGS, 1997. Quantitative risk assessment for slopes and landslides - the state of the art. In *Landslide Risk Assessment, Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment, 19-21 Feb. 1997, Honolulu, Hawaii* (eds. Cruden D.M., Fell, R.). A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 3-12.
- Jakob, M., Stein, D. and Ulmi, M., 2012. Vulnerability of buildings to debris flow impact. *Natural hazards*, 60(2), pp.241-261.
- Kaynia, A.M., Papatoma-Köhle, M., Neuhäuser, B., Ratzinger, K., Wenzel, H. and Medina-Cetina, Z., 2008. Probabilistic assessment of vulnerability to landslide: application to the village of Lichtenstein, Baden-Württemberg, Germany. *Engineering Geology*, 101(1), pp.33-48.
- Lambert, S. and Bourrier, F., 2013. Design of rockfall protection embankments: a review. *Engineering Geology*, 154, pp.77-88.
- Leone, F., Asté, J.P. and Leroi, E., 1996. Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: working toward a better risk perception. *Landslides-Glissements de Terrain*. Balkema, Rotterdam, pp.263-270.
- Li, Z., Nadim, F., Huang, H., Uzielli, M. and Lacasse, S., 2010. Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, 7(2), pp.125-134.
- Lo, W.C., Tsao, T.C. and Hsu, C.H., 2012. Building vulnerability to debris flows in Taiwan: a preliminary study. *Natural hazards*, 64(3), pp.2107-2128.
- Mansour, M.F., Morgenstern, N.R. and Martin, C.D., 2011. Expected damage from displacement of slow-moving slides. *Landslides*, 8(1), pp.117-131.
- Maquaire, O., Thiery, Y., Malet, P., Weber, C., Puissant, A. and Wania, A., 2004. Current practices and assessment tools of landslide vulnerability in mountainous basins-identification of exposed elements with a semiautomatic procedure. *Landslides: evaluation and stabilisation*. Taylor and Francis Group, London, pp.171-176.

- Mavrouli, O. and Corominas, J., 2010. Rockfall vulnerability assessment for reinforced concrete buildings. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(10), p.2055.
- Mavrouli, O., Fotopoulou, S., Ptilakis, K., Zuccaro, G., Corominas, J., Santo, A., Cacace, F., De Gregorio, D., Di Crescenzo, G., Foerster, E. and Ulrich, T., 2014. Vulnerability assessment for reinforced concrete buildings exposed to landslides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), pp.265-289.
- Mavrouli, O., Giannopoulos, P.G., Carbonell, J.M. and Syrmakizis, C., 2016. Damage analysis of masonry structures subjected to rockfalls. *Landslides*, pp.1-14.
- Negulescu, C. and Foerster, E., 2010. Parametric studies and quantitative assessment of the vulnerability of a RC frame building exposed to differential settlements. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(9), pp.1781-1792.
- Nicodemo, G., Peduto, D., Ferlisi, S. and Maccabiani, J., 2016, October. Investigating building settlements via very high resolution SAR sensors. In *Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure, Proceedings of the Fifth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2016)* (pp. 16-19).
- Nielson, B.G. and DesRoches, R., 2007. Analytical seismic fragility curves for typical bridges in the central and southeastern United States. *Earthquake Spectra*, 23(3), pp.615-633.
- Nolesini, T., Frodella, W., Bianchini, S. and Casagli, N., 2016. Detecting Slope and Urban Potential Unstable Areas by Means of Multi-Platform Remote Sensing Techniques: The Volterra (Italy) Case Study. *Remote Sensing*, 8(9), p.746.
- Oñate, E., Idelsohn, S.R., Del Pin, F. and Aubry, R., 2004. The particle finite element method-an overview. *International Journal of Computational Methods*, 1(02), pp.267-307.
- Palmisano, F. and Elia, A., 2015. Shape optimization of strut-and-tie models in masonry buildings subjected to landslide-induced settlements. *Engineering Structures*, 84, pp.223-232
- Papathoma-Koehle, M., Keiler, M., Totschnig, R. and Glade, T., 2012. Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: debris flow event in South Tyrol. *Natural Hazards*, 64(3), pp.2083-2105.
- Papathoma-Koehle, M., Keiler, M., Totschnig, R. and Glade, T., 2012. Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: debris flow event in South Tyrol. *Natural Hazards*, 64(3), pp.2083-2105.
- Peduto, D., Pisciotta, G., Nicodemo, G., Arena, L., Ferlisi, S., Gullà, G., Borrelli, L., Fornaro, G. and Reale, D., 2016. A procedure for the analysis of building vulnerability to slow-moving landslides. *Proc 1st IMEKO Int Work Metrology for Geotechnics*, Athena Srl Benevento, pp.248-254.
- Peduto, D., Ferlisi, S., Nicodemo, G., Reale, D., Pisciotta, G. and Gullà, G., 2017. Empirical fragility and vulnerability curves for buildings exposed to slow-moving landslides at medium and large scales. *Landslides*, pp.1-15.
- Petley, D.N. and Allison, R.J., 1997. The mechanics of deep-seated landslides. *Earth surface processes and landforms*, 22(8), pp.747-758.
- Pingue, F., Petrazzuoli, S.M., Obrizzo, F., Tammara, U., De Martino, P. and Zuccaro, G., 2011. Monitoring system of buildings with high vulnerability in presence of slow ground deformations (The Campi Flegrei, Italy, case). *Measurement*, 44(9), pp.1628-1644.
- Porter, K., Kennedy, R. and Bachman, R., 2007. Creating fragility functions for performance-based earthquake engineering. *Earthquake Spectra*, 23(2), pp.471-489.
- Portioli, F. and Cascini, L., 2016. Assessment of masonry structures subjected to foundation settlements using rigid block limit analysis. *Engineering Structures*, 113, pp.347-361.
- Reichenbach, P., Galli, M., Cardinali, M., Guzzetti, F., Ardizzone, F., 2005. Geomorphologic mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria Region of central Italy.

- In Glade T, Anderson MG, Crozier MJ (eds.) *Landslide hazard and risk*. John Wiley pp 429-468.
- Remondo, J., Bonachea, J. and Cendrero, A., 2005. A statistical approach to landslide risk modelling at basin scale: from landslide susceptibility to quantitative risk assessment. *Landslides*, 2(4), pp.321-328.
- Roberds, W., 2005. Estimating temporal and spatial variability and vulnerability. *Landslide risk management*. Taylor & Francis, London, pp.129-158.
- Selby, A.R., 1999. Tunnelling in soils-ground movements, and damage to buildings in Workington, UK. *Geotechnical and Geological engineering*, 17(3), pp.351-371.
- Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J. and Naganuma, T., 2000. Statistical analysis of fragility curves. *Journal of engineering mechanics*, 126(12), pp.1224-1231.
- Syrmakezis CA, Asteris PG. Masonry failure criterion under biaxial stress state. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2001 Feb;13(1):58-64.
- Tapsell, S., McCarthy, S., Faulkner, H. and Alexander, M., 2010. Social vulnerability to natural hazards. State of the art report from CapHaz-Net's WP4. London.
- Tapsell, S., McCarthy, S., Faulkner, H. and Alexander, M., 2010. Social vulnerability to natural hazards. State of the art report from CapHaz-Net's WP4. London.
- Totschnig, R., Sedlacek, W. and Fuchs, S., 2011. A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport. *Natural Hazards*, 58(2), pp.681-703.
- Toyos, G., Oppenheimer, C., Pareschi, M.T., Sulpizio, R., Zanchetta, G. and Zuccaro, G., 2003, September. Building damage by debris flows in the Sarno area, Southern Italy. In *Proceed. Third international conference on debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction and assessment (Vol. 2, pp. 1209-1220)*.
- UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, 2017. Colombia - Avalancha e inundaciones en Mocoa (Putumayo) Flash Update No. 1 (01/04/17) ReliefWeb. UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. 1 April 2017. Retrieved 2 April 2017.
- Undro, 1984. *Disaster Prevention and Mitigation: A Compendium of Current Knowledge. Volume 11: Preparedness Aspects*, Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator, New York, United Nations.
- Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S. and Kaynia, A.M., 2008. A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Engineering Geology*, 102(3), pp.251-256.
- Van Westen, C.J., Castellanos, E. and Kuriakose, S.L., 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering geology*, 102(3), pp.112-131.
- Vega, J.A. and Hidalgo, C.A., 2016. Quantitative risk assessment of landslides triggered by earthquakes and rainfall based on direct costs of urban buildings. *Geomorphology*, 273, pp.217-235.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L.K., Gerber, W. and Jaboyedoff, M., 2011. Rockfall characterisation and structural protection-a review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, pp.p-2617.