# Efectos geotécnicos de los terremotos

## *Geotechnical effects of the earthquakes*

**José Delgado**
*Dept. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, Ap. Correos 99, 03080 Alicante.*
*E-mail: Jose.delgado@ua.es*

***Resumen*** La vibración del suelo durante un terremoto provoca una perturbación en su estado de esfuerzos que puede desencadenar los denominados efectos geotécnicos de un terremoto, fundamentalmente licuefacción y movimientos de ladera. En ambos casos, el terreno natural pierde su equilibrio y propiedades originales, dando lugar a un movimiento de la superficie del terreno que puede causar daños en viviendas e infraestructuras. Su caracterización es básica para una correcta evaluación y reducción del riesgo sísmico en una región. En este trabajo se describen las características básicas de ambos fenómenos, se presentan ejemplos y describen las ideas básicas para la gestión de ambos riesgos naturales. Finalmente, se adjuntan fuentes de información en internet.

***Palabras clave***: Efectos geotécnicos, efectos inducidos, movimientos de ladera, licuefacción, terremoto.

***Abstract*** *The ground motion during an earthquake causes a disturbance in the stress state of the terrain, which can trigger the so-called geotechnical effects of earthquakes, mainly liquefaction and landslides. In both cases, the natural terrain loses its balance and original properties, leading to a movement of the ground surface that will cause damage to homes and lifelines. Their characterization is essential for a proper assessment and seismic risk reduction in a region. This paper describes the basic features of both phenomena, giving examples; the basic ideas for managing both natural hazards are described as well. Finally, sources of information on the Internet are quoted.*

***Keywords:*** *Geotechnical effects, induced effects, landslides, liquefaction, earthquake.*

## INTRODUCCIÓN

El día 11 de Marzo de 2011 tuvo lugar uno de los mayores terremotos registrados en la historia reciente. El evento, de magnitud Mw 9.0, tuvo lugar próximo a la costa de la isla de Honshu (Japón) y la factura de daños fue enorme: más de 15.000 muertos, casi 5.000 desaparecidos, más de 300.000 edificios destruidos, etc. Si bien el movimiento del suelo provocado por el terremoto tuvo una extraordinaria amplitud y severidad, este terremoto será siempre recordado por el maremoto (o tsunami) que sucedió a la sacudida (Morales, 2011). Este terremoto también causó otros efectos, no tan "espectaculares", pero que también contribuyeron a incrementar la factura de daños en aquellas zonas que se salvaron del tsunami. En concreto, efectos muy frecuentes fueron la licuefacción de suelos granulares saturados y los movimientos de ladera inducidos por la sacudida.

Dos meses después, el 11 de Mayo de 2011, un terremoto de menor magnitud, Mw 5.1, sacudió la ciudad de Lorca (Murcia) y sus alrededores, causando una notable conmoción entre la población, numerosos heridos, 9 muertos y abundantes pérdidas materiales por daños en edificaciones (Martínez-Díaz, 2011). Hay mucho material gráfico disponible al respecto, donde se puede observar los efectos directos de la sacudida (Tabla I, video 1). En un contexto global, este evento se clasificaría como de magnitud moderada-baja; sin embargo, a pesar de ello, las indemnizaciones por daños en edificaciones exceden de 350 millones de euros (CCS, 2012). Además de daños directos en edificios, el terremoto desencadenó otros fenómenos sobre el terreno, como grietas y, sobre todo, centenares de inestabilidades de ladera en los alrededores de Lorca (Alfaro et al., 2012 a,b), alguno de los cuales fue incluso grabado en directo (Tabla I, video 2).



ISSN: 1132-9157 – Pags. 276-288

| Video | Link | Descripción |
|---|---|---|
| 1 | http://www.youtube.com/watch?v=Eosdl95CcVM&feature=related | Daños en edificaciones provocados por el terremoto de Lorca (11/05/2011, Mw 5.1). |
| 2 | http://www.youtube.com/watch?v=vKM7MIX5Rtc&feature=related | Desprendimientos durante el terremoto de Lorca (11/05/2011, Mw 5.1). |
| 3 | http://www.youtube.com/watch?v=6kzQn7ul2co&feature=related | Modelo analógico de licuefacción por una sacudida sísmica. |
| 4 | http://www.youtube.com/watch?v=n2gQviPJ7nA&feature=related | Movimiento oscilatorio del suelo y salida de agua con arena por zonas fracturadas. Terremoto de Japón (11/03/2011, Mw 9.0) |
| 5 | http://www.youtube.com/watch?v=KLZFlnNDohA<br>http://www.youtube.com/watch?v=G7jCbzwCoY4 | Formación de "geyseres" por escape del agua de las capas licuefactadas. Terremotos de Niigata (16/06/1964, Mw 7.5) y Christchurch (22/02/2011, ML 6.3). |
| 6 | http://www.youtube.com/watch?v=moh3jKBS_UA&feature=related | Volcanes de arena aún activos expulsando agua y arena. Terremoto de Christchurch (22/02/2011, ML 6.3). |
| 7 | http://www.youtube.com/watch?v=u8hfCN6k3YE | Movimiento sinusoidal de aceras sobre subsuelo licuefactado. Terremoto de Japón (11/03/2011, Mw 9.0) |
| 8 | http://www.youtube.com/watch?v=2_oYvJsqw9w | Oscilación de una vivienda sobre suelo licuefactado. Terremoto de Japón (11/03/2011, Mw 9.0) |
| 9 | http://www.youtube.com/watch?v=MjoSW4fZjTM<br>http://www.youtube.com/watch?v=FQd59SoCxPQ&feature=relmfu<br>http://www.youtube.com/watch?v=lZB2PW9vSL4&feature=relmfu | Efectos licuefacción en Dagupán durante el terremoto de 1990. |

*Tabla I. Vídeos de interés sobre efectos geotécnicos de los terremotos.*

Estos dos terremotos recientes ocurridos en Japón y Lorca ilustran perfectamente como los efectos producidos por los terremotos no se limitan exclusivamente a la sacudida, sino que ésta induce otros muchos efectos que, como se verá más adelante, también causan daños. Entre estos efectos adicionales a la sacudida encontramos la aparición de grietas y fracturas en el terreno, los tsunamis, las inundaciones o los denominados "**efectos geotécnicos**". Estos últimos, los efectos geotécnicos, incluyen la licuefacción y los movimientos de ladera. Se suelen denominar geotécnicos porque son debidos al propio comportamiento tenso-deformacional (geomecánico) de los materiales durante la sacudida.

El objetivo del presente trabajo es describir estos fenómenos para así comprender por qué y dónde suceden, así como demostrar por qué representan un riesgo añadido para nuestra sociedad.

## LICUEFACCIÓN

Formalmente, la licuefacción de un suelo se define como la transformación de un sólido saturado a un estado líquido como consecuencia de un incremento de la presión que ejerce el agua contenida en los poros del material (Seed e Idriss, 1971).

El proceso normalmente se produce en sedimentos detríticos no cohesivos, típicamente arenas de grano fino y tamaño uniforme, poco compactados (es decir, con poros de gran tamaño). Los esfuerzos cíclicos que inducen las ondas S al propagarse por el medio hacen que las partículas se reorganicen en una estructura más densa por reducción de poros (Obermeier et al., 2005; Fig. 1). Este proceso de reducción de poros es equivalente a una situación bastante cotidiana: cuando se pretende rellenar un recipiente (una maceta, un salero, un azucarero...) con una sustancia granular (tierra, sal, azúcar...) y se observa que al final suele quedar una pequeña cantidad de dicho material, que no se quiere tirar pero tampoco guardar en un armario. En tal caso, habitualmente lo que se hace es tomar el recipiente y sacudirlo vigorosamente durante unos segundos, porque al final de la operación el material se ha compactado, generando ese esperado hueco donde se pretende verter el resto de material. Lo que ha sucedido en esta operación es que la "sacudida" ha aplicado unos esfuerzos de cizalla a las partículas que componen dicho material, que se han desplazado

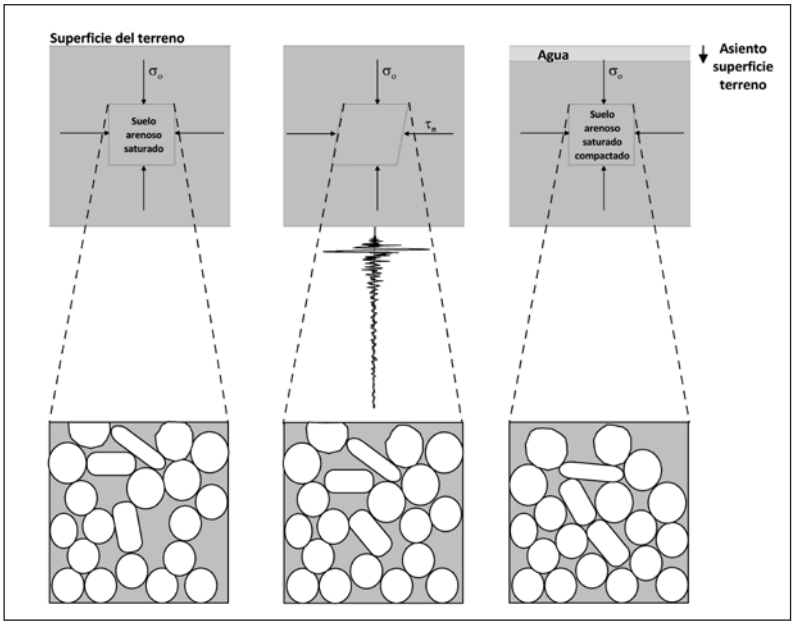


*Fig. 1. Modelo conceptual de la ocurrencia de licuefacción (basado en Obermeier et al., 2005).*

*Fig. 2. Ejemplos de volcanes de arena formados por la licuefacción de arenas durante el terremoto de Christchurch, Nueva Zelanda, de 22 de febrero de 2011 (ML 6.3). A: Vista general de un campo con numerosos volcanes de arena. B: Detalle de un grupo de volcanes de arena. Obsérvese cómo se reconocen las acanaladuras formadas por el flujo del agua al salir a la superficie. Fotografías cortesía de Caroline Hardwick.*

levemente y cerrado parte de los poros existentes entre ellas.

En este ejemplo no se produce, obviamente, licuefacción. Ello es debido a que los huecos están rellenos de aire, que es muy compresible y, consecuentemente, puede reducir sin dificultad su volumen. Además, la capacidad del aire para fluir y escapar de dichos huecos es también muy alta. En cambio, durante la licuefacción el fluido en los poros es agua, no aire, que es prácticamente incompresible y su velocidad de movimiento en el suelo es reducida (función de la permeabilidad del medio). Como la sacudida dura un cierto tiempo, el agua de los poros no tiene tiempo suficiente para salir de ellos, por lo que la presión que ésta ejerce sobre dichos poros se incrementa conforme se van cerrando. La licuefacción se produce cuando dicha presión iguala a la presión vertical confinante del medio, es decir, iguala a la presión debida al peso del material suprayacente.

Una consecuencia muy importante de la licuefacción de sedimentos arenosos es que la resistencia del terreno se reduce a cero. Como resultado, el terreno no soporta cargas y cualquier estructura cimentada sobre él comenzará a hundirse, como si se encontrase en una especie de "arena movediza".

El proceso de licuefacción se puede reproducir en laboratorio con facilidad (Tabla I, video 3): en una vitrina rellena de arena se inyecta agua por su base. El agua procede de una manguera conectada a un grifo; al abrir éste, el agua penetra en la vitrina y asciende por ella con la misma presión que tiene en las cañerías, que es claramente superior al peso de la arena en la vitrina. La arena sufre entonces licuefacción y cualquier estructura se hundirá en ella. Una consecuencia de las presiones intersticiales desarrolladas es que se establece un flujo desde la parte licuefactada (altas presiones) hacia la superficie (presiones intersticiales nulas), el cual arrastra partículas del suelo que se acumulan en la superficie del terreno, formando cuerpos cónicos alrededor de la abertura por donde salió el agua (Fig.2, Tabla I, videos 4 y 5). Por su similitud morfológica con los volcanes, a estos cuerpos se les conoce como "volcanes de arena".

Una vez conocida la causa de la licuefacción, se plantean las siguientes cuestiones: ¿qué material puede sufrir licuefacción? ¿En qué contexto geológico son más frecuentes estos materiales? ¿Todos los terremotos pueden dar lugar a licuefacción? ¿Qué sucede con el material una vez que ha sufrido licuefacción?

Para que se produzca licuefacción es necesario que el medio reúna los siguientes requisitos: (1) material de granulometría y permeabilidad apropiada, con elevada porosidad (más adelante se indicará que la arena fina es la más favorable), (2) estar saturado completamente en agua (el nivel freático debe ser muy superficial), (3) el material no debe estar a gran profundidad, y (4) es necesario un terremoto de cierta magnitud mínima.

Los tres primeros aspectos son específicos del medio y se les denomina conjuntamente susceptibilidad del medio. Tres elementos son clave para comprender los tres requisitos mencionados: poros de gran tamaño, ausencia de cohesión (o que ésta sea muy baja) y la permeabilidad del sedimento. La cohesión es un factor clave que controla la resistencia y deformabilidad de los suelos. Si un suelo posee cohesión (por contener arcillas o limos), aunque la presión intersticial del agua aumente, la resistencia del material no se anulará. De otra parte, la permeabilidad es tanto mayor cuando mayores son el tamaño de grano y la porosidad efectiva del suelo. Suelos de grano grueso (gravas) se caracterizan por permeabilidades elevadas, por lo que el agua puede fluir con facilidad en su seno (las sobrepresiones intersticiales se disipan rápidamente y es más difícil la licuefacción). Ello justifica que sólo en casos excepcionales se haya descrito este proceso en gravas

(Fig. 3), como sucedió durante los terremotos de Borah Peak (USA, 1983, Mw 7.3) o Kobe (Japón, 1995, Mw 6.9).

En general, todos los requisitos (ausencia de cohesión, permeabilidad moderada a baja, y elevada porosidad) se encuentran en suelos arenosos, especialmente arenas finas y arenas con limos (Fig. 3). Estos sedimentos son frecuentes en diversos contextos geológicos: sedimentos deltaicos, dunas eólicas y fluviales. Youd y Perkins (1987) han recopilado información acerca de numerosos terremotos en los que ha ocurrido licuefacción, el medio sedimentario de los depósitos así como la naturaleza de los sedimentos afectados, su edad y la frecuencia con que ocurría en cada medio. El análisis de los datos recopilados les permitió clasificar cada medio en diferentes grados de susceptibilidad o propensión a sufrir el fenómeno (Tabla II). La edad hace que la susceptibilidad disminuya, pues de forma natural los sedimentos se compactan y cementan.

En España hay ejemplos históricos de licuefacción durante terremotos en sedimentos fluviales y litorales recientes. Los mejor documentados corresponden a los terremotos de Andalucía (1884), Jacarilla (1919) y, sobre todo, Torrevieja (1829). En este último caso, Larramendi (1829) elaboró un detallado informe, solicitado por la Corona, donde describe los daños causados por el terremoto y en él adjunta una tabla donde cuantificó, entre otros daños, la su-

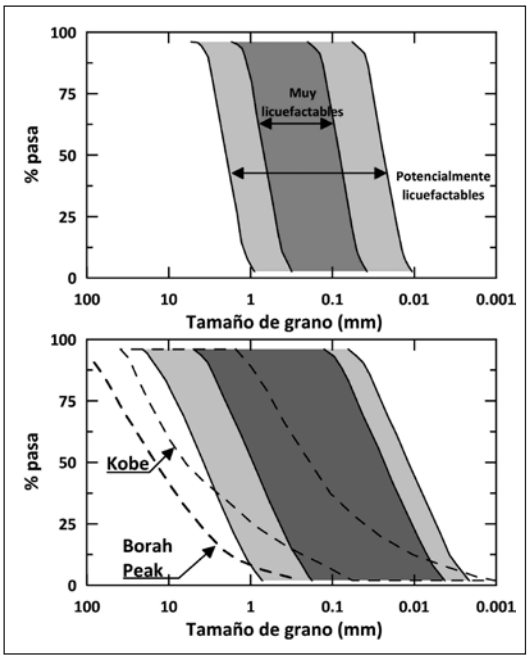


*Fig. 3. Granulometrías más propensas a sufrir licuefacción (de Obermeier, 1996).*

*Tabla II. Clasificación de la susceptibilidad a licuefacción de diversos medios sedimentarios en función de su edad (Youd y Perkins, 1978).*

| | Tipo de depósito | Distribución de los sedimentos no cohesivos | Probabilidad de que sedimentos no cohesivos saturados sean susceptibles a licuefacción (por edad del depósito) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | < 500 años | Holoceno | Pleistoceno | Plioceno |
| Depósitos continentales | Canales fluviales | Localmente variable | Muy alta | Alta | Baja | Muy baja |
| | Llanura de inundación | Localmente variable | Alta | Moderada | Baja | Muy baja |
| | Abanicos y llanuras aluviales | Amplia | Moderada | Baja | Baja | Muy baja |
| | Terrazas y llanuras marinas | Amplia | - | Baja | Muy baja | Muy baja |
| | Deltas y abanicos deltáicos | Amplia | Alta | Moderada | Baja | Muy baja |
| | Lacustre y playa | Variable | Alta | Moderada | Baja | Muy baja |
| | Coluvial | Variable | Alta | Moderada | Baja | Muy baja |
| | Talud | Amplia | Baja | Baja | Muy baja | Muy baja |
| | Dunas | Amplia | Alta | Moderada | Baja | Muy baja |
| | Loess | Variable | Alta | Alta | Alta | ? |
| | Tillitas | Variable | Baja | Baja | Muy baja | Muy baja |
| | Tuff | Rara | Baja | Baja | Muy baja | Muy baja |
| | Tefra | Amplia | Alta | Alta | ? | ? |
| | Suelos residuales | Rara | Baja | Baja | Muy baja | Muy baja |
| | Sebka | Localmente variable | Alta | Moderada | Baja | Muy baja |
| Zona costera | Delta | Amplia | Muy alta | Alta | Baja | Muy baja |
| | Estuarino | Localmente variable | Alta | Moderada | Baja | Muy baja |
| | Playa de alta energía | Amplia | Moderada | Baja | Muy baja | Muy baja |
| | Playa de baja energía | Amplia | Alta | Moderada | Baja | Muy baja |
| | Albufera | Localmente variable | Alta | Moderada | Baja | Muy baja |
| | Zona de batida | Localmente variable | Alta | Moderada | Baja | Muy baja |
| Artificiales | Relleno no compactado | Variable | Muy alta | - | - | - |
| | Relleno compactado | Variable | Baja | - | - | - |

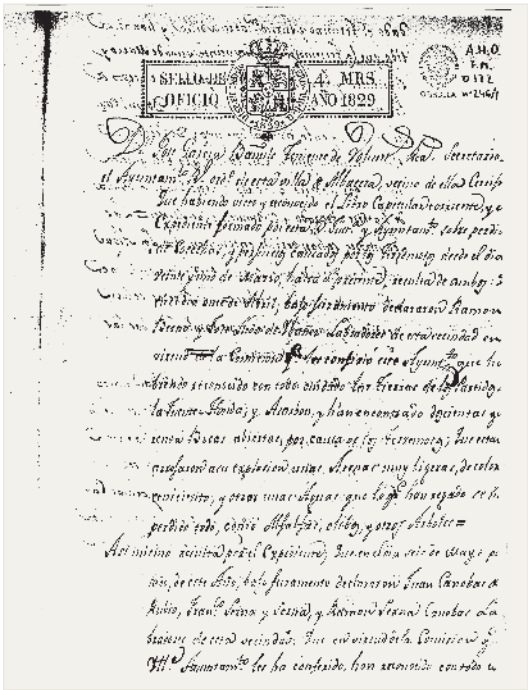


*Fig. 4. Carta de D. José García, Secretario del Ayuntamiento de Albatera (Alicante), donde se informa de la existencia de "bocas" por donde salió arena y agua tras el terremoto de 21 de marzo de 1829 (Terremoto de Torrevieja).*

perficie de terreno afectada por licuefacción en cada núcleo urbano. Existe además numerosa correspondencia de la época, donde se describe la apertura de "bocas" en el terreno por donde salió arena y agua. En la figura 4 se presenta una de estas cartas, donde se describe lo siguiente: *"(...) que habiendo reconocido con todo cuidado las tierras de la Partida de la Fuente-Honda, y Arabon, y han encontrado doscientas sesenta bocas abiertas por causa de los terremotos; que estas arrojaron a su explosión unas Arenas muy ligeras, de color ceniciento, y otras unas Aguas que lo que han regado se ha perdido todo (...)"*. Compárese lo descrito en esta carta con lo observado en las fotografías de la figura 2 y se comprobará que se trata del mismo fenómeno.

Además de la propia naturaleza del material, es importante que éste se encuentre a poca profundidad. Si no fuera así, los esfuerzos debidos al peso del terreno serían muy elevados y las presiones intersticiales requeridas para contrarrestarlos deberían ser tan elevadas que no ocurrirían en la práctica. Por todo ello, se considera que la mayor susceptibilidad tiene lugar para sedimentos a profundidades entre 0 y 10 m, disminuyendo para profundidades mayores.

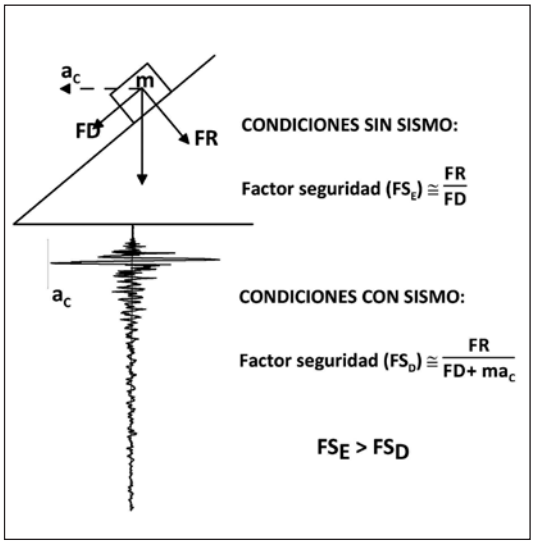


*Fig. 5. Distribución de fuerzas en un modelo simplificado de una masa potencialmente inestable en una ladera.*

Además de la existencia de materiales susceptibles, es necesario que los terremotos generen una perturbación de tal severidad que provoque la licuefacción. La experiencia indica que los terremotos deben tener una magnitud mínima de 5.0 (Atkinson et al., 1984), si bien los efectos de la licuefacción sólo se manifiestan en la superficie del terreno cuando dicha magnitud excede de 5.5 (Ambraseys, 1988). Las aceleraciones mínimas que debe sufrir el terreno para que ocurra licuefacción dependen de la duración de la sacudida y, en consecuencia, de la magnitud del evento: 0.025g para una magnitud (Mw) de 8.25 y 0.12g para Mw 5.5 (Carter y Seed, 1988).

Una vez que la licuefacción tiene lugar, la elevada presión intersticial hace que el agua fluya hacia zonas de menor presión, frecuentemente la superficie del terreno. Para ello aprovecha las zonas de debilidad (fracturas, grietas, etc.) que puedan existir o que se desarrollen durante la propia sacudida en los materiales suprayacentes. Una vez alcanzada la superficie, el agua fluye sobre la superficie (Tabla I, videos 4 y 5). La arena que pudiera ser arrastrada por el agua será depositada donde ésta no posea suficiente capacidad de transporte (Fig. 2, Tabla I, video 6). En ocasiones, el agua y la arena no llegan a la superficie, observándose en el registro geológico como diques de arena, sin estructura interna, inyectados en el material in situ, que sí conserva su estructura interna original. Estas estructuras son usadas para identificar paleoterremotos en el registro geológico (Masana et al., 2011).

Finalmente, como consecuencia de la reducción de la resistencia del sedimento que sufre licuefacción, cualquier estructura que se encuentre sobre dicho nivel oscilará y, finalmente, se hundirá en él (Tabla I, videos 3, 7-9), pudiendo sufrir daños.

## MOVIMIENTOS DE LADERA SISMOINDUCIDOS

Desde un punto de vista físico, la estabilidad de una ladera es equiparable, con las lógicas diferencias, al clásico problema físico de deslizamiento de un bloque sobre un plano inclinado (Fig. 5). El bloque constituiría la masa que potencialmente puede movilizarse. El peso de esta masa se descompone en dos fuerzas: una que es paralela a la ladera y favorece el movimiento (fuerza desestabilizadora, FD), y otra que es normal a la misma y contribuye a mantener la masa en su sitio (fuerza estabilizadora, FR). La estabilidad de la ladera viene dada por el balance entre estas dos fuerzas: cuando FR < FD,

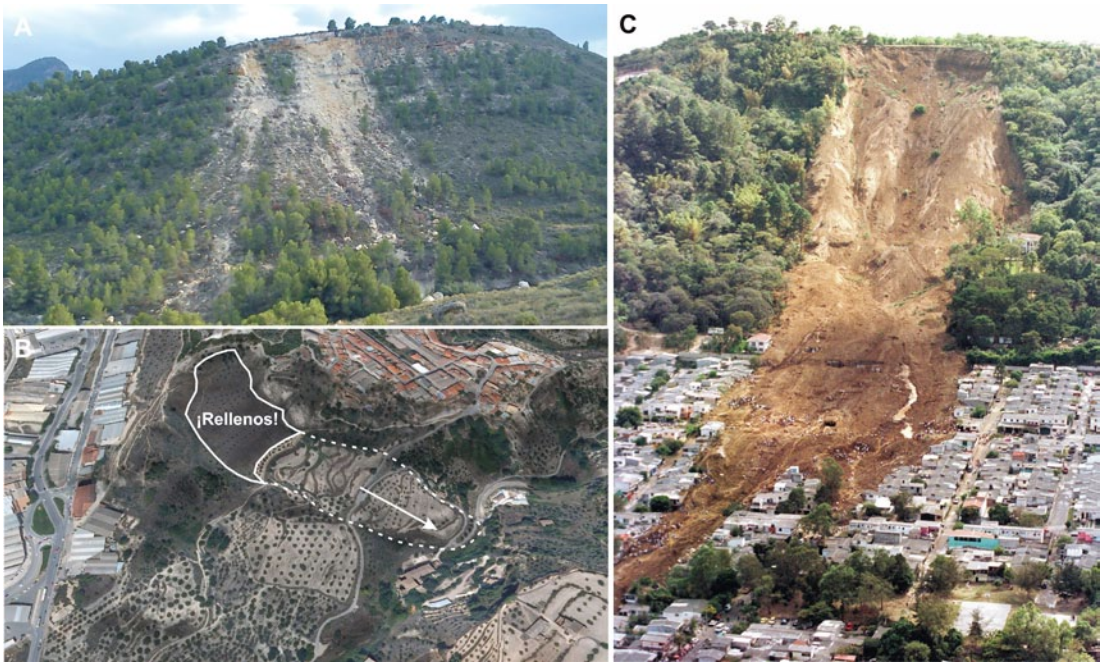


*Fig. 6. Tipologías básicas de inestabilidades de ladera inducidas por terremotos. A: "Disrupted" - Desprendimiento de rocas (Terremoto de Lorca, 11 Mayo 2011, Mw 5.1). B: "Coherent" – Deslizamiento en margas (Terremoto de Alcoy, 2 Diciembre 1620, Mw 5.5). C: "Flow" – Flujo de tierras (Terremoto de El Salvador, 13 Enero 2001, Mw 7.6). Foto: Agencia EFE, por cortesía de Geólogos del Mundo (portada del número 17.3 de la revista Enseñanza de las Ciencias de la Tierra).*

la ladera se dice que es inestable y el movimiento de la masa es previsible (aunque no se puede establecer cuándo ocurrirá). En este contexto, un terremoto actúa como una fuerza desestabilizadora adicional, que se suma a FD, favoreciendo la ocurrencia de inestabilidades. La intensidad del movimiento del suelo (o magnitud de la fuerza de origen dinámico) y el estado en que se encontraba la ladera antes del terremoto (balance de fuerzas FR vs FD) determinarán cómo se comportará ésta durante el mismo.

Establecido cómo actúa un terremoto sobre una ladera, se plantean cuestiones como ¿qué tipo de movimientos de ladera puede desencadenar el terremoto? ¿Cuántas puede llegar a desencadenar un terremoto? o ¿A qué distancia del foco pueden ocurrir?

Un terremoto puede desencadenar cualquier tipo de movimiento de ladera. En este sentido, las clasificaciones al uso en el estudio de movimientos de ladera inducidos por otras causas (p.e. lluvia) son perfectamente válidas (Varnes, 1978; Copons y Tallada, 2009); no obstante, cuando se aborda el problema desde una óptica sísmica, se las acostumbra a reunir en tres grupos básicos (Keefer, 1984). El primer grupo lo constituyen los denominados "movimientos desorganizados" ("disrupted slides/falls") o inestabilidades cuya masa se rompe como consecuencia del movimiento (Fig. 6A). En este grupo quedan incluidos movimientos como desprendimientos, vuelcos, avalanchas, algunos deslizamientos, etc. El segundo grupo, o "movimientos coherentes" ("coherent slides"), incluye a aquellas inestabilidades que preservan su estructura original a pesar del movimiento (Fig. 6B), frecuentemente deslizamientos. Finalmente, el tercer grupo lo constituyen los flujos y las extensiones laterales ("flows /lateral spread", Fig. 6C).

Se ha comprobado que para que ocurran estos tipos básicos de inestabilidades es necesario que el terremoto tenga una magnitud mínima. Así, el terremoto debe tener una magnitud Ms de 4.0 para desencadenar inestabilidades del tipo "desorganizado", 4.5 para el tipo "coherente", y 5.0 para "flujos" (Keefer, 1984). No obstante, como quiera que el estado de la ladera antes del terremoto (equilibrio de fuerzas entre FR y FD) puede ser muy precario, es posible que terremotos de magnitud baja (<4.0) puedan desencadenar, ocasionalmente, inestabilidades en laderas. Así, son conocidos ejemplos de desprendimientos producidos por terremotos de magnitud menor que 3.0 (Rodríguez et al., 1999; Delgado et al., 2011a). Los mismos ocurrieron siempre en taludes muy fracturados, con bloques de suelo/roca en equilibrio muy precario.

Por otra parte, un terremoto puede desencadenar los tres tipos básicos de movimientos de ladera, pero la tipología "movimientos desorganizados" es la más abundante en la naturaleza, mientras que "flujos y extensiones laterales" son los menos frecuentes. Este hecho se observa claramente en los datos procedentes de terremotos históricos en la Cordillera Bética (Delgado et al., 2011b; Alfaro et al., 2012a,b). La figura 7 muestra la frecuencia de cada

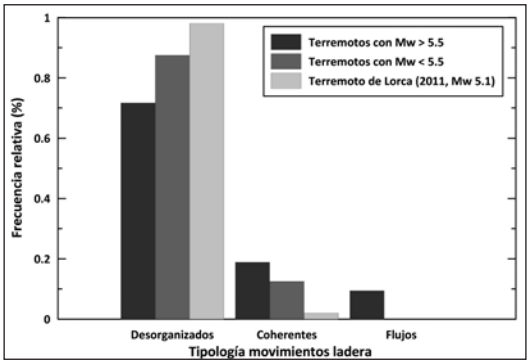


*Fig. 7. Frecuencia de ocurrencia de las tipologías básicas de movimientos de ladera inducidos por terremotos en la Cordillera Bética.*

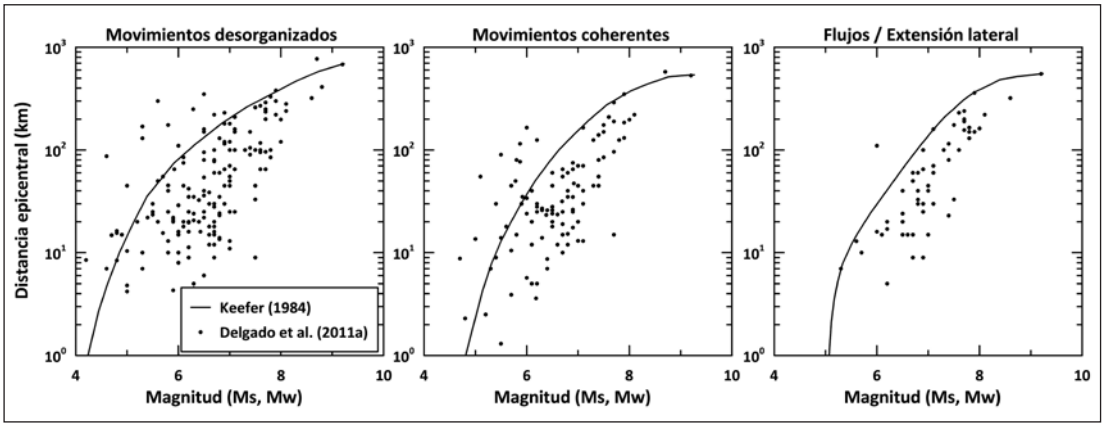


*Fig. 8. Distancias epicentrales máximas observadas para inestabilidades inducidas por terremotos en función de la magnitud de los eventos.*

tipología. Cuando se consideran las inestabilidades inducidas por los eventos de magnitud más elevada (Mw > 5.5), los movimientos desorganizados representan casi el 70% del total; para eventos de magnitud inferior a este umbral, no se conocen flujos y los movimientos desorganizados constituyen más del 80% del total de inestabilidades producidas. Para el caso del terremoto de Lorca de mayo de 2011, los movimientos desorganizados (e.g. desprendimientos en suelos y/o rocas) representan más del 95% del total de inestabilidades desencadenadas por este evento (Alfaro et al., 2012 a,b). Los movimientos coherentes (deslizamientos) fueron poco frecuentes. Esto es así porque para movilizar una masa coherente, generalmente de gran tamaño, es necesaria una excitación de cierta amplitud que actúe durante un periodo de tiempo suficientemente largo como para poder poner en movimiento dicha masa. Si el evento es de magnitud moderada o baja, su amplitud y duración no son suficientes. Algo similar sucede con los flujos y las extensiones laterales, pero requieren además que el terreno esté saturado en agua (o próximo a este estado), lo que explica su menor frecuencia en la naturaleza.

El número de inestabilidades inducidas por un terremoto depende, como otros aspectos comentados, del relieve y del estado de las laderas en la región afectada por el terremoto así como de la severidad de la sacudida. Para una misma región (y por tanto igualdad de relieve y de condiciones preterremoto), cuanto más severo sea el movimiento del suelo (mayor valor pico de movimiento del suelo y mayor duración de la sacudida), mayor número y a mayores distancias se producirán las inestabilidades. Así experimentalmente se ha comprobado que existe una relación entre la magnitud de los terremotos (que controla la severidad y duración de la sacudida) y las distancias epicentrales máximas a las que se han producido las inestabilidades. La figura 8 presenta la información disponible al respecto y en ella se comprueba que eventos de magnitud alta (Mw ≥ 7.0) pueden provocar (o reactivar) movimientos de ladera a centenares de kilómetros del epicentro. Tal fue el caso del deslizamiento de Güevéjar (Granada, Fig. 9), inducido por el terremoto de Lisboa de 1755 (Mw 8.7), con epicentro localizado a más de 500 km de la inestabilidad (Martínez Solares, 2001). Los daños causados obligaron a des-

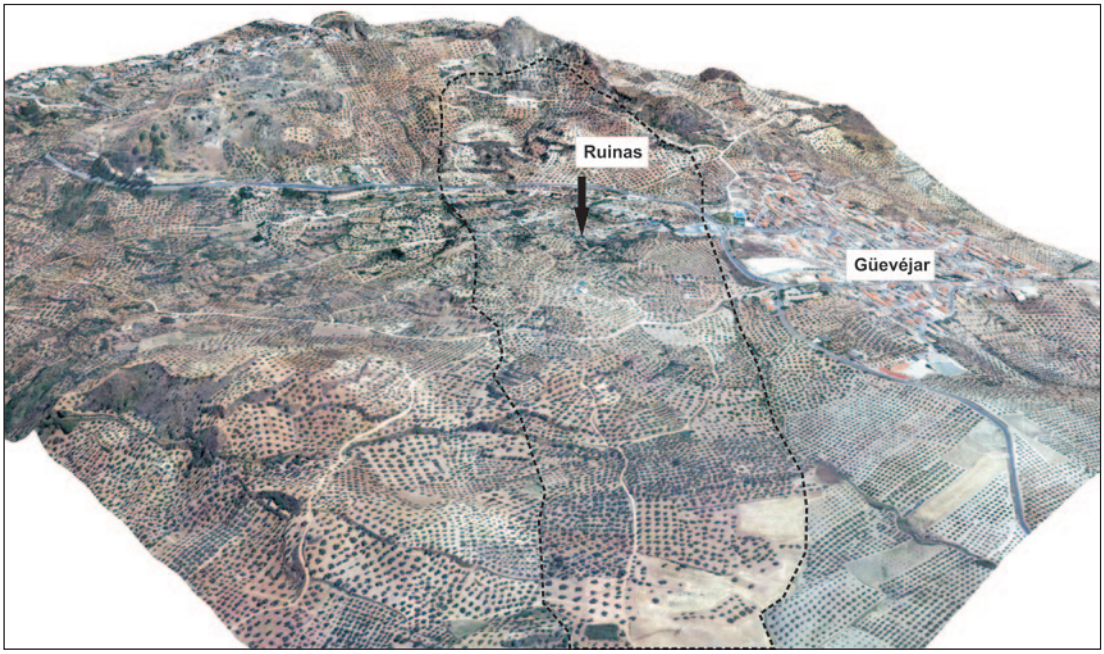


*Fig. 9. Deslizamiento de Güevéjar (Granada), inducido por los terremotos de 1755 (Mw 8.7) y 1884 (Mw 6.5).*

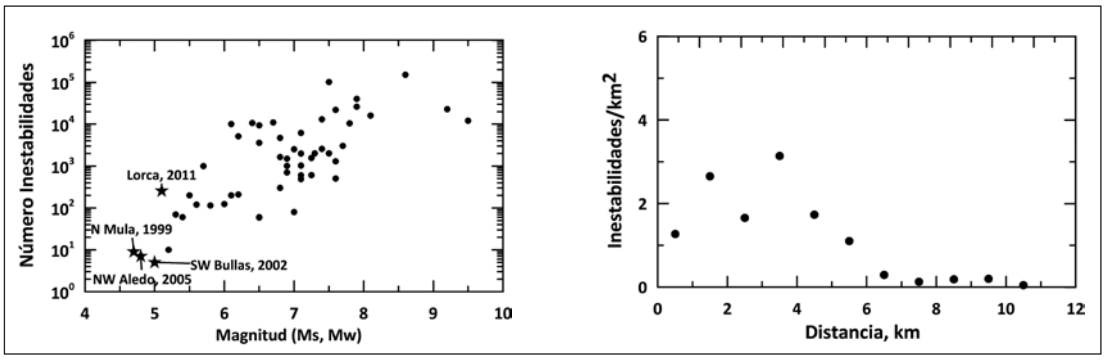


*Fig. 10. A: Número de inestabilidades inducidas por terremotos en función de la magnitud. Se incluyen datos de los terremotos ocurridos en las última década en el SE Peninsular. B: Distribución espacial (densidad de inestabilidades inducidas por km²) para el terremoto de Lorca de 2011 (Alfaro et al., 2012b).*

alojar temporalmente el pueblo, que se encontraba dentro del deslizamiento. Posteriormente, el mismo deslizamiento fue reactivado por otro terremoto en 1884 (Terremoto de Andalucía, Mw 6.5) (Martínez-Solares, 2011), con epicentro a unos 45 km del mismo, causando la destrucción casi completa del pueblo (Sanz, 1992). Ante las repetidas reactivaciones, el pueblo se reconstruyó en una ubicación distinta, a pocos kilómetros del antiguo.

Keefer (1984) propuso un conjunto de relaciones experimentales para delimitar las distancias máximas observadas de ocurrencia de las inestabilidades de ladera inducidas por terremotos (Fig. 8); sucesivos datos acumulados desde la propuesta de estas curvas indica que estas curvas son apropiadas en la mayoría de los casos, aunque ocasionalmente pueden reconocerse inestabilidades a distancias aún mayores. Cuando esto ocurre, se ha comprobado que suelen concurrir una o varias de las siguientes situaciones: (1) ocurrencia de fenómenos de amplificación local de la vibración, (2) el terremoto ha afectado a zonas susceptibles (propensas) a sufrir inestabilidad, (3) el evento es parte de una serie sísmica con múltiples eventos de magnitud moderada o alta, o (4) el terreno estaba saturado por lluvias antes del terremoto (Delgado et al., 2011a).

La magnitud del terremoto también controla el número de inestabilidades inducidas (Fig. 10A). Sin embargo, dicho número puede variar notablemente dependiendo, una vez más, del estado en que se encontraran las laderas antes del evento y de los factores mencionados anteriormente. El terremoto de Lorca de Mayo de 2011 constituye un magnífico ejemplo de lo comentado. Así, de este evento se han inventariado más de 250 inestabilidades (Alfaro et al., 2012 a,b; Fig. 10A); sin embargo, terremotos de magnitud similar registrados en el mismo ámbito geográfico (Mula 1999, Bullas 2002 y Aledo 2005) no desencadenaron tantas inestabilidades (Delgado et al., 2011b).

La distribución de estas inestabilidades, por otra parte, tampoco es uniforme en el espacio. Así, las mayores concentraciones se observan alrededor del epicentro, donde la severidad de la sacudida es mayor, y disminuyen al alejarnos de éste. Sin embargo, este hecho está también controlado por otros factores. Nuevamente, el terremoto de Lorca de 2011 es un ejemplo de distribución "irregular" debido a la concurrencia de factores "no sísmicos" (Fig. 10B): el epicentro se localizó próximo a la llanura del río Guadalentín, en una zona de relieves suaves. Sin embargo, a pocos kilómetros del epicentro, tanto al NE como al W/SW se encuentran los relieves de la Sierra de la Tercia y de Peña Rubia, cuyas laderas escarpadas han favorecido los numerosos casos de movimientos de ladera sismo-inducidos reconocidos.

## DAÑOS CAUSADOS POR LOS EFECTOS GEOTÉCNICOS DE LOS TERREMOTOS

La ocurrencia de efectos geotécnicos durante un terremoto da lugar a daños y pérdidas para la sociedad. Dichas pérdidas pueden ser directas o indirectas.

Los daños directos derivan de la ocurrencia de cualquiera de los fenómenos descritos directamente bajo un edificio o estructura, causando movimientos en el terreno sobre el que se cimenta el bien dañado (Fig. 11). Las estructuras soportan movimientos diferenciales de sus cimentaciones de pocos centímetros. A menos que el movimiento de la masa permita un movimiento al unísono de toda la estructura (Tabla I, video 8) o movimientos de pocos centímetros

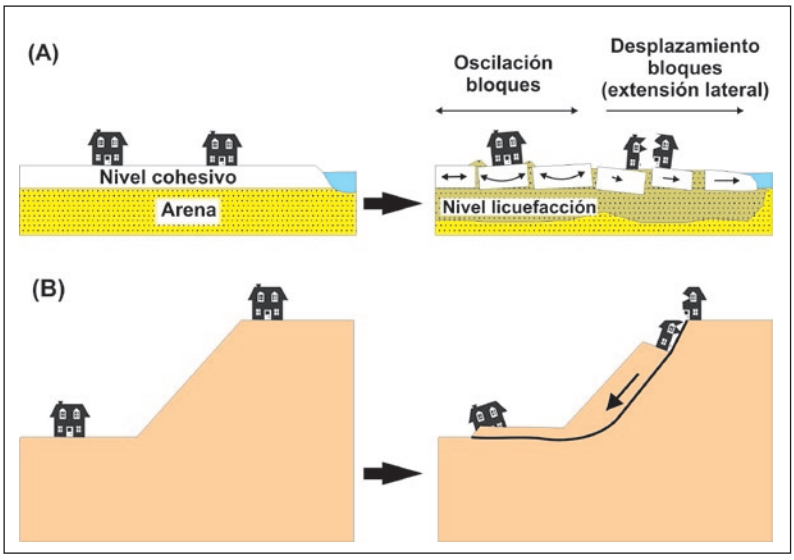


*Fig. 11. Causas frecuentes de daños directos por efectos geotécnicos durante terremotos. A: Daños por licuefacción. Es interesante comparar es esquema con los videos 7 y 8 (Tabla I). B: Daños por movimientos de ladera.*

entre los elementos de la cimentación, la estructura quedará (gravemente) dañada. En el caso concreto de los movimientos de ladera, otros daños directos se producirán sobre aquellos bienes situados en la trayectoria de la masa en movimiento: las estructuras no están diseñadas para soportar el impacto de bloques de suelo/roca o el empuje de una gran masa en movimiento, por lo que en caso de verse alcanzadas quedarán muy dañadas, colapsando. Frecuentemente, los casos documentados de muertes por movimientos de ladera sismo-inducidos tienen lugar asociados a estos últimos casos: personas que vivían o se encontraban dentro de edificios que colapsan por efecto del movimiento/alcance de la inestabilidad.

Ya se ha comentado el caso de Güevéjar (Fig. 9), que finalmente fue reconstruido en un emplazamiento diferente después de haber sido destruido dos veces por el movimiento del deslizamiento sobre el que se encontraba. Otro ejemplo lo encontramos en Alcoy (Alicante), donde colapsaron varias viviendas construidas sobre terreno que deslizó al río Molinar por efecto del terremoto ocurrido el 2 de diciembre de 1620, Mw 5.5. En el mismo murieron las personas que se encontraban en ese momento dentro de las viviendas. Estos ejemplos palidecen ante la magnitud de la catástrofe que tuvo lugar durante el terremoto de Chimbote, Perú, en 1970. El evento, de magnitud 7.9 provocó un flujo de tierras y agua, de varios millones de toneladas de masa, que avanzó rápidamente por un valle estrecho hasta alcanzar las ciudades de Yungay y Ranrahirca, causando más de 20.000 muertos, casi un tercio del total de muertes causadas por el terremoto (estimadas en 66,000). La cicatriz (así como parte de la masa del flujo) es aún reconocible en fotografías de satélite o en Google Earth (volar a -9.108211º, -77.626823º). Otros eventos recientes han causado también centenares de muertes, como los terremotos de Filipinas (1990), Irán (1997), El Salvador (2001; Fig. 6C) o Pakistán (2005).

Los daños directos por licuefacción no son tan espectaculares ni provocan muertes, salvo casos extraordinarios. Hay frecuentes ejemplos de edificios que colapsan por efecto de la licuefacción, como los conocidos edificios dañados durante el terremoto de Niigata (1964), que frecuentemente ilustran libros y webs sobre la temática (http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/selectpiclique/nigata64/tiltedbuilding.jpg). Por efecto de la licuefacción se producen los dos fenómenos mencionados en apartados previos: variaciones de volumen, que causan asientos diferenciales en la cimentación, y reducción de la resistencia al corte del terreno, permitiendo el hundimiento del edificio en el terreno. Así, hubo zonas en Dagupan (Filipinas) donde se observaron edificios que se hundieron hasta 2 m en el terreno después del terremoto de Luzón de 1990 (Tabla I, vídeo 9). Estos daños se amplifican en edificios situados en los límites entre zonas afectadas y no afectadas por licuefacción, debido a los notables movimientos diferenciales que sufren las cimentaciones.

La licuefacción causa graves daños directos en las proximidades a superficies libres, como son los

*Fig. 12. Ejemplos de inestabilidades de ladera desencadenadas por el terremoto de 11 de mayo de 2011 en Lorca, Mw 5.1, afectando a carreteras y caminos en los alrededores de la ciudad. Nótese los cráteres de impacto dejados por otros bloques.*

cauces de ríos, canales o puertos, donde permite el movimiento lateral del terreno superficial, que flota sobre el afectado por licuefacción, hacia dicha superficie libre (Fig. 11A). Así, el terremoto de 1995 en Kobe (Japón) causó licuefacción de rellenos que se habían utilizado para ampliar las instalaciones portuarias, inutilizándolas (http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/quakes/kobe/kobe.html).

Además de estos daños directos, los efectos geotécnicos también los causan de forma indirecta. Ello es así porque pueden ser centenares o miles las inestabilidades desencadenadas por un terremoto (Fig. 10A) o porque la licuefacción puede afectar a decenas de km². La probabilidad de que tales fenómenos afecten a una vía de comunicación (Fig. 12) u otros servicios básicos para nuestra sociedad (conducciones de luz, gas, agua, etc.), dejándolas inservibles, es por ello muy elevada. Este hecho se va a traducir en una ralentización/impedimento para la llegada de medios de emergencia o salidas de heridos en áreas montañosas, donde las vías de comunicación están limitadas por la propia orografía, pero también producirá daños por cese de actividad económica (los productos no pueden llegar/salir de las zonas incomunicadas o no hay energía para producirlos). Este hecho fue dramático en el caso de la ciudad de Kobe (Japón) por efecto del mencionado terremoto de 1995: el coste económico directo de la licuefacción (reconstruir los muelles) fue pequeño en comparación con el daño a la economía local, basada en la exportación de equipos y productos (era el principal puerto exportador de Japón antes del terremoto), pues las actividades portuarias se desviaron a otros puertos.

En otros casos, los daños indirectos vienen motivados por inducir, a su vez, otros riesgos. Éste fue el caso del terremoto de Wenchuan (China), Mw 7.9, ocurrido el 12 de mayo de 2008. A raíz del terremoto, centenares de movimientos de ladera se produjeron en un área de relieve escarpado, algunos de ellos de grandes dimensiones. Frecuentemente, estas inestabilidades colapsaron los fondos de valle, generando presas aguas arriba, que inundaron amplias zonas bajas de dichos valles (Cui et al., 2009).

A partir del análisis estadístico de los daños causados por 50 terremotos durante el periodo 1989-2003, Bird y Bommer (2004) han cuantificado las causas de los daños directos ocasionados por diversos fenómenos que acompañan a un terremoto (Fig. 13). Para los eventos considerados en su muestra, los daños en edificaciones son causados mayoritariamente por la sacudida (Fig. 13A). En cambio, las vías de comunicación sufren muchos daños por los efectos geotécnicos (más de la mitad de la casuística), independientemente de si el terremoto afectó gravemente o no a este tipo de infraestructuras (Fig. 13B y 13C). Finalmente, para otras infraestructuras, la mayor parte de los daños (45% del total) vuelven a estar producidos por la sacudida, aunque la licuefacción adquiere gran importancia como agente causante cuando los daños son de carácter moderado.

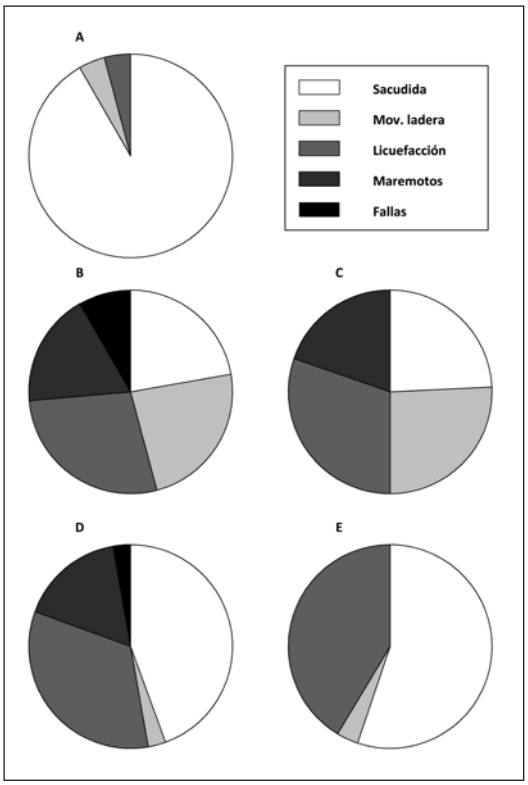


*Fig. 13. Causas de los daños directos producidos por terremotos (según Bird y Bommer, 2004). A: Daños en viviendas. B: Terremotos con daños significativos en vías de comunicación. C: Terremotos con daños moderados en vías de comunicación. D: Terremotos con daños significativos en otras infraestructuras. E: Terremotos con daños moderados en otras infraestructuras.*

## APRENDIENDO DE LOS TERREMOTOS

Los fenómenos geotécnicos inducidos por los terremotos son conocidos desde antiguo. No obstante, el año 1964 marca un hito en su historia: dos terremotos, Alaska (Mw 9.2) y Niigatá (Mw 7.5), fueron acompañados por notables daños asociados a dichos efectos. Como consecuencia, el estudio de estos fenómenos adquirió notable popularidad en años sucesivos, desarrollándose modelos para su estudio y predicción.

Actualmente, la normativa sismorresistente vigente en España (NCSE-02; BOE 11 octubre 2002; http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres /053727 ED-0350-4280-8784-C8F4CC34655F/4491/norma1.pdf) ha centrado su atención en los efectos directos de la sacudida sobre los edificios, y no en los efectos inducidos entre los que se encuentran la licuefacción y los movimientos de ladera. Para estos dos fenómenos, la reducción del riesgo tiene que basarse tanto en políticas predictivas como preventivas.

Actualmente hay varias formas de predecir la ocurrencia de licuefacción (Finn, 2002) o de inestabilidades sismoinducidas (Jibson et al., 2000) a partir de información geotécnica estándar. Su uso

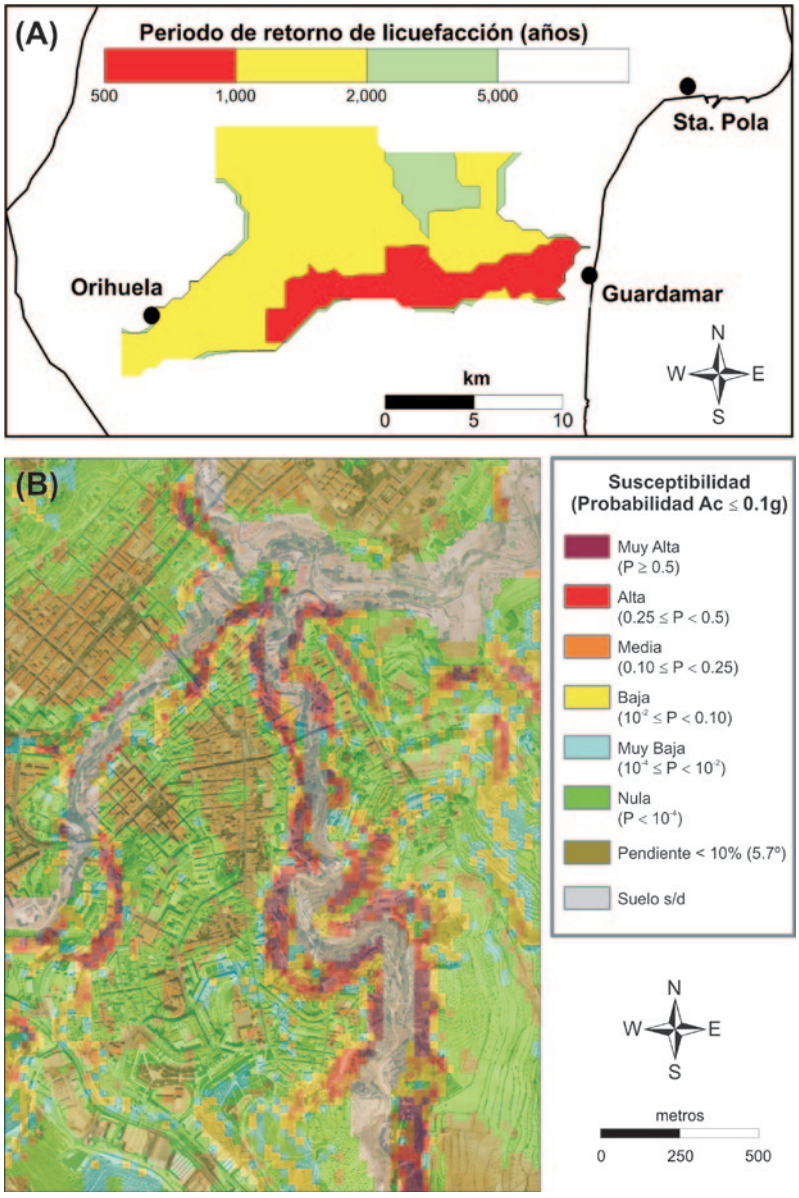


*Fig. 14. Ejemplos de mapas previsores de efectos inducidos por terremotos. A: Periodo de retorno para la ocurrencia de licuefacción de los sedimentos fluviales arenosos de la Vega Baja del río Segura, Alicante (Delgado et al., 1998). El inverso del dato representado es la probabilidad anual de ocurrencia del fenómeno. B: Susceptibilidad de laderas a movimientos de ladera en Alcoy, Alicante (Delgado et al., 2006).*

permite reconocer aquellas zonas del territorio más propensas o más vulnerables a estos fenómenos (Fig. 14).

De otra parte, cuando el territorio debe ocuparse a pesar de ser susceptible a cualquier de los fenómenos descritos, existen soluciones técnicas que permiten resolver alguno de los problemas planteados. Así, en zonas susceptibles a sufrir licuefacción de Japón o Estados Unidos se están realizando cimentaciones profundas, que se apoyan en materiales situados bajo los arenosos potencialmente licuefactables. También se construyen drenes que favorecen el flujo del agua y la disipación de las presiones intersticiales. De igual forma, para áreas afectadas por movimientos de ladera inducidos por terremotos, las soluciones técnicas son similares a las empleadas para problemas de estabilidad de ladera desencadenados por otras causas (por ejemplo lluvias): modificación de la pendiente de la ladera antes de construir, refuerzo del terreno, muros, etc.

## RECURSOS EN LA RED

Internet también constituye una poderosa herramienta en la búsqueda de información sobre efectos geotécnicos de los terremotos. Existen numerosas webs que tratan, de forma directa o indirecta, los problemas descritos. Dado el enorme número de páginas webs disponibles, el presente listado es necesariamente incompleto.

Los servicios geológicos de Canadá (http://www.nrcan.gc.ca/home) y Estados Unidos (www.usgs.gov) realizan un trabajo detallado de la sismicidad a nivel no sólo nacional, sino también global. Concretamente, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) contiene, en la página: https://geohazards.usgs.gov/, links generales al problema de terremotos, movimientos de ladera y otros riesgos naturales. En la misma se tiene acceso a un listado de terremotos históricos a nivel mundial, organizados por país, con una breve descripción de los daños causados. Aquellos eventos de mayor relevancia contienen links a webs de los correspondientes países con información adicional de los efectos del terremoto. La página http://earthquake.usgs.gov/learn/faq/?categoryID=8 tiene links que presentan, de una forma sencilla y bastante ilustrativa, los efectos de los terremotos, incluidos los efectos geotécnicos. De otra parte, en: http://earthquake.usgs.gov/learn/photos.php se encuentran links a reportajes fotográficos de terremotos históricos en USA, donde se pueden observar efectos geotécnicos de dichos terremotos. Adicionalmente, este organismo publica periódicamente informes técnicos (Professional Papers, Open File Reports), descargables desde http://pubs.er.usgs.gov/, donde se describen efectos de terremotos, estudios de zonación del territorio, desarrollo de metodologías de trabajo y zonación del territorio, análisis de casos estudio, etc.

La Universidad de Washington tiene una web dedicada específicamente al problema de la licuefacción (http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html), aunque no ha sido actualizada desde hace un tiempo. En ella se describe de forma muy didáctica la naturaleza del problema y contiene fotografías espectaculares de casos históricos de licuefacción.

La asociación EERI (Earthquake Engineering Research Institute, http://www.eeri.org/) organiza visitas técnicas sobre el terreno cada vez que tiene lugar un terremoto destructivo. Los resultados de dichas inspecciones quedan luego recopiladas en informes técnicos, denominados "Learning from earthquakes", descargables gratuitamente desde su web. En dichos informes existe un capítulo dedicado a los efectos geotécnicos de los terremotos. Este instituto también distribuye comercialmente presentaciones, vídeos y fotografías sobre dichos terremotos, organizados para su uso tanto didáctico

como técnico. Una labor equivalente realiza el instituto MCEER, de la Universidad de Buffalo (http://mceer.buffalo.edu/).

El trabajo original de Keefer (1984) sobre movimientos de ladera inducidos por terremotos, de gran valor científico, puede consultarse en http://www.ci.bainbridge-isl.wa.us/documents/pln/2001_smp_reference2/keefer_dk_landslides_caused_by_earthquakes.pdf.

A un nivel técnico elevado destacan las publicaciones técnicas realizadas por miembros de las universidades de California (http://www.universityofcalifornia.edu/), de Illinois en Urbana-Champaing (www.uiuc.gov), o de British Columbia en Vancouver (www.ubc.ca) sobre estos efectos geotécnicos sismoinducidos.

En Europa, diversos institutos de Geología y/o Geofísica (http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geofisica/sismologia/, http://www.dur.ac.uk/ihrr/, http://www.ingv.it/terremoti/geologia-dei-terremoti/, http://www.landslidecentre.org/index.html, http://www.igme.es/internet/default.asp) están estudiando los terremotos y sus efectos en sus respectivos ámbitos geográficos. En la web del Instituto Andaluz de Geofísica (http://www.ugr.es/~iag/) existen interesantes fotografías históricas del terremoto de Andalucía de 1884, en alguna de las cuales se pueden apreciar efectos geotécnicos (desprendimientos en la zona de Alhama de Granada).

Una página con vídeos y fotografías muy interesantes es http://blogs.agu.org/landslideblog/. En la misma se describen casos concretos y hay vídeos de algunas inestabilidades inducidas por terremotos. Más vídeos, con carácter general, se pueden encontrar en Youtube o en Google. Para tal fin es conveniente emplear como término de búsqueda alguno de los siguientes (o su equivalente en castellano): "landslides", "earthquake induced landslide", "liquefaction".

## CONCLUSIONES

La vibración o movimiento del suelo durante un terremoto es la causa principal (y también la más conocida) de daños en estructuras, de heridos y hasta de muertes. Sin embargo, existen otros fenómenos que acompañan a la sacudida y que también causan cuantiosos daños a nuestra sociedad, en ocasiones tantos que ensombrecen el efecto de la sacudida. Entre ellos encontramos los denominados efectos geotécnicos, que son debidos al comportamiento tenso-deformacional de los materiales durante la sacudida.

Mientras que los daños de la sacudida producen colapsos de estructuras, muy espectaculares y llamativos, fácilmente reproducibles en nuestro mundo digital, los daños causados por los efectos geotécnicos de los terremotos suelen ser menos "vistosos". No obstante, también contribuyen a la factura final de pérdidas, tanto en forma de daños directos como, sobre todo, daños indirectos, difícilmente evaluables debido a que cuando ocurren lo hacen en gran número y afectando amplias zonas de territorio y de una forma difícil de evaluar.

Actualmente se disponen de herramientas suficientes para poder hacer cartografías de riesgos que delimiten las zonas más propensas a sufrir estos fenómenos en caso de eventos futuros. El problema se plantea en la forma de integrar éstas en los planes de ordenación urbana o de gestión de riesgos. La actual normativa sismorresistente se centra en aspectos relacionados con la sacudidad pero no en la ocurrencia de efectos geotécnicos.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido realizado en el marco del GITE-11016-UA: Didáctica de la Geología. Quiero expresar mi agradecimiento a Pilar Villamor, del GNS de Nueva Zelanda, por sus gestiones para conseguir las fotografías de la figura 2.

## BIBLIOGRAFÍA

Alfaro, P., Delgado, J., García-Tortosa, F.J., Lenti, L., López, J.A., López-Casado, C., Martino, S. (2012a). Widespread landslides induced by the Mw 5.1 Lorca, SE Spain, earthquake of 11 May 2011. *Engineering Geology*. En prensa. Doi: 10.1016/j.enggeo.2012.04.002

Alfaro, P., Delgado, J., López, J.A., García-Tortosa, F.J., Lenti, L., López-Casado, C., Martino, S. (2012b). Landslides induced by the May 11 (2011), Lorca (SE Spain), earthquake (Mw 5.1). *Proc. ESC-ISL*, Banf, Canada. Junio 2012, 5 p.

Ambraseys, N.N. (1988). *Engineering Seismology, Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 17. Elsevier, Amsterdam, pp. 1 – 105.

Atkinson, G.M., Finn, W.D.L., Charlwood, R.G. (1984). Simple computation of liquefaction probability for seismic hazard applications. *Earthquake Spectra*, 1, 107-123.

Bird, J.F., Bommer, J.J. (2004). Earthquake losses due to ground failure. *Engineering Geology*, 75, 147-279.

Carter, D.P., Seed, H.B. (1988). *Liquefaction Potential of Sand Deposits Under Low Levels of Excitation*. Report No. UCB/ EERC-81/11. College of Engineering, Univ. of California, Berkeley. 119 pp.

CCS, Consorcio de Compensación de Seguros (2012). *Vigésimo segunda nota informativa sobre la actuación del Consorcio con motivo del terremoto de Lorca de 11-5-2011*. Madrid. http://www.consorseguros.es/c/document_library/get_file?folderId=12870&name=DLFE-19397.pdf.

Cui, P., Zhu, Y., Han, Y., Chen, X. y Zhuang, J. (2009). The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: distribution and preliminary risk evaluation. *Landslides*, 6, 209-223.

Copons, R., Tallada, A. (2009). Movimientos de ladera. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17.3, 284-294.

Delgado, J., López-Casado, C., Alfaro, P. Giner, J.J., Estévez, A. (1998). Liquefaction potential in the Lower Segura river basin (south-east Spain). *Engineering Geology*, 49, 61-79.

Delgado, J., Peláez, J.A., Tomás, R., Estévez, A., López Casado, C., Doménech, C., Cuenca, A. (2006). Evaluación de la susceptibilidad de las laderas a sufrir inestabilidades de ladera inducidas por terremotos. Aplicación a la cuenca de drenaje del río Serpis (provincia de Alicante). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 19.3-4, 197-218.

Delgado, J., Garrido, J., López-Casado, C., Martino, S., Peláez, J.A. (2011a). On far field occurrence of seismically induced landslides. *Engineering Geology*, 123, 204-213.

Delgado, J., Peláez, J.A., Tomás, R., García-Tortosa, F.J., Alfaro, P., López Casado, C. (2011b). Seismically-induced landslides in the Betic Cordillera (S Spain). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 1203–1211.

Finn, W.D.L. (2002). State of the art for the evaluation of seismic liquefaction potential. *Computers and Geotechnics*, 29, 329-341.

Jibson, R.W., Harp, E.L., Michael, J.A. (2000). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology,* 58, 271–289.

Keefer, D.K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin,* 95, 406–421.

Larramendi, J.A. (1829). Memoria y relación circunstanciada de los estragos que la terrible catástrofe de los terremotos de 21 de marzo y si¬guientes, principalmente, el del sábado 18 de abril hasta el presente día, han causado en Torrevieja y demás pueblos de la Gobernación de Orihuela y sus inmediaciones, en la ciudad de Murcia, y algunos pueblos de la provincia de este nombre. Imprenta Real. Madrid. 24 p. http://www.01.ign.es/ign/resources/sismologia/publicaciones/LarramendiTorrevieja1829.pdf.

Martínez-Díaz, J.J. (2011). El terremoto de Lorca de 11 de mayo de 2011: Características geológicas de un terremoto pequeño pero catastrófico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19.3, 362-364.

Martínez-Solares, J.M. (2011). Sismicidad pre-instrumental. Los grandes terremotos históricos en España. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19.3, 296-304.

Martínez Solares, J.M. (2001). *Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 de noviembre de 1755)*. Ministerio de Fomento. Monografía núm, 19. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, p. 756. http://www.ign.es/ign/resources/sismologia/publicaciones/EfectosEspanaterremotoLisboa.pdf.

Masana, E., Rodríguez-Pascua, M.A. y Martínez-Díaz, J.J. (2011). Los paleoterremotos: estudiando el pasado para entender el futuro. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19.3, 305-316.

Morales, J. (2011). El Terremoto, Mw=9.0, de Tohoku-Oki (Japón) del 11 de Marzo de 2011: El *big one* en un lugar no esperado. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19.3, 365-368.

Obermeier, S.F., Olson, S.M., Green, R.A. (2005). Field occurrences of liquefaction-induced features: a primer for engineering geologic analysis of paleoseismic shaking. Engineering Geology, 76, 209-234.

Rodríguez, C.E., Bommer, J.J., Chandler, R.J. (1999). Earthquake-induced landslides: 1980–1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18, 325–346.

Sanz, E. (1992). El deslizamiento de ladera de Güevéjar (Granada) durante los terremotos de Lisboa (1755) y Andalucía (1884). III Simposio de taludes y laderas inestables. La Coruña, 20-23 octubre 1992, 195-203.

Seed, H.B., Idriss, I.M. (1971). A simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 97.9, 1249–1273.

Varnes, D.J. (1978). Slope movement typesand processes. En: *Landslides: Analysis and control* (Eds.: R.L. Schuster, R.J. Krizek). Special Report 176. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, 11-33.

Youd, T.L., Perkins, D.M. (1987). Mapping of liquefaction severity index. *J. Geotech. Eng., Am. Soc. Civil Engineers*, 113.11, 1374-1392. ■

*Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 17 de abril de 2011 y aceptado definivamente para su publicación el 8 de septiembre de 2011.*