

Els efectes dels terratrèmols sobre el terreny

Sara Figueras Vila

1. Introducció

La vibració que, a causa d'un terratrèmol, s'observa en un punt determinat de la superfície de la terra es pot considerar el resultat de la superposició de tres factors: el trencament que es produeix a la font sísmica i que dóna lloc al terratrèmol, la propagació de les ones sísmiques i els efectes locals, determinats per la geologia i topografia del terreny proper al lloc d'observació.

En general, les capes superficials de dipòsits sedimentaris tous i poc consolidats poden amplificar de manera important el moviment del sòl, i contribuir així a l'augment dels danys causats pels terratrèmols. Aquest fenomen físic es coneix amb el nom d'efecte de lloc. D'altra banda, la topografia local també pot modificar les característiques de les ones incidents i originar el que anomenem efecte topogràfic. Els efectes de lloc i els efectes topogràfics s'engloben sota la denominació d'efectes locals.

A més d'aquests efectes se'n poden observar d'altres d'indirectes sobre el terreny, com poden ser les esclavissades, la líquüefacció o els tsunamis. No tractarem aquí els efectes induïts, com les inundacions per trencament d'embassaments o conduccions d'aigua, incendis originats pel trencament de conduccions de gas, el tancament de carreteres, de vies de tren, de comerços, contaminació de l'aire o l'aigua per escapaments tòxics, etc.

Els efectes locals poden ser molt destructors si afecten el terreny on s'assenten les ciutats i els edificis essencials (hospitals, bombers, centrals elèctriques, dipòsits d'abastiment d'aigua i combustible, etc.), i s'han de tenir en compte en la planificació territorial, en el disseny antisísmic d'estructures i en la revisió de les normes de construcció sísmoresistent.

2. Com es produeix un terratrèmol

Els terratrèmols són fenòmens naturals originats per la dinàmica del subsòl: les plaques tectòniques que formen l'escorça de la Terra suren sobre el mantell, els corrents de convecció del mantell fan que les plaques tectòniques llisquin, xoquin o se separin entre si. A les zones de contacte entre les plaques s'hi produeixen, doncs, friccions, fet que dóna lloc a una acumulació

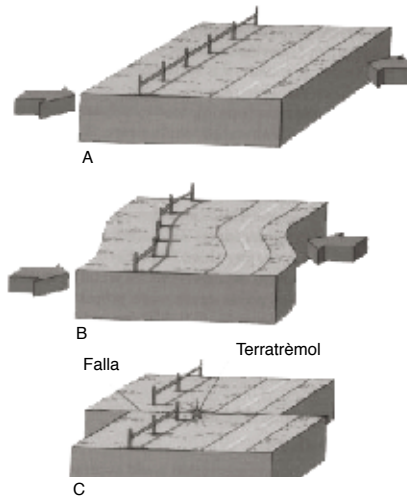


Figura 1. Seqüència de gràfics on es mostra com es produeix un terratrèmol.

de tensions que originen deformacions lentes fins a superar la resistència del material; quan aquest es trenca s'allibera de cop tota l'energia que s'ha anat acumulant amb el temps. Aquest alliberament sobtat dels esforços acumulats al llarg del temps a l'escorça de la Terra són els terratrèmols, es produeixen allà on és més fàcil de trencar els materials rígids de les plaques, al llarg de zones febles anomenades falles (figura 1). El trencament d'una falla produeix vibracions que es propaguen en totes direccions en forma d'ones elàstiques –les ones sísmiques–, i quan arriben a la superfície de la Terra es produeix un moviment d'oscil·lació que, segons la seva freqüència i amplitud podrà produir danys a les construccions i a les persones.

Un terratrèmol és, per tant, una alliberació sobtada d'energia acumulada que es propaga per la Terra en forma d'ones elàstiques i es percep com una vibració del sòl. En el món es perceben, de mitjana, 80.000 terratrèmols cada mes, aproximadament, 2.600 cada dia i 2 cada minut; els terratrèmols són fenòmens naturals comuns, però només uns pocs són danyosos.

La causa principal dels danys produïts pels terratrèmols és la sacsejada mateixa, que ocasiona la caiguda d'objectes i l'esfondrament d'edificis. El col·lapse dels edificis fa que els seus habitants quedin atrapats entre les runes i sovint morin per esclafament. La caiguda d'objectes pot produir ferides i pot arribar a matar si són objectes pesants (mobles, falsos sostres) o tallants (trossos de vidres de finestra).

3. Efectes sísmics locals

Es defineix l'efecte sísmic local com la variació del senyal sísmic entre dos punts propers, a causa de la configuració geològica, geometria, propietats dinàmiques de la formació superficial i la topografia de la superfície i del subsòl. Els terrenys tous i les capes superficials poc consolidades tenen propietats dinàmiques que contrasten amb el substrat rocós, fet que provoca la modificació del senyal sísmic, la geometria de les conques sedimentàries fa que les ones quedin atrapades i es produeixin fenòmens de ressonància en interferir entre si.

A la figura 2 es mostren diferents estructures i configuracions típiques que poden donar lloc a efectes locals. Els efectes locals poden modificar el senyal en la seva amplitud, contingut freqüencial i durada.

Els sismes catastròfics dels darrers 20 anys, així com observacions instrumentals obtingudes durant terratrèmols recents, han posat de manifest que el moviment sísmic del sòl varia, sovint dràsticament, en funció de la naturalesa, propietats mecàniques i topografia del lloc, i permeten concloure que els efectes locals poden tenir un paper molt important en el grau de distribució de danys durant un terratrèmol.

A la figura 3 es mostra un exemple pel cas del sisme de Michoacán (Mèxic) de l'any 1985. Es pot observar com les característiques locals del subsòl de Mèxic D. F. (punt c en la figura) van modificar el senyal sísmic tot i trobar-se lluny de l'epicentre; també hi podem apreciar la variació del contingut freqüencial, amplitud i durada del senyal sísmic respecte al registre obtingut en el punt a, més proper a l'epicentre i sobre substrat rocós.

La influència de la topografia sobre el senyal sísmic és ben coneguda. Les observacions dutes a terme en diversos terratrèmols permeten concloure que el dany es concentra a prop dels cims, lloc on s'obtenen també registres d'elevada amplitud. Els edificis situats dalt dels cims pateixen danys més greus que els localitzats a la base. La recerca sobre els efectes topogràfics se centra en estudis numèrics o en estudis empírics basats en desplegament d'instruments de registre. Els principals resultats sobre l'efecte topogràfic són: ampliació d'ones de cisalla prop de les crestes, presència de ressonàncies fonamentals de

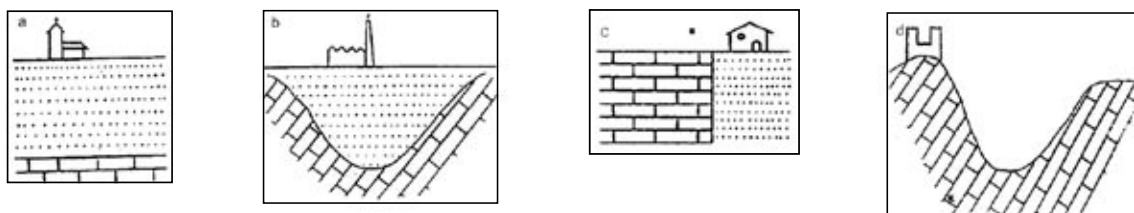


Figura 2. Estructures i configuracions típiques que poden donar lloc a efectes locals. a) Capes sedimentàries horitzontals sobre un fonament rocós. b) Ompliment sedimentari d'una vall. c) Fortes discontinuïtats laterals. d) Relleus (efecte topogràfic). (Bard et al. 1995).

les ones de cisalla a 3-5 Hz i dependència amb l'angle d'incidència de l'ona i les dimensions del relleu (CORAL, 2002).

Hi ha diferents mètodes per avaluar i incloure els efectes locals en els estudis de perillositat sísmica. Entre altres, mètodes empírics instrumentals a partir de registres de sismes en sòl i roca, mètodes empírics indirectes i mètodes de simulació numèrica per l'aplicació dels quals cal tenir un coneixement detallat de la geologia i geotècnia del lloc d'estudi. (FIGUERAS, 1994).

4. Microzonació sísmica

La microzonació sísmica consisteix en la divisió d'una regió en zones geogràfiques on es preveu que tindran la mateixa resposta relativa davant un terratrèmol. Els mapes de microzonació poden utilitzar-se per planificar la construcció i el desenvolupament urbà, per orientar el disseny resistent als terratrèmols dels edificis nous i reforçar els edificis i instal·lacions existents d'acord amb les reglamentacions antisísmiques vigents.

La microzonació sísmica considera les particularitats topogràfiques, geològiques i geotècniques d'una zona determinada per estudiar els efectes locals produïts per les característiques del terreny en certs emplaçaments, i els que són conseqüència indirecta del sisme, com els tsunamis, la líquüefacció, les esllavissades, els enfonsaments i els efectes induïts. Un objectiu prioritari en els estudis de microzonació sísmica és la recopilació de la màxima informació geotècnica del subsòl i sísmica, no només de la zona que s'estudia, sinó també de la que l'envolta.

Actualment s'apliquen diferents aproximacions per dur a terme els estudis de microzonació: tècniques experimentals junt amb la utilització d'aproximacions teòriques que inclouen la modelització del moviment del sòl sota diferents hipòtesis permeten classificar les àrees urbanes

en diverses zones amb diferent resposta davant d'un terratrèmol. A la figura 4 es mostra com a exemple el mapa de microzonació sísmica de la Cerdanya, en termes de l'increment d'intensitat macrosísmica que cal tenir en compte quan es vol considerar l'efecte local en els estudis de perillositat sísmica. (MACAU *et al.*, 2006)

En diferents països s'han elaborat recentment guies o recomanacions per dur a terme la microzonació sísmica, i els resultats dels treballs de microzonació s'estan incorporant a poc a poc en els codis de construcció antisísmica més recents.

En el Pla d'Emergències Sísmiques de Catalunya (SISMICAT) s'han tingut en compte els possibles efectes locals d'una manera simplificada, considerant la geologia predominant de cada municipi. (SUSAGNA *et al.*, 2006)

5. Efectes sísmics indirectes

Esllavissaments de terreny

Una esllavissada és la despesa i caiguda d'una massa de terra o de rocs al llarg d'un vessant (RIBA,

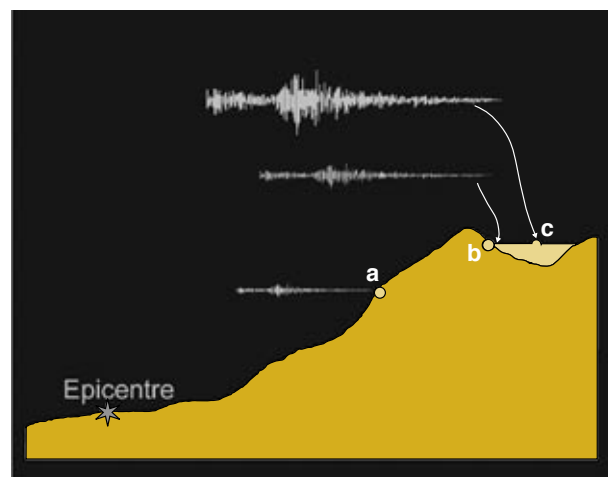


Figura 3. Comparació de registres sísmics obtinguts en emplaçaments amb diferents condicions locals i situats a diferent distància de l'epicentre del sisme de Michoacán (Mèxic) de l'any 1985.

1997). La velocitat pot ser molt variable, però en general són processos ràpids que poden abastar grans proporcions. La inestabilitat de talussos i vessants de muntanyes pot produir moviments en massa en zones amb pendents i característiques mecàniques susceptibles d'esllavissament. Les esllavissades activades per sisme han estat documentades des de 373 o 372 aC (SEED i IDRIS, 1968) i han donat lloc a desenes de milers de morts i nombroses pèrdues econòmiques durant el segle passat a tot el món.

El nombre d'esllavissades produïdes per sisme generalment s'incrementa amb l'augment de la magnitud d'aquest, però les condicions geològiques locals i els paràmetres sísmics també hi tenen una influència important. Un sisme pot donar lloc també a reactivacions d'esllavissades preexistents.

Un estudi de sismes mundials (KEEFER, 1984) mostra que hi ha una correspondència dels tipus i distribució d'esllavissades amb els sismes. Les esllavissades induïdes per sisme es classifiquen principalment tenint en compte el tipus de materials, les característiques del moviment i altres com el grau de fractura i saturació dels materials. Així, s'identifiquen catorze tipus d'esllavissades, que s'agrupen en tres grans categories: esllavissades fracturades o blocs, esllavissades en material cohesiu, i expansions laterals i fluxos. A la figura 5 es mostra un exemple de gran esllavissada activada per sisme de Kobe de l'any 1995.

El risc que presenten les esllavissades activades per sismes depèn de l'abundància d'aquestes, del seu moviment característic i de la distribució de la població i de les construccions. Les esllavissades més abundants i destructives activades per sisme són les caigudes de roques i els fluxos ràpids de terreny. La majoria de morts causats per aquests lliscaments queden sepultats o són transportats a diversos quilòmetres del lloc d'iniciació de l'esllavissada.

Hi ha diferents tècniques analítiques que permeten avaluar la perillositat d'esllavissada induïda per sisme, com per exemple la que s'està aplicant actualment en els estudis de risc sísmic que l'Institut Geològic de Catalunya efectua en el principat d'Andorra (FIGUERAS *et al.*, 2005)

Liqüefacció

La liqüefacció es defineix com la transformació d'un material granular sòlid a un estat fluid dens

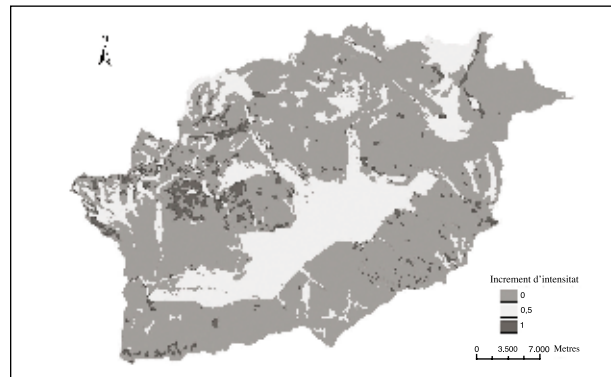


Figura 4. Zonació sísmica de la Cerdanya en termes de l'increment d'intensitat macrosísmica que cal aplicar quan es vol tenir en compte l'efecte local. (Macau *et al.* 2006).

causada per un augment de la pressió d'aigua entre els porus i una pèrdua de la resistència a l'esforç de cisalla. Per tant, tenint en compte les característiques del terreny i el seu grau de saturació d'aigua, quan aquest es troba sotmès a una excitació cíclica elevada, com per exemple la produïda pel pas d'una ona sísmica, augmenta la pressió intersticial fins que es perd el contacte entre les partícules que el componen, l'aigua que es trobava entre els porus s'allibera amb una forta pressió, el sòl perd completament la seva consistència i les deformacions induïdes en el terreny són molt grans (FIGUERAS, 1994).

La liqüefacció acostuma a produir-se, doncs, en terrenys formats per sorres i llïms saturats d'aigua. Com a resultat de la liqüefacció es poden observar en el terreny quatre tipus de fallida:

1. Despreniments laterals de blocs superficials de sediments causats per la liqüefacció d'una capa superficial. Aquests desplaçaments poden oscil·lar entre varis metres fins a algunes desenes de metres si les condicions del sòl són favorables a la liqüefacció i la sacsejada sísmica té una durada suficient.
2. Fluxos en el terreny que poden desplaçar masses de materials fins a desenes de quilòmetres i a velocitats de l'ordre de 10-20 km/h. Aquests poden produir-se tant en condicions aèries com subaquàtiques.
3. Oscil·lacions del terreny que ocorren quan la liqüefacció es produeix a certa profunditat i el pendent permet posteriors lliscaments laterals, les capes de sòl que es troben per sobre la capa liqüefactada es desacoblen i oscil·len sobre aquesta, i donen lloc a oscil·lacions en el



Figura 5. Esllavissada a Kobe, Japó, produïda pel sisme de 1995 i que va donar lloc a la destrucció de nombroses cases construïdes sobre el pendent (Roca et al., 2006).



Figura 6. Efectes de la líquefacció del terreny sobre alguns edificis, observats durant el sisme de Kocaeli de 1999 (Roca et al., 2006).

terreny que sovint s'observen en les ones que es propaguen. Se solen produir també ejeccions o boles d'arena i tancament i obertura de fissures en el terreny.

4. Pèrdua de resistència. Quan el terreny perd la resistència i es liqua es produeixen grans deformacions a l'interior de la massa de sòl que poden donar lloc a bolcades i enfonsaments d'estructures o edificis que tenen els fonaments construïts sobre aquests tipus de sòls.

Durant el sisme d'Alaska de 1964 es van observar grans moviments de masses de materials ocasionats per fluxos en el terreny. En el sisme de Niigata de l'any 1964, la pèrdua de consistència del terreny va donar lloc a la caiguda d'edificis. A la figura 6 es mostra un exemple de l'efecte del fenomen sobre algunes construccions de la ciutat d'Adazapan (Turquia) durant el sisme de Kocaeli de l'any 1999 (Roca et al., 2006). El material dels fonaments no va suportar els esforços de cisalla generats pel pas de les ones sísmiques i provocà l'enfonsament parcial o l'ensorrament dels edificis amb fonaments a poca fondària. Aquest fenomen no va observar-se en els immobles suportats amb pilons o que tenien soterranis.

En els mapes de microzonació que tenen en compte la susceptibilitat de líquefacció s'hi identifiquen zones segons el seu índex de potencial de líquefacció i incorporen mapes de períodes de retorn per sismes que poden generar líquefacció en materials susceptibles.

Tsunamis

Paraula d'origen japonès (*Tsu*=port, *nami*=ona). Designa una gran onada que entra en un port. Els terratrèmols, les erupcions volcàniques i les

esllavissades submarines tenen el potencial suficient per generar un tsunami. També pot estar produït per la caiguda d'un meteorit a l'oceà. El 75% dels tsunamis que tenen lloc en el món estan originats per terratrèmols.

Un tsunami consisteix en una sèrie d'onades marines que es generen quan una gran massa d'aigua es troba ràpidament desplaçada de la seva posició d'equilibri; quan aquesta gran massa d'aigua torna instantàniament al nivell d'equilibri, es generen una sèrie d'onades que es propaguen –conservant l'energia– en cercles de radi creixent a partir del punt d'impacte. La velocitat a què es propaga l'ona és proporcional a la fondària de l'oceà i a l'acceleració de la gravetat; quan l'ona es propaga per l'oceà ho fa a gran velocitat, de l'ordre de 700 km/h, amb una alçada molt petita, de l'ordre de 30 cm i amb longituds d'ona molt grans, de centenars de quilòmetres, i és per tant imperceptible. En apropar-se a una zona costanera, l'ona es va frenant i va augmentant la seva alçada fins a formar una gran paret d'aigua; la força de l'onada fa que l'aigua entri fins a centenars de metres terra endins i que inundi tot el que troba al seu pas.

Fondària (m)	Velocitat (km/h)	Longitud d'ona (km)
7000	942,9	282
4000	712,7	213
2000	504,2	151
200	159,0	47,7
50	79,0	23,0
10	35,6	10,6

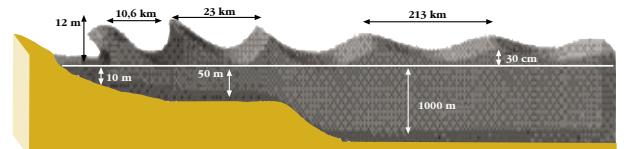


Figura 7. Propagació del tsunami, relació entre velocitat, profunditat del fons marí i distància entre crestes de les onades.

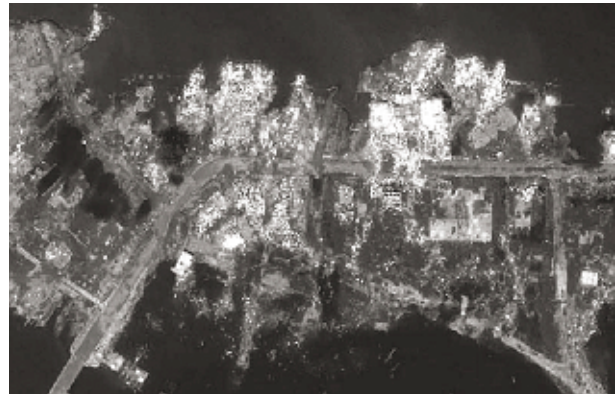


Figura 8. Imatge satèl·lit d'una zona de la costa del Banda Aceh abans i després del tsunami. (Digitalglobe).

A la figura 7 es pot veure un esquema de la propagació de les onades del tsunami. S'hi mostra la relació entre la profunditat del fons marí, la longitud d'ona o distància entre crestes successives i la velocitat del tsunami (<http://www.usgs.gov>). Per tal que un terratrèmol originari un tsunami s'han de complir una sèrie de condicions. En primer lloc, l'epicentre del sisme ha de ser marí, i el focus o hipocentre superficial. Per altra banda, el sisme ha de tenir la magnitud suficient perquè l'energia transmesa a l'aigua formi onades; estem parlant, doncs, de magnituds superiors a 7. Una altra característica que ha de tenir és que el seu mecanisme focal tingui un fort component vertical en el desplaçament del pla de falla. Aquest moviment vertical és el que desplaça la columna d'aigua que hi ha sobre el sòl oceànic formant el tren d'ones. Els tsunamis més grans coneguts s'han produït a partir de falles inverses amb un angle d'inclinació petit, típiques de les zones de subducció.

Els efectes del tsunami sobre les costes depenen de la combinació de la topografia submarina i terrestre de la zona i de l'orientació amb què les ones arriben a la línia de costa. Si el mar és profund prop de la costa l'ascens del nivell de l'aigua serà menys violent que en una costa poc profunda. En un mateix lloc de la costa les característiques de les ones poden variar d'una ona a la següent. Els tsunamis poden produir onades des de 10 m d'alçada fins a 40 m i devastar zones costaneres situades lluny de l'epicentre.

El tsunami de Sumatra del 26 de desembre de 2004 s'ha catalogat com el més destructiu de la història. Va ser produït per un sisme marí de magnitud 9.3 a una fondària de 30 km en una zona de subducció entre les plaques d'Índia i

Birmània. El tsunami va afectar totes les costes de l'oceà Índic, també va produir danys a Sud-àfrica, Austràlia i l'Antàrtida, i va ser enregistrat a les costes orientals d'Amèrica del Nord i del Sud (fig. 8).

Referències

- BARD, P.-Y., CZITROM, G., DURVILLE, J.L., GODEFROY, P., MENEROUD, J.P., MOROUX, P i PECKER, A. *Guidelines for seismic microzonation studies*, Association Française du Génie Parasismique. París, 1995.
- CORAL, H. *Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2002.
- FIGUERAS, S. *Simulació numèrica del moviment del sòl produït per terratrèmols. Aplicació a moviments febles i forts*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2004.
- FIGUERAS, S., MACAU, A., GOULA, X., GONZÁLEZ, M. *Aplicación del método de Newmark para el estudio de los movimientos de ladera activados por terremotos en Andorra*. *Proceedings del VI Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables*, vol. II. València, 2005. P. 867-878.
- KEEFER, D. (1984). *Rock avalanches caused by earthquakes: source characteristics*, *Mar.* 23, (EART Q1/S33).
- MACAU, A., S. FIGUERAS, B. COLAS, B. LE BRUN, A. BITRI, T. SUSAGNA, J. CIRÉS, M. GONZÁLEZ, ROULLÉ, A. *Seismic microzonation in two valleys of the eastern Pyrenees: Andorra and the Cerdanya*. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Ginebra, Suïssa, 3-8 setembre 2006. Núm. document 655.
- RIBA. *Diccionari de Geologia*. Institut d'Estudis Catalans. *Enciclopèdia Catalana*. Barcelona, 1997.
- ROCA, A., C.S. OLIVEIRA, A. ANSAL, S. FIGUERAS, S. "Site Effects and Microzonation. Assessing and managing earthquake risk", a C. S. Oliveira, A. Roca i X. Goula (ed.), *Assessing and Managing Earthquake Risk*, 67-89, Springer, 2006.
- SEED, H.B., IDRIS, I. M. "Influence of soils conditions on ground motion during earthquakes". *ASCE*, vol. 94, SM. 1. p 99-137. 1968.
- SUSAGNA, T., PUJADES, L., PALMA, J.J. "Anàlisi del risc al Pla d'emergències sísmiques de Catalunya", a *La Punxa*, núm. 41. COAiATG. Girona, 2006.

Sara Figueras Vila

Institut Geològic de Catalunya