

Quan la Terra tremola

1. Introducció

Sara Figueras i Vila

Els terratrèmols han estat, des de temps molt antics, subjecte de llegendes. Cada civilització ha creat mites i llegendes per explicar per què la terra, sovint referenciada com la mare dels homes, destrueix les seves cases i s'emporta les seves vides. Els pobles antics imaginaven que sota la terra hi vivien serps, tortugues, peixos-gat o aranyes gegants que quan es movien produïen els terratrèmols; més endavant, quan les societats van començar a creure en un Déu únic, els pobles atribuïen els terratrèmols a càstigs de Déu. Al segle IV abans de Crist, Aristòtil va intentar explicar els terratrèmols basant-se en fenòmens naturals va postular que els vents que quedaven atrapats dins les coves subterrànies de tant en tant feien sacsejar la superfície de la Terra. D'acord amb la teoria més moderna de la deriva dels continents, el supercontinent Pangea començà a trencar-se fa uns 225-200 milions d'anys i quedà finalment fragmentat en els continents que ara coneixem. La tectònica de plaques és una ciència relativament nova que ha revolucionat el nostre coneixement de la dinàmica de la Terra, aquesta teoria ha unificat l'estudi de la Terra considerant diverses branques de les ciències de la Terra des de la paleontologia (estudi dels fòssils) fins a la sismologia (estudi dels terratrèmols), donant explicació a qüestions que els científics han especulat durant centenars d'anys: per què els terratrèmols i les erupcions volcàniques es produeixen en determinades regions de la Terra i com es formen les grans cadenes muntanyoses com els Pirineus, els Alps, l'Himàlaia, etc.

2. Per què tremola la Terra?

El planeta Terra és un objecte calent situat en un entorn fred: el medi interplanetari (figura 1). Des de la seva formació, fa 4.550 milions d'anys, tendeix a refredar-se lentament enviant la seva calor cap a l'exterior mitjançant un mecanisme de convecció: la calor circu-

la des de dins de la Terra (ferro líquid en el nucli i materials rocosos al mantell) i forma corrents ascendents de material calent a la vegada que els corrents freds circulen des de la superfície cap al mantell. Aquesta circulació és molt lenta, de l'ordre d'alguns centímetres per any. Per tant, el mantell de la Terra conté cèl·lules de convecció que bressolen permanentment els seus materials. Si tenim en compte les seves propietats físiques, direm que la Terra està formada per la litosfera, closca esfèrica rígida que comprèn l'escorça (que pot ser de dos tipus: oceànica i continental) i el mantell superior, que es troba sobre l'astenosfera, capa més calenta i menys rígida que ocupa part del mantell inferior.

La litosfera està formada per plaques de dimensions variables encaixades com un trencaclosques, aquestes plaques suren sobre l'astenosfera i s'anomenen plaques tectòniques. Hi ha set grans plaques: Euroasiàtica, Africana, Amèrica del Nord, Amèrica del Sud, Pacífica, Indoaustraliana i Antàrtica i altres de més petites com poden ser la placa de Scotia, Cocos, Nazca o la de Filipines entre d'altres. A causa dels corrents de convecció del mantell, es mouen unes respecte a les altres a velocitats entre 1–2 cm/any les més lentes i fins a 6–7 cm/any les més ràpides. No es mouen totes en el mateix sentit, sinó que poden fer-ho en sentits oposats.

A les zones de contacte entre les plaques s'hi produeixen friccions, però a causa de la seva rigidesa les plaques no es deformen sinó que s'hi van acumulant tensions arribant a un moment en que se supera la resistència del material i aquest es trenca i 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 2). La majoria d'aquestes falles es troben en les zones de contacte entre les plaques, però també n'hi ha lluny d'aques-

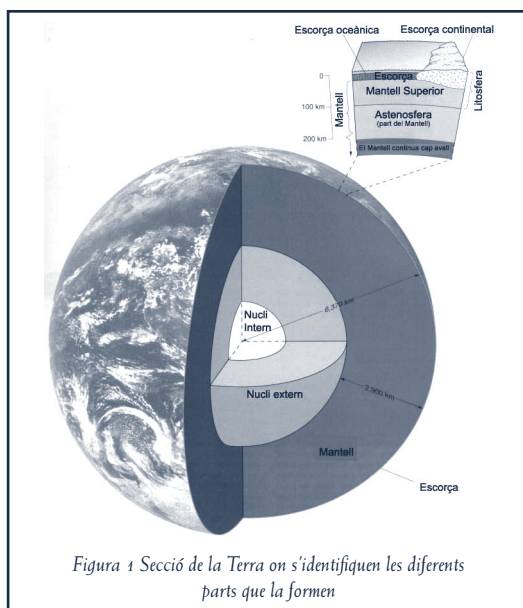


Figura 1 Secció de la Terra on s'identifiquen les diferents parts que la formen

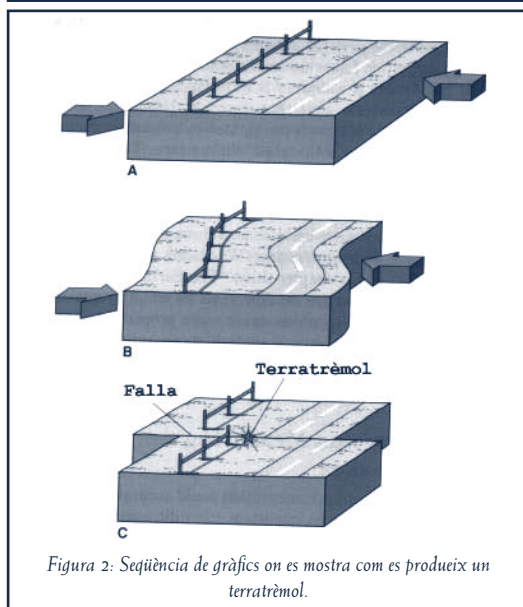


Figura 2: Seqüència de gràfics on es mostra com es produeix un terratrèmol.

tes fronteres. El trencament d'una falla produeix vibracions que es propaguen en totes direccions en forma d'ones, són les ones sísmiques, 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, doncs, una alliberació sobtada d'energia

Figura 3: Taula anual d'ocurrència de terratrèmols en el món, classificats segons la seva magnitud.

Descripció	Magnitud	Freqüència Anual
Molt gran	> 8.0	1
Gran	7 - 7.9	18
Fort	6 - 6.9	120
Moderat	5 - 5.9	800
Feble	4 - 4.9	6.200
Petit	3 - 3.9	49.000
Molt petit (imperceptible)	< 3.0	Magnitud 2-3: 1.000/dia Magnitud 1-2: 8.000/dia

acumulada que es propaga per la Terra en forma d'ones elàstiques i es percep com una vibració del sòl. A la figura 3 es mostra una taula amb un resum de la freqüència d'ocurrència de terratrèmols en el món elaborada a partir d'observacions des de l'any 1900. Tenint en compte la informació de la taula es dedueix que en el món es perceben, en mitjana, aproximadament 80.000 terratrèmols cada mes, 2.600 cada dia i 2 cada minut; de tots ells només uns quants produeixen danys, com s'observa, els terratrèmols són fenòmens naturals comuns.

3. Les plaques tectòniques, la causa dels terratrèmols

Com hem vist, les zones de la Terra on és més probable que es produeixin terratrèmols són els límits de les plaques tectòniques. Hi ha diferents tipus de límits de plaques: límits constructius o extensius com les dorsals oceàniques on es crea escorça, límits destructius com les zones de subducció on es destrueix escorça, zones de col·lisió on es creen les grans formacions muntanyoses i límits conservatius on no es crea ni es destrueix escorça. Els terratrèmols que es produeixen en cada un d'aquests contextos tectònics tenen característiques diferents.

Una falla pot ser definida com una fractura quasiplana dins la roca, al llarg de la qual s'ha produït un desplaçament en el passat i per tant es considera una zona feble. Segons el moviment relatiu d'un costat de la falla respecte a l'altre es diferencien els tres tipus de falles que es mostren a la figura 4:

- > Falla normal o d'extensió en la qual els dos blocs s'allunyen un de l'altre, es troben falles normals en règims tectònics extensius o dorsals oceàniques (Dorsal Atlàntica) on les plaques se separen sota la pressió del material que prové del mantell. S'observen també en els rifts continentals.
- > Falla inversa o falla de compressió en la qual el bloc superior puja pel pla de falla, s'observa un moviment horitzontal d'apropament i un moviment vertical relatiu dels dos blocs, aquest tipus de falla és característic de les zones de subducció on es produeix un enfonsament d'una placa oceànica sota una altra de continental, (per exemple Alaska, Xile, Japó, Mèxic o Colòmbia) i a les zones de col·lisió continental (Pirineus, Himàlaia).
- > Falla horitzontal on el pla de falla és vertical o quasi vertical, es troba aquest tipus de falla a la frontera entre dues plaques que es mouen xocant una respecte a l'altra sense allunyar-se ni apropar-se, és el cas per exemple de la falla de San Andrés a Califòrnia.

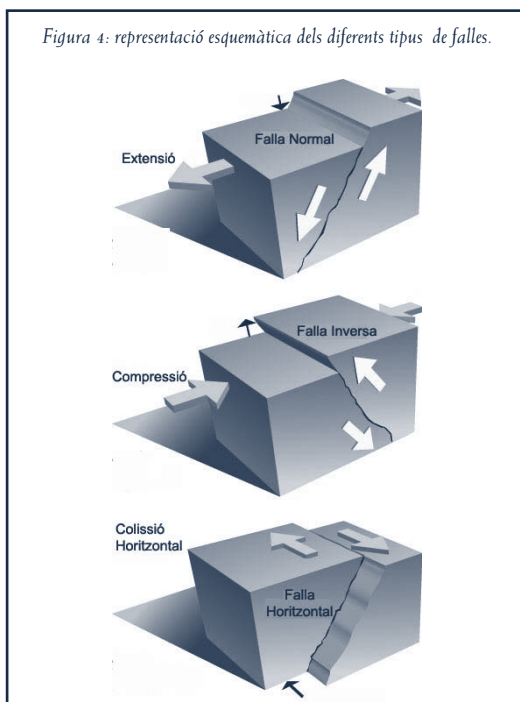
Un sisme tectònic es produeix al llarg d'una falla, però el trencament només afecta en general una part d'aquesta. El punt de la falla on es produeix el trencament s'anomena focus o hipocentre i la seva projecció sobre la superfície terrestre és l'epicentre.

4. La grandària dels terratrèmols

Hi ha alguns paràmetres característics dels terratrèmols que estan relacionats, és el cas de la durada del trencament, la superfície del trencament al llarg del pla de falla i la magnitud, que mesura la força del terratrèmol.

La magnitud es calcula a partir del registre del moviment del terra o sismograma. Hi ha moltes maneres de calcular-la sigui utilitzant l'amplitud del senyal enregistrat, (magnitud local o de Richter, magnitud d'ones de superfície, magnitud d'ones de volum), sigui la seva llargada (magnitud de durada) o sigui l'energia total radiada (magnitud d'energia). La magnitud és una mesura de la mida del terratrèmol i representa l'energia alliberada per aquest. L'escala amb què es quantifica no és lineal sinó

Figura 4: representació esquemàtica dels diferents tipus de falles.



logarítmica: això vol dir que, per exemple, l'amplitud del moviment del sòl en un sisme de magnitud 6 és 10 vegades més gran que la d'un sisme de magnitud 5 i 100 vegades més gran que la d'un sisme de magnitud 4. L'escala de magnitud no està acotada, el seu límit inferior està imposat per la sensibilitat de l'aparell de registre i el seu límit superior està acotat per la resistència física de l'escorça. El terratrèmol de magnitud més gran enregistrat fins ara és el de Xile (1960) que va tenir una magnitud de 9,5, van haver-hi 6.000 morts i va generar un tsumani (ona produïda per un terratrèmol marí) que va produir morts a Hawaii i Japó. El dia 26 de desembre de 2004 es va produir un terratrèmol de magnitud 9 a la costa NW de Sumatra, aquest terratrèmol és el quart més fort enregistrat al món des de l'any 1900, el trencament es va produir al llarg de 1000 km amb un salt de falla de 20m, es va generar un gran tsunami que va produir danys i moltes víctimes a l'Índia, Sri Lanka, Indonèsia, Tailàndia i fins i tot a les costes de Somàlia. El nombre total de víctimes s'estima al voltant de 160.000 en 13 països i milers de desapareguts.

A nivell popular i fins i tot en alguns mitjans de comunicació es confon sovint el concepte d'intensitat i magnitud, la intensitat macrosísmica (MSK, EMS98, etc.) es quantifica a partir dels danys observats en els edificis i les infraestructures així com també per la percepció del terratrèmol per les persones. L'escala d'intensitat va del grau I (sisme no percebut) fins al grau XII (destrucció total i canvi de paisatge), per un mateix sisme la intensitat varia en funció de la distància a l'epicentre i dels fenòmens associats al terratrèmol (esmorzeïment o ampliació de les ones sísmiques), la zona d'intensitat màxima s'anomena epicentre macrosísmic.

No hi ha, però, una relació directa entre la intensitat i la magnitud; un sisme de forta magnitud però profund i en una regió poc poblada serà poc destructiu i, per tant, serà qualificat d'intensitat feble; al contrari, un sisme superficial de menor magnitud pot ser molt destructor i, per tant, caracteritzat amb un grau elevat d'intensitat. A la figura 5 es presenta una taula amb l'equivalència entre magnitud, intensitat màxima epicentral i energia alliberada, així com també una definició resumida de l'escala d'intensitat macrosísmica (MSK).

En la figura 5 es presenta una taula amb l'equivalència entre magnitud, intensitat màxima epicentral i energia alliberada, així com també una definició resumida de l'escala d'intensitat macrosísmica (MSK).

5. Les ones sísmiques

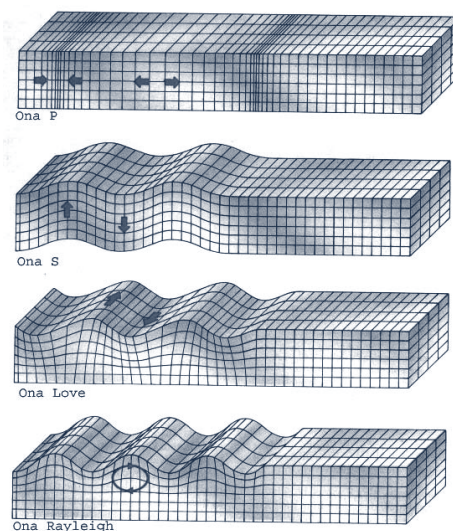
Fins aquí hem parlat de la font del terratrèmol, és a dir, de la regió on es produeix un trencament al llarg d'una falla, però sabem que els efectes d'un terratrèmol es noten a distàncies llunyanes de la font. Quan es produeix un terratrèmol es generen

Figura 5: Taules amb equivalència entre magnitud, energia alliberada i intensitat epicentral, a la dreta definició de l'escala d'intensitat macrosísmica MSK.

Magnitud	Equivalència entre energia alliberada i quantitat d'explosiu (kg)	Intensitat màxima epicentral (MSK)I
2.0	56	II-III
3.0	1.800	III-IV
4.0	56.000	IV-V
5.0	1.800.000	V-VI
6.0	56.000.000	VII-VIII
7.0	1.800.000.000	IX-X
8.0	56.000.000.000	XI-XII
9.0	18.000.000.000.000	XII

Grau I	No percebut
Grau II	A penes percebut
Grau III	Dèbil, percebut parcialment
Grau IV	Àmpliament percebut
Grau V	Desplaçament d'objectes lleugers
Grau VI	Danys lleugers
Grau VII	Danys a les construccions
Grau VIII	Destrucció d'edificis
Grau IX	Danys generalitzats a les construccions
Grau X	Destrucció general de les construccions
Grau XI	Catàstrofe
Grau XII	Canvi del paisatge

Figura 6: Esquema del moviment de les partícules del sòl al pas dels diferents tipus d'ones sísmiques



ones sísmiques que es propaguen a través de la Terra, tant pel seu interior com en superfície. Les ones sísmiques són vibracions de tipus elàstic, que es poden agrupar bàsicament en dos tipus: ones de volum, que es propaguen en tot el volum de la terra, són les ones P o primàries i les ones S o secundàries, i ones de superfície que es propaguen per les capes més superficials de la Terra i es produeixen per interferències de les ones de volum, d'aquest tipus coneixem les ones Love i les Rayleigh. A la figura 6 es representen els diferents tipus d'ones sísmiques.

Figura 7: Estació sísmica de camp i antenes instal·lades al centre de recepció de dades (ICC).

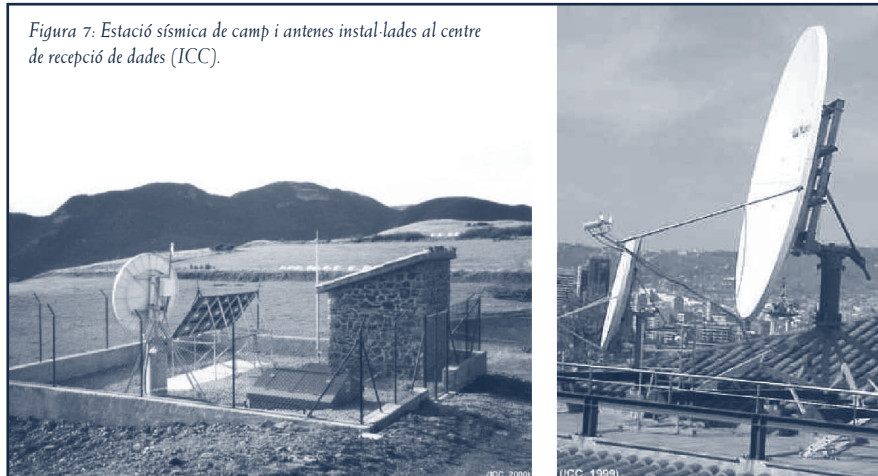


Figura 8: Representació del sismòmetre més antic conegut fins ara.



- > Ones P: són les primeres que es noten a les proximitats d'un sisme perquè són les que tenen una velocitat de propagació més gran, al pas de les ones P les partícules es comprimeixen i es relaxen com una molla, aquestes ones es propaguen per tot tipus de medis, fins i tot els líquids i els gasos.
- > Ones S: són ones de cisalla, al seu pas, les partícules es mouen en direcció perpendicular a la direcció de propagació de la pertorbació, per tant aquestes ones només es propaguen en medis sòlids que presenten resistència a la distorsió; les ones S tenen una amplitud més gran que les P i freqüències més baixes.
- > Ones Love: les vibracions són horitzontals, perpendiculars a la direcció de propagació.
- > Ones Rayleigh: les vibracions són el·líptiques en el pla vertical que conté la direcció de propagació.

A causa de les diferències en les velocitats de propagació de cada tipus d'ona, quan notem un terratrèmol les primeres sacsejades són degudes a l'ona P, després les ones S i finalment les superficials. En general, les ones tipus S i les superficials són les que produeixen oscil·lacions horitzontals del terreny més perilloses per les estructures.

6. L'enregistrament dels terratrèmols

Les ones sísmiques generades pels grans terratrèmols poden travessar la Terra d'un costat a l'altre conservant suficient energia com per ésser enregistrades a la superfície. És, doncs, gràcies a la sismologia que es pot conèixer amb precisió l'estructura interna de la Terra.

L'enregistrament del moviment del sòl implica diverses tasques més o menys independents, cadascuna d'elles la realitza un aparell diferent i la cadena completa d'adquisició s'anomena sismògraf. Les tasques que realitza un sismògraf són doncs les que es descriuen a continuació:

- > Detectar la vibració del terreny: l'aparell que ho realitza és el sensor o sismòmetre.
- > Mesurar i enregistrar la vibració detectada: conversió de les oscil·lacions de la massa del sensor en corrent elèctric, pre-amplificació, filtratge i digitalització per tal de tenir un enre-

gistrament digital en memòria informàtica per poder fer-hi càlculs científics.

- > Datar amb precisió les vibracions registrades de manera que el moviment del sòl enregistrat pugui ser representat com una funció del temps. El registre d'un terratrèmol s'anomena sismograma i consisteix en una representació de l'amplitud del moviment del sòl en funció del temps, per saber sempre l'hora exacta a la qual s'ha fet la mesura, el digitalitzador disposa d'un rellotge intern que es sincronitza regularment (sistema GPS) i permet conèixer l'hora en tot moment amb una precisió de mil·lèsimes de segon.
- > Disposar d'un sistema de transmissió de dades: en el cas de xarxes d'estacions centralitzades, cal tenir un sistema de transmissió a distància dels registres realitzats en les estacions remotes. Actualment, a la xarxa sísmica de Catalunya amb seu central a l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), la comunicació de les dades es realitza en continu i en temps quasi real pel satèl·lit HISPASAT
- > Disposar d'un sistema d'alimentació basat en plafons solars fotovoltaics o corrent elèctric.

En la figura 7 es presenta una foto de l'estació sísmica que l'ICC té instal·lada a Bruguera, s'hi observa l'antena emissora de dades, els plafons fotovoltaics, la caseta del sismòmetre (està enterrat) i la caseta més gran on hi ha tota l'electrònica del sismògraf. A la foto de la dreta es pot veure l'aspecte de les antenes instal·lades al terrat de l'edifici de l'ICC per rebre els senyals que provenen de les estacions sísmiques remotes.

El sensor o sismòmetre

L'aparell de detecció de sismes més antic conegut fins ara va ser inventat l'any 132 a.C. per un filòsof xinès, Zhang Heng. L'instrument era una gran gerra de bronze amb un pèndul central a dins (figura 8). Decorant l'exterior de la gerra hi havia una sèrie de caps de drac, cada un amb una bola dins la boca i connectats amb el pèndul, directament sota la boca de cada drac, al peu de la gerra hi havia una granota de bronze amb la boca oberta per poder rebre la bola de la boca del drac. Quan es produïa un terratrèmol, el moviment del terra feia moure el pèndul i això provocava que una o més boles caiguessin de la boca del

drac a la boca de la granota. La direcció del terratrèmol era indicada pels caps dels dracs que havien perdut la bola.

El principi del funcionament dels sismòmetres és el pèndul inercial (figura 9): una massa suspesa d'una molla en un marc solidari amb el terra, quan el terra es mou, la inèrcia de la massa fa que aquesta es desplaci amb un temps de retard i la molla (en el cas d'un pèndul vertical) la torna ràpidament a la posició d'equilibri, després d'una sèrie d'oscil·lacions. La utilització conjunta d'un sismòmetre vertical i dos horitzontals orientats 90 graus permet reconstruir fàcilment el moviment del sòl en tres dimensions.

Com tot sistema mecànic, el sismòmetre està caracteritzat per un període propi d'oscil·lació, en funció del tipus d'ones que volem estudiar utilitzarem un sismòmetre de període propi curt, per exemple 1s, per registrar els sismes propers i un sismòmetre de període propi llarg, per exemple 20s, per estudiar ones sísmiques de sismes llunyans. Actualment es disposa de sensors anomenats de banda ampla que cobreixen tot el rang de freqüències tant per als sismes propers com llunyans.

La relació entre el període de ressonància del sensor i el del moviment del terra té molta importància sobre el paràmetre al qual és sensible el sismòmetre, segons la grandària d'aquesta relació, el moviment de la massa serà proporcional al desplaçament, a la velocitat o a l'acceleració del sòl. La major part dels sismòmetres són velocímetres, sensibles a la velocitat del sòl. També es construeixen acceleròmetres per als estudis dels moviments forts i en zones properes a l'epicentre, ja que en el camp de l'enginyeria sísmica l'acceleració del sòl es relaciona més directament amb les forces aplicades als edificis durant un terratrèmol.

7. La localització dels terratrèmols

La localització d'un terratrèmol consisteix a identificar el lloc on s'ha produït i l'instant precís en que aquest ha tingut lloc: per tant, la informació que s'obté quan es localitza un sísmic és l'hipocentre o punt on s'ha iniciat el trencament, i es descriu amb la latitud, la longitud i la fondària; l'epicentre que és la projecció a la superfície de la Terra de l'hipocentre, i l'hora origen que és l'hora exacta d'iniciació del procés de ruptura, es dona generalment en temps universal (TU). Actualment les localitzacions es fan amb càlculs numèrics per ordinador.

El principi bàsic de la localització dels terratrèmols és la triangulació: reagrupant i comparant les informacions obtingudes dels registres de diverses estacions s'arriba a localitzar amb precisió un terratrèmol. Les dades utilitzades són principalment els temps d'arribada a les estacions de les ones elàstiques que s'emeten en totes les direccions quan es produeix un sísmic. Coneixent les velocitats de propagació d'aquestes ones a través de la Terra es pot calcular la llargada del trajecte que han recorregut i, per tant, la distància entre el focus del sísmic i l'estació.

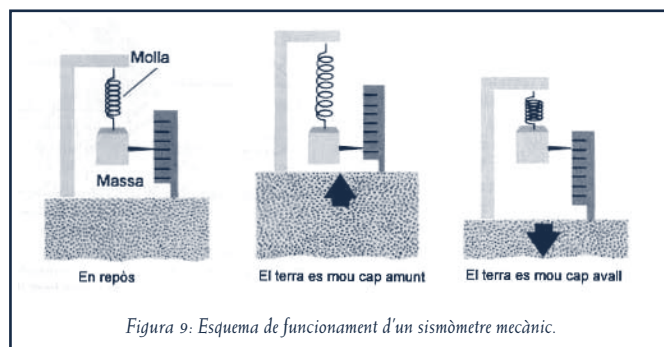


Figura 9: Esquema de funcionament d'un sismòmetre mecànic.

gut i, per tant, la distància entre el focus del sísmic i l'estació.

Els dos paràmetres importants per a la localització d'un terratrèmol són, doncs:

- > El coneixement el més exacte possible del temps d'arribada de les ones, que s'aconsegueix amb la utilització de rellotges molt precisos en les estacions de registre i en la bona lectura dels temps d'arribada de les diferents ones (P i S) que fa l'expert sobre els registres.
- > El coneixement de l'estructura interna de la Terra; en concret, de les velocitats de propagació de les ones en els diferents materials que la componen. S'utilitzen, en general, models que descriuen aquests valors de velocitat en funció de la fondària.

A part dels terratrèmols, en els sismògrafs es registren tot tipus de moviments del sòl: voladures en pedreres, petjades de persones o animals prop de l'instrument, explosions nuclears, bombes, etc. Cal saber diferenciar els senyals que realment són terratrèmols.

8. Els efectes dels terratrèmols

La causa principal dels danys produïts pels terratrèmols és la pròpia sacsejada, la qual produeix la caiguda d'objectes i l'esfondrament d'edificis (Figura 10). 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). Altres efectes induïts poden ser:

- > La desestabilització de talussos i vessants de muntanyes que pot produir moviments en massa en zones amb pendents i característiques mecàniques susceptibles d'esllavissament.
- > La líquüefacció dels sòls quan aquests són de gra molt fi i estan saturats d'aigua, els fonaments d'edificis construïts sobre aquests tipus de sòl poden perdre tota consistència quan arriba una oscil·lació sísmica molt intensa.
- > Els tsunamis que poden produir onades des de 10 m fins a 40m i devastar zones costaneres situades lluny de l'epicentre.
- > Les inundacions per trencament d'embassaments o conduccions d'aigua.

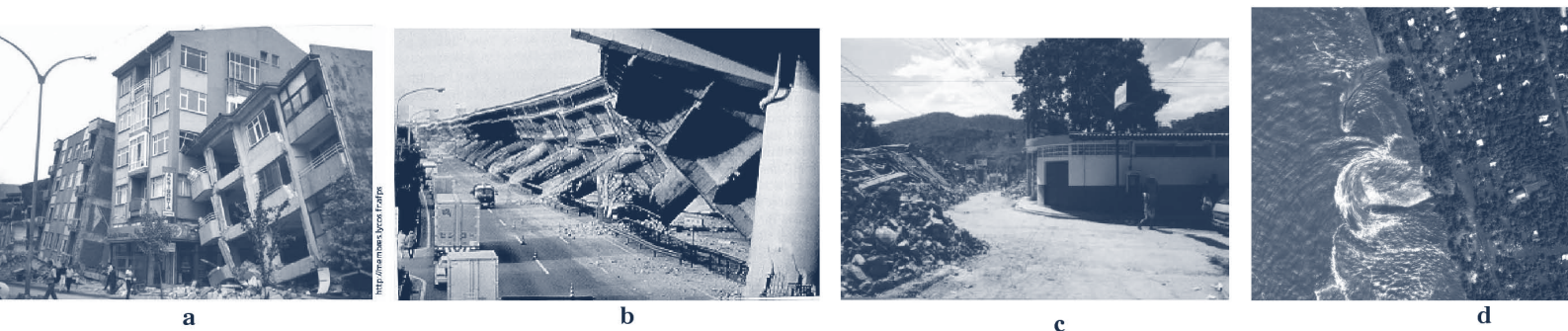


Figura 10: a) bolcament d'edificis durant el terratrèmol de Turquia del 1999; b) bolcament d'una via elevada durant el sisme de Kobe del 1995; c) Sisme de El Salvador 2004, després del pas de l'ona sísmica; a l'esquerra del camí col·lapse de cases de fang i fusta, a la dreta edifici de formigó sense danys; d) Imatge satèl·lit del Tsunami generat pel terratrèmol de Indonèsia el 26/12/2004, a la foto s'observa la gran ona que s'està formant abans d'arrassar la costa de Sri Lanka.

Tots aquests fenòmens poden ser molt destructors si afecten el terreny on s'assenten les nostres ciutats o els edificis essencials (hospitals, bombers, centrals elèctriques, dipòsits d'abastiment d'aigua i combustible, etc). Un altre fenomen que acostuma a acompanyar un terratrèmol és el foc degut al trencament de conduccions de gas, etc. La falta de subministrament d'aigua pot impedir que es pugui apagar el foc, altres situacions poden ser el tancament de carreteres, de vies de tren, de comerços, contaminació de l'aire o l'aigua per escapaments tòxics, etc.

El nivell de dany sofert per una estructura depèn de l'amplitud i de la durada de la sacsejada, les amplituds són més grans prop de l'epicentre i la durada generalment augmenta amb la grandària del sisme, la geologia regional pot afectar el nivell i la durada de la sacsejada, però són molt importants els efectes locals, quan les ones es propaguen per conques sedimentàries o valls al·luvials queden atrapades, s'interfereixen i donen lloc a grans amplificacions del moviment del terreny. S'ha observat també que l'amplificació del moviment és més gran quan l'ona es propaga per sediments que no pas en materials rocosos. Tots aquests factors 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 sismoresistent.

9. La sismicitat a Catalunya

La península Ibèrica es troba a les proximitats d'un límit de plaques litosfèriques, la placa africana i la placa Euroasiàtica. Aquestes dues plaques s'estan apropant des de fa uns quants milions d'anys i produeixen el xoc de les dues masses continentals. La compressió que aquest xoc ha produït en les vores de la Península és la que ha deformat l'escorça i ha aixecat les serralades alpines recents: els Pirineus i les Bètiques, els relleus més grans de la Península. La convergència de plaques segueix avui encara a una velocitat d'uns 2 centímetres a l'any, transmetent un esforç a l'interior del continent, com més petita sigui la distància al límit amb la placa africana i més gran la densitat de falles susceptibles de ser mogudes, més gran és la probabilitat que s'hi produeixin terratrèmols. El ritme de la sismicitat o freqüència actual d'aparició de sismes es pot considerar "moderat". Comparat amb altres regions, és inferior al del sud i sud-est de la península Ibèrica i

molt inferior al de regions de la mediterrània oriental i central, com ara Itàlia, Grècia o Turquia.

Encara que l'activitat sísmica actual del NE de la Península sigui moderada, les dades històriques ens mostren que hi ha hagut terratrèmols destructors en el passat, la majoria s'han produït als Pirineus però han afectat tot Catalunya i part de França. El coneixement dels sismes històrics permet disposar d'un catàleg més complet a l'hora d'avaluar la perillositat sísmica. Els documents històrics escrits disponibles daten d'uns 800 anys enrere i això permet allargar la finestra d'observació en el temps. Gràcies a la revisió de cròniques i documents antics (cròniques reials, anals dels monestirs, anals urbans, documents municipals, etc), sabem que els sismes més destructors a Catalunya van succeir entre els anys 1373 i 1448. Cal destacar-ne els següents:

- > 3/03/1373 a la Ribagorça, amb intensitat epicentral VIII-IX.
- > Crisi sísmica de 1427-1428 a la Selva, la Garrotxa i el Ripollès, amb els tres sismes principals següents: /03/1427 a Amer amb intensitat acumulada VIII-IX; 15/05/1427 a Olot, amb intensitat epicentral IX; 02/02/1428 al Ripollès amb intensitat epicentral IX.
- > 04/05/1448 al Vallès Oriental, amb intensitat epicentral VIII.

A principi de segle XX comença el període instrumental a Catalunya i durant molts anys els únics enregistraments sísmics procedien de l'Observatori de l'Ebre (1904) i de l'Observatori Fabra (1906). Es pot dir que no és fins al 1977 que es comença a tenir una bona aproximació de la sismicitat a partir de l'enregistrament instrumental, gràcies a la instal·lació al costat francès de nous sismògrafs per part del Laboratoire de Détection et Géophysique del Commissariat à l'Energie Atomique, amb la finalitat de detectar explosions nuclears subterrànies d'arreu del món.

En el període comprès entre l'any 1901 i 1985 es produeixen un centenar de sismes fortament percebuts per la població, amb intensitats epicentrals superiors a IV (MSK). En aquest període els dos únics sismes amb danys considerables a Catalunya són :

- > 19/11/1923 a la zona de Viella, d'intensitat epicentral VIII.
- > 12/03/1927 a Sant Celoni, d'intensitat VII.

Als anys vuitanta, per la necessitat de conèixer la sismicitat en el territori català amb més precisió, el Servei Geològic de Catalunya (actualment amb seu a l'ICC) inicia la instal·lació d'una xarxa sísmica. La sismicitat determinada a partir de les dades enregistrades pels sismògrafs de la xarxa sísmica ha estat recollida en els Butlletins Sismològics des de l'any 1984. A partir de l'any 1986 la situació a Catalunya millora considerablement, la xarxa sísmica es densifica, i es redueix la distància entre estacions sísmiques, fet que permet localitzar amb una bona precisió (<5km) els focus sísmics dels terratrèmols que es troben dins la xarxa.

Amb el doble objectiu d'informar ràpidament els responsables de protecció civil i els mitjans de comunicació en cas de produir-se un terratrèmol i d'obtenir dades sísmiques de qualitat per a la comunitat científica, comença l'any 1999 la renovació de la xarxa sísmica de Catalunya, aquest projecte que actualment està en la tercera fase preveu la instal·lació de 20 estacions sísmiques, equipades amb sensors de banda ampla de tres components i d'un gran marge dinàmic, els avenços tecnològics en el camp de les comunicacions fan possible la transmissió de dades en continu, via satèl·lit. En el sistema s'hi han integrat també altres sensors de mesures geofísiques i geodètiques (figura 11). La xarxa antiga no disposava d'un sistema d'alerta en temps real, els sensors tenien un període propi d'1s, només enregistraven la component vertical del moviment del sòl i tots els moviments sísmics forts saturaven els registres. La pàgina web de l'ICC: <http://www.icc.es/sismes> s'actualitza diàriament amb la informació dels sismes locals, regionals o telesismes que s'enregistren cada dia, també hi ha informació dels sismes localitzats a Catalunya des de l'any 1999, així com els sismes regionals i llunyans (telesismes) enregistrats per les estacions de la xarxa sísmica de Catalunya.

A la figura 12 es presenta un mapa de sismicitat de Catalunya 1986-2000. Entre aquests anys s'han localitzat uns



Figura 11: Situació dels sismògrafs de la Xarxa Sísmica de Catalunya

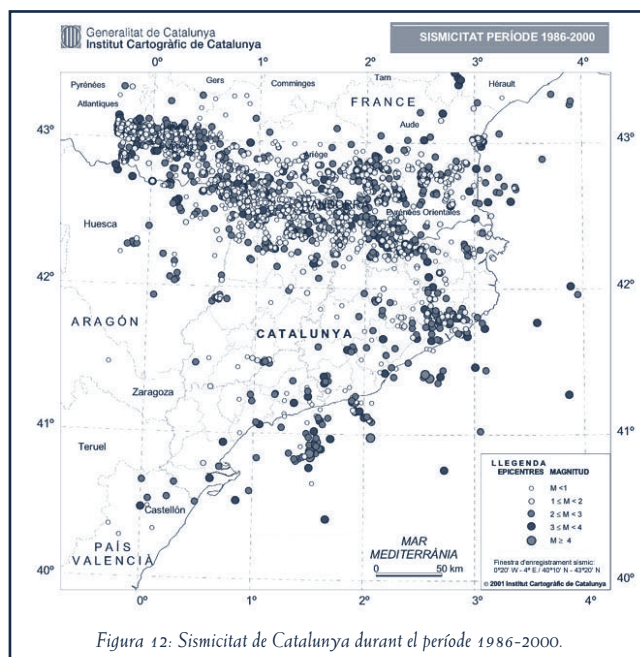


Figura 12: Sismicitat de Catalunya durant el període 1986-2000.

2000 sismes, la majoria dels quals corresponen a magnituds inferiors a 3, és a dir, sismes imperceptibles per la població. S'han produït una mitjana d'uns 15 terratrèmols cada any de magnitud superior o igual a 3 i entre 1 i 2 per any de magnitud superior o igual a 4.

La magnitud màxima enregistrada durant aquest període és de 5,2 i correspon a un sisme ocorregut el 18 de febrer de 1996 a la regió de les Fenolledes en el Departament del Pirineu Oriental Francès. Aquest sisme va ocasionar danys lleugers (I=VI) prop de l'epicentre. És el sisme més fort des de l'any 1950 a la zona del Pirineu Oriental. A la zona costanera s'han produït quatre sèries de sismes amb magnituds superiors a 4.0, els anys 1987 i 1995 davant les costes de Tarragona, l'any 1991 davant la costa del Garraf i, l'any 1994, davant la costa del Maresme, tots ells percebuts per la població, però afortunadament sense danys materials.

A Catalunya, la sismicitat d'aquests últims anys presenta característiques relacionades

amb el context geològic, representat per tres grans unitats: els Pirineus, el sistema Mediterrani i la conca de l'Ebre. La major activitat sísmica s'ha concentrat principalment en els Pirineus i en l'àrea Mediterrània; a la depressió de l'Ebre, l'activitat és baixa per les reduïdes deformacions tectòniques que s'hi observen. Els sismes s'han produït a profunditats compreses entre 0 i 15 km, rarament se'n localitzen a profunditats superiors. Entre els Pirineus i el sistema Mediterrani se situa la zona de transferència, en aquesta regió s'hi localitza la zona volcànica neògena-quaternària on a l'edat mitjana, s'hi va produir la sèrie sísmica destructora esmentada abans, l'activitat sísmica ha estat molt baixa a la part central de les falles i s'ha concentrat a les extremitats nord (marge meridional dels Pirineus) i sud (marge meridional de la depressió de la Selva), on s'observa una densa presència d'epicentres de petita magnitud.

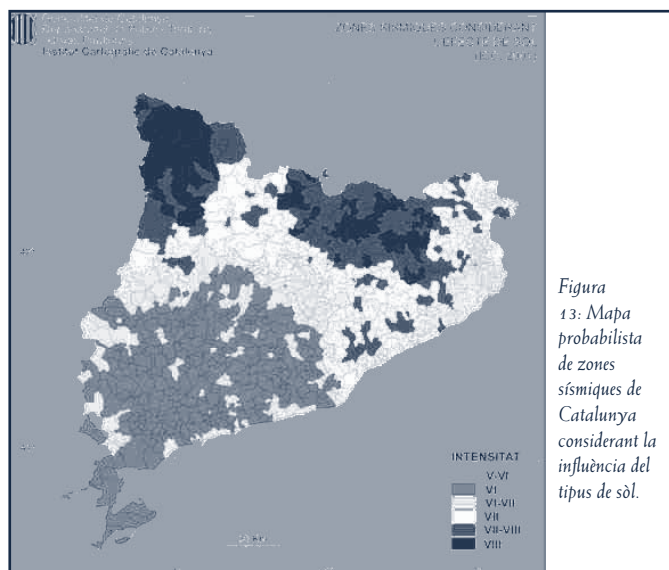


Figura 13: Mapa probabilista de zones sísmiques de Catalunya considerant la influència del tipus de sòl.

El fenomen sísmic no es pot predir, en el sentit més estricte del terme, però els coneixements actuals permeten aportar alguns elements com a resposta a la incògnita de l'activitat futura:

El fenomen sísmic és recurrent i en els llocs on s'han produït sismes es tornaran a repetir.

En temps històrics s'han produït a Catalunya terratrèmols destructors: l'any 1373 a la Ribagorça i els anys 1427–28 a les comarques del Ripollès i la Garrotxa.

Per tant l'extrapolació de les dades actuals completades amb les històriques indiquen que poden produir-se terratrèmols destructors al nostre territori i que en mitjana se'n produeixen 1 de $M=5$ (danys lleugers) cada 10 o 20 anys, 1 de $M=6$ (danys greus) cada 100 o 200 anys. Per a magnituds superiors, com la dels sismes destructors de l'Edat Mitjana, l'extrapolació és incerta i calen més informacions per determinar-ne el període de recurrència. En particular, els estudis de paleosismicitat, per a trobar traces de sismes en el registre geològic quaternari o a partir de mesures precises de posicionament, per determinar les velocitats de deformació actual han de donar indicacions d'aquests períodes per ara desconeguts.

10. La sismicitat al Solsonès

Solsona i la seva comarca se situa a la Catalunya central, el nord i la zona central de la comarca pertanyen a la zona axial externa dels Pirineus, el basament rocós (sòcol) és profund, es troba a fondàries superiors als 3 km i la cobertora està deformada i desplaçada; la zona sud de la comarca forma part del domini deformat de la conca de l'Ebre, la cobertora sedimentària està també deformada i desplaçada. A Organyà hi ha instal·lada una estació sísmica de l'ICC. L'activitat sísmica a la comarca és molt baixa, la majoria de sismes es localitzen a la zona de Gòsol, i en general són de magnituds inferiors a 3. En els darrers 10 anys s'han produït a la comarca uns 25 terratrèmols amb magnituds compreses entre 0.8 i 2.9.

No tenim constància en documents escrits que els sismes de la crisi del 1427-1428 fossin percebuts a la comarca del Solsonès, en les simulacions realitzades a l'ICC pel sisme del Ripollès del 1428 obtenim que probablement va ésser percebut

al Solsonès amb una intensitat de VII.

Alguns sismes importants amb epicentre a Catalunya que ha estat percebuts al Solsonès són:

- Sisme del 2 de març de 1373 a la Ribagorça, intensitat epicentral $I_0=VIII-IX$, percebut a Solsona amb intensitat VI–VII.
- > Sisme del 29 de novembre de 1919 a Boí (Lleida), intensitat epicentral $I_0=VI$, percebut a Solsona amb intensitat III, III–IV.
- > Sisme del 19 de novembre de 1923 a Viella, intensitat epicentral $I_0=VIII$, percebut a Solsona amb intensitat IV, IV–V.
- > Sisme del 8 de juliol de 1965 a la Seu d'Urgell, intensitat epicentral $I_0=IV$, percebut al nord del Solsonès amb intensitat II, II–III.
- > Sisme del 14 de març de 1970 a Andorra, intensitat epicentral $I_0=V-VI$, percebut al Solsonès amb intensitat III, III–IV.
- > Sisme del 26 de setembre del 1984 a Ripoll, intensitat epicentral V, percebut al nord del Solsonès amb intensitat II, II–III.
- > Sisme del 6 de gener de 1989 a Bagnères de Bigorre, intensitat epicentral $I_0=VI$, percebut al Solsonès amb intensitat II, II–III.
- > Sisme del 15 de maig de 1995 a la costa de Tarragona, intensitat epicentral $I_0=V$, percebut a Solsona amb intensitat III.
- > Sisme del 18 de febrer de 1996 a Sant Pau de Fenollet, intensitat epicentral $I_0=VI$, percebut amb intensitat II–III al Solsonès.

Ens els estudis de risc sísmic que es fan a l'ICC, s'ha elaborat recentment un mapa probabilista de zones sísmiques que dóna idea de les intensitats previstes en cada municipi, en un període de retorn de 500 anys, tenint en compte també els efectes locals, és a dir l'amplificació del moviment sísmic degut a la presència de sols tous, (figura 13). Amb la classificació geotècnica realitzada al Solsonès, associada a la velocitat que tenen les ones S en travessar-los, la majoria d'edificis estan construïts en sols de classe A(roques compactes) i alguns en sols de classe B (materials semicompactats). Veiem en el mapa que al nord del Solsonès se li assigna una intensitat VII–VIII, al centre de la comarca una intensitat VII i al Sud una intensitat VI–VII. L'ICC, juntament amb els organismes de protecció Civil, ha elaborat el pla Sismicat, d'alerta sísmica de Catalunya. S'han creuat dades sobre la intensitat del possible terratrèmol, zona sísmica on es produeix, característiques del sòl i dels habitatges i s'han establert uns escenaris de danys preliminars útils per a les gestions de Protecció Civil en cas de terratrèmol.

Bibliografia general

- > Bolt, A. (1981). "Terremotos". Serie reverte ciencia y sociedad. Editorial Reverté, p. 266.
- > Doyle, H. (1995). "Seismology". Edit. Wiley.
- > Stacey (1969). "Physics of the Earth". Edit. Wiley
- > Udias, A, Mezcuja J. (1986). "Fundamentos de Geofísica". Editorial Alhambra.