



**Meritxell Aulinas, Guillem Gisbert,
Maria Ortuño**

La Terra, un planeta inquiet

**Com funcionen els volcans i
els terratrèmols, com ens afecten
i què podem fer per conviure-hi**



Índex

Pròleg, per Pere Santanach, professor emèrit del Departament de Geodinàmica i Geofísica de la UB	13
---	----

PART I. INTRODUCCIÓ

Capítol 1. L'origen de l'Univers	21
El Big Bang i la nucleosíntesi primordial.	21
La formació de les estrelles i les galàxies	24
Com es forma una estrella i quins processos s'hi produeixen?	24
Capítol 2. La formació del Sistema Solar i la Terra	31
La formació del Sol i els planetes	31
La diferenciació dels planetes	37
El cas concret de la Terra	39
Capítol 3. Tectònica de plaques	43
L'estructura interna de la Terra i el comportament de les roques	43
Les plaques tectòniques	49
Límits convergents.	50
Límits divergents.	54
Límits transformants	58
Per què es mouen les plaques tectòniques?	59
La Terra, un planeta calent	60

<i>El model de cel·les de convecció.</i>	61
<i>El model actual</i>	62
<i>La convecció del mantell</i>	65
Què passarà amb la tectònica de plaques a mesura que la Terra es refredi?	66

PART 2. TERRATRÈMOLS

Capítol 4. L'origen dels terratrèmols	69
La sismologia, una ciència jove	69
Què és un sisme i per què es produeix?	72
Ones sísmiques	74
<i>Tipus d'ones sísmiques</i>	74
Les plaques litosfèriques es mouen sisme a sisme	76
<i>La profunditat dels terratrèmols, una de les evidències de la subducció.</i>	78
<i>El camp d'esforços</i>	80
Els sismes associats a volcans	80
Els sismes associats a isostàsia i a fenòmens de recuperació elàstica	82
Sismes induïts per l'activitat humana	84
Les falles com a principals fonts sísmiques	85
<i>Tipus de falles.</i>	87
<i>La Terra és lenta perquè no té pressa</i>	89
El cicle sísmic	89
Capítol 5. La mida dels terratrèmols: intensitat i magnitud	93
La intensitat	95
<i>Mapes d'isosistes i escales d'intensitat sísmica</i>	95
<i>Escala de Mercalli</i>	96
<i>Escala macrosísmica europea (EMS98).</i>	98
<i>Escala sísmica de l'Agència Meteorològica del Japó. Escala Shindo</i>	99
<i>La intensitat màxima sempre coincideix amb l'epicentre d'un terratrèmol?</i>	99

<i>Moviment del terreny</i>	102
La magnitud	103
<i>Escala logarítmica per mesurar la magnitud local (o de Richter)</i> . . .	105
<i>Moment sísmic i magnitud moment.</i>	106
Energia sísmica d'una regió del planeta	107
<i>Llei de Gutenberg-Richter</i>	108
Capítol 6. Efectes col·laterals dels sismes	111
Efectes primaris	112
Efectes secundaris.	114
<i>Liqüefacció.</i>	114
<i>Esquerdes al terreny.</i>	116
<i>Moviments de vessant.</i>	117
<i>Altres efectes secundaris</i>	119
Tsunamis	120
<i>Quan es produeix un tsunami?</i>	120
<i>Com es propaga un tsunami i per què és tan destructiu?</i>	121
<i>Tots els terratrèmols sota el mar produeixen tsunamis?</i>	124
Capítol 7. Com estudiem els terratrèmols	127
Entenent els sismes per la petjada que deixen en el passat: paleosismologia, arqueosismologia i estudi del registre històric de sismes	130
<i>La geologia de terratrèmols</i>	130
<i>La paleosismologia</i>	140
<i>Sismologia històrica i arqueosismologia</i>	145
Correlacions entre els sismes que ara mesurem i els sismes del passat que van quedar registrats a la geologia	147
Entenent els sismes tot mesurant-ne les propietats físiques	148
<i>Els primers sismògrafs</i>	148
<i>Localitzant el focus del sisme</i>	150
<i>Estudiant la zona de deformació amb tecnologia satel·lital.</i>	151

Capítol 8. Conviure amb els terratrèmols	153
Perill, vulnerabilitat, risc... i altres termes útils	155
Sismicitat a Catalunya i a la península Ibèrica	156
La predicció dels sismes	158
<i>Avaluació del perill i del risc sísmic</i>	159
Reducció dels efectes destructius d'un sisme.	163
<i>Mesures estructurals</i>	163
<i>Mesures no estructurals</i>	165

PART 3. VULCANISME

Capítol 9. Els magmes	173
Què són i com es formen els magmes?	173
Els magmes i la tectònica de plaques	180
<i>Límits de placa divergents</i>	180
<i>Límits de placa convergents</i>	181
<i>Zones d'intraplaca</i>	183
Propietats dels magmes	186
<i>Composició química i classificació dels magmes</i>	186
<i>Propietats físiques dels magmes</i>	189
Capítol 10. Del magma a la roca	193
Fusió parcial i diferenciació magmàtica	193
<i>Fusió parcial</i>	193
<i>Cristal·lització fraccionada</i>	194
<i>Barreja de magmes i assimilació magmàtica</i>	198
Els productes de refredament dels magmes: les roques ígnies	200
<i>La classificació de les roques volcàniques</i>	203
Capítol 11. Tipus d'erupcions volcàniques.	205
Activitat efusiva	207
Activitat explosiva.	208
<i>Erupcions estrombolianes</i>	209

<i>Erupcions vulcanianes</i>	210
<i>Erupcions plinianes</i>	211
<i>Erupcions hidromagmàtiques</i>	214
L'índex d'explosivitat volcànica (IEV)	215
<i>Què és l'índex d'explosivitat volcànica?</i>	215
Capítol 12. Tipus de volcans i productes volcànics	219
Volcans monogenètics	220
<i>Cons d'escòries</i>	220
<i>Maars, cons de tuf i anells de tuf</i>	222
Volcans poligenètics	224
<i>Volcans en escut</i>	225
<i>Volcans compostos o estratovolcans</i>	227
Calderes i supervolcans	232
<i>Calderes associades a estratovolcans</i>	233
<i>Calderes associades a volcans en escut</i>	234
<i>Calderes renaixents o ignimbrítiques</i>	234
Productes volcànics	235
<i>Productes d'erupcions efusives</i>	236
<i>Productes i dipòsits d'erupcions explosives</i>	241
<i>Gasos</i>	246
Capítol 13. Conviure amb els volcans	247
Els perills volcànics	248
Colades de lava	249
Emissió i caiguda de piroclastos	251
Fluxos piroclàstics	253
Emissió de gasos	255
Terratrèmols i tremolor volcànica	257
Esllavissaments	258
Lahars	258
Tsunamis	259
Estudi i vigilància dels volcans	261

Capítol 14. Els volcans de casa	263
Edificis volcànics i estils eruptius	264
<i>Zones volcàniques de l'Empordà i la Selva</i>	264
<i>Zona volcànica de la Garrotxa</i>	266
Productes volcànics.	269
<i>Els piroclastos.</i>	270
<i>Les laves.</i>	272
Composició del magma i tipus de roques volcàniques	273
Per què hi ha volcans a Catalunya?	274
Els volcans a Catalunya: extingits o adormits?	276
 Bibliografia i webs	 279

PRÒLEG

En el decurs de generacions contemplem el mateix paisatge. Muntanyes, valls i planes se'ns presenten com un marc estàtic sobre el qual es desenvolupa la vida. Només de tant en tant, i en determinats llocs de la Terra, terratrèmols i volcans, fenòmens de curta durada i sovint d'efectes catastròfics per a les persones, omplen els noticiaris televisius i ens mostren de manera contundent un planeta dinàmic. Volcans i terratrèmols són una manifestació palpable per a tothom de l'activitat interna de la Terra. És justament aquesta activitat la que aixeca serralades i enfonsa depressions davant dels nostres ulls, encara que, a causa de la lentitud dels processos, la superfície de la Terra ens aparegui com a estable.

Terratrèmols i volcans són manifestacions puntuals, breus, de processos geològics lents de llarga durada. Els terratrèmols són conseqüència del moviment de les falles —dislocacions de l'escorça de la Terra—, el moviment de les quals causa la formació de muntanyes i depressions. Les falles llisquen a velocitats mitjanes de l'ordre de mil·límetres per any, o fins i tot menys, durant desenes de milions d'anys, i d'aquesta manera generen relleus davant nostre sense que ens n'adonem. Les falles, però, no es mouen de manera contínua, sinó que ho fan de forma episòdica, a batzegades espaciades en el temps. Fan salts, petits desplaçaments, bruscs, que poden arribar a atènyer alguns metres, separats per llargs períodes de quietud. Aquests salts provoquen les vibracions que coneixem com a terratrèmols. Cada falla produeix terratrèmols amb una de-

terminada cadència, des de cada pocs anys fins a desenes de milers d'anys. Això depèn del grau d'activitat de la regió on se situa la falla. L'existència de falles en períodes de temps llargs entre salts explica l'ocurrència de terratrèmols en regions on eren desconeguts. Compte, doncs: regions aparentment tranquil·les algun dia podrien tremolar!

Els volcans són el resultat de l'arribada a la superfície de la Terra d'una fosa de roques, el magma, originat en profunditat. Perquè un volcà faci erupció, cal que en algun lloc de l'interior de la Terra es fongui la roca i es formi el magma, i que després el magma migri i s'acumuli prop de la superfície, fins que es donin les condicions que permetran l'erupció. Tot plegat és un procés llarg i complex. El volcà és només un fenomen superficial i breu, que posa en evidència l'activitat magmàtica de l'interior de la Terra. El magma no sempre acaba en manifestacions volcàniques; pot consolidar a l'interior de l'escorça.

Si estem atents als telenotícies, ens adonarem que algunes regions concentren la majoria de terratrèmols i erupcions volcàniques, com els voltants de l'oceà Pacífic, mentre que d'altres regions no surten mai a les notícies per causa d'aquests fenòmens, com és el cas d'Escandinàvia. Hi ha regions més actives i d'altres de més tranquil·les. Això és degut a la manera com s'organitza la dinàmica de les capes més externes de la Terra. Cal entendre aquesta dinàmica per comprendre els terratrèmols i els volcans.

Des de la més remota antiguitat, terratrèmols i volcans van cridar l'atenció de l'home, que va donar-hi explicació. Interpretacions mítiques i sobrenaturals primer, que a poc a poc van anar deixant pas a explicacions científiques, d'acord amb les visions que en cada moment es tenia de la Terra i el seu funcionament. No es tracta, ni aquí, ni en aquest llibre, de fer-ne la història. Només citaré uns exemples d'interpretació dels terratrèmols i volcans de mitjan segle XVIII, quan s'estaven establint els fonaments de la geologia, Lavoisier posava les bases de la química i s'acabava de descobrir l'electricitat. Es considerava que els terratrèmols eren

la conseqüència de tempestes elèctriques a l'interior del globus comparables a les de l'atmosfera. Fins i tot es van proposar «paraterratrèmols», a la manera dels parallamps, consistents en cables profundament enterats perquè dissipessin l'electricitat responsable dels terratrèmols. A la mateixa època es pensava que el magma que feia erupció pels volcans era degut a la fusió de roques força superficials causada per l'incendi de capes de carbó de pedra.

D'aleshores ençà, el coneixement de la Terra i dels processos que hi tenen lloc ha progressat molt i ha canviat radicalment. La teoria de la tectònica de plaques, formulada fa poc més de mig segle, explica la dinàmica de les capes més externes de la Terra i integra, en un marc dinàmic global, la majoria de fenòmens geològics, entre els quals hi ha la sismicitat i el vulcanisme.

El llibre que teniu a les mans dóna una visió entenedora dels coneixements actuals sobre volcans i terratrèmols en el marc de la dinàmica de la Terra, tal com s'entén avui. Els tres primers capítols expliquen els conceptes fonamentals de la teoria de la tectònica de plaques, i per entendre com la Terra ha arribat a aquest comportament, repassa prèviament, de manera breu, l'evolució de les estrelles, els sistemes solars i els planetes, en particular l'evolució de la Terra.

Els terratrèmols són l'objecte de cinc capítols. S'exposa què és un sísmic i per què es produeix, i es destaca el paper de les falles com a fonts dels terratrèmols. A continuació es tracta la mida dels terratrèmols i es defineixen els conceptes de magnitud i intensitat, que cal distingir sempre en parlar de terratrèmols. També es descriuen els efectes que produeixen els sísmics i els mètodes d'estudi dels sísmics actuals i dels ocorreguts en èpoques antigues, tant d'aquells dels quals es té notícia històrica com dels sísmics més antics en què cal recórrer a la informació que proporciona el registre geològic. Exposit el fenomen sísmic, s'aborda el problema de la convivència de l'home amb els terratrèmols. Es poden preveure? Com se'n poden mitigar els efectes?

L'última part del llibre parla dels volcans, en cinc capítols més. Explica què són els magmes, com es formen, els diferents tipus i la seva relació amb la dinàmica de les plaques. Se segueix amb els processos de consolidació dels magmes, els tipus de roques a què donen lloc i el paper dels volcans en aquests processos. Es dedica un capítol a descriure les característiques dels diferents tipus de volcans i dels productes que emeten: escòries, gredes, bombes, laves, etc. Anàlogament a la manera com han estat tractats els sismes, també es discuteix els perills dels volcans i la vigilància de l'activitat volcànica.

Tant pel que fa als volcans com als terratrèmols, els autors il·lustren els diferents conceptes amb exemples d'arreu i del nostre país. No cregui el lector que els temes tractats en aquest llibre tenen només un interès científic aliè a la nostra realitat. També en tenen per al nostre país, que, sense estar situat en una zona de gran activitat sísmica i volcànica, no es pot dir que estigui exempt dels perills ocasionats per aquests fenòmens. L'home va veure els volcans olotins en acció; l'última erupció va tenir lloc fa només 11.000 anys. Els volcans de la Garrotxa estan extingits o només adormits? Terratrèmols destructius han ocorregut molt més recentment. El 1829 un sisme destruï Torrevella i altres poblacions del Baix Segura, i en el segle XV una sèrie de terratrèmols va sacsejar la Garrotxa. Van ser destruïdes diverses poblacions, entre elles Olot, i el terratrèmol ocorregut el dia de la Candelera de 1428, el més fort de la sèrie, va matar unes 1.000 persones. Avui, tenim una central nuclear situada sobre una falla, en aparença tranquil·la però que en els últims 100.000 anys ha ocasionat diversos terratrèmols, resultat de salts de la falla que han produït ruptures notòries del terreny. Poden les falles aparentment inactives del nostre país produir terratrèmols destructius?

Espero que aquests apunts acabin de desvetllar l'interès del lector i l'animin a introduir-se en el món dels terratrèmols i els volcans.

Finalment, cal dir que aquest llibre és el resultat de la voluntat divulgadora de Meritxell Aulinas, Guillem Gisbert i Maria Ortuño, investiga-

dors de volcans i terratrèmols i professors de Geologia de la Universitat de Barcelona, i de la voluntat de Publicacions i Edicions d'aquesta Universitat de difondre a un públic ampli l'estat del coneixement científic.

Aulinas i Gisbert centren la seva investigació en la geoquímica i la petrologia de roques volcàniques. El principal objectiu de la recerca d'Aulinas és el vulcanisme de les illes Canàries, en particular el vulcanisme recent de l'illa de Gran Canària. També ha treballat en el Vesuvi i a Campi Flegrei, prop de Nàpols. Gisbert s'ha ocupat principalment d'un vulcanisme antic de l'illa de Sardenya i també del recent de la Garrotxa; a més, ha fet alguna incursió en el vulcanisme d'Amèrica Central. Ortuño investiga terratrèmols prehistòrics, pel coneixement dels quals cal basar-se en l'empremta que han deixat en els materials geològics. Ha estudiat terratrèmols ocorreguts durant els últims 300.000 anys als Pirineus, al sud-est de la península Ibèrica i també a Nicaragua i Mèxic.

PERE SANTANACH

*Professor emèrit del Departament de Geodinàmica i Geofísica,
Universitat de Barcelona*

Part I
Introducció

CAPÍTOL 1

L'origen de l'Univers

Sovint, quan es vol explicar la presència de volcans i terratrèmols al nostre planeta, es fa mitjançant la teoria de la tectònica de plaques, una teoria de la qual gairebé tothom ha sentit parlar alguna vegada. Ara bé, rarament es justifica la presència de la tectònica de plaques en si, cosa que és fonamental per poder entendre el perquè de tot plegat. Per fer-ho cal remuntar-se ben bé fins a l'origen de l'Univers, ja que la tectònica de plaques és el resultat de la dinàmica de formació de les estrelles, dels sistemes solars i dels planetes.

EL BIG BANG I LA NUCLEOSÍNTESI PRIMORDIAL

El model més acceptat sobre la formació de l'Univers conegut és la teoria del Big Bang. Segons aquest model l'Univers es formà fa aproximadament 13.700 milions d'anys a partir de l'«explosió» (el Big Bang) d'un punt minúscul infinitament dens i calent que concentrava tota la matèria i energia de l'Univers observable. L'evolució de l'Univers durant els seus primers segons de vida va ser trepidant. En poc més de tres minuts es va passar de tenir tota la massa i energia de l'Univers concentrada en un punt minúscul a una temperatura inimaginable (es calcula que 10^{-43} s

—és a dir, 0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 01 s— després del Big Bang la temperatura de l'Univers era d'uns 10^{32} °C —això és un 1 seguit de 32 zeros!—), a tenir ja nuclis atòmics. Al començament de tot la temperatura era tan elevada que les partícules elementals no podien existir i les quatre forces fonamentals que actuen avui a l'Univers (gravitatòria, interacció nuclear forta, interacció nuclear feble i electromagnètica) estaven unificades en una de sola. Durant una fracció minúscula del primer segon després del Big Bang l'Univers va experimentar una expansió increïblement ràpida, que es coneix com a època inflacionària. Aquesta expansió va fer que l'Univers s'anés refredant. És el procés equivalent al que té lloc amb els productes en esprai; encara que el pot estigui calent, l'esprai que en surt (per exemple desodorant) sempre surt fred gràcies a l'expansió. A mesura que va anar baixant la temperatura les forces es van anar separant i van començar a aparèixer les partícules; es van formar els quarks i els leptons, que són els constituents fonamentals de la matèria, i les partícules responsables de les forces fonamentals. A partir d'aleshores l'univers es va continuar expandint però ja més lentament. Inicialment es creà matèria i antimatèria en proporcions gairebé idèntiques. Amb el temps, matèria i antimatèria es van aniquilar mútuament en proporcions estrictament idèntiques. Ara bé, per raons que encara no es coneixen amb certesa existia un mínim excés de matèria respecte d'antimatèria, que va quedar com a residu al final del procés. És aquesta matèria residual la que crea l'Univers conegut. Segons va anar disminuint la temperatura per l'expansió van aparèixer partícules més complexes fins que, al voltant dels 100 segons després del Big Bang, ja existien protons i neutrons (els constituents dels nuclis atòmics), en una proporció de 7 a 1. El nucli atòmic més simple possible és el de l'hidrogen (H), que consisteix únicament en un protó; és el nucli més petit, lleuger i abundant de l'Univers. Als 200 segons, en arribar a una temperatura de $9 \cdot 10^8$ °C (900 000 000 °C), protons i neutrons es van començar a combinar i van donar lloc als primers nuclis

atòmics complexos; aquest procés es coneix com a nucleosíntesi primordial. El primer a formar-se va ser el deuteri (un tipus d'hidrogen més pesant que consta d'un protó i un neutró), i, a partir d'aquest, l'heli (He), el gas que posem als globus. El procés va continuar i va donar lloc a nuclis cada vegada més pesants, fins que, al voltant dels 1.000 segons després del Big Bang (una mica més de setze minuts), la temperatura va baixar per sota dels $3 \cdot 10^8$ °C (uns tres-cents milions de graus centígrads), punt en què l'energia ja no va ser suficient per continuar aquest procés de fusió atòmica i es va aturar la formació de més nuclis atòmics. Com a resultat d'aquesta nucleosíntesi primordial ocorreguda tot just en els primers vint minuts de vida de l'Univers conegut, va quedar establerta la proporció entre elements químics que encara avui dia predomina a l'Univers. El resultat d'aquest procés van ser unes proporcions en massa (que no en nombre d'àtoms) dels diferents elements d'un 75% d'hidrogen (H), un 25% d'heli (^4He), un 0,01% de deuteri (^2H), i quantitats mínimes (de l'ordre de 10^{-10} %) de liti (Li) i beril·li (Be). Tots aquests elements corresponen als més lleugers, els primers que trobem a la taula periòdica dels elements. No es van arribar a formar elements més pesants. Als 380.000 anys la temperatura va baixar per sota dels 3.000 °C, punt en què els nuclis atòmics i els electrons no es van poder mantenir separadament per més temps. Els nuclis atòmics (amb càrrega elèctrica positiva per la presència de protons) van atreure llavors els electrons (que tenen càrrega negativa), de manera que es van anar combinant i van donar lloc als primers àtoms elèctricament neutres formats pel nucli atòmic i el núvol d'electrons associat. A partir d'aquí es van poder formar també les primeres molècules.

Del que s'ha explicat fins ara sorgeix una pregunta: si durant la nucleosíntesi primordial només es van formar els elements més lleugers de la taula periòdica, d'on surten la resta dels elements que formen el nostre planeta o a nosaltres mateixos? La resposta es troba a les estrelles.