



# ELS RISC D'ERUPCIIONS VOLCÀNIQUES A CATALUNYA

**Joan Martí**

Aquest informe està inclòs al projecte **RISKCAT** encarregat pel CADS (Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible) al Grup de Recerca RISKNAT de la Universitat de Barcelona.

Projecte: **RISKCAT** 2008

Director: Joan Manuel Vilaplana

Coordinadora: Blanca Payàs

Equip d'experts: Ramon Copons, Jorge Guillén, Joan Escuer, María José Jiménez, Mariano García, Joan Martí i Eduard de Ribot

Assessor: Antonio Cendrero

Suport tècnic: Lau de Llobet, Silvia Panadell i Marta Guinau



## ÍNDEX

### **1. Definició del fenomen**

- 1.1. Els perills volcànics

### **2. Rellevància del fenomen volcànic a Catalunya**

- 2.1. Introducció sobre el vulcanisme recent a Catalunya
- 2.2. Història geològica recent del vulcanisme a Catalunya
- 2.3. Estimació quantitativa de l'impacte
  - 2.3.1. Efectes a curt termini
    - Fase estromboliana
    - Fase freatomagmàtica
  - 2.3.2. Efectes a llarg termini
- 2.4. Estimació del risc en el territori

### **3. Estat actual del coneixement científic i accions en gestió de risc**

- 3.1. Treballs científics i de divulgació
- 3.2. Cartografia geològica

### **4. Valoració de l'estat actual del coneixement i de la gestió del risc**

### **5. Recomanacions per a una gestió sostenible del risc**

- 5.1. Vigilància dels volcans
- 5.2. Predicció i prevenció del risc volcànic
- 5.3. Recomanacions concretes
  - 5.3.1. Millora del coneixement vulcanològic
    - 5.3.1.1. Datació de les erupcions recents
    - 5.3.1.2. Caracterització dels mecanismes eruptius
    - 5.3.1.3. Relació entre tectònica i vulcanisme
    - 5.3.1.4. Determinació de les característiques dels aqüífers de la zona
    - 5.3.1.5. Revisió de la cartografia geològica de la zona
    - 5.3.1.6. Elaboració d'una base de dades vulcanològica
  - 5.3.2. Pla de vigilància volcànica o monitorització geofísica
    - 5.3.2.1. Monitorització sísmica
    - 5.3.2.2. Monitorització gravimètrica
    - 5.3.2.3. Monitorització magnètica
  - 5.3.3. Geofísica estructural
    - 5.3.3.1. Perfils sísmics
    - 5.3.3.2. Gravimetria estructural
    - 5.3.3.3. Revisió de les dades del vol aeromagnètic de 1989-1990
    - 5.3.3.4. Campanya, o campanyes, de control d'emissió de radó per a la detecció de fractures obertes

### **6. Consideracions finals**



## 1. Definició del fenomen

El procés de sortida del magma a l'exterior de la superfície terrestre és el que coneixem com erupció volcànica. La causa bàsica que genera una erupció és l'increment de pressió del magma, ja sigui dins d'una cambra magmàtica o dins del conducte magmàtic. Aquest augment de pressió del magma pot ser degut, principalment, a dues causes, que poden actuar de manera aïllada o combinada. La primera és la injecció de nou magma en el mateix lloc però a més pressió. La segona causa d'augment de pressió del magma és deguda a la progressiva formació de gas que va experimentant el magma a mesura que puja cap a zones més superficials (amb menor pressió litostàtica). Aquesta segona causa és la que controla principalment les erupcions dels magmes generats a les zones de subducció, i de manera general dels magmes rics en gasos.

Segons les característiques dels magmes i les causes de les erupcions volcàniques associades, els productes derivats poden ser diversos. Les erupcions més violentes fragmenten el magma i les parets del conducte volcànic i arrossequen a l'exterior, juntament amb els gasos volcànics, tots aquests fragments (de magma i de la roca encaixant); l'acumulació d'aquests fragments crea els dipòsits piroclàstics. A les erupcions més tranquil·les, per contra, el magma surt continuadament en forma de colades de lava. Tant les laves com els piroclastos poden presentar diferents varietats en funció dels mecanismes eruptius, que, a la vegada, dependran de les característiques fisicoquímiques del magma i de les del seu entorn.

Els materials volcànics més característics de les erupcions efusives són els corrents de lava. La morfologia de les laves prové de la seva viscositat inicial, de la variació de viscositat durant l'emplaçament (refredament), del volum de material extrudit, del pendent topogràfic de l'edifici volcànic i del medi en què s'emplacen. Les laves bàsiques, com per exemple les dels basalts i basanites de la Garrotxa, són molt fluides i poden crear corrents de lava de grans extensions. Per contra, les laves derivades de magmes àcids, com per exemple les de dacites i riolites, són molt viscoses i normalment s'acumulen sobre la mateixa boca de sortida i conformen doms, i en casos extrems en què extrudeixen pràcticament solidificades, pitons volcànics o agulles.

Les erupcions més violentes estan associades a magmes calcoalcalins o alcalins molt evolucionats (rics en silici, àlcals i components volàtils) i s'anomenen plinianes, gràcies a la descripció que Plini el Jove va fer de la violenta erupció del Vesubi l'any 79. Aquestes erupcions estan sempre associades a volcans poligènics, de grans dimensions (estratovolcans i volcans en escut), i amb un període de vida molt llarg, de milers o, fins i tot, de milions d'anys, en què diversos episodis de forta activitat alternen amb altres de tranquil·litat. Aquest tipus de volcans està sempre associat amb una o diverses cambres magmàtiques superficials, en què el magma acumulat durant un llarg període de temps evoluciona i s'enriqueix en gasos. Les erupcions poden ser disparades per la ruptura d'aquesta cambra, per l'augment de la pressió dels gasos que es van formant o per injecció de nou magma a la base de la cambra. Aquestes erupcions es caracteritzen per la formació d'una columna eruptiva vertical, formada per gasos i piroclastos, de gran alçada (de 30 km i més) i que presenta una forma típica de xampinyó o pi mediterrani.

Un altre tipus d'erupcions explosives de gran violència són les erupcions vulcanianes. Aquestes erupcions, especialment freqüents en els volcans poligènics andesítics, tendeixen a ser explosions de curta durada relativa en què gran part del material piroclàstic correspon a fragments lítics (fragments de roca) que provenen de la roca encaixant o de parts solidificades del magma. En general, les erupcions vulcanianes estan associades a volcans centrals amb cons alts i de pendents pronunciats. Les erupcions vulcanianes poden generar columnes eruptives d'alguns quilòmetres d'alçada i, sobretot, corrents piroclàstics de diversa naturalesa.



Les erupcions estrombolianes són les erupcions explosives de menor intensitat i són característiques dels magmes basàltics (com és el cas d'algunes erupcions de la Garrotxa), molt menys viscosos i molt més pobres en gasos que els magmes més evolucionats. En aquestes erupcions es produeixen petites explosions separades per períodes de menys d'un segon fins a poques hores. Els productes piroclàstics generats en aquestes erupcions corresponen a bombes, lapil·li i cendra, que s'acumulen a prop del centre emissor i formen edificis cònics de dimensions relativament petites, si es comparen amb els volcans anteriors.

Durant el decurs d'una erupció volcànica, sigui del tipus que sigui, pot haver-hi una interacció del magma amb aigua meteòrica, procés que pot canviar totalment les característiques d'una erupció i incrementar-ne la intensitat, i fins i tot pot transformar erupcions inicialment tranquil·les en extremadament violentes. Aquestes són les erupcions hidrovulcàniques o freatomagnàmiques, produïdes per la interacció del magma o d'un focus de calor magmàtic amb aigua meteòrica, superficial o subterrània.

### 1.1. Els perills volcànics

L'activitat volcànica genera un conjunt de productes que, d'entrada, comporten sempre un perill per a l'entorn que afecten. Depenent del tipus de producte volcànic, els efectes poden ser molt localitzats o globals. En molts casos l'emplaçament de productes volcànics com laves o corrents piroclàstics signifiquen la destrucció total per a l'àrea afectada. L'entrada de partícules sòlides disperses i gasos, que després formaran aerosols, a l'atmosfera durant les erupcions plinianes pot comportar canvis importants en la dinàmica atmosfèrica que afectin significativament el clima terrestre. La presència de gasos nocius pot comportar molèsties i, fins i tot, la mort dels éssers vius que hi estan en contacte. Finalment, els volcans presenten pendents acusats i són terrenys inestables que poden generar esllavissades de volum variable, un perill volcànic addicional.

En el cas del vulcanisme recent de Catalunya, és de composició basàltica i té dos tipus d'erupcions molt característiques: erupcions estrombolianes, amb emissió de corrents de lava i formació de dipòsits de cendra i d'escòria, i erupcions freatomagnàmiques, amb formació de corrents piroclàstics i bretxes i cendres de caiguda. Ambdós dinamismes eruptius es poden produir per separat o durant una mateixa erupció.

Els corrents de lava es formen per una emissió continuada de magma des del volcà durant una erupció no explosiva. Les laves del vulcanisme recent de Catalunya són molt fluides i d'alta temperatura (>1.200°C). Poden representar un grau de destrucció molt elevat de l'àrea afectada. Tot i això, el risc que comporten es pot considerar relativament baix per a les persones, ja que l'emplaçament és lent i poden tenir temps de fugir de la zona d'acció. L'emplaçament de les colades de lava està controlat topogràficament, i tendiran a anar i a acumular-se cap a les zones topogràficament més deprimides.

Els productes piroclàstics que es poden originar en les erupcions tipus del vulcanisme de Catalunya són diversos i dependran de les característiques particulars de cada erupció. Bàsicament, podem tenir bombes i escòries que s'acumularan al voltant del centre emissor formant un con, fragments de mida lapil·li o gredes que també formaran part del con però que poden cobrir superfícies més grans, i cendres que es dispersaran a les capes altes de l'atmosfera i en caure al terra poden formar mantells molt extensos de gruixària variable. Els dipòsits piroclàstics de cendra disminueixen progressivament de gruixària a mesura que s'allunyen del centre emissor, i no estan controlats per la topografia sinó



que tendeixen a cobrir homogèniament el terreny. El risc directe associat és el pes del material acumulat, que pot esfondrar teulades i edificis poc resistents, però també ho és la presència de partícules de cendra a l'atmosfera que, a més d'efectes climàtics a llarg termini, poden tenir efectes directes per a l'aviació civil, perquè l'entrada d'aquestes partícules a les turbines d'un reactor en pot comportar la degradació i, fins i tot, l'aturada durant el vol. El risc d'impacte directe per caiguda de bombes és molt menor, ja que es restringeix a la zona més propera al volcà.

En el cas de les erupcions amb un component freatomagmàtic important, es poden trobar el mateix tipus de productes, a més de bretxes d'explosió i corrents piroclàstics. El perill associat a les primeres es bàsicament el mateix que el de les bombes i escòries, i es restringeix a l'impacte d'aquests clastos en una regió al voltant del centre emissor. Pel que fa als corrents piroclàstics, els fragments són transportats a ran de terra dins d'un flux gravitatiu, turbulent i de densitat variable, format per partícules sòlides i gas, que es desplaça a una temperatura i velocitat elevades. Els corrents o fluxos piroclàstics s'emplacen seguint la topografia, encara que la seva energia i velocitat els permeten de sobrepassar a vegades barreres topogràfiques importants. De tots els perills volcànics, els fluxos piroclàstics són els que representen un grau de destrucció i un risc més important, atesa la velocitat d'emplaçament, la temperatura i el volum del material transportat.

En el vulcanisme recent de Catalunya s'ha observat, i per tant cal tenir-ho present com a possible perill potencial, la presència de lahars. Els lahars són dipòsits piroclàstics que presenten característiques intermèdies entre els fluxos piroclàstics i els sedimentaris. Els lahars són corrents de fang originats per la mobilització de material piroclàstic recent per aigua de pluja o desglaç. Estan controlats per la topografia i comporten un risc molt alt per la velocitat de desplaçament i la massa de material transportada.

També cal tenir en compte com a possible perill potencial la presència de gasos. Si bé no són destructius respecte de les edificacions i infraestructures, poden tenir efectes letals per a les persones i els altres éssers vius. Alguns gasos volcànics, com és el cas del  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SH}_2$ , etc., són tòxics i corrosius i, per tant, irrespirables. El seu efecte es concentra bàsicament a les proximitats dels volcans, en els camps de fumerols. També poden ser transportats a distàncies més grans a dins dels corrents piroclàstics i làvics, la qual cosa n'incrementa el risc potencial, que se suma al propi del seu agent de transport. Cal remarcar l'efecte del  $\text{CO}_2$  que, sense ser un gas letal, pot representar un perill molt gran, ja que en ser més dens que l'oxigen pot desplaçar-lo i impedir la respiració dels éssers humans i dels animals.

## **2. Rellevància del fenomen volcànic a Catalunya**

### **2.1. Introducció sobre el vulcanisme recent a Catalunya**

El vulcanisme recent a Catalunya es concentra al NE del Principat i en algunes manifestacions aïllades al Baix Ebre i en el fons marí entre Catalunya i les Balears. Correspon a una manifestació magmàtica conseqüència de la tectònica extensiva de tipus rift, que afecta tota la Mediterrània occidental des del final del Terciari (Miocè) fins a l'actualitat. L'existència d'activitat volcànica en aquest indret no s'ha de considerar com un fet aïllat, sinó que cal emmarcar-la dintre dels episodis volcànics d'aquesta edat que apareixen a l'Europa central i occidental i que, en concret, afecten altres indrets dels Països Catalans. Aquest vulcanisme és de tipus intraplaca (és a dir, localitzat a l'interior d'una placa litosfèrica, lluny de les vores de la placa on es concentra l'activitat tectònica), i està



representat quasi exclusivament per roques basàltiques derivades directament de magmes molt poc evolucionats.

Els diferents afloraments volcànics s'han agrupat tradicionalment en tres unitats: Els episodis volcànics més antics s'observen a l'Alt Empordà i tenen de 10 a 11 milions d'anys. Des de llavors fins gairebé ara, l'activitat volcànica ha aparegut de manera esporàdica però relativament continuada, passant cap al Baix Empordà, després cap a la Selva i, finalment, cap a la Garrotxa, on el vulcanisme ha estat present des de fa uns 350.000 anys fins fa uns <9.000 anys, amb un episodi eruptiu cada 15.000 o 20.000 anys de mitjana. Les erupcions més recents són les de la zona de Santa Pau, i concretament el Croscat i la Pomareda són les darreres manifestacions volcàniques datades (9.000 anys), tot i que hi ha proves d'erupcions més recents, com per exemple la del volcà Roca Negra.

A la zona de la Garrotxa és on es localitzen els episodis volcànics més recents i on se situen els edificis més ben conservats. Son identificables un total de 50 volcans, agrupats en dos conjunts: l'un al nord, que correspon a la zona del Fluvià, i l'altre al sud, que coincideix amb la conca mitjana del Ter. El principal nucli volcànic pertany al sector nord (on hi ha uns 35 edificis), mentre que el sector sud únicament en té una quinzena, tot i que són els més grans. Entre aquests cal destacar la presència de dos importants edificis volcànics molt ben conservats i que mostren una complexitat eruptiva notable a la comarca del Gironès, i concretament al llarg de la vall del Llémena: el puig de Banya del Boc i els seu con adventici del clot de l'Omera, i el volcà de Puig d'Adri. El bon estat de conservació fa pensar que es tracta de volcans recents, encara que se'n desconeix l'edat concreta.

El vulcanisme de la Garrotxa i de les zones veïnes està caracteritzat principalment per erupcions estrombolianes que van formar cons de lapil·li i escòries (greda) al llarg de zones de fractura. Aquestes erupcions van tenir un caràcter monogenètic (erupció única amb diverses fases eruptives), de poc volum i de curta durada (de pocs dies a poques setmanes). Exemples d'aquest tipus d'activitat són els volcans Montsacopa, Croscat, Puig Alós, Puig Martinyà, Artigues Roges, etc. A part de les erupcions estrombolianes hi ha hagut també importants erupcions freatomagmàtiques. Els edificis amb activitat freatomagmàtica són molt més complexos, tot i que morfològicament es poden confondre amb els estrombolians. Poden alternar-hi fases freàtiques, produïdes per explosions de vapor que arrossega únicament material del substrat, amb fases freatomagmàtiques, en què hi ha una interacció directa de l'aigua meteòrica amb el magma basàltic, amb fases purament estrombolianes. Les seqüències eruptives que en resulten, deduïdes de l'estudi dels dipòsits piroclàstics, mostren variacions importants d'uns edificis als altres, cosa que demostra que els comportaments eruptius respectius són diferents. Exemples de volcans amb activitat hidrovulcànica o freatomagmàtica són els volcans del Puig de la Codina, Can Tià, Garrinada, Santa Margarida, Plaça Ribera, Racó, Puig de les Medes, Llacunagra, Puig Redó, Puig de la Banya del Boc, Puig Granollers, Can Simó, Clot de l'Omera, Traiter, Closa de Sant Dalmai i Puig d'Adri.

La diversitat de seqüències eruptives i de dipòsits produïts en cada fase contrasta amb la monotonia de la composició del magma. Per aquesta raó, cal cercar les diferències en el comportament eruptiu dels volcans estudiats en les múltiples formes d'interacció que pot haver-hi entre el magma i l'aigua meteòrica en els diferents volcans, que estan determinades per l'estructura geològica dels darrers centenars de metres de l'escorça i, especialment, per les característiques hidrològiques del terreny. De l'estudi d'aquestes seqüències eruptives es pot deduir que són dues, bàsicament, les formes en què el magma pot interaccionar amb l'aigua meteòrica, en aquest cas sempre subterrània. En el primer cas, el magma flueix a la base d'un aqüífer, escalfa l'aigua que hi ha, i quan la pressió de vapor supera el límit de fractura de les roques es produeix una gran explosió que comporta la formació d'un gran cràter envoltat d'un dipòsit heterolitològic i heteromètric. Això és el que va succeir a la Closa de Sant Dalmai. En el segon cas, el conducte volcànic passa a través de l'aqüífer sense



que hi hagi cap mena d'interacció entre el magma i l'aigua. Quan l'erupció ja ha començat i el magma dins del conducte perd pressió, l'aigua de l'aquífer hi pot accedir i llavors es produeix la interacció entre ambdós, generant unes explosions que formen colades i onades piroclàstiques. Això és el que sembla que va succeir a volcans com el Cairat, Canet d'Adri i el Puig de Banya del Boc.

Finalment, cal assenyalar que les dades petrològiques i la modelització del transport de xenòlits (fragments més densos que el magma) dins del magma permeten d'estimar la velocitat d'ascens del magma dins les fractures que el transporten des de la base de l'escorça, situada a uns 28 km de profunditat, fins a la superfície en uns 0,2 m/s, cosa que significa que un cop s'inicia l'ascens cap a la superfície el magma pot arribar-hi en uns pocs dies.

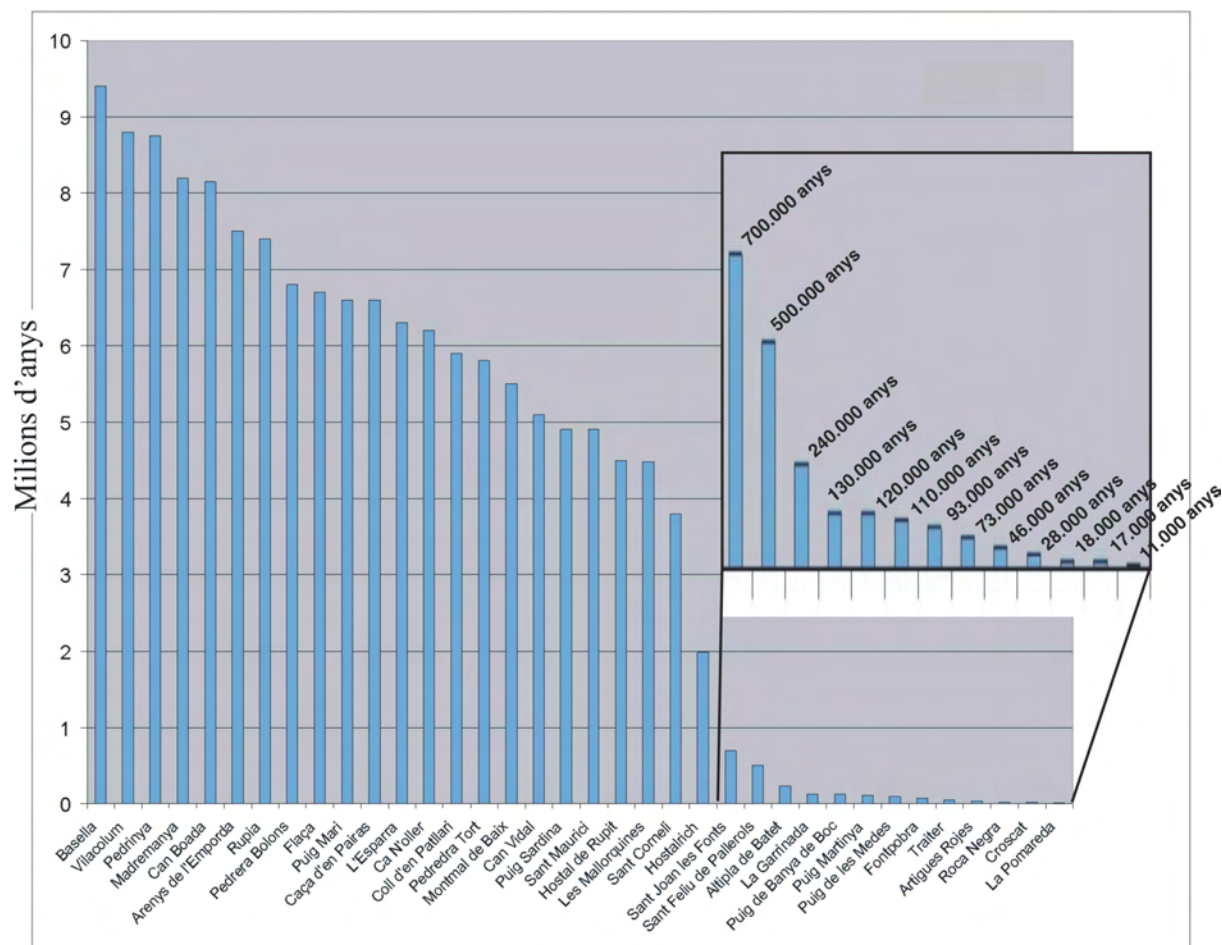


Figura 1. Distribució de les edats radiomètriques del vulcanisme de Catalunya

## 2.2. Història geològica recent del vulcanisme a Catalunya

Durant l'època geològica recent (darrers 10.000 anys, Holocè), l'activitat volcànica a Catalunya ha estat poc remarcable, tot i que l'activitat volcànica a la zona de Girona es registra de manera més o menys continuada durant els darrers deu Ma (fig. 1).

Tot i així, cal tenir en compte que la darrera erupció datada correspon a la del volcà Croscat i del seu con adventici la Pomareda, i és de fa uns 9.000 anys. Prenent aquesta edat com a referència, les relacions estratigràfiques entre diferents dipòsits volcànics i sedimentaris observables en camp demostren l'existència d'erupcions més recents. Per exemple, el volcà Roca Negra, a prop de la localitat de Santa Pau i situat en l'eix de dispersió de les cendres del Croscat, no està cobert per aquestes cendres.



De la mateixa manera, en sondatges fets en dipòsits lacustres a les Preses apareixen cendres volcàniques primàries d'edat aparentment no superior als 5.000 anys. Aquesta és una dada a tenir en compte a l'hora de considerar aquest vulcanisme com a potencialment actiu, i més si tenim en compte que amb les dades de què es disposa actualment, clarament insuficients, es pot establir un període de retorn d'uns 15.000 a 20.000 anys pels darrers 300.000 anys a la comarca de la Garrotxa.

Definitivament, la imprecisió en la determinació de les edats del vulcanisme a Catalunya és un dels punts més febles, i alhora més importants, per poder determinar el risc real que representa el vulcanisme.

Tot i això, seguint les recomanacions de l'Associació Internacional de Vulcanologia (IAVCEI), cal considerar com a zona volcànica activa "aquella que mostra o ha mostrat manifestacions d'activitat volcànica, no necessàriament erupcions (fumaroles, activitat sísmica, flux tèrmic elevat, etc.) durant l'Holocè (darrers 10.000 anys)", i aquest seria el cas del vulcanisme a la Garrotxa.

### 2.3. Estimació quantitativa de l'impacte

Per poder entendre l'impacte que pot representar una erupció volcànica avui a la Garrotxa, i com que no en tenim registre de cap, es defineix un escenari eruptiu prenent com a exemple una erupció com la del Croscat.

Aquesta erupció es va caracteritzar per un volum total de piroclastos d'uns  $0,01 \text{ km}^3$  i per l'existència de dues fases eruptives ben diferenciades, una d'inicial estromboliana, que ocupa el 80 % de l'erupció i comprèn diversos intervals, i una fase final freatomagmàtica. La fase estromboliana comprèn un episodi inicial amb formació d'un dipòsits d'escòries, un episodi principal de generació de dipòsits de lapil·li ben estratificats i un episodi final més cinerític, en què s'inicia la interacció amb aigua. La fase freatomagmàtica representa la culminació d'aquest procés eruptiu, amb la generació d'onades piroclàstiques i cendres. Els dipòsits estrombolians són responsables de la construcció de la major part del con de greda, que va assolir una alçada d'uns 170 m i una base d'uns 500 m, i va crear un mantell de lapil·li fi i cendres que es van distribuir cap a l'est i que s'han identificat entre els sediments del llac de Banyoles, amb una gruixària d'uns 12 cm.

La fase freatomagmàtica culmina la construcció del con amb un dipòsit d'uns tres metres, que lateralment té una extensió de diversos quilòmetres cap a l'est, amb gruixàries que sobrepassen els dos metres. De l'anàlisi de la dispersió del piroclastos es pot deduir que la fase estromboliana va generar una columna eruptiva d'uns 3.000 m d'alçada, mentre que durant la freatomagmàtica aquesta va assolir els 8.000 m. En els estadis finals de l'erupció es va produir l'emissió d'un corrent de lava que es va desplaçar cap a l'oest recorrent una distància d'uns set quilòmetres i formant el substrat del que avui és la Fageda d'en Jordà. La durada de l'erupció es pot estimar en funció del volum total de material extrudit i de les dimensions del con, i en aquest cas indiquen que l'erupció va durar diverses setmanes (entre sis i vuit).

Com que les condicions geològiques (distribució de la xarxa de fracturació, existència d'un règim distensiu, presència de dos aqüífers, Quaternari i Eocè, principals, topografia, flux tèrmic) que van condicionar aquesta erupció i les anteriors a la zona no han variat en l'actualitat, podem perfectament copiar les característiques de l'erupció del Croscat per reproduir les condicions d'una nova erupció tipus a la zona. La localització del centre emissor o volcà pot ser en qualsevol punt sobre la xarxa de



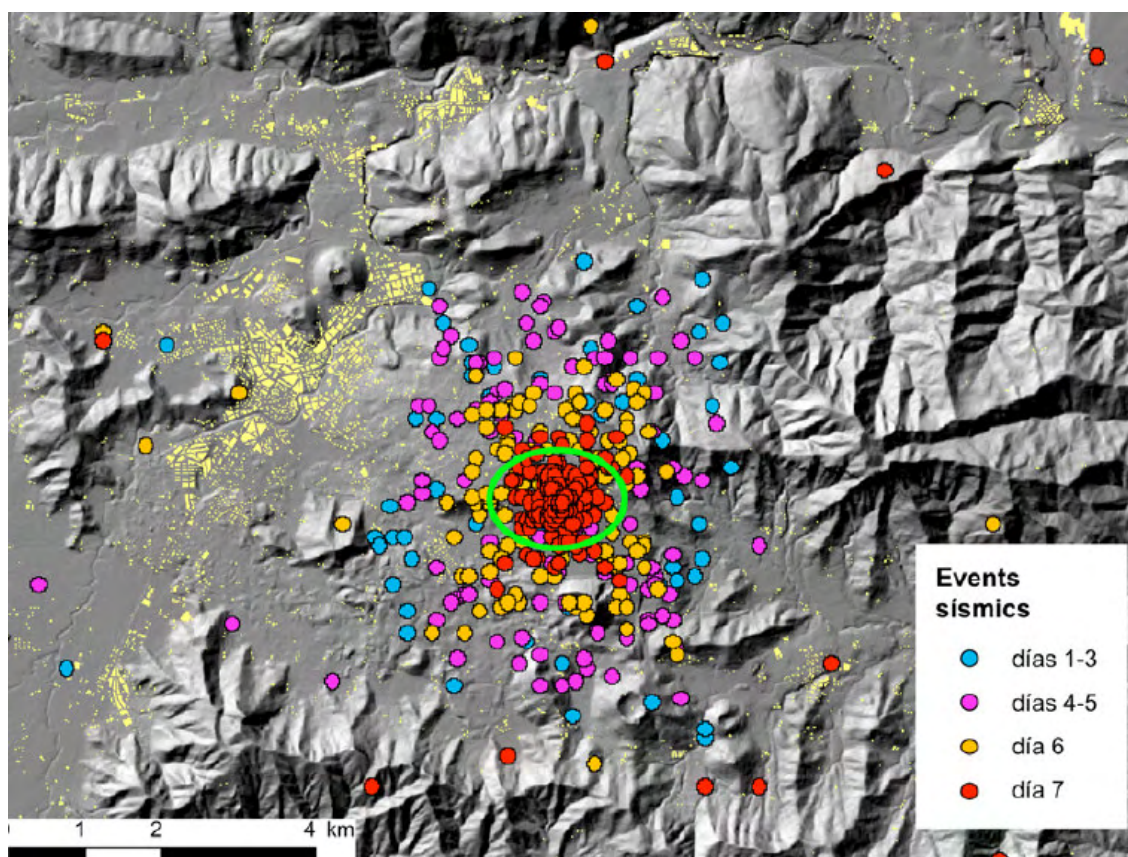


fractures distensives, excepte en aquells mateixos que ja han estat objecte d'erupció de magma en ocasions anteriors.

El que es presenta és una simulació basada en l'aplicació informàtica VORIS2, dissenyada a l'Institut Jaume Almera del CSIC, que permet quantificar l'evolució d'aquesta erupció i de les àrees ocupades pels seus productes dins de cada fase eruptiva; s'indiquen per separat els efectes propers i a curt termini, i els efectes més distants i a llarg termini.

### ***Efectes a curt termini***

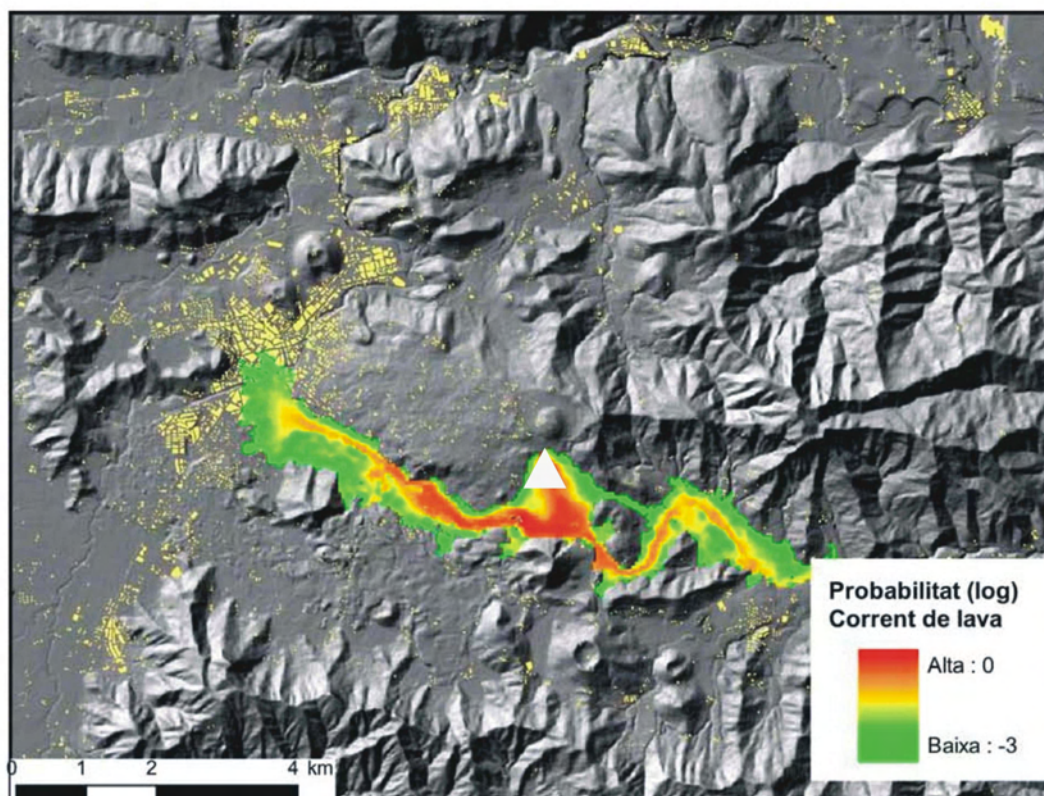
Localització del centre emissor (volcà)



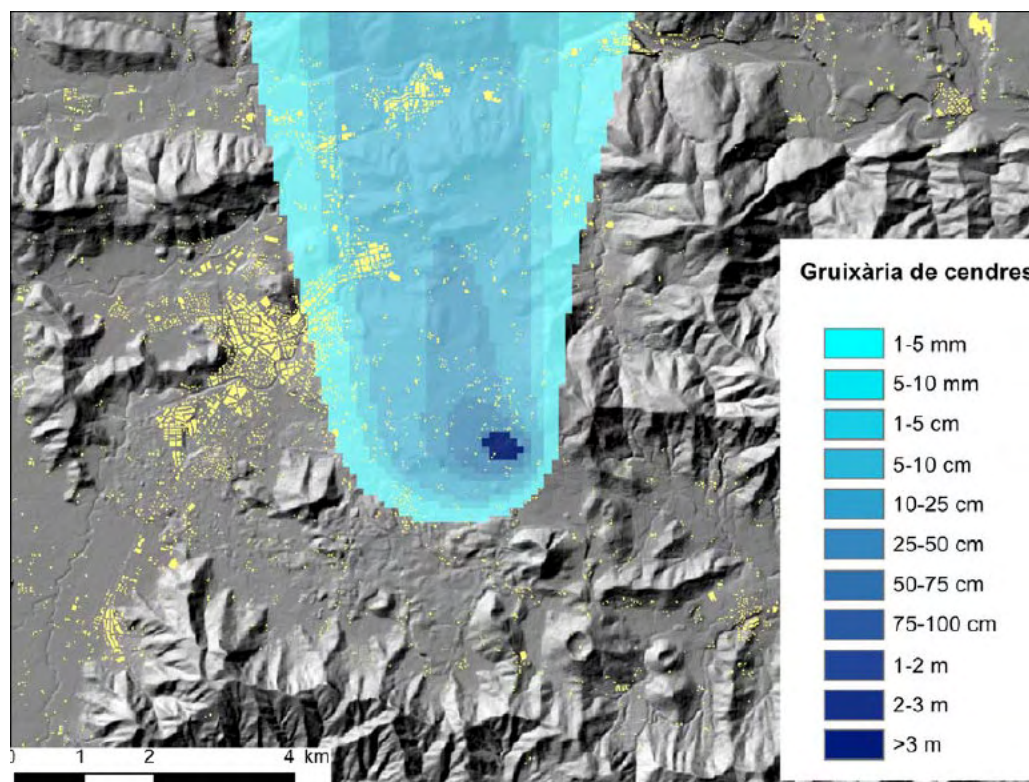
**Figura 2.** Representació hipotètica de concentració de sismicitat just abans de l'inici de l'erupció, la qual cosa permetria de saber on s'inicia i, per tant, de localitzar el punt (centre emissor) des del qual se simula l'escenari per poder estimar-ne la perillositat i el risc.

### Fase estromboliana

En aquesta fase considerem l'emplaçament de colades de lava i de caiguda de cendres. En ambdós casos tenim em compte les dades deduïdes de l'erupció del Croscat (extensió de la colada, alçada de la columna eruptiva, volum de piroclastos, durada de l'erupció, etc.) com s'ha presentat en l'apartat anterior. Solament es consideren les dades de vents actuals, d'un dia concret (el 23 d'octubre de 2006) per comprovar l'efecte que aquest paràmetre té en el resultat de l'erupció. Les dades de vents i atmosfèriques a la fase inicial de l'erupció s'han obtingut del radiosondatge de Saragossa, a les quals es pot accedir via web.



**Figura 3.** Representació de la probabilitat de ser envaït per les laves. El centre emissor està representat pel triangle blanc. Les edificacions estan representades en groc.



**Figura 4.** Dispersió de les cendres de la columna eruptiva (3 km d'alçada) i gruixària dels dipòsits resultants.



### Fase freatomagmàtica

En aquesta fase es considera l'emplaçament d'onades piroclàstiques i de caiguda de cendres. En ambdós casos es tenen també en compte les dades deduïdes de l'erupció del Croscat (extensió dels dipòsits d'onades piroclàstiques, alçada de la columna eruptiva, volum de piroclastos, durada de l'erupció, etc.) tal com s'han presentat anteriorment. Es consideren les dades de vents actuals, d'un dia concret (el 23 d'octubre de 2006) per comprovar l'efecte que aquest paràmetre té en el resultat de l'erupció. Les dades de vents i atmosfèriques a la fase inicial de l'erupció s'han obtingut del radiosondatge de Saragossa, a les quals es pot accedir via web.

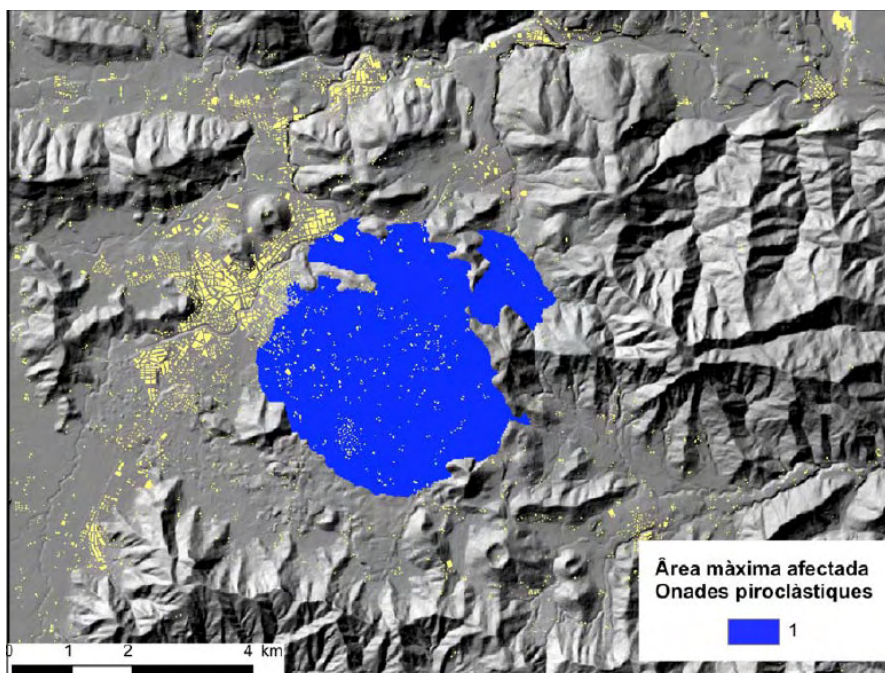


Figura 5. Àrea màxima afectada per les onades piroclàstiques.

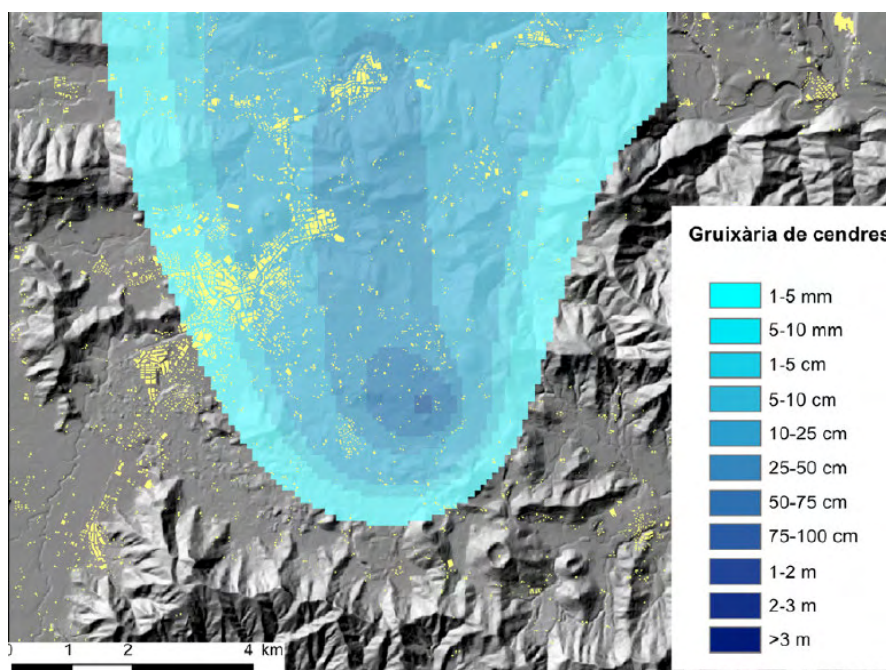
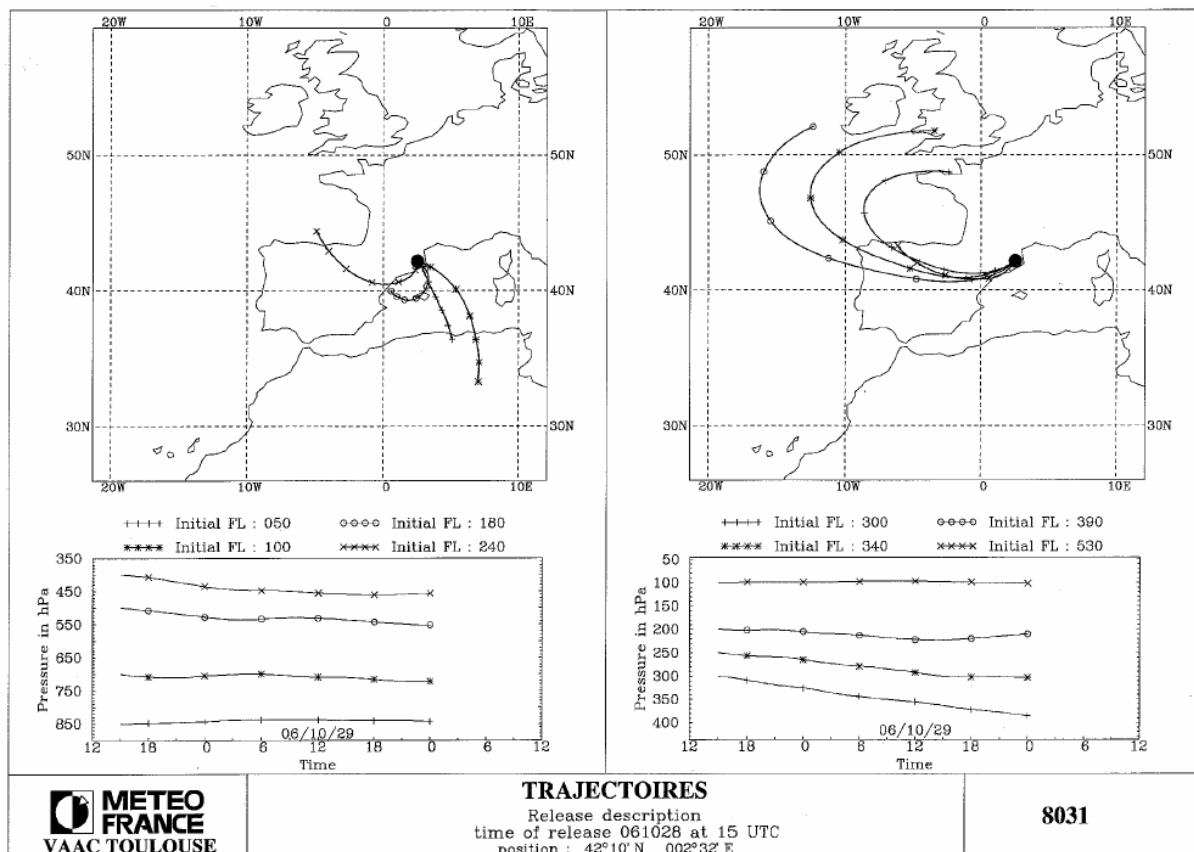


Figura 6. Dispersió de les cendres de la columna eruptiva (8 km d'alçada) i gruixària dels dipòsits resultants. Observeu la diferència entre aquesta distribució i la corresponent a la fase estromboliana.



**Efectes a llarg termini**

Quan una erupció d'aquest tipus es posa en marxa i, a més, es preveu la formació de columnes eruptives i la dispersió de cendres a l'atmosfera, cal notificar-ho a la xarxa internacional de centres meteorològics de seguiment d'erupcions volcàniques (VAAC). En el cas de Catalunya caldria posar-se en contacte amb el centre de Tolosa de Llenguadoc (França), que és el responsable del control atmosfèric per a Europa i Àfrica. Aquest centre aporta les dades de vents actuals en diferents punts de l'atmosfera sobre la zona de l'erupció i s'encarrega de modelitzar com els vents (i les cendres) evolucionaran amb el temps.



**Figura 7.** Trajectòries per a diferents alçades de les cendres generades durant la fase freatomagmàtica de l'erupció. Observeu com les zones afectades per les cendres inclouen els aeroports de Girona, Barcelona i Mallorca, i també els de Bristol i Cardiff, a la Gran Bretanya. Aquest fet indica que una erupció petita com aquesta avui tindria un impacte molt gran per la seva localització i les seves característiques, ja que afectaria gran part del tràfic aeri europeu.

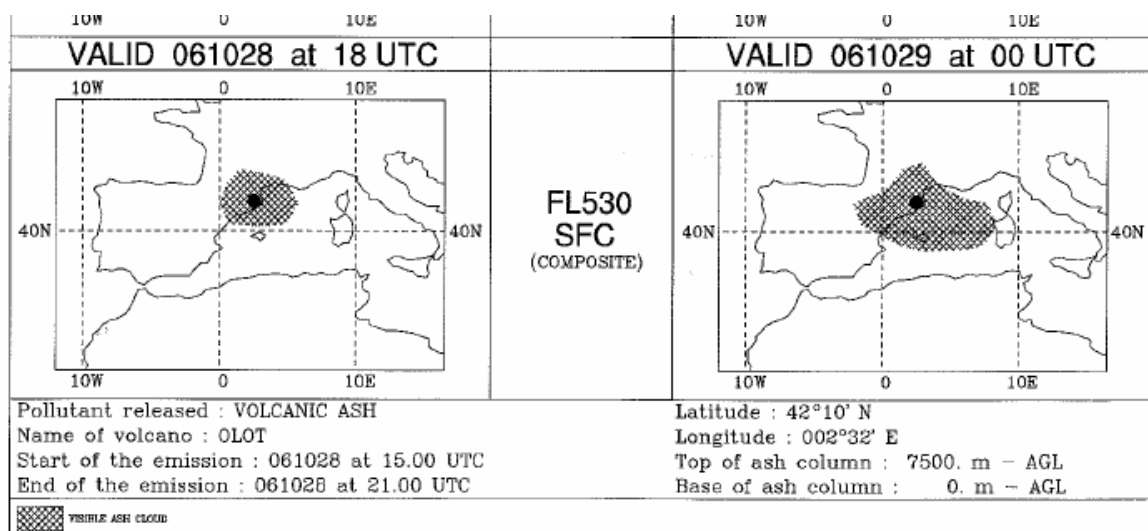


Figura 8. Exemples de mapes de zones afectades pel núvol de cendres en intervals de sis hores.

## 2.4. Estimació del risc en el territori

L'estimació de la perillositat volcànica i del possible risc associat depèn de la recurrència que puguem considerar per a cada fenomen. El possible risc no depèn solament del mateix fenomen natural sinó també de les característiques de l'àrea que es pot trobar afectada i de la vulnerabilitat dels elements en risc. En el cas del vulcanisme a Catalunya, i en concret a la zona on aquestes manifestacions són més recents (la Garrotxa), l'evolució socioeconòmica de l'àrea fa que es passi d'un risc baix o molt baix fa 100 anys a un risc moderat o alt en l'actualitat (vegeu l'informe). En el nostre cas, si es considera un període de retorn de 10.000 anys, s'estaria en un límit baix de seguretat. En situacions similars en els EUA o el Japó s'estan considerant períodes de retorn de 100.000 a 200.000 anys, per tal de disposar d'un marge prou ampli per valorar correctament la perillositat i el risc associat al fenomen volcànic. Cal tenir en compte que el vulcanisme de Catalunya ha seguit una pauta similar durant els darrers 10.000.000 anys, per la qual cosa no es pot afirmar que aquest vulcanisme es va aturar fa ara uns 10.000 anys. Tot al contrari, cal pensar que aquesta activitat continuarà en el futur amb una pauta temporal com la passada.

Com a conseqüència directa d'aquest concepte erroni de vulcanisme extingit, no hi ha cap avaluació de la perillositat i del risc ni cap anàlisi de vulnerabilitat enfront dels perills volcànics impulsats per cap administració, ni tampoc per universitats ni centres de recerca, i molt menys per cap empresa.

En qualsevol cas, i per tal de definir de manera més precisa l'apreciació que podem tenir sobre l'existència o no de risc volcànic a Catalunya, cal només aplicar les directrius de l'Associació Internacional de Vulcanisme (IAVCEI) per determinar el grau d'amenaça que representa aquest vulcanisme recent; i s'obté un valor d'amenaça moderada. Cal dir que s'apliquen valors molt conservadors dels diferents paràmetres d'entrada per la manca de coneixement que se'n té. Per aquesta raó, cal aprofundir en el coneixement del vulcanisme d'aquesta zona, potenciant els estudis geològics i geofísics que calguin per poder disposar de la informació bàsica imprescindible i poder abordar el tema de l'avaluació de la perillositat i del risc amb les mínimes garanties possibles.

A continuació, presentem l'aplicació dels criteris d'avaluació de la perillositat i risc volcànic a Catalunya, seguint el model emprat pel Servei Geològic dels Estats Units (USGS) per determinar el grau d'amenaça dels seus volcans, basats en les indicacions de la IAVCEI. La primera taula descriu els factors de perillositat, és a dir els lligats estrictament al fenomen geològic i vulcanològic.



Atès que desconeixem alguna de les informacions necessàries, s'ha optat per introduir dues columnes de valors, una (esquerra) amb el que creiem que és amb la informació disponible, i una altra (dreta) amb el mínim rigorosament cert que coneixem amb les dades que tenim ('0' és no i '1' és sí).

OLOT: Factors de perillositat	Valors	
		Mínim
Tipus de volcà	0	0
Índex màxim d'explosivitat volcànica	0	0
Activitat explosiva en els darrers 5.000 anys	0	0
Activitat explosiva més gran en els darrers 5.000 anys	0	0
Recurrència eruptiva	1	1
Fluxos piroclàstics holocens	0	0
Lahars holocens	1	0
Corrents de lava holocens	1	1
Potencial d'explosions hidrotermals	1	1
Tsunamis holocens	0	0
Potencial per esclavissades	0	0
Origen primari de lahars	0	0
Activitat sísmica observada	1	1
Deformació observada	0	0
Activitat fumaroliana	0	0
Total factors de perillositat	5	4

A la taula següent s'indiquen els factors de risc, és a dir, els factors condicionats per les característiques de l'àrea que es pot veure afectada pel fenomen que es considera i per la vulnerabilitat dels elements que conté envers aquest perill. En aquest cas, també s'introdueixen dues columnes de dades amb el mateix significat que a la taula anterior. Aquí alguns valors s'expressen com a valors logarítmics, ja que en comptes de dir solament sí o no, es vol indicar l'ordre de magnitud. Al final es multiplica la suma de les dues taules entre elles i s'obté el valor del risc de la zona considerada. En el nostre cas s'obté un risc moderat a les dues columnes (opcions) considerades, i s'indiquen les mesures de protecció i vigilància que caldria prendre en aquest cas.



OLOT: Factors d'exposició	Valor	
		Mínim
Log <sub>10</sub> de l'índex de població (VPI) a 30 km	4	4
Log <sub>10</sub> de la població corrent avall del volcà	3	2
Víctimes històriques	0	0
Evacuacions històriques	1	0
Exposició d'aviació local	1	1
Exposició d'aviació regional	4	4
Infraestructura energètica	1	0
Infraestructura de transport	1	1
Desenvolupament més gran o àrees sensibles	1	1
Illa volcànica	0	0
<b>Total factors d'exposició</b>	<b>16</b>	<b>13</b>
<b>Factors de perillositat x factors d'exposició = rànkung de risc relatiu</b>	<b>80</b>	<b>52</b>

Rànking de risc

Molt alt 324 - 123  
 Alt 113 - 64  
 Moderat 63 - 30  
 Baix 30 - 6  
 Molt baix 6 - 0

### 3. Estat actual del coneixement científic i accions en gestió de risc

El coneixement que hom té del vulcanisme recent a Catalunya, i en concret del de la zona de la Garrotxa, és encara poc detallat, almenys pel que fa a la determinació precisa de l'edat del vulcanisme, a la caracterització de l'activitat eruptiva i a l'avaluació de la perillositat i del risc associat.

Aquest fet és degut en gran part perquè tradicionalment se l'ha considerat com un vulcanisme totalment extingit i improbable de tornar a ser actiu. Per aquesta raó, la major part dels estudis que existeixen sobre aquest episodi geològic estan enfocats cap a la descripció del paisatge volcànic i la petrologia, i en aquest camp sí que es pot dir que hi ha una bona caracterització relativa del magmatisme i de les implicacions geodinàmiques.

Un altre aspecte desconegut però igualment fonamental per avaluar la perillositat és la relació entre tectònica local i activitat eruptiva, ja que aquest és un dels criteris bàsics per determinar la susceptibilitat volcànica (probabilitat espacial d'obertura de nous centres emissors). Finalment, caldria acotar al màxim l'edat del vulcanisme i de les seves erupcions per tal d'establir els períodes de retorn i les probabilitats temporals de noves erupcions.

Així, doncs, de tota la informació de què es disposa actualment sobre el vulcanisme a Catalunya, cap està orientada específicament a l'avaluació de la perillositat o del risc. Tot i això, part d'aquesta informació, que s'indica a continuació, es pot utilitzar com a base per iniciar aquest tipus d'estudis, ja que ofereix un fonament científic per establir les característiques i la distribució del vulcanisme a Catalunya.

Pel que fa a les accions en gestió de risc volcànic a Catalunya,, cal dir que aquest informe és la primera acció que es realitza , ja que fins ara, com ja s'ha dit,, no hi ha hagut la percepció d'una possible existència d'aquest tipus de risc al nostre país. De la mateixa manera, cap zona volcànica europea que pertany a aquest episodi geològic i que, per tant, té els mateixos condicionants genètics i evolutius, tampoc no ha realitzat cap acció en aquest sentit.



## 4. Valoració de l'estat actual del coneixement i de la gestió del risc

Com ja hem assenyalat en els apartats anteriors, Catalunya no disposa de cap estudi específicament adreçat a valorar el possible risc volcànic i, per tant, tampoc no disposa ni d'accions a realitzar ni de plans mitigadors. La limitació principal prové de la mateixa inexperiència dels tècnics i gestors de l'Administració en aquest camp, perquè mai no s'ha considerat com un problema potencial. Tot i així, el desenvolupament socioeconòmic de la regió fa que la planificació territorial i l'evolució de les infraestructures hagin de tenir en consideració també aquest risc possible.

L'existència d'un parc natural a la zona on es concentra la més gran activitat volcànica recent podria ajudar a coordinar un estudi sobre l'avaluació de risc a la zona, en el qual haurien de col·laborar les institucions amb responsabilitat en aquest tema o/i amb una base de coneixement per garantir els resultats.

## 5. Recomanacions per a una gestió sostenible del risc

### 5.1. Vigilància dels volcans

El fet que la probabilitat d'erupcions volcàniques a Catalunya sigui baixa, que no menyspreable, aconsella de desenvolupar un mínim programa de vigilància vulcanològica. La vigilància dels volcans es basa en l'aplicació de mètodes geofísics i geoquímics, que controlen variacions de paràmetres fisicoquímics indicatius de l'estat d'activitat o d'equilibri del volcà. La reactivació de l'activitat volcànica està lligada al moviment de magma i fluids associats a l'interior de l'escorça terrestre, de manera que es produiran canvis tant en l'estructura (deformació, canvis en el camp gravitatiu o magnètic, temperatura, etc.) com en la composició dels fluids que podran sortir per fractures i fissures, que es podran detectar amb l'ús d'aparells adequats.

La vigilància geofísica inclou l'aplicació de mètodes sobre el terreny i remots (per satèl·lit) dissenyats per detectar qualsevol canvi en les principals propietats físiques del volcà i del seu voltant. Així, hi ha mètodes com els sistemes d'anivellació tradicionals o amb làser, el GPS, la interferometria de radar, etc. per mesurar deformacions del terreny provocades per un augment de pressió de la cambra magmàtica.

També hi ha detectors de l'activitat sísmica (sismògrafs) que es pot desencadenar quan s'inicia el moviment de magma a l'interior del volcà, i instruments que permeten de descobrir variacions en els camps gravimètric i magnètic associades al moviment de magma. Tots aquests canvis en l'estat d'equilibri (normal) del volcà són indicadors (precursors) geofísics de l'activitat volcànica. També és important el control dels paràmetres geoquímics per poder notar qualsevol variació en l'estat del volcà, com canvis en la composició dels gasos que s'escapen pels fumerols o a través del sòl en les zones properes al volcà. Una bona combinació de mètodes de vigilància és la millor estratègia per detectar amb precisió l'inici d'un nou procés eruptiu.

### 5.2. Predicció i prevenció del risc volcànic

Per la mateixa raó, cal tenir un programa d'avaluació de la perillositat i del risc volcànics. En l'avaluació del risc d'una àrea volcànica activa, i d'acord amb la definició de risc, cal tenir en compte





una sèrie d'aspectes, com per exemple la vulnerabilitat de la zona respecte a un perill concret, la probabilitat que un determinat fenomen es pugui produir, i les característiques d'aquest fenomen.

La vulnerabilitat depèn directament del tipus de fenomen que considerem, (no és el mateix una lava que un corrent piroclàstic) i de les característiques socioeconòmiques i d'infraestructures de l'entorn. Cal conèixer les característiques geogràfiques i morfològiques de la zona (topografia), la qualitat i distribució de les construccions, la distribució de la xarxa viària (cal tenir vies de sortida en cas de sinistre), l'existència de plans d'emergència, etc. Aquesta és una informació que han d'aportar les administracions centrals i locals. Quan l'avaluació del risc és a llarg termini, cal també tenir en compte l'existència de plans de desenvolupament (urbanístics, industrials) que s'han de dur a terme en un futur més o menys llunyà.

Conèixer la perillositat i probabilitat d'un fenomen volcànic implica poder caracteritzar físicament el procés i vigilar-lo. L'estudi de les erupcions volcàniques passades ens ofereix una informació molt valuosa sobre la dinàmica del volcà, els seus productes i la possible ciclicitat. A més, ens facilita les pautes per poder elaborar models predictius del comportament futur. En l'estudi del comportament eruptiu d'un volcà cal combinar estudis de camp i de laboratori sobre les erupcions passades, l'elaboració de models de laboratori que simulin determinats processos i, també, l'elaboració de sofisticats models matemàtics que ajudin a entendre la dinàmica dels processos i el paràmetres físics que els controlen. Tota aquesta informació permet de conèixer el comportament del volcà en el passat i quin pot ser el seu comportament en el futur.

L'experiència adquirida en la reconstrucció d'erupcions volcàniques històriques ens mostra que els volcans i les àrees volcàniques, i en especial els més grans i complexos, poden estar inactius durant centenars i milers d'anys abans de tornar a fer erupció. Tot i així, la reactivació es pot produir en un període de temps molt curt, de pocs mesos a pocs anys, la qual cosa demostra que cal disposar d'observatoris vulcanològics ben equipats per tal d'alertar adequadament i amb promptitud en cas de detectar senyals de nova activitat. Canvis en la deformació del volcà, en la temperatura, la sismicitat, la composició dels gasos... oferiran informació sobre moviments ocults del magma i fluids associats si podem disposar d'un conjunt de tècniques de vigilància adequades.

Un bon coneixement dels processos volcànics és molt important per poder assegurar la interpretació correcta dels precursors eruptius. No solament cal la prevenció de l'activitat volcànica per detectar si un volcà en particular s'ha tornat actiu, sinó també per conèixer si la renovació d'activitat culminarà en una erupció i com podrà ser en el cas que es produeixi. La reducció dels perills volcànics només serà efectiva si els sistemes de monitorització adequats estan disponibles i funcionant regularment, i si els efectes d'una erupció futura es poden anticipar amb precisió. És clar que l'activitat volcànica no es pot aturar, però sí que es poden evitar els efectes i reduir els danys potencials si es pot predir amb prou anticipació.

En el cas del volcà, l'avaluació del risc depèn molt de les condicions geogràfiques i socioeconòmiques de la zona concreta, però també de la seva naturalesa. És important remarcar també que en funció d'aquests aspectes els processos volcànics poden, moltes vegades, desencadenar altres processos naturals catastròfics, com terratrèmols, tsunamis, esllavissaments, incendis, pluges torrencials..., que, juntament amb els seus propis efectes, incrementen el risc de manera considerable. Aquesta possible concatenació de processos catastròfics s'ha de tenir sempre present per efectuar l'avaluació del risc d'una àrea volcànica determinada, a més d'avaluar el risc volcànic per ell mateix.



### 5.3. Recomanacions concretes

En el cas concret del risc volcànic a Catalunya s'ha de començar de zero, ja que fins ara no s'ha considerat com un risc possible. El fet que la perillositat del fenomen volcànic a Catalunya sigui relativament baixa i que la periodicitat del vulcanisme sigui de diversos milers d'anys, no permet de dir que geològicament la probabilitat de recurrència del vulcanisme al nostre país sigui zero. Encara que aquesta probabilitat és baixa, la vulnerabilitat del nostre país envers aquest fenomen és molt alta, cosa que fa que el risc no sigui insignificant. Per tant, creiem que aquest risc cal tenir-lo en compte a la planificació territorial de Catalunya, sobretot pel que fa a la planificació de grans infraestructures a zones properes als focus més recents de l'activitat volcànica.

Per tal de poder avaluar correctament la perillositat volcànica i fer una estimació del risc que comporta per a Catalunya, i en un intent de completar els aspectes deficitaris identificats a l'apartat 3 d'aquest informe, recomanem d'emprendre una sèrie d'accions destinades a completar el coneixement geològic que es té d'aquest fenomen i a proveir de la informació necessària per vigilar-lo i gestionar-lo adequadament.

Aquestes accions, indicades per ordre de prioritat, són:

#### 5.3.1. Millora del coneixement vulcanològic

Dins d'aquesta previsió d'activitats per poder disposar del coneixement bàsic necessari per avaluar la perillositat i el risc volcànic a la zona, cal incloure també un conjunt de tasques més geològiques i vulcanològiques necessàries i urgents, igualment.

##### 5.3.1.1. Datació de les erupcions recents

Un aspecte clau en la comprensió de l'evolució vulcanològica de la zona i de la possible ciclicitat eruptiva és el coneixement de l'edat dels episodis eruptius que s'hi han produït. Aquest és un aspecte difícil d'afrontar en una àrea volcànica de naturalesa basàltica com la que tenim i en què les erupcions són prou recents com per estar en el límit de confiança dels mètodes de datació actuals.

De fet, en projectes anteriors, s'ha intentat la datació de diverses erupcions de la zona amb resultats poc precisos o del tot inservibles. En aquest cas, es proposa d'utilitzar el mètode Ar-Ar, que es considera el millor per caracteritzar l'edat de roques recents.

##### 5.3.1.2. Caracterització dels mecanismes eruptius

Aquest és un aspecte en què ja s'ha treballat i del qual es disposa d'alguna informació que ja ofereix una idea general del tipus d'activitat eruptiva de la zona.

Aquesta primera informació és suficient per donar a conèixer l'existència d'una àmplia varietat de processos eruptius de tipus estrombolià i freatomagmàtic. Tot i això, seria recomanable d'aprofundir més en la determinació dels paràmetres físics que han caracteritzat aquestes



erupcions, tant pel que fa a la física dels magmes com pel que fa a la física de la fragmentació, l'erupció i la sedimentació sobre la superfície.

#### **5.3.1.3. Relació entre tectònica i vulcanisme**

Aquest és un aspecte també important a considerar, ja que defineix la probabilitat de cada punt de l'àrea que s'estudia de ser centre de noves erupcions. Aquest aspecte deriva de combinar l'aspecte anterior amb l'apartat de geofísica estructural.

#### **5.3.1.3. Determinació de les característiques dels aqüífers de la zona**

El fet que moltes de les erupcions observades siguin de naturalesa freatomagmàtica implica que els aqüífers de la zona tinguin un paper clau en la dinàmica eruptiva. Per aquesta raó cal caracteritzar-los, per conèixer-ne la distribució, la profunditat i els paràmetres físics.

#### **5.3.1.4. Revisió de la cartografia geològica de la zona**

La cartografia geològica de la zona ha estat revisada recentment per l'IGC, però se suggereix una altra revisió per poder tenir una informació més completa sobre els mecanismes eruptius i les litologies volcàniques.

#### **5.3.1.5. Elaboració d'una base de dades vulcanològica**

És absolutament imprescindible que tota la informació anterior s'introdueixi en una base de dades dissenyada específicament per rebre i tractar informació vulcanològica, amb la finalitat d'elaborar posteriorment mapes de susceptibilitat, perillositat, vulnerabilitat i risc volcànic, i de qualsevol altre element vulcanològic i geològic que sigui convenient.

### **5.3.2. Pla de vigilància volcànica o monitorització geofísica**

#### **5.3.2.1. Monitorització sísmica**

Actualment es disposa d'una estació sísmica de curt període a la zona de la Garrotxa, integrada a la xarxa de vigilància sísmica de l'Institut Geològic de Catalunya (IGC). El que es proposa és de completar aquesta mínima monitorització sísmica amb la instal·lació d'una altra estació d'un component de curt període, i d'una de tres components també de curt període.

#### **5.3.2.2. Monitorització gravimètrica**

Es recomana també d'instal·lar un gravímetre en registre continu per un període de temps determinat per tal d'observar de manera continuada possibles variacions del camp gravitatori a la zona de la Garrotxa.



### 5.3.2.3. Monitorització magnètica

Es recomana també la possibilitat d'instal·lar magnetòmetres de registre continu per un període de temps determinat.

## 5.3.3. Geofísica estructural

Per tal de conèixer millor l'estructura geològica en profunditat de la zona volcànica de la Garrotxa, en particular la distribució de les grans unitats litològiques i dels principals trets del sistema de fracturació, es proposen tres actuacions:

### 5.3.3.1. Perfils sísmics

Amb un disseny que cobreixi la major part de l'àrea d'estudi i creuant les principals alineacions tectòniques, seria convenient realitzar dos o tres perfils sísmics amb l'equip de sísmica de l'IGC, que permet d'obtenir una resolució de fins a cinc quilòmetres de fondària.

### 5.3.3.2. Gravimetria estructural

Com a complement a l'activitat anterior es proposa de realitzar un estudi gravimètric detallat de la zona, també amb la finalitat de detectar grans unitats litològiques i la distribució de les falles principals.

### 5.3.3.3. Revisió de les dades del vol aeromagnètic de 1989-1990

La revisió de les dades d'aquest vol aeromagnètic permetria de reinterpretar alguns dels aspectes estructurals de la zona i complementar els resultats dels estudis anteriors.

### 5.3.3.4. Campanya, o campanyes, de control d'emissió de radó per a la detecció de fractures obertes

Aquesta activitat permetria de completar les anteriors en la detecció i delimitació dels principals sistemes de fracturació de la zona.

## 6. Consideracions finals

La Directriu bàsica de planificació de protecció civil davant el risc volcànic (21 de febrer de 1996) només estableix com a obligatorietat la planificació del risc volcànic a la comunitat autònoma de Canàries.

Aquest fet és un error greu derivat del desconeixement de la realitat del fenomen vulcanològic, i que en el cas que no se solventés podria tenir unes conseqüències molt negatives per a Catalunya.

Per tant, recomanem l'establiment d'un pla de prevenció del risc volcànic a Catalunya. Aquest pla



podria ser molt simple, i hauria d'incorporar: l'avaluació de la perillositat i vulnerabilitat volcànica referida fonamentalment a grans infraestructures (aeroports, línies energètiques, línies de transport, hospitals, etc.); un mínim programa de monitorització geofísica; el reforç del coneixement bàsic del vulcanisme (sobretot la dinàmica eruptiva i l'edat del vulcanisme); i també un pla d'emergència per fer front a una crisi hipotètica.

Les possibles mesures de preparació que haurien d'estar previstes en cas d'alguna erupció passen, d'entrada, a més del pla de prevenció esmentat al punt anterior, per una ordenació territorial correcta que tingui en compte la possibilitat d'aquest fenomen, un programa d'educació per conèixer el fenomen, i els perills potencials i les mesures de prevenció i d'emergència que l'Administració ha de desenvolupar per minimitzar el risc.