

1.- O ENFOQUE MEDIOAMBIENTAL DOS SUBSISTEMAS DA TERRA SÓLIDA

1.1 O estudo de casos relativos a volcáns e riscos volcánicos

- *A Soufrière* (Guadalupe), 1976. Durante todo 1975 houbo tremores na zona do volcán. O 8 de xullo de 1976 produciuse unha grande explosión, debida á vaporización da capa freática. 25.000 poboadores evacuaron por iniciativa propia os arredores de La Soufrière, pero os científicos non se puxeron de acordo. O xeoquímico Claude Allègre afirmou que o volcán estaba a expulsar magma novo; o vulcanólogo Haroun Tazieff negouno, alegando que se trataba de fragmentos da cheminea retomados polas explosións de gas. Como os tremores proseguiron, agora acompañados de caída de cinzas, o 15 de agosto o gobernador, seguindo o parecer de Allègre, deu a orde de evacuar, que afectou a 76.000 persoas. Pero pasaron tres meses e a prevista erupción non se produciu. Os escolares non puideron empezar o curso, ante o cal os evacuados amotináronse e, o 18 de novembro, volveron ás súas casas. Allègre nunca perdoou a Tazieff, e montou unha conspiración contra el, alentando varios colegas a que escribisen á prensa mensaxes despectivas cara a "un aventureiro superado pola Ciencia moderna". Le Monde fíxose cunha destas cartas e publicouna. Tazieff demandou a Allègre, que foi condenado a unha indemnización de 1 franco.
- *Campi Flegrei*, Nápoles, 1982-84. Dende o verán de 1982 producíronse tremores e elevación (ata 160 cm) do chan. En 1538, unha elevación semellante foi seguida dunha erupción. A composición dos gases cambiou, con aumento do CH₄. En outubro de 1983 houbo 250 tremores en 3 horas; non obstante, a profundidade dos focos (3-4 km) non

diminuíu. Evacuáronse 40.000 habitantes do centro de Pozzuoli porque as súas casas eran inseguras, pero o vulcanólogo Franco Barberi resistiu as presións para unha evacuación total da área, que tivese afectado a máis de 400.000 persoas. En decembro de 1984 o chan volveu baixar, e a sismicidade cesou, sen que a temida erupción chegase a producirse.

- *Nevado do Ruiz*, Colombia. Dende setembro de 1985 sentíronse tremores na área do volcán. O 13 de novembro tivo lugar unha pequena erupción, con emisión de piroclastos que fundiu o 10% do glaciar que coroaba o volcán e produciu catro lahares, que se encaixaron e reactivaron nos barrancos. En Armeiro, a 50 km, morreron 20.000 dos 29.000 habitantes, máis outros 3.000 noutros pobos. O mapa de risco distribuírase un mes antes, pero o congreso colombiano criticou os científicos por alarmistas. A tormenta dificultou as comunicacións. O alcalde estaba a dicir por raio "eu non creo que aquí haxa moito risco" cando a corrente o levou. Hoxe hai na zona estremeira ao volcán 100.000 persoas en situación de alto risco.
- *Lume de Colima*, México. O volcán produciu lahares en 1999 e 2005. Os campesiños foron evacuados repetidamente, e actualmente desconfían dos vulcanólogos.
- Mayon, Filipinas. O espectacular lahar de 1984 non produciu vítimas (houbo 73.000 evacuados); pero outro en 1993 sepultou 77 campesiños. En xullo de 2006 houbo unha erupción lávica tranquila, sen consecuencias; pero en novembro, o tifón Durian remobilizou os materiais recentes e converteunos nun lahar que causou máis de 1.300 vítimas

1.2 Estudo de casos relativos a sismos e a riscos sísmicos

Consideremos agora o risco sísmico. A raíz da catástrofe desencadeada polo sismo de Tohoku-Oki (11/3/11), os sismólogos de todo o mundo tiveron que revisar as súas hipóteses, coas que se construíran mapas de risco que crían fiables. Por exemplo, pensábase que os megasismos (Mw 9) só podían darse na subducción de litosfera oceánica nova, xa que a máis antiga, por ser máis

fría e densa, descendería con facilidade. A realidade encargouse de demostrar o contrario, porque o sismo xaponés se produciu na subducción de litosfera xurásica, a máis antiga (>140 Martes) existente.

Unha aclaración previa sobre escalas sísmicas. O momento sísmico (1979) é unha medida da enerxía liberada no sismo. Como a de Richter (1935), a súa escala é logarítmica de base 30; a diferenza dela, non se satura para os megasismos ($MW > 8$); para iso analízanse ondas de período moi longo (>200 s), coas que se calculan o salto da falla e a superficie movida (que se obtén pola distribución das réplicas). Para calcular como aumentan: 30^D (sendo a diferenza entre magnitudes); pág. ej, $D 9,6 - 9,0 = 300,6 = 7,7$.

A conca indopacífica foi o escenario dos maiores terremotos da historia recente: é evidente que a subducción é con moito a situación xeolóxica máis perigosa, aínda que as grandes fallas transcorrentes tampouco sexan amigables. A repetición recente de sismos catastróficos levou a que os propios científicos se pregunten se hai algunha razón para un período especialmente sismogénico. Aínda que unha representación gráfica da enerxía acumulada podería indicar que si, a idea non resiste unha análise estatística: nunha simulación numérica que tivo en conta os sismos dos últimos 100 anos, a probabilidade de que a pauta non sexa aleatoria foi do 50%. En cambio, un grupo italiano creu encontrar unha pauta repetida para algunha falla no Apeninos.

Vexamos a continuación datos dalgúns sismos significativos.

- *Lisboa*, 1/11/1755. Un terremoto submarino de magnitude $\sim 8,7$ (Richter) destrúe a cidade e provoca un tsunami: 100.000 mortos (en Marrocos, 10.000; en Huelva, 61 polo sismo e 1.214 polo tsunami). A catástrofe conmociona a cultura europea: Voltaire e Rousseau polemizan sobre se é ou non unha proba da inexistencia de Deus, mentres que Kant propón a primeira teoría racional para explicar os sismos: o afundimento de grandes cavernas cheas de gases. Hoxe, os sismólogos seguen discutindo a situación do epicentro.

- *Chile*, 1960, MW 9,5-9,6. O maior terremoto rexistrado dende que a sismoloxía existe como ciencia. Unhas 5.000 vítimas, incluíndo os 200 mortos causados en Hawai e Xapón por un tsunami que varreu o Pacífico. O máis estraño: foi precedido por un Mw 8,1. E saltaron 1.000 km de falla.
- -93 de cada 100 edificios de *Tangshan* (China) derrubáronse o 28/7/76 a causa das vibracións producidas por un terremoto de 7,5 -7,8 Richter. A cidade, de 1 millón de habitantes, estaba atravesada por unha falla transcorrente dextral e ademais estaba construída sobre sedimentos fluviaís; a pesar diso, os sismólogos considerábana segura (¿?). Hoxe, Tangshan foi reconstruída; pero agora está poboada por 7 millóns de persoas.
- O sismo máis internacional (con vítimas en 11 países, como as 31.000 de Sri Lanka, a 1.500 km, e as >100 en Somalia, a 5.000 km do foco) produciuse o 25/12/04, cando 1.200 km do fondo do Índico se introduciron 15 m baixo Sumatra. Case todas as 230.000 vítimas produciunas o tsunami. Os sismólogos tiveron problemas en calcular a enerxía do terremoto: de entrada pensaron que como moito sería un Mw 8 (59 veces menos enerxía que un 9,2), que non tivese provocado un megatsunami. O Ministro de Ciencia e Tecnoloxía da India dixo: "Non se fan "enormes investimentos para previr un risco que acontece unha vez nun século".
- *L'Aquila*, Italia. O 6/4/09, un lixeiro terremoto (Mw 6,3) causou 308 vítimas e destruíu boa parte deste pobo do centro de Italia. As fallas dividen a área entre unha zona occidental en extensión, e outra oriental que se move cara ao Leste. O movemento diferencial exprésase mediante fallas sobre todo directas, pero tamén de rumbo. Esta diferenza xera unha importante tensión na litosfera do centro de Italia. O sismo non tería tido tanta transcendencia de non ser porque, unha semana antes, un comité científico tranquilizara a poboación, sobre a base de que os continuos tremores estaban a liberar a enerxía

acumulada. Os científicos están a ser xulgados baixo a acusación de homicidio involuntario.

- O límite entre as placas Norteamericana e Caribe está compartido por varias fallas L-W que cruzan a *illa Hispaniola*. Todas (especialmente a de Enriquillo, que pasa moi preto de Porto Príncipe) foron moi activas no século XVIII, pero en cambio estaban silenciosas dende metade do XX. O 12 de xaneiro de 2010, un sismo de enerxía intermedia (MW 7, ou sexa 1.777 veces menos intenso que o de Sumatra) causou a morte a 316.000 persoas. O problema engadido é que a falla Enriquillo non mostra sinais de movemento recente: quizais hai outra falla paralela. No que coinciden os sismólogos é que o sismo non liberou toda a tensión, polo que hai que esperar outros.
- -O *sismo de Tohoku-Okii* (Xapón) do 11/3/11 aconteceu nunha zona de risco sísmico teoricamente baixo pero de dinámica complexa, onde a Placa Pacífica subduce (cara ao Leste) baixo a de Okhotsk, que se move cara ao Sur. A subducción é de ángulo moi baixo, polo que o foco foi moi superficial (24 km), provocando un gran tsunami. O tremor principal foi precedido por outro menor, de Mw 4,9, que serviu como detonante. Nalgúns lugares a falla saltou máis de 50 m. A sismicidade na foxa do Xapón cambia de carácter á altura de Tokyo: ao norte é esencialmente compresiva, mentres que cara ao sur alternan a compresión e o deslizamento lateral. Neste sismo a ruptura puido darse entre unha zona atascada (aspereza) causada polo relevo do plano de subducción, e outra lisa, que se descolgou.

Todas as predicións fallaron. O norte da illa de Honshu considerábase, tomando como base os rexistros históricos, unha zona de risco moderado. Non só fallou a predición de longo prazo, senón tamén a de curto: baseándose nos primeiros sinais deseñouse un mapa de risco que quedou absolutamente desbordado.

Sobre este problema de predición apuntou as dúas fórmulas que temos para abordar estes riscos sísmicos, que son incorporar sensores a fallas ou ben

seguir as series históricas. Sobre a incorporación de sensores, sinalou que solo está ao alcance dos países máis ricos. Puxo o exemplo da falla de San Andrés, pero fixo referencia a que solo valerán se a falla avisa, e aínda así reflexionou sobre as dificultades que nese caso presentaría a evacuación da Baía de San Francisco. Mencionou tamén o elevado risco da zona, dando como moi probable unha activación nos próximos 30 anos da falla na importante lagoa sísmica que hai ao lado desa baía.

Sobre os sistemas de detección de tsunamis, fixo referencia ao importante sistema de detección que se implantou no océano Índico que está cheo de boias. Mantivo que aínda así non había garantías de que dera tempo a reaccionar. Reflexionou sobre a situación de zonas moi sensibles situadas en rexións con risco sísmico, como é o caso de Bangladesh onde a gran parte do país se atopa de 3 a 5 metros sobre o nivel do mar, o solo na capital viven once millóns de persoas. Apuntou tamén outras zonas máis próximas a nós con un risco importante como Istambul. Fixo mención tamén ao risco de tsunamis en Turquía e Grecia, en base aos datos históricos. En relación ao risco neste tipo de fenómeno extremo, sinalou tamén o risco que existe en Huelva, onde se rexistraron 7 nos últimos 5.000 anos.