

CIENCIAS DA TERRA PARA O MUNDO CONTEMPORÁNEO DENDE CLIMÁNTICA

Texto sobre o desenvolvemento do contido dos tres módulos

FRANCISCO ANGUIA VIRELLA

Guión

1.- O ENFOQUE MEDIOAMBIENTAL DOS SUBSISTEMAS DA TERRA SÓLIDA	2
1.1 O vulcanismo e os seus riscos: estudo de casos	2
1.2 Os sismos e os seus riscos: estudo de casos	4
1.3 Métodos e técnicas para abordar a previsión sísmica: estudo de casos de ameaza sísmica	7
2.- O ENFOQUE MEDIOAMBIENTAL DOS SUBSISTEMAS DA TERRA FLUIDA	9
2.1 A contaminación atmosférica	10
2.2 Contaminación e impactos sobre a hidrosfera.....	12
2.3 Evidencias e impactos do cambio climático nos subsistemas fluidos	14
3.- OS CONDICIONANTES XEOLÓXICOS DA BIOSFERA DENDE A ORIXE DA VIDA ATA A SOCIEDADE DO CAMBIO CLIMÁTICO	17
3.1 Condicionantes da vida no Universo	17
3.2 Información do rexistro xeolóxico sobre a vida na Terra.....	20
3.3 O <i>Homo sapiens</i> , e a súa relación cos recursos xeolóxicos	20
3.4 Consecuencias para a Biosfera do uso dos recursos xeolóxicos na nosa época e as solucións que lle estamos a dar	23
3.5 Como aparecerá a nosa especie no rexistro xeolóxico?.....	24

1.- O ENFOQUE MEDIOAMBIENTAL DOS SUBSISTEMAS DA TERRA SÓLIDA

O fío condutor deste tema é a enerxía da Terra. O planeta non é unha cebola que imos estudando capa a capa, senón un sistema dinámico cuxos fluxos enerxéticos conectan todos os seus subsistemas. Polo tanto, as ilustracións clave dos libros de texto deberían transmitir esa dinámica, moito máis importante que a estratificación en capas. A investigación da Terra profunda comparouse ás exploracións xeográficas do Renacemento.

En superficie, esa dinámica profunda reflíctese basicamente en dous procesos, vulcanismo e sismicidade, que levan aparelados importantes riscos, para persoas e bens. Isto convérteos en importantes interseccións entre Ciencia e Sociedade, e por iso en fenómenos perfectos para un enfoque das materias CTMA e CCMC baseado no estudo de casos.

1.1 O vulcanismo e os seus riscos: estudo de casos

Unha aclaración previa referida aos volcáns, e que ten importancia ambiental: a influencia dos volcáns sobre o clima é ambivalente. Cando nunha erupción ultraexplosiva a proporción de aerosois é importante (como o foi por exemplo no caso do Pinatubo en 1991), pódense inxectar na estratosfera cantidades importantes de partículas que bloqueen a radiación solar e polo tanto arrefrían a Terra; pero este é un efecto de prazo curto, uns poucos anos como máximo. O efecto contrario, quentamento causado pola emisión de gases de efecto invernadoiro, é moito máis significativo a escala xeolóxica. En concreto, a hipótese básica para explicar o clima de invernadoiro do Cretácico é a erupción dunha masa enorme de rochas volcánicas no fondo do Pacífico acompañada de cantidades tamén masivas de CO₂. Non se coñece un sistema máis eficaz de quentar a atmosfera dun planeta que extraer do seu interior, vía volcáns, gases de efecto climático.

A continuación revisaremos varios exemplos paradigmáticos da avaliación de riscos de orixe profunda, empezando polos volcánicos.

- *A Soufrière* (Guadalupe), 1976. Durante todo 1975 hubo 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 Os sismos e os riscos sísmicos: estudo de casos

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-Oki* (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.

1.3 Métodos e técnicas para abordar a previsión sísmica: estudos de casos de ameaza sísmica

Como abordar a previsión sísmica? Con instrumentos, ou máis ben con estatísticas? Vexamos casos de ameazas sísmicas.

- - Quizais a historia de *Tohoku-Oki* non rematase aínda. A zona movida deixou un inquietante intervalo baleiro. O buque oceanográfico Chikyu vai perforar o fondo oceánico preto do epicentro, para tratar de reconstruír este. O problema da sismicidade en zonas de subducción é que as fallas perigosas son practicamente imposibles de observar. Por iso proxéctanse equipos de sensores ancorados no fondo, que servirían de estacións de recollida de datos, de deformación por exemplo. Pero unha simple medición de deformación no fondo pode custar medio millón de dólares.
- - Problemas para *Bangla Desh* (por se tiña poucos): a ruptura de 2004 en Sumatra trasladou tensión a un sector do bordo de placa onde non hai rexistrados sismos históricos, aínda que toda a zona é moi sismogénica. Hai varias lagoas sísmicas, as máis temibles xunto ao delta do Irrawaddy e fronte ao do Ganxes-Brahmaputra. E a capital, Daca, está construída sobre os limos deste último delta, un material perfecto para licuarse ante as vibracións.
- - A falla *Norantolia* ten un rexistro ameazador de migración de focos sísmicos cara ao oeste. A serie máis completa é a de 1939-1942-1943-1944-1957-1967. A moderna é moito máis austera, 1992-1999; pero Izmit está ás portas de Istanbul.
- - O *risco sísmico en EUA* Ademais da vixiada zona californiana (onde San Andreas saltará cun 100% de garantías en 30 anos), temos a zona de New Madrid, en Mississippi, onde houbo varios sismos (Richter M~7) en 1811 e 1812; en Charleston, outro 7 en 1886; ambos os dous, en posibles antigos rifts reactivados.
- - O Mediterráneo é unha zona de alto risco de tsunamis. Turquía, p. ex., foi afectada por máis de 90 tsunamis nos últimos 3.000 anos. E no Golfo de Cádiz houbo cinco tsunamis nos últimos 7.000 anos.

Rematamos cun dato social. Segundo unha análise publicada en xaneiro de 2011 na revista *Nature*, o 83% das mortes por colapso de edificios acaecidos

nos últimos 30 anos sucedeu en países con altos niveis de corrupción. Esa é a causa máis probable de que o número de mortes por derruba de edificios, unhas 60.000 ao ano, seguisse aumentando nas últimas décadas a pesar dos avances en técnicas antisísmicas de construción. Un exemplo triste: no sismo de Cachemira de outubro de 2005 derrubáronse 7.600 escolas. Case todas foran construídas nos anteriores 20 anos.

2.- O ENFOQUE MEDIOAMBIENTAL DOS SUBSISTEMAS DA TERRA FLUIDA

A historia comeza na orixe do Sistema Solar. Situada dentro do que os científicos planetarios chaman liña de neve (a zona demasiado quente para que nela se reteñan volátiles), a Terra formouse inicialmente desprovista deles; pero nas etapas finais da xénese planetaria, asteroides da parte afastada do cinto encargáronse de proporcionarllos: algúns deles conteñen ata 20% de auga, cuxa composición isotópica é idéntica á dos océanos da Terra. Tamén transportan aminoácidos racémicos (ou sexa, necesariamente extraterrestres).

A auga e o resto dos volátiles mesturáronse cos outros materiais de construción achegados polos planetesimais. A calor dos impactos fundiu o planeta, e deste magma universal empezaron a liberarse volátiles, ata que a superficie estivo abondo fría para que a auga permanecese líquida. Este proceso non foi longo, porque encontramos pegadas dos primeiros océanos hai polo menos 4.200 millóns de anos. Unha vez estabilizados estes, a calor interna puido canalizarse a través de sistemas hidrotermais, dos que as actuais chemineas das dorsais oceánicas serían un paralelo en pequena escala.

Estes océanos hidrotermais son agora os grandes axentes do clima, suxeitos a un sistema global de correntes que redistribúen a calor solar. Pero a civilización tecnolóxica converteunos tamén en vertedoiros: nas latitudes medias localizáronse cinco zonas (áreas de calma definidas por correntes circulares; entre elas o famoso Mar dos Argazos), con enormes acumulacións de lixo: na do Pacífico norte contáronse 334.271 pezas de plástico por quilómetro

cadrado, dando unha proporción plástico/plancto de 6:1. As partículas de polipropileno poden absorber contaminantes, o que incrementaría o risco para a fauna mariña. E en último termo ninguén sabe se estas partículas rematan nas praias ou se afunden, contaminando así o mar profundo.

Seguindo o mesmo argumento, o fío condutor deste módulo é a suma de problemas ambientais que ten formulada a sociedade actual. Como esquema de partida utilizo un gráfico publicado por un grupo internacional de investigadores en 2009 na revista *Nature*, no que se cuantificaba o grao en que estamos a violar as marxes de seguridade do planeta. Non todos estes problemas, pero si a maioría, refírense á Terra fluída, o conxunto de subsistemas que abrangue atmosfera, hidrosfera e criosfera.

Revisaremos os impactos que producimos, e seguimos producindo, sobre cada subsistema: os aerosois na atmosfera; a acidificación que esta contaminación causa nos océanos; o burato de ozono, que non parece reducirse significativamente, e agora ademais apareceu sobre o Ártico; as alteracións nos ciclos do nitróxeno e o fósforo; os conflitos en torno á auga; e por último o cambio climático, que inflúe en moitos dos outros temas. Outros dous aspectos, a perda de biodiversidade e os cambios no uso da terra, verémolos na última sesión. A teoría xeolóxica que hai detrás deste tema é moi simple: redúcese aos esquemas básicos de circulación atmosférica (coas súas células de Hadley) e oceánica (a famosa fita transportadora global e o fenómeno periódico Del niño) e do ciclo da auga, cunha corrente fluvial como tema máis complexo.

2.1 A contaminación atmosférica

Empezamos coa contaminación atmosférica. Un paradoxo da loita contra esta praga é que, ao velar a radiación solar, algúns dos contaminantes (como os **aerosois de sulfatos**, xerados na combustión de hidrocarburos) arrefrían a atmosfera, ao revés que o ozono troposférico e as partículas de feluxe, que

contribúen ao efecto invernadoiro. Enfrontámonos así coa disxuntiva de que combater a contaminación pode acelerar o cambio climático.

A **acidificación** dos océanos é unha consecuencia directa da contaminación, xa que se produce a través da disolución de óxidos de xofre e nitróxeno na auga de chuvía. Baixo pH ácido, os moluscos teñen dificultades para construír as súas cunchas, e as corais perden os seus Zooxanthellas, branquexando, aínda que este último proceso pode ser causado tamén polo aumento da temperatura da auga.

As previsións sobre a evolución do **burato de ozono** antártico apuntan á súa desaparición cara a 2065 ou 2075. Non obstante, a súa evolución recente permite dubidar deste prognóstico: a súa forma cambia pero as súas dimensións apenas se reducen (o de 2011 foi o noveno en extensión en 26 anos de medidas). Peor noticia é a aparición, por vez primeira, dun burato incipiente no Ártico. Segundo os climatólogos, deberíase a que os gases de invernadoiro reteñen máis calor na troposfera, co que a estratosfera se arrefría en exceso. Isto determina o aumento de monóxido de cloro, o axente que rompe as moléculas de osíxeno e acaba destruindo o ozono.

Vexamos agora os **ciclos de nitróxeno e fósforo**. Os inventos de Haber e Bosch para producir fertilizantes nitroxenados, e do motor de explosión, que emite grandes cantidades de óxidos de nitróxeno, duplicaron (dende 1895, acelerándose dende 1970) a cantidade de nitróxeno lixeiro (^{14}N) na biosfera. Os especialistas en atmosferas din que estamos bañados en nitróxeno, unha situación que favorece as explosións de algas e polo tanto a anoxia en concas pechadas, e que, en xeral, distorsiona as cadeas tróficas na súa base planctónica. Pola súa banda, os fosfatos estanse a converter nun material estratéxico. Concentrados en poucos países, e co seu uso crecendo a un ritmo de 3% anual, as reservas probadas poderían durar só entre 50 e 125 anos, e non é doado buscar repostos. Por iso o problema do Sahara Occidental non se resolverá doadamente.

2.2 Contaminación e impactos sobre a hidrosfera

O libro *Viaxe ao corazón da sede*, do xornalista inglés Fred Pearce, é unha excelente introdución ao problema máis crítico entre os que afectan aos recursos básicos. Entre o ciclo da auga natural e o real hai un abismo: salvo nos sempre falidos intentos de provocar chuva artificial, apoderámonos de cada unha das súas partes (incluíndo a evaporación, agora forzada polo cambio climático antrópico). As principais vítimas son os ríos, que practicamente desapareceron como ecosistemas. Un mapamundi de presas exprésao mellor que calquera dato. Os casos son múltiples, pero teñen como denominador común o prexuízo ambiental. En Patagonia hai un combate entre o goberno e os ecoloxistas chilenos sobre a construción de sete grandes presas, que en opinión destes últimos alterarían irreversiblemente paisaxes míticas, tendo en conta que habería que abrir un corredor de 120 m de anchura para erixir 5.000 torres de alta tensión, e que os estudos de impacto ambiental son moi deficientes. O tema é tan impopular que o BBVA se retirou del.

Ademais de inundar 13 cidades e 466 poboacións menores (obrigando a desprazarse a 1.300.000 persoas), a presa das Tres Gargantas contribuíu a deteriorar a calidade da auga: o fluxo máis lento do río alentou as explosións de algas tóxicas. O goberno chinés aprobou un plan de remediación no que investirá 26.000 millóns de dólares. Outro efecto negativo foi o aumento da erosión: a presa retén sedimentos, e a auga que sae dela é máis clara, o que aumenta a súa capacidade erosiva. Isto notouse sobre todo no delta do Yangtsé, onde dende 2003 predomina a erosión en lugar da sedimentación. O traballo onde se publicaron estes datos recorda o terrible número de presas construída sobre o río.

Se exceptuamos as presas que China construíu no seu curso alto, o Mekong é o último sistema fluvial relativamente intacto. Pero Laos proxecta construír unha presa xigante cuxos prexuízos sufrirán sobre todo Cambodja (onde millóns de persoas viven da pesca fluvial) e Vietnam (17 millóns de persoas no delta do Mekong, que está a perder a batalla fronte ao mar). Estes países

protestaron ante a Comisión do Mekong, pero Laos anunciou que seguirá adiante.

Os gobernos brasileiro e peruano deseñaron plans para explotar a fondo a conca amazónica. Si se levan a cabo, en 30 anos a metade da enerxía de Brasil proviría do Amazonas. Pero o cambio climático probablemente incrementará a pluviosidade nos Andes e reduciráa no sueste da conca: aquelas presas estarán subdimensionar, ao contrario que as amazónicas.

Por casos como os anteriores, Daniel Beard, ata a súa xubilación o director do organismo que administra as presas en EUA, se dedica agora a loitar contra a construción de presas. A destrución de presas marcha a bo ritmo en EUA: 60 en 2010; pero nalgúns casos ten motivos económicos. Por exemplo, nalgúns ríos está orientada a recuperar a industria da pesca do salmón.

Deixamos agora as presas para examinar algúns casos de uso de acuíferos. Aproveitando as baratas bombas hidráulicas xaponesas (cada ano instálase un millón), os agricultores indios estiveron a sacar dos seus acuíferos uns 250 km³ de auga cada ano; pero a recarga é de só 150 km³. Por iso, nalgunhas zonas o nivel freático pasou de 10 m en 1950 a máis de 500 m hoxe. No oeste do país hai millóns pozos secos, e a tendencia é a empeorar. O Gran Río Artificial de Gadafi, 3.500 km de condutos de 4 m de diámetro que comunican o acuífero nubio, o maior depósito de auga fósil do mundo, coa costa, construído usando os beneficios do petróleo e 5 millóns de toneladas de cemento, suficientes para pavimentar unha estrada dende Trípoli ata Bombay. O proxecto constaba de cinco fases, das que só se completaron dous. A auga do Gran Río Artificial é a máis cara do mundo, e só durará 50 anos.

Os lagos e mares interiores tamén sufriron os excesos da agricultura. O Mar de Aral foi a vítima do sono algodoeiro soviético, herdado polas repúblicas sucesoras, Kazajstán, Kirghizistan, Tadhikistan, Turkmenistán e Uzbekistán. Estes cinco países ocupan cinco dos sete primeiros lugares na lista mundial de consumo de auga por persoa (encabezada, por certo, polos dous últimos). Unha desgracia semellante sucedeu ao Lago Chad, un mar interior moi

superficial (1,5 m de profundidad media). A seca (50%) e o exceso de regadíos (outro 50%) remataron con el. Agora, os catro países ex - ribeiregos disputan sobre as súas fronteiras. Analogamente, o Mar Morto vai camiño de facer honra aínda máis literalmente ao seu nome, desfalecido como está pola auga que Israel e (apenas) Xordania extraen do Río Jordán, o seu único emisario.

Non é estraño que a auga se convertese nunha arma política. Por exemplo, en mans do Estado de Israel, que escavou profundos pozos xunto ás fronteiras palestinas co fin de rebaixar o nivel freático nos territorios ocupados. Prohibe ademais aos palestinos afondar os seus pozos e, fose de programa pero claramente tolerado polo programa, os seus colonos dedícanse a contaminar os mananciais accesibles aos palestinos.

2.3 Evidencias e impactos do cambio climático sobre os subsistemas fluídos

O Cambio Climático foi dende os anos oitenta o gran tema ambiental. É un asunto complexo, que integra procesos en todos os subsistemas da Terra fluída, e mesmo do interior terrestre, como é a influencia climática do vulcanismo. Un primeiro efecto do cambio climático en marcha é a alteración das zonas climáticas. Unha síntese de 14 modelos climáticos prognostican unha aridez crecente nas zonas temperadas, como é a conca mediterránea. Pero non son só os modelos. O retroceso de case todos os glaciares do mundo é unha evidencia incontestable. Nature, sempre preocupada con este tema, titulaba a súa portada dun número de 2008: "*Estase a fundir Groenlandia?*". A perda crecente de xeo así faino pensar. En canto ao Ártico, ten o récord de mínima extensión de xeo en 2007, con 4,3 .106 km²; pero 2011 andou moi preto, con 4,33. A perspectiva é que o xeo desapareza na segunda metade do século, pero a perda da última década desborda os modelos; de proseguir esta tendencia, o Ártico sería navegable a partir de 2030. En cambio, os científicos non puideron descubrir se existe un albor crítico para un desxeo aínda máis acelerado.

As perspectivas para a fauna ártica non son optimistas. A fauna de latitudes medias está a migrar cara ao norte, pero os animais polares non teñen ningún sitio máis frío onde ir. Os osos brancos, carentes de xeo, invaden a terra próxima e híbrídanse cos osos pardos. E as morsas, que tamén cazan e se aparean sobre o xeo, están cada vez máis constringidas en hábitats costeiros.

Como consecuencia do quentamento, o permafrost está a fundirse. Os climatólogos calculan que dentro del hai 1.700 millóns de toneladas de carbono orgánico, o triplo das estimacións anteriores (que xulgaban que só habería materia orgánica en cantidades importantes no metro máis superficial de chan). A medida que o solo se desconxela, as bacterias descompoñen lentamente o carbono, liberando CO₂ (97%) e metano (3%) ao longo de décadas. Os chans máis encharcados adoitan conter bacterias metanógenas. E o metano ten un efecto de invernadoiro 25 veces superior ao CO₂, polo que, a pesar da súa pequena proporción causaría tanto efecto climático coma este gas, co problema engadido de que se trata dunha fonte dispersa e remota, e por iso incontrolable.

En febreiro de 2002, a plataforma de xeo Larsen B, de 3.250 km² de superficie e 200 m de espesor, empezou a desintegrarse. A pesar de manterse estable dende había 12.000 anos, en tres semanas convertérase en icebergs á deriva no Mar de Weddell. É o caso de Larsen B extrapolable a todo o xeo da Antártida? Afortunadamente non: aínda que a maioría dos glaciares da Antártida Oriental están a adelgazarse, o proceso non ten a velocidade que mostran os de Groenlandia e a Península Antártica.

Loxicamente, a fusión do xeo (unida á expansión térmica da auga mariña) está a facer subir o nivel do mar, só uns 20 cm no século XX pero moito máis no futuro se o quentamento prosegue: 12 m se se fonden Groenlandia, a Península Antártica e os glaciares de montaña, e outros 19 m se o fai o xeo mergullado que bordea a Antártida Oriental. Este fenómeno faise sentir xa nalgunhas costas, como é o caso de Tuvalu, no Pacífico, e a marxe atlántica de Norteamérica. Outro efecto negativo do quentamento da atmosfera é o

aumento das grandes tormentas tropicais, tanto en frecuencia coma en enerxía liberada. Katrina sería un preludio.

O último efecto, discutido, do quentamento oceánico sería frear a fita transportadora oceánica. A fusión do xeo de Groenlandia rebaixaría a salinidade (e con ela a densidade) no Atlántico norte, impedindo a formación da corrente de fondo que baixa por este océano ata a Antártida. As medicións da velocidade da corrente parecen apoiar esta idea, pero só provisionalmente, xa que se constatou que o descenso podería ser parte da oscilación natural do sistema.

E, non obstante, existen escépticos. Repito a miña hipótese explicativa: o cambio climático obriga a repensar a sociedade actual. Se algunha vez necesitas argumentos para rebater aos que cren que todo é un invento de científicos esquerdistas, o mellor que coñezo é que o Ártico, infranqueable ao longo de toda a historia humana (o capitán americano John Franklin perdeu os seus dous barcos e todos os seus homes intentándoo en 1845) foi circunnavegado por un simple catamarán en 2010.

Cara a 1980, un científico que estaba a estudar a atmosfera de Venus cambiou de tema ao advertir que a do seu propio planeta estaba a alterarse moi rapidamente (280 ppm de CO₂ en 1750, e preto xa de 400 ppm naquel momento). Dende entón, James Hansen converteuse na besta negra dos negacionistas. No seu libro *"Tormentas dos meus netos"* formulou a súa alternativa: peche das minas de carbón (e polo tanto das centrais térmicas alimentadas con el), e renuncia a explotar as lousas bituminosas e a explorar máis hidrocarburos.

Hai algunha posibilidade de que fagamos caso á persoa que mellor coñece o clima deste planeta?

3.- OS CONDICIONANTES XEOLÓXICOS DA BIOSFERA DENDE A ORIXE DA VIDA ATA A SOCIEDADE DO CAMBIO CLIMÁTICO

A pregunta sobre a nosa soidade (ou compañía) cósmica é tal vez a máis popular que se pode facer á Ciencia. Aquí tratareina dende un punto de vista particular (un libro escrito por dous científicos, un paleontólogo e un astrónomo) que non obstante nos servirá á perfección como fío condutor introdutorio. Na segunda parte tratarei de avaliar o comportamento da nosa sociedade co resto da biosfera, e co planeta en xeral.

3.1 *Condicións para a vida no Universo*

O libro chámase *Rare Earth (Terra rara)* e ten o propósito de avaliar a probabilidade de vida complexa noutros puntos do Universo. Para iso formula unha serie de condicións (18, exactamente) sine qua non algunhas das cales parecen bastante discutibles. Examinémolas unha a unha. A primeira esixe que o planeta resida na chamada zona de habitabilidade, a distancia á estrela para a cal a auga é estable na súa fase líquida. A segunda require que a estrela hóspede (ou primaria) pertenza á parte inferior da chamada Secuencia Principal: é dicir, que o seu brillo e luminosidade non sexan excesivos nin deficitarios, para dar tempo a que a evolución actúe.

A terceira condición é que os seus veciños planetarios permanezan en órbitas estables: os planetas migratorios deben de causar estragos na cohorte dunha estrela. A cuarta pide unha masa planetaria axeitada: suficiente para reter volátiles, pero non en exceso (unha atmosfera masiva de H e He faría inviable unha biosfera complexa); ademais é interesante un núcleo parcialmente fundido que asegure un campo magnético

A quinta condición é que exista no sistema un planeta de gran masa que defleccione os impactores (asteroides ou papaventos) que poderían ser perigosos para a vida; pero non debería estar moi preto, para non provocar excesivas mareas no planeta habitado. O sexto requisito, un marte, podería servir como viveiro de vida. Como sétima condición, a tectónica de placas, un bo sistema

de controlar a concentración de CO_2 na atmosfera, e con iso de impedir un invernadoiro descontrolado como o de Venus. A oitava refírese á cantidade de auga. Un planeta desértico será un medio demasiado duro para que unha civilización prospere; pero nun totalmente oceánico, o xurdimento de tecnoloxía será probablemente imposible.

O noveno filtro require un satélite xigante, como é a Lúa respecto á Terra; a súa presenza serviría para estabilizar o eixe de rotación, impedindo que realizase excursións caóticas que desorganizasen continuamente o clima. A décima, unha inclinación axeitada do eixe de rotación, asegura a existencia de estacións e un clima predicible.

O undécimo filtro estipula un máximo de impactos xigantes. Non implica que non poida haber ningún: a Terra debe o seu satélite xigante a un deles. Pero un exceso de colisións podería esterilizar o planeta. A duodécima condición regula a concentración de carbono. Nun planeta desprovisto deste elemento non podería xerarse vida; pero un exceso de carbono sería igualmente prexudicial, porque se nun medio hai máis C que O non se formará auga, xa que o enlace C-O é máis estable que o H-OU, e o C acapará todo o OESTE.

Chegamos á estipulación número 13. Para que a vida sexa estable durante miles de millóns de anos é necesario que o planeta se manteña termicamente estable. Na Terra coexisten dous termóstatos, un biótico e outro abiótico. O primeiro vén regulado pola función clorofílica: unha elevación de temperatura provocará un aumento de biomasa, que absorberá máis CO_2 , rebaixando a temperatura. O segundo baséase na meteorización dos silicatos (o compoñente mineral básico das rochas), un proceso que absorbe CO_2 . O requisito décimocuarto é que se produza evolución; dende a nosa perspectiva terrestre é difícil ver como tal cousa podería evitarse, se hai mutacións e un mínimo de presión ambiental.

A condición número quince é que se produza acumulación de osíxeno, un combustible celular imprescindible (ata onde sabemos) para procesos, tanto físicos coma mentais, típicos de formas de vida avanzadas. E o filtro

décimosexto é que o planeta se ache nunha galaxia espiral. Os autores cren que só nestas existe a cantidade mínima de elementos pesados como os que forman os nosos corpos. O requisito décimoséptimo pide que o planeta se encontre no que os autores chaman zona de habitabilidade galáctica, equidistante do centro e da periferia. A razón aducida é que os centros galácticos bolen cun exceso de enerxía (raios X e UV, ondas gravitacionais e de choque) sen dúbida prexudicial para a vida complexa, mentres que a periferia, de novo, sería deficitaria en elementos pesados. Como requisito final engaden algunhas cláusulas non imprescindibles pero si interesantes: que se produza unha complejificación repentina (como o chamado Big Bang da vida ao principio do Paleozoico terrestre), ou que se eviten superglaciacións como a que puido rematar coa biosfera ao final do Proterozoico.

Algunhas obxeccións a este esquema: a Terra inicial contiña moi pouco carbono (como vimos, moi poucos volátiles en xeral); non obstante, a biosfera contén unhas trinta veces máis carbono que o Sol (ou sexa, que a nebulosa protosolar). Parte deste carbono puido ser incorporado en impactos asteroidales, e o resto captado da mínima dotación inicial. É dicir, que non parece necesario que o planeta conteña de entrada moito carbono: a propia biosfera encargárase de centralo. Con respecto á necesidade de que a galaxia hóspede sexa espiral: moitas galaxias non espirais (como algunhas elípticas moi afastadas que poboan o espazo profundo) teñen cantidades apreciáveis de po, ou sexa de elementos pesados, adecuados para formar vida. Ademais, tamén hai planetas en torno a estrelas que non teñen demasiados elementos pesados: o Sol é unha delas.

A última obxección non se refire aos filtros nin ao xeocentrismo, senón ao limitado coñecemento do Universo co que se elaborou a teoría. O telescopio orbital Kepler, posto en órbita en 2009, descubriu ata a data 2.326 obxectos non luminosos en torno a estrelas do cúmulo de Cisne, a uns 3.000 anos-luz de distancia. Moitos deles son de tamaño terrestre, aínda que os máis abundantes teñen diámetros intermedios entre os da Terra e Urano: son as chamadas superterras, potencialmente habitables. Números tan grandes levaron os

científicos a extrapolar a cifra duns 100 millóns de terras ou superterras en zonas habitables; deles, 20 millóns serán terras habitables.

3.2 Información do rexistro xeolóxico sobre a vida na Terra

Tras esta introdución, vexamos que nos di o rexistro xeolóxico sobre a vida no único sitio en que a coñecemos. Os primeiros tempos da historia da Terra denomináronse Hádico (do Hades); pero agora os especialistas xa non están seguros de que o nome sexa adecuado, porque algúns minerais formados nesa época parecen indicar un ambiente non tan distinto do actual. Un debate interesante sobre estes primeiros tempos da Terra refírese ao momento de comezo da tectónica de placas. Se esta se remonta a uns 4.000 Martes, unha das opinións sustentadas, sería simultánea á orixe da vida, e polo tanto poderíanse aplicar á xénese desta os estudos das comunidades submarinas que aproveitan a enerxía das chemineas hidrotermais.

A fauna de Ediacara, que colonizou a Terra ao final do Proterozoico, supón o final do planeta de bacterias e algas que fora a Terra nos seus primeiros ~3.300 Martes. Será sempre tan longo o período pre-animal? Y, por que somos case todos bilaterais?

Por fin, hai uns 35.000 anos, *Homo sapiens*. Dende ese momento, o último homínido empeza a colonizar o planeta. Empeza sempre polas chairas aluviais, lugares propicios para o sustento e a caza.

3.3 O homo sapiens a súas relacións cos recursos xeolóxicos

No Crecente Fértil, ou Mesopotamia, a civilización máis antiga coñecida, a sumeria-acadio, declinou tras un longo período de seca cara a 2.200 a.C. Moitas cidades foron abandonadas (no norte, sobre todo), e construíronse muros defensivos para conter as invasións doutros pobos que fuxían tamén da seca. Non moito despois, os sumerios cederon o seu lugar na historia aos babilonios.

O imperio maia colonizou Yucatán durante 2.000 anos antes de sucumbir ás repetidas secas, que socavaron a súa base agrícola, e que eles mesmos agravaron coa deforestación provocada sobre todo con motivos cerimoniais (a produción do estuco co que tapizaban os seus pazos requiría un enorme consumo de leña). A súa organización social, baseada na guerra e a escravitude, colapsou moito antes da chegada dos españois. A selva volveu tomar posesión das cidades.

Os polinesios que colonizaron a Illa de Pascua durante cinco séculos son un caso semellante, coa diferenza de que aquí non fixo falta a intervención do clima: a deforestación da illa foi suficiente para privalos dos medios básicos de subsistencia (como construír canoas coas que pescar, ou ter leña para quentarse) e culturais (madeiros para transportar os moai ou incinerar os mortos). Os europeos encontraron unha poboación residual e depauperada, que dedicara as súas últimas forzas a destruír os moai dos veciños. Por último, unha crise moderna: a gran seca de 1932 a 1939 sobre o Medio Oeste de EUA e Canadá (o chamado Dust Bowl) obrigou a emigrar a tres millóns de persoas, un amargo éxodo inmortalizado por Steinbeck en *As uvas da ira*.

Homo oeconomicus é un mutante da Revolución Industrial, unha especie con dúas características: a súa necesidade imperiosa de enerxía e a súa pulsión de viaxar. Revisemos o estado desas fontes de enerxía, sen perder de vista a posibilidade de comparar os colapsos desas antigas civilizacións coa nosa.

O carbón ten fama de case inesgotable, e non obstante é só o tirón de China o que está a manter a produción en aumento: o resto do mundo cada vez produce menos. China aduce ter reservas probadas para 62 anos, pero expertos estranxeiros cren que o máximo de produción se alcanzará moito antes, e que despois o prezo subirá rapidamente debido ás dificultades de extracción do que reste (a maioría da minas chinesas está a máis de mil metros de profundidade).

Sobre as reservas de petróleo investigouse moito máis. Case todo o mundo está de acordo en que estamos moi preto do máximo de produción, que

seguramente se alcanzará na presente década. A rapidez do declive dependerá de moitos factores, sobre todo económicos e políticos. Un exemplo do arriscado que é efectuar predicións sobre os hidrocarburos foi a apertura á exploración marítima do Océanos Ártico, un preludio á explotación dos seus recursos naturais, entre eles grandes depósitos de gas. Outra sorpresa é o *fracking*, ou inxección de auga, area e produtos químicos para extraer os hidrocarburos das lousas bituminosas. Púxose en práctica tan recentemente que nin sequera se avaliaron en detalle as súas consecuencias ambientais; pero parece probado que estes depósitos conteñen máis metano que os convencionais, e que neles os escapes deste gas (4 a 8%) superan os que se dan tipicamente nestes (2 a 6%). A pesar de todo, hai moitos proxectos de fracking en marcha, incluíndo un no País Vasco que cubriría o consumo enerxético de Euskadi durante 60 anos. A última fonte convencional, a enerxía nuclear, está suxeita sempre a batallas políticas, dende abril de 2011 atizadas polo problema das centrais xaponesas.

No noso país, aparentemente as enerxías alternativas están a cobrar un papel importante, que non obstante queda reducido á súa dimensión real ante os datos xerais, como son a decisión de China de non renunciar a extraer todo o carbón posible, ou os novos depósitos mariños de hidrocarburos. En consecuencia, os datos das emisións de dióxido de carbono seguen batendo récords: en 2010 foron de 30,6 billóns de toneladas. O obxectivo de non superar os 2°C de aumento en 2100, fixado no cumio climático de Cancún, requiriría non consumir máis de 32 billóns en 2020, pero é case seguro que ese límite se alcanzará con 8 ou 9 anos de adianto.

En que estamos a gastar toda esta enerxía? En empresas tan esenciais como é a construción de illas artificiais no Emiratos Árabes Unidos. Trátase de proxectos que se fan con extremadamente superficiais informes de impacto ambiental. Arredor da illa artificial de Palm Jumeirah, en Dubai, a auga apenas flúe, o que está a incrementar o risco de invasións de algas. Dende 2001, a rexión perdeu o 70% dos seus arrecifes de coral.

Este é polo tanto o momento de introducir os dous aspectos ambientais que quedaron pendentes da sesión anterior. O uso da terra (e do mar) está a sufrir cambios brutais e acelerados. No proxecto de *Palm Jumeirah* drenouse 94 millóns de m³ de sedimentos, e alteracións semellantes vense en todos os os ecosistemas. Ás veces son residencias turísticas, ás veces proxectos de regadío en zonas áridas, ás veces pura e simple deforestación. Non é moi difícil imaxinar un planeta convertido nun enorme conxunto de granxas e campos de cultivo poboados tan só por humanos e unhas dúcias das plantas e animais necesarios para alimentar unha poboación de 10.000 ou 15.000 millóns de persoas.

3.4 Consecuencias para a biosfera do uso dos recursos xeolóxicos da nosa época e as solucións que lle estamos a dar

As consecuencias para a biosfera son cada vez máis evidentes. Os paleontólogos calcularon que, dende que existen animais, a taxa natural de extincións foi dunha cada 4 ou 5 anos. Na actualidade, mídense en especies por hora (cen ao día?). As matanzas directas, por caza ou sobrepesca, actúan en combinación coa destrución de hábitats ocasionadas pola deforestación ou a chuvia ácida. Ademais, non se trata tan só de destrución de especies, senón da eliminación das relacións tróficas. Por exemplo, a pesca de quenllas alenta a proliferación de peixes herbívoros, que danan a coral; os rouba te devoran aos consumidores das pradarias de algas; os xaguares manteñen a raia os herbívoros nun bosque de Venezuela; e os lobos, reintroducidos en Yellowstone, axudan a manter denso o sotobosque. O colapso das pesqueiras é outro problema en estado crítico. Só nos últimos 50 anos pasaron a estar por debaixo de mínimos 2/3 das especies; e 80% nas zonas con poucas especies, porque nelas as cadeas tróficas son máis fráxiles.

Solucións? Hai algúns anos apareceu na revista *Scientific American* un conxunto de remedios para os problemas ambientais. Ningún deles implica cambiar en profundidade modelos de comportamento; por exemplo, non se alenta a usar o transporte público, senón a usar o coche con moderación; nin a gastar menos enerxía, senón a instalar desmesuradas plantas de enerxía solar,

un caro substitutivo das convencionais. En canto a deter a deforestación, sen dúbida é unha boa idea, pero habería que ver quen é capaz de poñela en práctica en todas as rexións do planeta.

Na conferencia sobre medio celebrada en Durban (Suráfrica) en decembro de 2011 acordouse preparar un tratado internacional sobre o cambio climático que entraría en vigor en 2020. Os defensores do medio cren que o acordo foi un tremendo paso atrás, xa que para entón a desviación entre a realidade e o obxectivo de limitar o quentamento a 2°C en 2100 será aínda maior que agora. A inacción dos políticos deixa o campo aberto aos modelos climáticos, segundo os cales cara á metade deste século haberá intensas secas en gran parte das latitudes medias, como o Mediterráneo e o centro-oeste de Norteamérica. Estes cambios na pluviosidade traerán consigo grandes migracións: serán os refuxiados do cambio climático. Algúns sociólogos creron ver unha conexión entre os vaivéns climáticos e as guerras, e especificamente durante a segunda metade do século XX nos países onde se notan os efectos *Del* niño.

3.5 Como aparecerá a nosa época no rexistro xeolóxico?

Será nosa época merecedora dun apartado especial na escala dos tempos xeolóxicos? Os científicos débáteno; pero os máis sabios din que o rexistro se parecerá máis ben ao do límite K/T: uns milímetros de material exótico (residuos radiactivos entre outros) marcando unha grande extinción. E no futuro afastado, o Sol, ao continuar o seu quentamento, fará elevarse a temperatura da atmosfera, e a Terra volverá ser un planeta de bacterias. Ao cabo de 4.500 Martes, ao alcanzar a súa fase de xigante vermello, fará ferver os océanos e a vida na Terra desaparecerá. Ao final, como ao principio, un océano de magma cubrirá un planeta cunha historia de 12.000 millóns de anos.