

## **NOUS CONEIXEMENTS I NOUS PARADIGMES EN GEOLOGIA. HISTÒRIA DE LES NOVES PROPOSTES EN LES CIÈNCIES DE LA TERRA ENTRE 1978 I 2003 (Leandro Sequeiros i Francisco Anguita)<sup>1</sup>**

En aquest treball es proposa una visió dels nous coneixements i els nous paradigmes que s'han succeït en la geologia en els últims 25 anys, entre 1978 i 2003. Sembla necessari situar aquests coneixements dintre del context del que va ser el desenvolupament de les ciències de la Terra en el segle XIX, amb l'adveniment dels grans principis amb els quals Hutton i Lyell construïren els pilars metodològics de la geologia.

En el passat la incipient comunitat científica dels geòlegs espanyols, situats en general al marge de les institucions universitàries, va assimilar amb rapidesa les innovacions que venien d'Europa encara que sense aportar grans novetats científiques. L'acceptació d'aquestes propostes científiques es va perllongar sense dificultat fins als anys setanta en els quals noves institucions científiques van recollir l'herència dels nous coneixements i paradigmes arribats de més enllà de les fronteres.

Finalment es detallen alguns nuclis de coneixements geològics que més canvis han sofert en aquests anys i que encara tenen molts problemes oberts. Tals com els avanços en el coneixement dels processos interns de la Terra i el disseny de la tectònica de plaques, els avanços en Geologia Global i en les relacions entre les Ciències de la Terra i el Medi ambient, la Geoplanetologia i la nova Paleontologia emergent en aquests anys.

### **I. LA HISTÒRIA DE LA CONSTRUCCIÓ DELS GRANS PARADIGMES GEOLÒGICS FINS ALS ANYS SETANTA DEL SEGLE XX**

No és possible entendre el que ha estat l'avanç històric i científic de la geologia en el món i a Espanya en els últims 25 anys si no es tenen en compte les referències al que han suposat les construccions dels grans paradigmes de les ciències de la Terra en els segles anteriors.

Les ciències de la Terra, com tot coneixement organitzat, no és obra d'una sola persona sinó de moltes al llarg de molt temps generant múltiples controvèrsies. Tal vegada, les més interessants per al desenvolupament de les idees sobre el coneixement dels processos que han donat lloc a les idees actuals sobre la configuració de la Terra siguin les referents als debats entre neptunistes, vulcanistes i plutonistes, les mantingudes entre catastrofistes i uniformitaristes i les que es van centrar en l'edat de la Terra.

Al llarg de la història del pensament científic sobre la Terra com planeta del Sistema Solar, els geòlegs, els filòsofs i els teòlegs han tingut molts punts de conflicte i divergència. Però també aquests debats han permès arribar a consensos que han fet avançar el coneixement. Durant els segles XVII i XVIII, els primitius geòlegs van proposar els que s'anomenen models de la Terra. Però fins a finals del segle XVIII (sobretot amb Hutton), i fins al segle XIX (sobretot amb Lyell i Darwin), no es van trobar els arguments científics que van permetre contrastar les hipòtesis més rellevants.

Una de les preguntes més radicals és: si com va dir Newton hi ha lleis en la naturalesa que tenen vigència en tots els punts de l'univers actual, pot dir-se que aquestes mateixes lleis han existit també cap a endarrere, en l'abisme del temps passat? Seguiran vigents en el futur?

Al començament del segle XVIII la hipòtesi diluvista era defensada fermament per molts autors, entre ells cap destacar, per la difusió de les seves idees a Espanya, a Johann Jakob Scheuchzer (1672-1733) i al franciscà José Torrubia (1698-1761), autor de *l'Aparell per a la història natural espanyola* de 1754, primer tractat de paleontologia diluvista en castellà.

El segle XVIII va ser testimoni de dos tipus de debat igualment apassionats en el camp de les ciències de la naturalesa: el sostingut per Carl von Linné i Jean Louis Leclerc, comte de Buffon, entorn del creacionisme teològic estricte enfront del progresionisme materialista; i el debat entre les idees transformistes de Lamarck enfront del catastrofisme de Cuvier. La "Teoria de la Terra" de Buffon segueix els plantejaments clàssics del foc interior ocasionat per la permanència de foc interior, de manera que per a aquest autor, la calor del sol és menyspreable en comparació amb la calor emanada pel centre de la Terra.

---

<sup>1</sup> Resum i traducció de: NUEVOS SABERES Y NUEVOS PARADIGMAS EN GEOLOGÍA. HISTORIA DE LAS NUEVAS PROPUESTAS EN LAS CIENCIAS DE LA TIERRA EN ESPAÑA ENTRE 1978 Y 2003. LEANDRO SEQUEIROS Y FRANCISCO ANGUIA

Lull, Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas, 2003, vol. 26, 279-307

Una explicació coherent amb aquesta de la dinàmica terrestre va ser exposada per l'escocès James Hutton (1726-1797) en el seu treball *Theory of the Earth* (1795). Partidari de l'existència d'un focus igni central en la Terra, herència de l'antic astre incandescent que s'apaga, segons les teories de Laplace (1749-1827), Hutton pensava que és la calor central la font d'energia que subministra força a la Terra. La calor interna consolida els sediments i els eleva fins a la superfície, i les roques plutòniques i volcàniques procedeixen dels focus ignis del centre de la Terra. Per aquest motiu el seu sistema va ser anomenat Plutonisme. El gran valor de Hutton està en descartar per als processos de la Terra (i en particular per als energètics) un origen extranatural o sobrenatural.

La Teoria de la Terra que havia proposat Hutton postulava tres elements que seran objecte de crítiques per uns i de desenvolupament per uns altres: primer, l'existència d'un focus de calor interna en la Terra que consolidava els estrats; segon, l'existència real de continus cicles geològics, i en conseqüència d'una uniformitat en l'activitat dels agents físics; i tercer, la necessitat d'atribuir a la Terra una edat indefinida, sense que es pugui demostrar que existeix un principi i un final.

Els últims anys del segle XVIII i primera meitat del segle XIX marquen l'inici de la geologia moderna amb l'establiment dels seus principis bàsics. Aquesta visió de conjunt està present en els quatre capítols històrics amb que Charles Lyell prologa el primer volum dels *Principles of Geology* (1830). Lyell introdueix un concepte científic i filosòfic que és alhora principi metodològic i projecte d'investigació traduït al com Uniformitarisme. Aquest principi es presenta amb diversos significats: com uniformitat de llei (la invarianza històrica de les lleis de la naturalesa), uniformitat de processos (el principi metodològic de la simplicitat); com uniformitat d'intensitat (referit a la taxa mitja de velocitat dels processos, el gradualisme); i el quart significat, el més problemàtic, el de la uniformitat d'estat o estat estacionari (el canvi en la Terra es dona de manera lenta, gradual i contínua al llarg del temps geològic, però no existeix en aquests processos cap direccionalitat). Durant molts anys, Lyell es va oposar a qualsevol tipus de direccionalitat en els processos naturals i, sobretot, dels processos biològics.

Durant molt temps es va mantenir la idea que la Terra havia estat creada per Déu tal com la veiem i que només havia esdevingut un procés de *degeneració*.

Les autèntiques teories orogèniques, que implicaven la intervenció d'una energia "constructiva" de la Terra, no apareixen en el pensament geològic fins ben avançat el segle XIX. Quan a la interpretació de les causes dels terratrèmols i dels volcans s'afegeix la pregunta sobre l'origen de les cadenes muntanyenques, comença a plantejar-se la possibilitat de l'existència de processos constructius en l'escorça terrestre. Pel que fa a la formació de les muntanyes, Charles Lyell no va semblar mai massa preocupat per donar una explicació, amb la condició de que no s'acudís a explicacions "catastrofistes". Tot depenia de la continuïtat d'acumulació de petits esforços dilatats durant milions d'anys. Des d'aquest punt de vista, va comparar la formació de les cadenes muntanyenques amb l'aixecament isostàtic de la península escandinava.

### **I.1 Nous temps: nous paradigmes.**

A Espanya, les idees de modernitat geològica de Lyell van ser introduïdes molt aviat gràcies a la traducció que Joaquín Ezquerro del Bayo (1793-1859) va publicar en 1846 dels *Elements de Geologia*. Però en aquests temps apareixen altres paradigmes científics que van merèixer l'atenció dels geòlegs espanyols, com són els catastrofistes. No és possible entendre el que a finals del segle XX va suposar la geologia a Espanya sense acudir, encara que sigui breument, a una descripció dels avatars de les ciències de la Terra durant el segle XIX i el segle XX. Per a major claredat s'ha sistematitzat aquesta informació en tres grans capítols que agrupen als partidaris de tres paradigmes explicatius del funcionament dinàmic de la Terra. Aquestes sistematitzacions tenen el perill de mutilar la visió global però introdueixen una major claredat expositiva.

### **I.2 Els geòlegs i les teories sobre degeneració i la contracció de la Terra**

Un ampli grup de debats geològics desenvolupats en els segles XIX i XX, i que incideixen en la geologia espanyola de finals del segle XX, pretenen donar respostes al problema de l'origen i la naturalesa de les forces que donen lloc a la formació de les muntanyes. Una de les hipòtesis més influent per la seva coherència interna va ser la de la contracció de l'escorça de la Terra. L'enginyer de mines francès Leonce Elie de Beaumont (1798-1874) va proposar en 1829 la

teoria de la contracció, que desenvoluparia amb més profusió en un treball publicat 25 anys després. La seva proposta es basava en les idees defensades per Buffon i després per Laplace segons la qual la Terra estaria originalment fosa, i posteriorment, lenta però inexorablement, anava perdent calor. El refredament provocaria una pèrdua de volum de manera que l'exterior s'arruga. Buffon havia calculat una edat de 75.000 anys (una quantitat escandalosa per a la seva època). Però Darwin ho va allargar fins a 300 milions d'anys (quantitat de temps necessària per a explicar els complexos processos evolutius).

A partir del gradient de temperatura observat en la superfície, William Thomson (1824-1907), més conegut com Lord Kelvin, va calcular en 1890 el temps que necessitaria la Terra per refredar-se, des de l'estat original de fusió fins a la seva situació actual. El resultat va ser de només entre 20 i 200 milions d'anys, xifres que xocaven amb les dades geològiques. Els càlculs més científics de l'edat de la Terra van ser presentats per Lord Kelvin, que va promoure un gran debat científic i va donar finalment a la Terra una edat de 98 milions d'anys, basat en l'esgotament dels recursos energètics del planeta i del Sol.

El descobriment de la radioactivitat per Becquerel en 1896 i de la seva transformació en calor per Pierre i Marie Curie van resoldre la controvèrsia. Gran part de la calor emesa per la Terra es deu a fenòmens de desintegració atòmica i només una part a restes de la calor originària de la seva formació.

També a mitjan segle XIX el professor de la Universitat de Yale James D. Dana (1813-1895) va defensar la teoria contraccionista. Considerava que els continents corresponien a les zones de l'escorça que primer es van refredar. Les contraccions posteriors provocarien enfonsaments de l'escorça que ocupa els oceans. Al reduir-se el volum de l'interior terrestre, els continents sofririen enormes pressions. I com a conseqüència d'això, es formarien les serralades "com les arrugues que s'originen en la pell d'una poma a l'assecar-se". Els entusiastes de la teoria de la contracció van calcular que, al refredar-se fins a la temperatura actual a partir d'un estat de fusió, hauria trigat uns cent milions d'anys i que la circumferència de la Terra s'hauria contractat uns quants centenars de quilòmetres.

La teoria de la contracció va rebre un gran impuls amb l'obra del prestigiós geòleg austríac Eduard Suess (1831-1914) que va publicar entre 1885 i 1909 la seva obra *La faç de la Terra*. Per a Suess, la Terra estava estratificada en tres capes concèntriques: l'escorça superior, el mantell intermedi i el nucli central. Grans blocs de l'escorça original s'anaven enfonsant a mesura que es refredava l'interior terrestre, donant lloc a les conques oceàniques. Per a Suess "vam assistir a l'enfonsament del globus terrestre". La concepció gravitatòria com origen de les deformacions estava molt present.

Suess pensava que en el passat havia hagut dos supercontinents: Gondwana i Atlantis que després es van fragmentar i les vores del qual es van enfonsar. Aquests grans supercontinents havien existit des de sempre, però les semblances de fauna i flora exigien la presència pretèrita d'uns ponts intercontinentals que posteriorment s'haurien enfonsat en les conques oceàniques.

### **I.3 Cap a una teoria orogènica constructiva: la isostasia**

Però en els últims anys del segle XIX apareix un paradigma alternatiu que aborda el problema des d'una altra perspectiva: Com es pot explicar l'elevació topogràfica d'immenses masses de roca, la formació d'enormes plecs, i fins i tot el desplaçament de masses de roques al llarg de quilòmetres per formar les serralades? Diversos geòlegs havien estudiat la deformació de l'escorça terrestre i es preguntaven sobre l'origen de les immenses forces necessàries per a això.

Sembla que va ser Bailey Willis, geòleg del Geological Survey, el primer que en la dècada de 1890 va intentar reproduir en el laboratori el plegament dels Apalaches. En els primers anys del segle XX, Willis va arribar a l'atrevida hipòtesi que la formació de les serralades estava lligada a la calor generada en l'interior de la Terra per la desintegració radioactiva. En 1938 va suggerir que les grans borses de magma que ascendien de l'interior de la Terra produïen una expansió de les roques de l'escorça que donaven lloc a pressió lateral el bastant forta com per a produir serralades. Apareixien les teories de tipus constructiu que atribuïen a l'energia interna de la Terra la capacitat de generar grans forces formadores de serralades.

En el curs d'una expedició als Andes, a mitjan segle XVIII, el geògraf Pierre Bouguer va observar que al peu de la gran serralada la plomada es desviava de la vertical menys del que calia esperar. Els cartògrafs sabien que el fil de la plomada, que normalment apunta cap al

centre de gravetat de la Terra, en la proximitat de masses rocoses importants experimenta una desviació a causa de l'atracció gravitatòria que aquestes exerceixen.

Aquesta anomalia exigiria una explicació i Bouguer va tenir la gosadia de proposar la idea que les muntanyes estudiades devien estar gairebé buides per dins, el que li va fer víctima de no poques burles. Un segle més tard, el matemàtic anglès, John Henry Pratt (1809-1871), va comprovar un fenomen similar en la gran serralada del Himalaia. Amb aquestes dades, Pratt va presentar en la Royal Society de Londres una comunicació científica que va ser molt discutida. Per a explicar que l'atracció gravitatòria fos menor de l'esperada en l'Himàlaia, va proposar una interessant teoria sobre la gènesi de les muntanyes. En la seva opinió, l'existència en determinats llocs de l'interior terrestre de temperatures anormalment altes, provocaria la dilatació dels materials allí situats, el que donaria lloc a l'elevació de les muntanyes. És més: la dilatació de les roques determinaria la disminució de la seva densitat, pel que la massa de les muntanyes era menor del que cabia esperar a causa de l'existència en determinats llocs de l'interior terrestre de temperatures anormalment altes, i que provocaria la dilatació dels materials allí situats i això originaria les muntanyes.

Aquestes idees van despertar l'interès de l'astrònom George Airy (1801-1892), qui en 1855 va publicar la seva proposta: l'escorça es trobaria surant sobre uns materials poc resistents, encara que no necessàriament líquids, però sí, molt densos. Va comparar l'escorça amb uns troncs d'arbre surant en l'aigua. Només emergeix una part d'ells. "Les muntanyes tindrien arrels" i això explicava les anomalies gravimètriques.

Les propostes de Pratt i Airy tenien elements comuns: en ambdós casos, les muntanyes no són excessos de càrrega situats sobre la superfície, sinó que es continuen cap a l'interior i només percebem una part del volum total, de manera que l'excés de massa en superfície es compensa amb un defecte de massa en profunditat. Però per a Pratt, la profunditat de compensació era la mateixa a tot arreu; mentre que per a Airy, el nivell de compensació era més profund en les zones de les terres més elevades.

En 1892, el geòleg estructural Clarence Dutton (1841-1912) va donar a aquesta teoria el nom de isostasia: l'equilibri dinàmic existent entre una zona externa poc densa situada sobre un mantell més dens, de manera que tot increment de massa seria compensat amb un enfonsament. La teoria de Dutton no contentava als científics que creien en l'existència de continents enfonsats pel refredament i per la contracció de la Terra. Si es demostrava la isostasia, els continents no podien enfonsar-se del tot i desaparèixer.

#### **I.4 Les idees mobilistes, el paradigma de la teoria del geosinclinal i la tectònica de plaques**

En els inicis del segle XX emergeix un altre paradigma que pretenia explicar la dinàmica global del planeta Terra i que va a donar lloc al desenvolupament de la geologia moderna. La història de les anomenades idees mobilistes està lligada a l'obra *L'origen dels continents i oceans* publicada per primera vegada en 1915. El seu autor, Alfred Wegener (1880-1930) era un meteoròleg alemany que tres anys abans havia presentat les seves idees en una conferència i en dos articles. Sostenia que els continents es movien sobre el mantell i que fins i tot en l'antiguitat havien estat units formant un supercontinente, la Pangea.

Després de la tràgica i imprevista mort de Wegener en 1930, la teoria dels desplaçaments continentals va anar perdent credibilitat. També les hipòtesis sobre la contracció per refredament de la Terra van ser entrant en crisi. El descobriment de la radioactivitat mostrava que la Terra no perdia calor al ritme previst ja que apareixien noves fonts de calor. Què passa amb l'energia de la Terra? És sostenible el model de Wegener? Com es formen les muntanyes i els volcans i es produeixen els terratrèmols?

L'origen de les modernes idees geològiques cal buscar-lo en l'inici dels estudis dels fons oceànics i de les grans masses de sediments en algunes conques del món. Aquestes investigacions van dur a James Dana a elaborar una teoria fecunda: la teoria del geosinclinal. La idea inicial d'aquest model parteix del geòleg Émile Argand (1879-1940), fundador de l'Institut Geològic de Neuchâtel (Suïssa), el qual va començar a interessar-se per la geologia dels Alps en 1905, amb 26 anys. Al principi, va acceptar l'explicació clàssica contraccionista que postulava que la formació de les serralades muntanyenques es devien al refredament i a la contracció de la Terra, però, al llegir l'obra de Wegener en 1915, va canviar d'opinió i va suposar que el moviment dels continents havien generat els Alps. Estudis posteriors van lligar els fenòmens volcànics, sísmics i orogènics a l'evolució històrica dels geosinclinals.

Durant anys, aquesta teoria va coexistir amb la de la deriva continental que es va sostenir enfront dels atacs públics gracies a l'ajuda de diversos geòlegs. El suport més decidit i entusiasta a les idees de Wegener va arribar del geòleg sud-africà Alexander Du Toit. Aquest tenia la seguretat d'haver trobat les "proves" concloents que els continents havien estat units en el passat. Però tenia les seves divergències. En lloc d'un únic supercontinent, Du Toit reconstruïa els continents australs en el pol sud i agrupava els continents septentrionals prop de l'equador.

Però Du Toit, igual que Wegener, tot just va dedicar el seu temps al problema de l'energia necessària per a moure els continents. Suposava que la força centrífuga de rotació de la Terra era suficient per a explicar-lo. Tal vegada, aquí està un dels punts febles de la seva teoria: d'on treure l'energia per a desplaçar les masses continentals.

Durant la dècada dels cinquanta, l'oceanografia adquireix un important desenvolupament. S'elaboren mitjançant procediments geofísics "mapes" molt incipients encara dels fons oceànics, descobrint amb sorpresa que aquests són molt més accidentats que els relleus terrestres. L'estudi minucios de les dorsals oceàniques va suscitar vius debats sobre el seu origen i evolució. La gairebé absència de sediments antics en les dorsals va donar origen a la interpretació nova d'Harry Hess (1960) sobre l'expansió i la subducció dels fons oceànics i de les masses continentals. I tot això ho va relacionar amb les idees de convecció del mantell de Arthur Holmes.

En 1963, Vine i Matthews estudien les bandes d'anomalies magnètiques del fons oceànic les interpreten com resultat de l'extensió originada a partir de la cresta central. De manera que el basalt injectat en la dorsal queda marcat pel camp magnètic terrestre. Fins i tot van poder amidar el ritme d'expansió del fons oceànic.

Un any més tard, Edward Bullard, amb ajuda d'un ordinador, va realitzar un acoblament dels continents incloent les seves plataformes. I en 1965, el geòleg canadenc John Tuzo Wilson, a al estudiar les falles transformants, va parlar ja de l'existència de grans "plaques rígides" en moviment, amb creixement (per uns bords) i destrucció (per altres).

Els geòlegs i geofísics Jason Morgan i Xavier Li Pichon són els primers que publiquen en 1968 un desenvolupament complet de les plaques litosfèriques. Però una visió sistèmica de la Terra, en la qual l'energia té un paper impulsor, va ser ja intuïda abans per Tuzo Wilson. Aquest va publicar un article el mateix any de 1968: *Revolucions en les ciències de la Terra*, amb el qual es considera que s'inicia una nova època. A partir d'aquest moment, la geologia és una ciència diferent del que havia estat fins a llavors.

## **II. LA CONSTRUCCIÓ DE NOUS CONEIXEMENTS I NOUS PARADIGMES EN LA GEOLOGIA I LA INTRODUCCIÓ DE LES NOVES PROPOSTES EN LA SEGONA MEITAT DEL SEGLE XX**

### **II.1 Nous coneixements i nous mètodes per a la nova geologia**

La tectònica de plaques, que ha suposat una autèntica revolució en la història del pensament geològic, no és el punt d'arribada d'aquest treball. Un dels problemes pendents de la nova geologia és el de l'energia del planeta Terra en tots els seus aspectes. Però avui no només ens fixem en els aspectes estrictament geològics del planeta. Els geofísics i els geoplanetòlegs han donat una gran importància a la consideració global dels jocs d'energia del planeta. És més: des d'un punt de vista sistèmic (veure més endavant), els processos terrestres no poden separar-se dels processos del Sistema Solar i del conjunt de la Galàxia, ja que el nostre planeta no és sinó un element del sistema solar i, per això, sotmès a interaccions que han marcat la seva història, segons veurem en l'apartat II.5

Dos elements han contribuït que en aquests últims anys estigui emergint en el món científic en general (i en el de les ciències de la Terra, en particular) una nova forma d'entendre la realitat natural. D'una banda, vam assistir a una revolució en el camp de la difusió de la informació que contribueix a l'anomenada "societat del coneixement". L'espessa xarxa de satèl·lits que poblen l'espai, que en geologia ha contribuït al desenvolupament de la teledetecció, permet avui recollir, emmagatzemar, ordenar, distribuir i analitzar milions de dades per segon de múltiples variables del sistema Terra en relació amb el conjunt de l'univers.

L'establiment entre 1973 i 1992 del sistema de localització global GPS (Global Positioning System), encara que al principi va ser creat per a ús militar, ha obert el camp a nombroses aplicacions científiques en el camp de la geodèsia i de la geofísica. En sismologia s'ha produït

també una veritable revolució amb el desenvolupament dels sismògrafs digitals de banda ampla en els anys vuitanta.

En els últims anys, tots els coneixements humans estan travessats per una nova concepció del món: la concepció sistèmica. Basada en la Teoria dels Sistemes (que tan magistralment descriu Ludwig von Bertalanffy, l'anomenada concepció sistèmica travessa totes les disciplines i ha estat assumida pels øgeòlegs. No és aquest el moment de recordar els conceptes bàsics d'aquesta visió de la realitat. Basti dir que un sistema és una manera d'interpretar el funcionament multifactorial de qualsevol element dinàmic de la realitat, en el qual es donen propietats emergents. Un element bàsic d'un sistema és la seva capacitat de perpetuació mitjançant mecanismes d'autocontrol (feed back) que estableixen el conjunt, fent-lo conservador.

## **II.2 Els avanços en aquests 25 anys en el coneixement de la convecció del mantell.**

Durant la primera meitat del segle XX es van establir les línies generals del nostre coneixement sobre l'interior de la Terra. En 1906, Richard Oldham va establir l'existència del nucli i la seva naturalesa fluida, i en 1912 Beno Gutenberg va mesurar la seva profunditat des de la superfície en 2.900 km, mesura que ha canviat molt poc des de llavors. En 1932, Inge Lehmann va mostrar l'existència del nucli intern sòlid, sent solament fluït l'extern. La discontinuïtat entre l'escorça i el mantell va ser demostrada en 1919 per Andrija Mohorovicic.

Des dels anys seixanta se suposa que en el mantell terrestre se succeeixen trens d'ones de convecció deguts a canvis tèrmics. Però en aquests anys, la mesura era molt difícil. Se sabia que hi ha un creixement ràpid de la temperatura amb la profunditat, que en els primers 100 km arriba als 1.500°C. A majors profunditats s'especulava que l'augment de la temperatura és més lent i gradual fins a arribar a uns 7.000°C en el seu centre. Suposat el caràcter peculiar de l'estat de la matèria en el mantell i nucli, se suposava que devien existir corrents de convecció tal com es produeix en una olla de sopa quan s'escalfa per sota. L'aigua calenta té menor densitat i ascendeix cap a la superfície. Allí, l'aigua tendeix a refredar-se i a l'augmenta la seva densitat tendeix a enfonsar-se cap al fons. S'estableixen així unes cèl·lules de convecció amb corrents ascendents calents i corrents descendents més fredes.

Les mesures geofísiques han permès establir simulacions per ordinador d'aquestes zones de convecció, en les quals les diferències de temperatura des de la part més profunda a les més superficial s'estima en uns dos mil graus centígrads. En el cas del mantell terrestre, el material del qual és sòlid encara que amb certa plasticitat, la velocitat de desplaçament dels materials calents s'ha avaluat en uns centímetres per any. No obstant això, en el nucli extern fluid, les velocitats són majors, estimant-se en alguns centímetres per minut.

Però en els últims 25 anys, la introducció d'una nova tècnica d'anàlisi de les ones sísmiques i els nous desenvolupaments d'instruments han obert un nou camp al nostre coneixement de l'interior de la Terra. La tècnica en qüestió, que abasta diferents mètodes, es denomina tomografia sísmica i és similar a la utilitzada per el TAC en medicina.

La metodologia, simple en teoria, té després complicacions quan s'aplica a casos reals. Consisteix a observar, en un nombre gran d'estacions, ones sísmiques generades per molts terratrèmols, de manera que els rajos creuin, en múltiples direccions, la part de la Terra que es desitja estudiar. La metodologia de la tomografia sísmica permet obtenir models en tres dimensions de l'interior de la Terra.

Les imatges tomogràfiques ens proporcionen un quadre de la distribució dels corrents de convecció en l'interior de la Terra. D'elles es pot obtenir la seva relació amb els continents i oceans i amb la situació de les grans cadenes muntanyenques.

També la Teoria de Sistemes està present en la manera d'interpretar avui els processos geològics i per això, la interpretació de la Terra com sistema energètic. En una primera instància va ser la tectònica de plaques la teoria que més ha incorporat aquests conceptes.

Des dels anys de John Tuzo Wilson (1908-1993) fins ara, molts aspectes del paradigma de la tectònica de plaques han estat retocats pels geòlegs, geofísics, paleontòlegs i molts altres científics. Nous conceptes, com els d'estratificació dinàmica, esquerdes subductives, punts calents, advecció, plomes i superplomes, litoferoclasts o terrenys, relleus intraplaca, etc., agafen protagonisme, mentre que uns altres, com les dorsals oceàniques i la astenosfera, són destronats o perden importància. Probablement, el canvi principal entre la formulació clàssica de la teoria i la seva definició actual sigui que la tomografia sísmica ha demostrat que la convecció es produeix a través de tot el mantell, però que no ho fa en forma de cèl·lules

organitzades, sinó com corrents caòtics de geometria complexa: n'hi ha prou amb pensar que les zones de descens (o subducció) són lineals, mentre que els ascensos es produeixen en forma de columnes (els plomalls tèrmics que expliquen els anomenats punts calents o zones volcàniques en superfície).

És aquesta circulació general del mantell el que ha fet innecessari un concepte (la astenosfera, o nivell plàstic situat en el mantell superior) que va ser central en la fase clàssica de la teoria. La capa superficial rígida de la Terra (litosfera) no necessita aquest nivell per desferrar-se del mantell profund, perquè aquest també s'està movent. Quant a les dorsals oceàniques, els relleus submarins, el descobriment dels quals va ser un dels desencadenants de la revolució movilista, la tomografia sísmica ha demostrat que el seu vulcanisme no té arrels tèrmiques profundes en el mantell, pel que no deuen ser considerats els llocs per on puja la calor d'aquell, serien tan sols grans esquerdes que, al despressuritzar el mantell superior, facilitaríen la seva fusió, sense participar dels grans cicles convectius, reservats, com ja s'ha dit, als punts calents i les zones de subducció.

Una darrera modificació del model clàssic ha tingut lloc, com les anteriors, en la dècada dels 90. Es tracta de la resposta a una pregunta clàssica després de l'acceptació de la tectònica de plaques com model real de la dinàmica terrestre: des de quan funciona la màquina de reciclar litosfera? En els anys 70 i 80, la resposta més freqüent a aquesta qüestió era que la tectònica de plaques era una característica de la Terra moderna, que hauria començat, com molt, al principi del Proterozoic (fa uns 2.500 milions d'anys, Dt.), o sigui durant la meitat més recent de la seva història. El raonament semblava impecable: la Terra de l'Arcaic (més de 2.500 Dt.) estava massa calenta per a albergar una litosfera rígida; sense rigidesa les fractures són impossibles, i sense trencament no hi ha subducció. No obstant això, els avanços en els mètodes de datació i en la reconstrucció de regions altament metamorfitzades han duit a la conclusió, més aviat sorprenent, que les roques més antigues de la Terra (uns 3.850 Dt., en el Sud-oest de Groenlàndia), duen ja empremtes de la subducció, o sigui de la tectònica de plaques, que per tant sembla haver estat el règim dinàmic permanent d'aquest planeta.

### **II.3 La mesura de l'expansió en temps real de les plaques continentals**

Un altre dels avanços en la Geologia es refereix a l'estudi i coneixement de l'expansió en temps real de les plaques continentals. Fins fa molt poc temps, el moviment de les plaques només podia determinar-se a partir d'altres observacions, però no d'una forma directa. El moviment de les plaques s'inferia només de l'estudi dels vestigis del magnetisme en les roques, el que es denomina el paleomagnetisme. En els anys seixanta i inici dels setanta, la velocitat d'expansió de les plaques s'havia pogut calcular de forma aproximada suposant com era la geografia terrestre de fa milions d'anys, segons la posició dels continents i la seva distància actual. D'aquesta manera es va suposar que el desplaçament devia ser d'uns 6 cm per any.

Però després de les investigacions realitzades en els últims 25 anys, els geòlegs estan en disposició de mesurar la velocitat actual del desplaçament de les plaques continentals. Per a això, s'acudeix a l'estudi dels terratrèmols esdevinguts en la vora de les plaques. Amb aquesta finalitat, se sumen els desplaçaments que es produeixen en cada terratrèmol i per a tots els terratrèmols, durant un nombre d'anys suficientment gran. Dividint pel nombre d'anys, s'obté el desplaçament anual i per això la seva velocitat. Aquest mètode suposa que el moviment de les plaques es dona solament en forma brusca produint terratrèmols, el que es coneix com moviment cosísmic.

Però, com es pot mesurar el possible moviment lent i gradual de les plaques? Per això, les investigacions s'han dirigit cap al desenvolupament de tècniques de mesures reals de desplaçaments de les plaques. Però per a mesurar aquests desplaçaments amb exactitud de menys d'un centímetre no era, fins fa molt poc, possible. Les mesures geodèsiques per triangulació són molt laborioses i poc precises. Les mesures modernes de geodèsia espacial permeten determinar pràcticament en temps real, la velocitat de les plaques.

L'estudi dels paràmetres de la Terra per a la Geologia Global ha estat facilitada en aquests últims anys amb l'ús cada vegada més generalitzat dels sistemes GPS. Els detectors GPS són aparells petits, de fàcil transport i preparats per a realitzar campanyes de mesures en molts punts. Les mesures donen la posició de cada punt sobre el mapa de la Terra amb una exactitud de mil·límetres referida a un sistema convencional fix de referència. La repetició d'aquestes mesures permet en pocs anys determinar, a través d'una anàlisi molt rigorosa encara que bastant complicat, el camp de velocitats relatives d'una certa regió que donen la magnitud de desplaçament anual i la seva direcció.

Amb la precisió creixent de les mesures del sistema GPS, augmenta també la precisió de la mesura de la velocitat del moviment de les plaques tectòniques. Per exemple, d'acord amb els càlculs efectuats fins a la data, les deformacions en l'interior d'Europa mesurades directament per aquests mètodes varien entre 2 i 5 mm per any. I en el sud de la península Ibèrica, sumant els desplaçaments produïts pels terratrèmols del segle XX, s'obtenen velocitats de desplaçament respecte a Àfrica d'entre 0.6 i 5.5 mm per any.

#### **II.4 La construcció d'un paradigma interdisciplinar: les ciències de la Terra**

La perspectiva sistèmica ha fet als geòlegs establir ponts amb altres disciplines per a constituir el que hem anomenat "Ciències de la Terra", una nova disciplina omnicomprensiva construïda des del paradigma sistèmic, dinàmic, i no necessàriament gradualista. Això no és tan nou, ja que ja estava present en el treball citat de Tuzo Wilson de 1968. La tectònica de plaques va revolucionar tot el paradigma de la geologia i ha permès, entre altres coses, elaborar síntesis globals de l'evolució biològica al costat de la geològica. La integració conceptual i metodològica de moltes ciències (des de la física a la meteorologia passant per les ciències de la computació) ha donat lloc a l'emergència d'una disciplina a la qual alguns denominen Geologia Global. L'intent és la consideració del planeta Terra com sistema energètic en el context de l'univers.

#### **II.5 La geoplanetologia, disciplina emergent en les ciències de la Terra**

En aquests vint-i-cinc anys (1978-2003), ha aparegut una nova disciplina de les ciències de la Terra, ens referim a la geoplanetologia. Els astrofísics indaguen els secrets recòndits de l'univers i les seves implicacions per al futur de la humanitat. Des del punt de vista de les ciències de la Terra, la història moderna de la geologia mostra que les principals aportacions de les ciències planetàries han estat les següents:

- a) D'una banda, subratllar la unitat del sistema de reciclatge litosfèric (tectònica de plaques) que exhibeix el nostre planeta. Ni Venus ni Mart mostren cap tret explicable segons l'esquema familiar de creació-destrucció de litosfera, encara que han pogut presentar-los en el seu passat geològic.
- b) La segona aportació ha estat ponderar la influència dels esdeveniments colisius en l'origen i evolució de la vida en la Terra. Sorgida durant una etapa de probable bombardeig asteroidal, la vida s'ha aferrat al planeta contra tota probabilitat, i pel que sembla ha estat modelada de forma aleatòria per factors externs, entre els quals les col·lisions d'asteroides i estels han pogut jugar un paper fonamental. D'aquestes consideracions ha sorgit una nova disciplina científica, la Astrobiologia.
- c) La tercera aportació es refereix a la resposta a una pregunta intrigant, que sorgeix de relacionar les dues anteriors: És casual que l'únic planeta conegut on ha sorgit la vida sigui també l'únic que recicla la seva litosfera? En altres paraules, és la tectònica de plaques un factor decisiu per a la vida planetària?

#### **II. 6 Noves perspectives per a temps nous: la geologia i el medi ambient**

En l'any 1972 va tenir lloc a Estocolm la que va ser anomenada "Primera cimera de la Terra" convocada per l'ONU amb el títol de "Una sola Terra". En ella es va reflexionar per primera vegada sobre la internacionalització i la globalització dels problemes ambientals, econòmics i socials del planeta. Les referències a les dimensions geològiques dels problemes són freqüents. Des de llavors, els científics i els polítics són conscients que l'impacte humà sobre el planeta cobra tons dramàtics. Les consideracions geològiques sobre els problemes de ciències de la Terra, la tecnologia i la societat estan desenvolupades en diverses fonts. Aquest procés ha fet que els científics (i els geòlegs en particular) s'anessin interessant cada vegada més pels problemes ètics de la ciència.

#### **II. 7 La paleontologia revoluciona les ciències de la vida**

Els paleontòlegs solen defensar que la paleontologia avui ha adquirit el seu status de paradigma autònom respecte a les ciències de la Terra i les ciències de la vida. Això no impedeix que els avanços de la paleontologia tinguin el seu lloc en la consideració històrica del

planeta Terra. En particular, la paleontologia ha estat determinant en la introducció dels paradigmes evolucionistes en les ciències de la Terra. De tots és conegut que la paleontologia neix amb Georges Cuvier i es consolida com ciència històrica amb Darwin. L'anomenat "debat darwinista" va omplir amb les seves polèmiques una bona part dels últims 40 anys del segle XIX. Pels anys 30 s'introdueix la genètica de poblacions en el pensament científic i apareix l'anomenada "Nova Síntesi" o "Teoria Sintètica de l'Evolució". Se sol considerar a Theodosius Dobzhanski (1900-1975) com el "pare" de la nova síntesi, juntament amb l'ornitòleg Erns Mayr, el botànic Stebbins i el paleontòleg George Gaylord Simpson, entre altres.

Part del debat internacional sobre la nova paleontologia va tenir lloc durant el primer Simposi Internacional sobre el concepte i el mètode de la Paleontologia (Barcelona, 1980). Les seves aportacions han estat assenyalades per molts paleontòlegs, doncs entre altres conclusions, en ell es reelaboren nous conceptes paleobiològics per a la macroevolució i per a l'adaptació biològica. La tesi fonamental d'aquest model és la proposta que les pautes i patrons de l'evolució no són "graduals", sinó que es tracta de canvis intermitents de ritme evolutiu. Per a aquests autors (i molts paleobiològics avui) el procés de l'evolució no posseeix un ritme lent, gradual i continu de canvi com postulaven Darwin i els partidaris de la Nova Síntesi. Per al nou model, les espècies mostren (tal com es contrasta en el registre fòssil) llargs períodes de "aturada morfològica" en el qual no hi ha canvis significatius, seguits de breus períodes de canvi morfològic sobtat en el conjunt de la població, de manera que la especiació és un procés relativament ràpid.

Aquest debat està molt relacionat amb un altre dels moderns problemes geològics i paleontològics, com és el de l'extinció catastròfica i episòdica d'espècies biològiques. Per al darwinisme clàssic i la Nova Síntesi, l'extinció de les espècies al llarg del dilatat temps geològic és un fet. Però és una extinció "de fons", gradual i lenta, sense "catàstrofes" ni "crisis biològiques" generalitzades. Dades procedents de l'astrofísica mostren avui que els ritmes d'extinció de fauna i flora tenen ritmes catastròfics amb una certa periodicitat (uns 28 milions d'anys) que podria coincidir amb el pas del Sistema Solar per la proximitat del núvol de Oort i l'impacte d'asteroides sobre la superfície dels planetes. El debat s'estableix entre els partidaris de l'anomenada extinció gradual enfront dels quals defensen un model d'extinció episòdica.

Aquests plantejaments han donat lloc a l'emergència d'una nova hipòtesi explicativa dels processos evolutius i, en el nostre cas, d'extinció biològica: el que denominem paradigma evolucionista "neocatastrofisme".

### **III. Conclusions**

Ens proposàvem a l'inici d'aquest treball transitar pels nous coneixements i els nous paradigmes que s'han succeït en la geologia en els últims 25 anys, entre 1978 i 2003. Ens semblava necessari situar aquests sabers dintre del context del que va ser el desenvolupament de les ciències de la Terra en el segle XIX, amb l'adveniment dels grans principis amb els quals Hutton i Lyell construïren els pilars metodològics de la geologia.

En el passat la incipient comunitat científica dels geòlegs espanyols, situats en general al marge de les institucions universitàries, va assimilar amb rapidesa les innovacions que venien d'Europa encara que sense aportar grans novetats científiques. L'acceptació d'aquestes propostes científiques es va perllongar sense dificultat fins als anys setanta en els quals noves institucions científiques van recollir l'herència dels nous coneixements i paradigmes arribats de més enllà de les fronteres.

Finalment, ens hem detingut especialment en alguns nuclis de coneixements geològics que més mutacions han sofert en aquests anys i que encara tenen molts problemes oberts. Tales són els avanços en el coneixement dels processos interns de la Terra i el disseny de la tectònica de plaques, els avanços en Geologia Global i en les relacions entre les Ciències de la Terra i el Medi ambient, la geoplanetologia i la nova paleontologia emergent en aquests anys.