

## DIFICULTATS INHERENTS A LA PREDICCIÓ ECOLÒGICA

RAMON MARGALEF

*Departament d'Ecologia, Universitat de Barcelona*

### INTRODUCCIÓ

Un dels desigs de l'ecologia és identificar l'estructura en el temps dels sistemes ecològics i utilitzar el coneixement que se'n deriva per a la predicció. Conegut el mecanisme de canvi en un sistema, a partir de la situació actual podríem deduir un futur pròxim. Sembla que la capacitat de predir podria ser una expressió del seny de la humanitat i fins es pensa que podria ser apte per augmentar el benestar. Per això l'ecologia, i sobre tot l'ecologisme, són donats a la profecia, no sempre falaguera. Segurament la predicció ecològica ofereix encara més dificultats que el pronòstic del temps que farà demà, o demà passat, que no és tasca senzilla ni té massa èxit. En realitat són part i expressió del mateix problema.

En aquesta comunicació em proposo usar el tema de la predicció, que per ell mateix ara no ofereix, com he dit, gran cosa, com a excusa per examinar breument quatre temes que en són previs: 1) La combinació constant de la successió ecològica, com a procés autoorganitzador, amb retorns de caràcter catastròfic que segueixen a repetides perturbacions imprevistes. 2) La validesa general d'aquesta antinòmia, i com es

reflexeï en l'experiment imaginari del «gat de Schrödinger». 3) La importància de mecanismes o artefactes que combinen o amplifiquen les perturbacions, construïts pels propis sistemes en evolució o en successió. 4) En els canvis que se suposen cíclics i regulars, la tornada mai és com l'anada presa en sentit invers.

La selecció natural és un dels conceptes més bàsics i profunds en biologia; explica la composició per espècies de les comunitats naturals, i ens dóna el mecanisme que empeny i guia l'evolució de les espècies. Juntament amb el mecanisme de còpia i transmissió d'informació, que ha estat identificat per la biologia molecular, la selecció natural esdevé un component essencial en qualsevol visió racional del món viu. Estableix una distinció clara, que pot ser paradigmàtica, entre la naturalesa indeterminada de la mutació —i el seu equivalent a qualsevol nivell— i la selecció natural, que depèn de les propietats dels organismes, i, en general, de l'organització més àmplia on el sistema sotmès a la selecció natural està encaixat. El canvi és, per tant, condicionat i, generalment, fet més lent per l'organització pre-existent en el món.

Com a base del present comentari, la

substància del paràgraf precedent es pot reestructurar en forma de tres proposicions: 1) Els sistemes vivents han tingut molt d'èxit en recuperar, en forma d'informació usable (amb un problema substancial i insoluble de la seva mesura), una part important de la informació equivalent a l'entropia produïda en el sistema i entorn d'ell. 2) Els sistemes portadors d'informació, si poden fer còpies barates d'ells mateixos, enteres o parcials, augmenten les seves probabilitats d'èxit. Així s'explica l'expansió de tota la classe de sistemes fets per subsistemes reproduïbles per ells mateixos (organismes) o per algun agent extern (paraules, màquines, virus). 3) La selecció natural utilitza informació barata, que es reproduïx de manera poc costosa, i per aquesta raó no sembla cara i no ho és. Utilitza assenyadament una fracció de les morts que de totes maneres es produïrien fatalment i que ja estan previstes.

Tractarem de resoldre alguns caps per lligar que deixen les aproximacions usals, i que semblen penjar per fora en tots els desitjos de copsar intel·ligiblement el nostre entorn. Molts d'ells, per dissort, no s'acostumen a tenir en compte en la major part de les consideracions que es fan dels problemes ecològics. Entre ells hi ha: 1) El contrast que existeix entre els canvis més quotidians, que són lents i autoorganitzats, i la resposta a la pertorbació, que és més sobtada i sol consistir en una simplificació de l'estructura. Aquests dos components del canvi vénen a aser com el punt i el contrapunt de la dinàmica ecològica. 2) L'absència general de reversibilitat en els canvis dels sistemes complexos, que queda prou ben expressada en les matrius de les probabilitats de transició entre els diversos estats diferenciats i que té les seves arrels en la termodinàmica. 3) Hi ha una certa regularitat entre la freqüència i la intensitat de les pertorbacions, en el sentit que les més enèrgiques semblen ocórrer amb menys freqüència. 4) Es completament desencoratjador fer simulacions sobre aquesta base, suposant que les pertorbacions colpeixen a l'atzar, sense altra regularitat que la dita. La predicció no sembla

possible. 5) Les distribucions en l'espai (especialment fàcils de copsar en ecosistemes pelàgics, de dinàmica molt ràpida a la nostra escala) permeten reconèixer tipus de relacions topològiques i d'asimetries que es repeteixen arreu i que mereixen un estudi acurat.

La presentació i debat es referirà a la manera de concebre i modelar sistemes dinàmics, compostos de subsistemes reproduïbles i immersos en una matriu física. Es una classe de sistemes molt freqüents i molt importants, i van des d'organismes i cervells a ecosistemes, comprenent també els llenguatges, les màquines en general i, especialment, les formades de parts modulars, i sistemes de comunicació. La naturalesa, molt vasta i prenys del tema, ha de moure'ns a procedir prudentment, ja que és difícil de concebre com una part d'un sistema, i per cert amb totes les propietats de part reproduïble i fàcilment substituïble, pugui produir una representació sensible i raonablement completa del sistema major del qual forma part. Però en el tempteig envers el coneixement de la naturalesa sembla probable que els primers passos siguin relativament més profitosos, com a conseqüència d'una aplicació del principi molt general de rendiments decreixents. De manera que podem començar el recorregut d'una sèrie d'aproximacions recurrents amb una certa esperança. El cervell és més aviat un òrgan de supervivència que no pas de coneixement, encara que supervivència i coneixement poden anar associats. Amb tarannà optimista cal prendre algunes precaucions per compensar les més paleses fonts d'errors.

El problema particular i més important en ecologia que proposo per examen és la falta d'uniformitat en els processos de canvi en el temps, tal com es perceben als diversos nivells de la vida, individus, espècies i, principalment, ecosistemes, tots ells sistemes que creixen i es desenvolupen per ells mateixos. La mida i la divisibilitat són caràcters importants; la mida es refereix a les dimensions a les quals es manifesta el comportament unificat. Aquest és important en els planetes, on la rigidesa mecànica interfer-

eix amb forces mareals. Molt més important és la unitat funcional en els objectes biològics. Les superfícies que limiten els objectes unificats o rígids són un lloc on els organismes es troben en desequilibri en relació a l'entorn. És aquí on s'aplica la termodinàmica de sistemes fora d'equilibri.

## INDETERMINISME I ORGANITZACIÓ. UN GAT MODÈLIC

Cadenes causals poden disparar-se per esdeveniments microfísics que mai podrem esbrinar del tot. Tingué certa celebritat un experiment imaginat, nascut de les discussions entre Bohr i Schrödinger i que aquest (1935) comentà amb més detall, fins al punt que se'l coneix com el «cas del gat de Schrödinger». Suposen un gat tancat en una capsa que conté també un comptador Geiger i una font feble de radioactivitat, així com un mecanisme complicat que, si el comptador es dispara, mata el gat. La qüestió que l'experiment —bastant estúpid, tanmateix— hauria de dilucidar és si el gat no es pot suposar viu o mort, fins que algú obre la capsa i comprova la realitat d'allò que solament era una sospita. És a dir, la confirmació *a posteriori* del que *a priori* era una probabilitat. Una modalitat més educativa del mateix experiment podria imaginar Déu obrint la tapa de la seva gran capsa negra, per comprovar si hi ha l'Univers o bé res, o, si ja sap que hi ha un Univers, obrir-la més tard per veure si l'home ja s'ha fet miques o segueix fent la viu-viu. La qüestió és que el gat —o jo— portem una vida el curs de la qual es pot predir fins a cert punt, i que acaba d'una manera que sembla qualitativament diferent dels esdeveniments aproximadament previsibles en la quotidianitat. Jo diria que el biòleg s'interesa més pels lligams construïts per la història, tant la màquina amplificadora mata-gats, com, naturalment, el pobre gat, que per la visió d'un déu jugant a daus a l'entrada de la màquina, una imatge que pot ser vàlida com a referència a l'espectre de les pertorbacions —

que sempre és provisional i, si es vol, expressió d'una ignorància—. Observador, gat, i màquina de matar gats són (som) artefactes històrics. En tot cas l'esdevenir en els sistemes molt organitzats se'ns presenta asimètric, i la història del gat de Schrödinger posa en valor el drama del desempar davant del fat. Aquesta asimetria és de la mateixa naturalesa que la que s'observa entre entitats diverses en mida i en duració de vida, és a dir, en capacitat de manejar informació. Per no sortir d'un esquema general, pensem en la relació del gat i el ratolí, del model ecològic que he anomenat de «Tom i Jerry».

Aquell experiment imaginari —i tan real!— ens fa pensar en la complexitat i la mida de les màquines construïdes per posar de manifest esdeveniments isolats a nivell de partícules elementals. Sense el gat, sense els grans acceleradors, cambres de col·lisió i detectors, els esdeveniments van a la seva i pot ser indiferent dir si són determinats o indeterminats. El que és important és la construcció de la màquina que pot assimilar i eventualment amplificar els seus efectes, en un sentit, diguem-ne, *positiu* —no saltres som organismes o màquines molt complicats i hem de valorar-nos com a tals. Les conseqüències d'un esdeveniment elemental, per ell mateix sense qualitat, depenen de la naturalesa de la màquina amplificadora. El mecanisme d'amplificació no és innocent, ha estat construït per l'evolució que ha afavorit descaradament certes formes de traducció, de la incertitud elemental a una relativa definició macrosòpica. No es podria construir un món solament amb successos aleatoris, i prou. Inevitablement s'acumula informació —és la propietat més meravellosa del món, l'aspecte positiu de la llei d'entropia —que permet construir l'organisme o la màquina, i fins el món, que treballa amb entrades que, per elementals, podem veure com indeterminades, si volem. L'important és construir organismes, màquines, que suporten i manipulen informació, encara que, de fet, són alimentats pels esdeveniments elementals que no hi ha cap inconvenient en acceptar com a aleatoris.



## ASIMETRIES TEMPORALS EN ECOLOGIA. SOBRE LA MEMÒRIA I DIFERENCIABILITAT DELS SISTEMES

Hi ha una asimetria evident entre creixement i autoorganització (anticipables des de l'interior dels mateixos sistemes en desenvolupament) i la inesperada caiguda en el buit. Això ens permet una classificació del canvi en els ecosistemes. En un extrem, el canvi és controlat des de l'interior del propi sistema, i la tendència general es pot resumir en termes d'autoorganització, o per seguir certes regles generals de successió ecològica que s'ajusten a les prediccions locals de la termodinàmica en referència a sistemes oberts i dissipatius, fora d'equilibri. Tendeixen a caure en estats que minimitzen el bescanvi d'energia amb l'exterior, referida sempre a la massa (biomassa) o a la informació acumulada. Aquest bescanvi d'energia guarda proporcionalitat amb l'augment d'entropia en el sistema i perifèria immediata. En un altre extrem tenim els esdeveniments que no es poden anticipar des del nostre migrat sistema de referència, i que es poden considerar, des d'ell, com si fossin al'atzar, tant per la seva intensitat com pel precís moment en què es manifesten. En el cas límit serien comparables a les desintegracions dels àtoms radiactius dintre la capsa on està tancat el gat de Schrödinger.

Quan volem representar el canvi en sistemes complicats, com són els ecosistemes, pot ser convenient fer-ho per una matriu que defineix les probabilitats de transició entre cada parell d'estats, dintre d'un llistat general—i segurament incomplet— de tots els estats possibles del sistema que considerem. És clar que la delimitació o definició dels diferents estats és una altra qüestió no pas senzilla, però no forma part essencial de la problemàtica debatuda en aquestes pàgines. Un exemple n'és la matriu de Leslie usada en demografia. Els individus poden créixer o seguir vivint, o morir. El que no poden fer és continuar idèntics a ells mateixos, ni avançar l'equivalent a dos o més anys en el temps d'un any. Anàlogament, cap ecosistema pot conti-

nuar actiu mantenint exactament la mateixa organització, i una espècie rarament es propagarà sense evolucionar. L'evolució és tal, que la vida no pot existir sense evolucionar. Aquest és un tema amb una importància que excedeix de molt l'objectiu d'aquestes ratlles.

Una altra matriu exemplar, usada en ecologia, descriu les probabilitats de transició entre diferents comunitats que es troben lligades en un procés de successió ecològica. Evidentment, es tracta d'un continu immensament diversificat, i ara farem abstracció dels problemes involucrats en la definició i classificació de tipus de comunitats, que, en tot cas, no són més que una aproximació a la tasca d'ordenar un nombre infinit de variants, sense que es manifesti la tendència, molt útil a efectes de la classificació, que es troba a nivell de les espècies biològiques, que les fa caure en tipus discontinus per diverses raons, que tenen molt a veure amb la reproducció i la sexualitat.

L'asimetria general d'aquestes matrius es relaciona conceptualment amb el fet que en un sistema material cap cicle ni cap fluctuació es fan amb simetria. El desplaçament en un sentit es pot anticipar més o menys bé, en funció de mecanismes determinables, i generalment se l'associa amb la tendència a esdevenir més complicat, mentre que el camí de retorn és com la caiguda en un desconegut sense límits i matemàticament no és diferenciable.

Continuant aquest enfocament els sistemes poden ser representats o projectats en un espai ideal de fase, amb unes dimensions que corresponen a descriptors escollits. Així, per exemple, l'eutrofització d'un llac, seguida d'una eventual recuperació, es pot representar en un pla amb unes dimensions que representen, respectivament, la càrrega de fòsfor i la concentració de clorofil·la en zona fòtica (Klein, 1988). La trajectòria és una baga i no pas una línia senzilla, perquè el camí de tornada no coincideix amb el d'anada. La recuperació no és l'invers de l'eutrofització. D'aplicacions similars n'hi ha moltes: Volum d'aigua escolada i materials dissolts en ella, després d'una pluja o

en embassaments temporals (Syvitski, Burrell i Skei, 1986); flux i pH (Cresser i Edwards, 1987); temperatura superficial d'un llac i calor acumulada en la columna d'aigua per unitat de superfície; producció i biomassa; intensitat d'explotació —o, alternativament, alimentació forçada— i la relació  $f$  entre producció nova i producció reciclada; covariància entre els factors més directes de producció i la difusió turbulenta en l'aigua (Margalef, 1989); canvis estacionals en les relacions entre nombre d'espècies i nombres d'individus (diversitat); o en les relacions entre connectància i diversitat.

L'ús de relacions com les esmentades per extreure'n conclusions quantitatives, resulta més eloqüent quan els gràfics comparen un descriptor extensiu (com massa, biomassa, nombre d'individus) amb un descriptor intensiu o estructural (estratificació, nombre d'espècies, connectivitat, etc.). En termes generals, es reconeixen fenòmens d'inèrcia o d'histeresi. És clar que les bagues o llaçades principals poden contenir-ne altres de secundàries, i les voltes successives, que corresponen a una cadena de fluctuacions, encara que puguin mantenir forma i proporcions semblants, sovint es troben relativament corregudes o desplaçades amb referència als valors dels descriptors escollits. L'espai (que ordinàriament serà una superfície) limitat per la representació de la trajectòria ideal descrita pel sistema és una mesura del treball realitzat quan se segueix el cicle complet. Aquesta propietat té implicacions pràctiques: En un procés de contaminació i d'eventual millora ulterior, la referida superfície limitada pot ser propiciosa al cost de l'operació completa.

Ja que aquesta és la situació general, una descripció correcta hauria d'evitar l'ús de regressions estadístiques senzilles ( $y \neq f(x)$ ) i fer referència explícita a la història ( $y = f(x, dx/dt)$ ). Per exemple, una mateixa biomassa (expressable en Joules) es pot relacionar amb diverses energies (expressades en Watts), segons que els processos ecològics accelerin o desaccelerïn, o bé si les poblacions estan augmentant o disminuint. N'hi ha prou comparant els nostres

ecosistemes de primavera i tardor. Tan sols les entitats i sistemes no materials (com els fotons) oscil·len de manera perfecta i seguirien, en sentits oposats, la mateixa ratlla en un diagrama com els comentats. El traçat de la línia que descriu els canvis en poblacions reals o en ecosistemes enters pot ser molt divers, separant-se poc d'una recta idealment comuna, o més correntment en forma de corba tancada, o bé com un llaç obert, que inclou un segment no diferenciable, i fins i tot no existent, que representa la caiguda al buit. O la mort, si el gràfic fa referència a la vida individual, a propòsit d'aquesta representació s'ha d'afegir que solament els turbel·laris poden tornar enrere, disminuint considerablement la seva mida, però, així i tot, en els mateixos animals la comparació entre la massa del teixit nerviós, enfront la biomassa total, mostra que els trajectes d'anada i de retorn mai són iguals. Quan les corbes inclouen segments no diferenciables, és interessant explorar les possibles connexions amb el concepte de caos.

Si hom considera un sistema en la seva extensió en un espai heterogeni, com és, per exemple, el fitoplàncton estudiat al llarg d'un transecte, les formes de les bagues que descriuen els canvis en les poblacions sembla que hauran de variar d'un punt a un altre. Si els canvis fossin regulars, potser podríem posar  $y = (x, dx/dy, dx/dL)$ , essent  $L$  una dimensió en l'espai real. Probablement serà aconsellable en molts casos recórrer a l'ús de nombres complexos, inspirant-nos en una aproximació de Volohosnyk (1985, 1986) a un problema semblant. La introducció de nombres complexos pot ser molt superior a l'estadística de consuetud, pel que fa referència a la dinàmica dels ecosistemes, i podria aportar a una apreciació més realista de la noció de caos.

Les implicacions termodinàmiques són òbvies i en un tempteig de descripció complementària ho podríem associar amb l'adquisició —o la pèrdua, en el retorn— de diferents menes de memòria. En les poblacions, l'autoorganització és el creixement individual, i el retorn és la mort, que colpeix els individus a l'atzar. En la successió ecològica, l'aspecte



equivalent és l'asimetria de la matriu de les probabilitats de transició, bàsicament la diferència entre el creixement d'un bosc i un foc o una estassada que torna el sistema a la casella inicial. En l'evolució, les coses poden ser menys comparables, però sempre hi ha una asimetria fonamental entre la continuïtat i l'extinció, així com una diferència entre la preservació de característiques arcaïques i l'adquisició de noves, com els cladistes destaquen. El resultat històric del procés evolutiu quedaria reflectit característicament en l'asimetria que tenen els arbres filètics. La mateixa asimetria apareix en la diferència entre macroevolució (canvi ràpid) i micro-evolució (fer temps en un lloc), o entre puntuació i *stasis*, si aquesta manera d'expressar-se és preferida.

### POSSIBLES REGULARITATS EN LES PERTORBACIONS

Si el problema que ens proposem és la predicció, ens hem de basar en la tendència a l'autoorganització, que a nivell d'ecosistemes podem retrobar en les tendències de la successió ecològica, vistes i interpretades de maneres molt diverses, i fonamentalment en un augment de la complexitat i un descens del flux relatiu d'energia (P/B). Mai no es pot anar massa enllà per causa de les pertorbacions. Hi ha pertorbacions de naturalesa molt diversa, el seu tret comú és que podríem considerar-les imprevisibles des de l'interior del sistema. El gat de Schrödinger no pot anticipar la desintegració d'un àtom de la substància radioactiva. És evident que si les pertorbacions menudegen, com en una tartera o en un lloc o part de mar sotmesa a repetits processos de barreja vertical de l'aigua, el procés d'autoorganització, la successió ecològica en aquest cas, no pot avançar gaire, i es tenen comunitats properes a les inicials, més generalitzades. En la regió atemperada, tant els canvis estacionals com el pas dels fronts atmosfèrics són una font seguida de pertorbacions moderades, que mantenen sistemes no

massa complexos i sempre preparats a una reconstrucció moderada, sempre productius. Altrament, en llocs de clima càlid i condicions generals menys variables, els ecosistemes arriben a graus molt avançats de complexitat, amb un excedent de producció negligible, com en la selva tropical humida i en els baixos de corall.

Si les pertorbacions es quantifiquen i caracteritzen per l'energia associada, hom arriba a identificar una tènue regularitat, en el setit que les pertorbacions més enèrgiques acostumen a ser menys freqüents que les considerem com a poc enèrgiques. Hi ha hagut un *big bang* únic, repetides glaciacions, i els canvis anuals i diaris es repeteixen amb major freqüència. En alguns casos es pot pensar que la forma de l'espectre es deu a què es tracta de pertorbacions semblants, però originades en punts distribuïts uniformement en un espai molt extens, en tot l'entorn, i els seus efectes són inversament proporcionals al quadrat de les respectives distàncies. Hi ha una altra possibilitat d'organització en la distribució en l'espai dels impactes de les pertorbacions, que es basa en mecanismes creats pels propis ecosistemes. Per exemple, en la interacció entre els grans rius que fan meandres i la vegetació terrestre, allí on la riba del riu retrocedeix apareixen faixes paral·leles amb les successives etapes de la successió, mentre que en el costat on el riu avança, talla simultàniament i perpendicular una sèrie d'etapes diverses, donant cos i realitat —tal com es veu de l'aire o de l'espai— a una matriu molt regular de probabilitats de transició.

Cap pertorbació té una freqüència absolutament regular, encara que seríem temptats de creure-ho en relació a alguns cicles còsmics (dies, anys). La desintegració d'un col·lectiu d'àtoms radioactius és exemplar perquè ens diu que la freqüència es manté, independentment de la identitat de cada un d'ells, i potser podríem trobar a aquest nivell una imatge del fet que les pertorbacions que incideixen sobre els ecosistemes i els fan tornar enrere, bé que conservin certa freqüència global, tenen el moment d'incidència indeterminat, i es pot escaure més aviat o

més tard, i això és molt important en el cas de les perturbacions molt intenses de freqüència molt baixa. La persistència de la successió, la *mania* organitzativa de la naturalesa s'encara amb un Univers que sembla totalment aleatori.

Suposem que en una regió definida, o a tota la Terra, és efectiu un determinat espectre de perturbació, i acceptem que el moment d'incidència de cada una de les perturbacions és indeterminat, conservant-se la freqüència total. Ara fem simulacions per veure la probabilitat que, en un lloc determinat, la successió ecològica arribi a cert estadi. Això dependrà d'encertar una sèrie més o menys llarga de perturbacions de poca importància, o bé una escala de perturbacions d'intensitat creixent. Tot seguit ens adonem que una predicció sobre un temps raonable és pràcticament impossible; i això que hem acceptat certes regularitats en l'espectre de perturbació. Si aquesta condició es treu, aleshores la predicció es demostra absolutament impossible.

## LA VIDA ASSIMILA MOLTES PERTORBACIONS

La pretesa regularitat en l'espectre de perturbacions és discutible. Les perturbacions més freqüents són de conseqüències poc greus senzillament com a conseqüència que la vida s'ha vist forçada a assimilar-les. Simplement hauria estat condició de supervivència per a l'espècie l'haver-les internalitzades, anticipant-les o trobant alguna manera de sobreviure a elles. Conrad (1983) presenta, en un sentit molt pertinent, des del punt de vista d'aquest article, la qüestió de l'adaptabilitat en termes d'adquisició d'informació. Els heteròtrofs poden sobreviure a la fosca, però és clar que els autòtrofs han hagut d'assimilar el ritme diari de radiació solar, que energèticament és cosa seriosa, però s'hagué d'assimilar com a condició necessària d'existència. Hom pot suposar, a més, que el ritme dia-nit ha estat molt important des del mateix origen de la vida, per fixar la mida

mínima i la duració mínima de la vida individual dels organismes—en diferenciar-se individus. El període fosc proporcionarà oportunitats suplementàries per al desenvolupament de la vida heterotròfica.

La gradual superació dels obstacles es pot elevar a la categoria de principi general, que es podria anomenar de Sagan, encara que aquest solament el comenta, segons em sembla, de manera incidental (Sagan, 1975). Abreujant, es podria dir que cada sistema es caracteritza per una energia associada als lligams que el mantenen coherent. En relació amb tal energia, les entrades associades amb les perturbacions es poden classificar en dos grups, segons estiguin per damunt o per sota. Les energies més intenses desorganitzen el sistema, però el sistema frueix en benefici propi de l'energia associada amb les perturbacions menors. Pensem que vents o pluges violents poden perjudicar les plantes que estan per sota de certa mida, però els arbres d'estructura robusta treuen profit d'aquells fenòmens atmosfèrics.

Els naturalistes interessats en evolució han vist un repte en les perturbacions, que milloren els organismes per mitjà de la selecció natural, amb el resultat—raonablement esperable—que al llarg de la història de la vida s'ha produït un augment de la capacitat per resistir perturbacions: primer els canvis diaris, després el pas de les estacions de l'any, i ara l'home, probablement, podria sobreviure millor que abans una glaciació, mostrant al mateix temps la importància de l'evolució cultural, que ve a continuar l'evolució dita biològica. Aquests canvis s'expressen i es faciliten tot allargant la duració mitjana de la vida. És natural intentar estendre aquests punts de vista a tota l'extensió de la història de la vida. Raup i Sepkoski (1982) han suggerit que el descens en les taxes d'extinció d'espècies al llarg de la història de la terra pot reflectir un augment generalitzat de l'adequació darwiniana, amb internalització progressiva (anticipació o indiferència, en relació amb el món extern) de perturbacions, assimilació que progressivament va incloent perturbacions cada vegada més



enèrgiques. L'evolució cultural, que és evolució, ve a reforçar la mateixa tendència. Es el resultat esperable del joc històric entre la vida i el seu entorn, i mostra la constructivitat de la vida que comentàvem al principi: el gat, l'artefacte matagats i l'observador, enfront de l'esdeveniment elemental o no compost de l'Univers.

### **UN PROBLEMA INVERS. COM ES POT CONSTRUIR UNA PERTORBACIÓ CONVENIENT**

Sembla que hi ha un mecanisme espontani que recupera una part del que en diem entropia en forma d'una organització, que canalitzarà més efectivament l'energia disponible en el futur. Aquesta energia es veu com a petites pertorbacions, i elles s'integren en relació amb algun propòsit que neix en el si de la màquina o organisme en qüestió. Però altres mecanismes paral·lels generen pertorbacions més enèrgiques, i sovint un organisme es pot veure com a causa de pertorbació per un altre, com el gat al ratolí. En ecologia és molt important entendre la configuració de pertorbacions majors, de quina manera es generen o es modifiquen per mecanismes entenedors d'acumulació d'informació. Hi ha un exercici interessant en tractar de reconstruir pertorbacions importants que ocorregueren en el passat i que evidentment no foren senzilles.

Avui dia tenim exemples en els incendis forestals, la intensitat dels quals pot ser en funció, no solament de la sequera, sinó també de l'acumulació de brolla i fusta morta, als quals s'ha d'afegir l'oportunitat que ens sembla més aleatòria, la de la guspira adient. Una qüestió semblant és la incidència de les pertorbacions culturals majors que anomenem guerres, regides per algun mecanisme que tindria de comú amb els incendis forestals el ser funció de la necromassa i artefactes exosomàtics acumulats. Això introduiria certa regularitat en la periodicitat dels focs, o en els cicles anomenats de Kondratiev (Goldstein, 1988). En fi, causes de pertorbacions

amb les quals cal comptar i que es podrien qualificar de semi-endògenes.

Raonaments semblants poden fer-se a propòsit de pertorbacions que ocorregueren en el passat. Les dificultats que hi ha en la reconstrucció de la història de la Terra i de la vida no són alienes a aquesta qüestió. Pensem en un exemple de pertorbació important i complexa, com és la transició del Cretaci al Paleogen (K-T). Sempre es pot invocar una col·lisió astral quan convingui, especialment quan no es té cap evidència directa. Però potser fou dependent de cascades internes de pertorbacions. És com en la interpretació de les glaciacions, on tenim una hipòtesi astronòmica que sembla més simple, i, matisant-la o substituint-la, la visió d'un oscil·lador intern al planeta. En relació amb la transició K-T és fàcil imaginar mecanismes complexos i interiors a la Terra. Per exemple: acumulació de CO<sub>2</sub> d'origen mixt, volcànic i biogen, en el fons d'oceans fortament estratificats —que ho eren—, fins al moment en què, en iniciar-se una circulació oceànica més activa amb components verticals més intensos (afloraments), com a resultats de canvis en la posició de plaques continentals, part dels oceans explotà literalment, segons el model prou demostrat en la catàstrofe de 1986 del llac africà Nyos. La gran quantitat de gas carbònic alliberat hauria pogut produir tsunamis i esclavissades al llarg de les costes, matar molts animals en àrees extenses i, més tard, afavorir el creixement de la vegetació terrestre, a través d'un efecte d'hivernacle.

La pressa amb què la nostra civilització crema els combustibles fòssils és un altre exemple de possible generació endògena de canvis importants i sobtats, com escau al que anomenem pertorbació. A escala geològica és un procés rapidíssim, que es podria veure com a instantani des d'un futur, si queden espectadors.

Tot això mostra com no només la vida ha augmentat el seu domini tot assimilant o internalitzant la cua de l'espectre de pertorbació, en la regió de major freqüència, sinó que a més apareix la possibilitat de combinar i amplifi-



car diverses possibilitats i així contribuir a pics que corresponen a la secció de baixa freqüència —i alta intensitat— de l'espectre de perturbacions.

## RECORDAR I OBLIDAR

A nivells molt diversos retrobem el joc entre la autoorganització —que és recordar— i el retrocés que porta a recomençar la construcció —que seria oblidar—. Aquesta oposició és molt general i es manifesta a diversos nivells. Proposo que pensem en un depredador que ataca preses potencials, entre les quals es troben espècies autoprotegides (els models aposemàtics) i d'altres mimètiques d'aquelles. En intentar menjar-se un individu protegit desperta una reacció de rebuig, que dura un temps durant el qual haurien estat possibles diverses interaccions; en aquest temps el depredador evita atacar altres aposemàtics o mimètics d'ells. Però per mantenir una eficiència convenient i obertes les possibilitats d'evolució, de tant en tant convé oblidar, assajar de nou, i veure què passa. La llargada de la sèrie d'individus evitats, després de l'experiència desagradable que es té en intentar menjar-se un individu protegit, es deu relacionar amb una sèrie de circumstàncies en el context de cada cas (Huheey, 1988).

L'important és oblidar, i provar de nou, i crec que això és un equivalent conceptual de la perturbació que recomença una successió, que no és més que una manera d'expressar com la naturalesa viva aprèn de l'entorn. Crec que és important trobar i entendre les connexions entre memòria, evolució i successió. Sovint s'ha parlat de relacions entre memòria i successió, de diverses maneres amb les quals rarament es pot estar d'acord; però aquí voldria insistir en la part negativa, en la importància que té esborrar part

del record. És essencial oblidar i procedir a una nova reconstrucció, i això també en qualsevol aproximació a la intel·ligència artificial. El pitjor que un sistema pot fer és tancar-se a l'entrada de nova informació, perill que amenaça els sistemes prou poderosos per negligir a seguir atents. La tasca de construir models ecològics i el conreu de la intel·ligència artificial comparteixen molts problemes i no solament la tasca humanitària de consolar-se mútuament per les seves insuficiències.

## BIBLIOGRAFIA

- CONRAD, M. (1983). *Adaptability: The signification of variability from molecule to ecosystem*. Nova York: Plenum.
- CRESSER, M.; A. EDWARDS (1987) *Acidification of freshwaters*. Cambridge Univ. Press.
- GOLDSTEIN, J. S. (1988). Mathematical models of Mimicry. A: Brower, L. P. (ed.), *Mimicry and the evolutionary process*. pp. 22-41. Univ. Chicago Press.
- FLEIN, G. (1988). «Ecodynamic changes in suburban lakes in Berlin during the restoration process after phosphate removal». A: Wolf, W.; C.-J. Soeder; F. R. Drepper (ed.), *Ecodynamics. Contributions to theoretical Ecology*. Springer Verlag, pàg. 138-145.
- MARGALEF, R. (1989). «Le plancton: Survivre et s'organiser dans un fluide mobile». A: *Océanologie: Actualité et Prospective*. Centre d'Océanologie de Marseille, pàg. 169-185.
- RAUP, D. M.; J. J. SEPKOSKI (1982). «Mass extinctions in the marine fossil record». *Science*, núm 215, pàg. 1501-1503.
- SAGAN, C. (1975). Full distribuït amb *Coevolution Quarterly*.
- SHRÖEDINGER, E. (1935). «The present situation in Quantum Mechanics, 5». *Naturwissenschaften*, núm. 23.
- SHRÖEDINGER, E. (1951). *Science and Humanism: Physics in our time*. Londres: Cambridge Univ. Press.
- SYVITSKI, J. P. M.; D. C. BURRELL; J. M. SKEI (1986). *Fjords. Processes and Products*. Springer Verlag.
- VOLOHONSKY, H. «Ecosystem's memory in the context of structural dynamics». *Ecological Modelling*, núm. 33, pàg. 59-75.