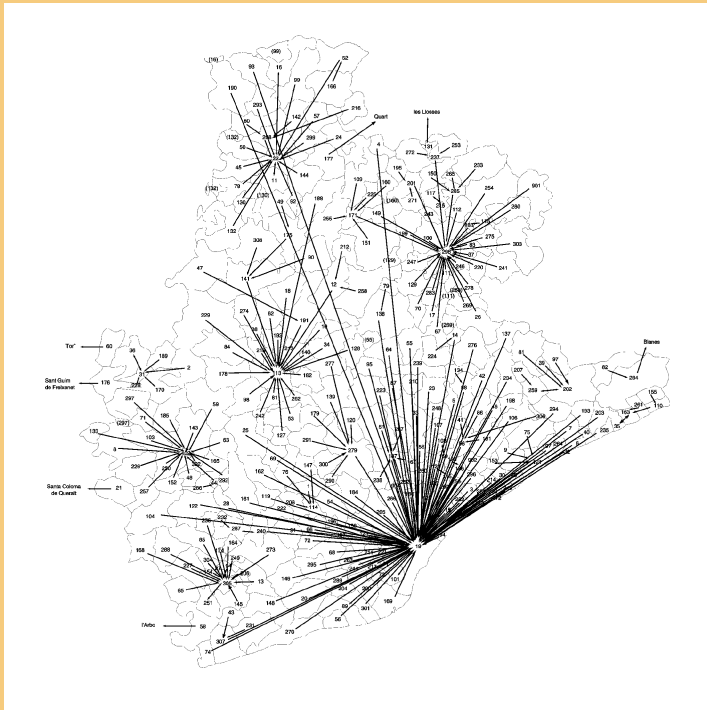


# AULA D'ECOLOGIA

CICLE DE CONFERÈNCIES  
2004



# AULA D'ECOLOGIA

ANNA ÀVILA I JAUME TERRADAS (EDS.)

# AULA D'ECOLOGIA

CICLE DE CONFERÈNCIES  
2004

Universitat Autònoma de Barcelona  
Servei de Publicacions  
Bellaterra, 2005

---

DADES CATALOGRÀFIQUES RECOMANADES PEL SERVEI DE BIBLIOTEQUES  
DE LA UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA

Aula d'Ecologia : cicle de conferències 2004 ; Anna Àvila, Jaume Terradas (eds.). — Bellaterra :  
Universitat Autònoma de Barcelona. Servei de Publicacions, 2005. — (Ciència i Tècnica ; 28. Ecologia)

ISBN 84-490-2393-9

I. Universitat Autònoma de Barcelona  
II. Col·lecció  
III. Àvila, Anna  
IV. Terradas, Jaume  
1. Diversitat biològica — Congressos  
502.3(063)

---

L'Aula d'Ecologia ha estat, en els cicles del 1996 al 2004, una iniciativa de l'Ajuntament  
de Barcelona i la Universitat Autònoma de Barcelona, que ha tingut el suport,  
en la coordinació i secretaria, del Centre de Recerca Ecològica i d'Aplicacions Forestals (CREAF).

**Director de l'Aula d'Ecologia**

Jaume Terradas i Serra, catedràtic d'Ecologia de la UAB

**Coordinadors per l'Ajuntament de Barcelona**

Txema Castiella i Viu, Margarita Parés i Rifà

**Preparació dels textos (resums de les ponències)**

Anna Àvila (CREAF)

**Coordinació de les sessions**

Pilar Andrés (CREAF)

Anna Àvila (CREAF)

**Il·lustració de la coberta**

Mapa de mobilitat extramunicipal  
per motiu de treball

Elaboració: Joan López Redondo

**Composició**

Medusa

**Edició i impressió**

Universitat Autònoma de Barcelona

Servei de Publicacions

08193 Bellaterra (Barcelona). Spain

Tel. 93 581 10 22. Fax 93 581 32 39

sp@uab.es

<http://blues.uab.es/publicacions>

ISBN 84-490-2393-9

Dipòsit legal: B. 11.456-2005

Impress a Espanya. Printed in Spain

Impress en paper ecològic



Aquesta publicació no pot ser reproduïda, ni totalment ni parcialment, ni enregistrada en, o transmesa per,  
un sistema de recuperació d'informació, en cap forma ni per cap mitjà, sia fotomecànic, fotoquímich, electrònic,  
per fotocòpia o per qualsevol altre, sense el permís previ de l'editor.

# Índex

- 9-11 Pròleg, per Jaume Terradas i Serra  
13-14 Ponents i programa de l'Aula d'Ecologia de l'any 2004

## **Novè cicle de conferències 2004**

- 15-29 **David Jou**  
Les lleis de la complexitat
- 31-38 **Jaume Baguñà**  
Complexitat i control en el desenvolupament embrionari
- 39-44 **Joan López Redondo**  
Xarxes de mobilitat
- 45-52 **Josep Piñol**  
Models senzills per entendre sistemes ecològics complexos
- 53-60 **Josep M. Garrell**  
Intel·ligència artificial
- 61-65 **Martí Domínguez**  
Art, ciència i complexitat
- 67-75 **Narcís Prat**  
El Pla Hidrològic Nacional: un cas de no-apreciació de la complexitat
- 77-82 **Nolasc Acarin**  
El cervell i la complexitat de la conducta humana
- 83-87 **Pedro Jordano**  
Complexitat dels ecosistemes: l'arquitectura de la biodiversitat

## Pròleg

Jaume Terradas i Serra

Catedràtic d'Ecologia de la Universitat Autònoma de Barcelona  
i director de l'Aula d'Ecologia

Aquest és el setè volum de resums de les conferències fetes a l'Aula d'Ecologia, que organitza l'Ajuntament de Barcelona juntament amb la Universitat Autònoma de Barcelona, i amb la cooperació del Centre de Recerca Ecològica i d'Aplicacions Forestals (CREAF). Correspon a l'edició de 2004 de l'Aula, que va tenir lloc a la Casa Elizalde de Barcelona, i que va ser enterament dedicada al tema de la complexitat. Els resums han estat elaborats per la Dra. Anna Àvila, investigadora del CREAF, i revisats pels mateixos ponents. El capítol del Dr. Jou ha estat escrit directament per l'autor.

Els sistemes complexos apareixen en ciències molt diferents, des de l'estudi de xarxes elèctriques o telefòniques fins a la genètica i l'estudi del desenvolupament. El fet que sistemes tan diferents presentin algunes similituds estructurals i de funcionament ha despertat un gran interès i ha permès d'edificar les bases d'una ciència de la complexitat que, els darrers anys, ha conegut un interessant desenvolupament. És, naturalment, una ciència interdisciplinària que pretén descobrir regles generals, amb l'ambició d'avançar més de pressa en la comprensió de sistemes que, pel nombre molt elevat de components i combinacions o connexions entre ells, fan molt costosa o impossible una aproximació merament mecanicista.

Els sistemes complexos es poden descriure com una xarxa gran d'elements o nusos (nodes, en la terminologia dels matemàtics), que interaccionen entre ells, i connexions (o arestes) entre parells de nusos. Aquestes xarxes poden tenir una realitat física més o menys permanent, com passa a les xarxes elèctriques, o ser més aviat una expressió conceptual, com passa a les xarxes tròfiques en un ecosistema. Les connexions entre nusos solen ser de durades més o menys curtes i la intensitat de la relació (per exemple, els fluxos al llarg de les connexions), variable i discontinua. Per exemple, en un ecosistema, una connexió entre un nus A i

un nus B pot significar que l'espècie A es menja la B, o a l'inrevés, però la quantitat de matèria i d'energia que passa per aquesta connexió canvia en cada moment i segons les estacions i els anys. Dins del genoma, sabem que hi ha interaccions entre els gens mitjançant proteïnes, molècules petites de RNA o DNA, etc., i que aquestes interaccions poden provocar inhibicions o activacions i altres interferències entre gens; però tot això varia de manera complicada i existeixen relacions jeràrquiques en les quals un gen pot controlar l'acció d'altres, com en els ecosistemes hi ha espècies que tenen control sobre les poblacions de diverses espècies més. Les jerarquies poden ser tan complicades com es vulgui. El metabolisme ens proporciona també exemples de sistemes complexos, amb grups de reaccions fortament relacionades entre elles i que es donen en organismes molt diferents, i milers de reaccions molt menys freqüents.

Les similituds estructurals i de comportament en sistemes complexos biològics i tecnològics hem volgut recollir-les en els exemples d'una sèrie de camps, cadascun força interessant, amb la convicció que les experiències obtingudes en cadascun d'aquests camps poden ajudar-nos a entendre alguna cosa més pel que fa als problemes que plantegen les qüestions ambientals, on es reuneixen sistemes complexos diversos, des dels ecosistemes fins als sistemes socials i econòmics, culturals i tecnològics. La tria dels conferenciant hauria pogut diferir, no hem esgotat els temes en què s'està estudiant la complexitat, però hem volgut donar-ne una mostra variada. Les conferències més generals van ser les de Rafael V. Simó i David Jou. El primer és un expert en sistemes complexos reconegut internacionalment, que va fer una presentació brillant de les propietats de les xarxes. Lamentem no poder oferir-ne el resum (per primer cop en aquesta col·lecció), perquè l'autor no ho va creure oportú. David Jou, físic, va aprofundir en les lleis de la complexitat des d'un punt de vista físicomatemàtic, en els avenços que s'han produït i en les repercussions de tot això en qüestions epistemològiques i pràctiques. La conferència del Dr. Jou, escrita per ell mateix, l'oferim sencera en aquest volum. Altres conferències van tocar exemples de complexitat, com la de Jaume Bagunyà, que va versar sobre la genètica del desenvolupament embrionològic; la de Pedro Jordano, sobre la biodiversitat dels sistemes ecològics; la de Josep Piñol té un caire diferent, ja que, sense deixar els ecosistemes, planteja un parell d'exemples de models senzills per a l'estudi de sistemes complexos (la idea és que un model complex, amb moltes variables, és tan difícil d'entendre com la mateixa realitat i, per tant, poc útil per al científic); Nolasc Acarin va presentar la complexitat de la conducta humana i de les seves bases físiques, per donar

algunes idees importants sobre la qüestió essencial de la naturalesa humana; Narcís Prat va abordar el tema de la complexitat en una qüestió ambiental, la del Pla Hidrològic Nacional, per demostrar justament les conseqüències previsibles d'haver subestimat aquesta complexitat; la conferència de Joan López va tractar d'un tipus no biològic de xarxes, les de mobilitat humana, per mostrar-ne les relacions amb altres sistemes complexos i la problemàtica que plantegen; Josep M. Garrell es va ocupar d'un aspecte extraordinàriament interessant de la creació de complexitat per l'home, l'anomenada intel·ligència artificial, i va insistir en les limitacions que encara existeixen dins un tema el nom del qual potser és excessivament pompós en relació amb la realitat que s'hi inclou; la conferència que va inaugurar el cicle, de Martí Domínguez, sobre art, ciència i complexitat, va ser un magnífic enllaç entre el món de la ciència i el de les humanitats.

Com a director de l'Aula, agraeixo un any més que s'hagi mantingut la voluntat de l'Ajuntament de Barcelona, representada per la tinent d'alcalde Imma Mayol, i la gerència del Sector de Serveis Urbans i Medi Ambient, així com la de la Universitat de Barcelona, de seguir organitzant aquests cicles. També agraeixo al públic que hagi continuat fent-los possibles amb la seva assistència i participació activa en els debats. Altres agraïments són per al CREAM, per al Servei de Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona (especialment per a Carlos Alonso) i per a Marta Barceló i Javier Jerónimo (secretariats del CREAM i de la Unitat d'Ecologia de la UAB, respectivament). Absolutament essencial ha estat la tasca de coordinació, des de l'Ajuntament de Barcelona, de Txema Castiella i Margarita Parés, i per a les sessions, de Pilar Andrés i d'Anna Àvila, la qual s'ha ocupat de la redacció dels resums. Finalment, no cal dir que res no hauria estat possible sense la participació, brillant en les presentacions i en general comprensiva en les altres fases, dels ponents.

Gener de 2005



## Ponents i programa de l'Aula d'Ecologia de l'any 2004

### Novè cicle de conferències 2004

**Dr. Martí Domínguez**, professor de periodisme de la Universitat de València i director de la revista *Mètode*  
*Art, natura i complexitat: la percepció del món natural en el Renaixement*  
(17 de febrer).

**Dr. Ricard Solé**, investigador ICREA del Laboratori de Sistemes Complexos de la Universitat Pompeu Fabra i professor de l'Institut Santa Fe (Nou Mèxic, EUA)  
*Què són i com evolucionen les xarxes complexes* (24 de febrer).

**Joan López Redondo**, Institut d'Estudis Regionals i Metropolitans de Barcelona  
*Xarxes de mobilitat* (2 de març).

**Dr. Josep M. Garrell**, professor del Departament d'Informàtica. Universitat Ramon Llull  
*Intel·ligència artificial: actualitat i futur* (9 de març).

**Dr. Narcís Prat**, professor del Departament d'Ecologia. Universitat de Barcelona  
*El Pla Hidrològic Nacional: un cas de no-apreciació de la complexitat*  
(16 de març).

**Dr. Pedro Jordano**, investigador CSIC. Estación Biológica de Doñana. Sevilla  
*Relacions mutualistes complexes en els ecosistemes* (23 de març).

**Dr. David Jou**, professor del Departament de Física. Universitat Autònoma de Barcelona  
*Les lleis de la complexitat* (30 de març).

**Dr. Josep Piñol**, professor del Departament de Biologia Animal, de Biologia Vegetal i d'Ecologia de la Universitat Autònoma de Barcelona, i investigador del CREAF

*Models simples per entendre sistemes ecològics complexos* (13 d'abril).

**Dr. Jaume Bagunyà**, professor del Departament de Genètica. Universitat de Barcelona.

*La construcció de la complexitat: del DNA als organismes* (20 d'abril).

**Dr. Nolasc Acarin**, cap de la Secció de Neurologia de l'Hospital de la Vall d'Hebron i professor de neurociència a la Facultat d'Humanitats de la Universitat Pompeu Fabra

*El cervell i la complexitat de la conducta humana* (27 d'abril).

L'Aula Permanent d'Ecologia de la Ciutat va néixer el 1996, com a resultat d'una col·laboració iniciada molt abans, el 1980, entre l'Ajuntament de Barcelona i la Universitat Autònoma de Barcelona en el camp de l'ecologia urbana. Ja des de 1996, l'Aula d'Ecologia organitza un cicle anual de conferències i, des de l'any següent, aquesta sèrie en publica els resums.

En aquest volum, que és ja el setè, s'hi apleguen les conferències del cicle 2004, totes al voltant del tema de la complexitat i l'estudi dels sistemes complexos. S'hi van tractar aspectes generals dels sistemes complexos que transcendeixen les matèries específiques i constitueixen les bases teòriques de l'emergent ciència de la complexitat, i es van proposar exemples concrets de sistemes complexos obtinguts del món de la biologia (desenvolupament embriològic, sistema nerviós, sistemes ecològics), de qüestions ambientals (Pla Hidrològic Nacional), de l'activitat humana (xarxes de mobilitat, intel·ligència artificial) i de les relacions entre el món de la ciència i les humanitats. És, en conjunt, una visió força completa de la importància que, en moltes ciències i aplicacions concretes, pot arribar a tenir el punt de vista de la ciència de la complexitat, i com aquest punt de vista és d'un interès especialment notori quan es tracta d'abordar problemes ecològics i ambientals.

Seguint la tònica d'altres anys, les conferències van ser impartides per un professorat selecte, de gran prestigi, i seguides per un públic atent que va participar d'una manera animada en els debats que van seguir cada ponència.

# Les lleis de la complexitat

David Jou

Departament de Física  
Universitat Autònoma de Barcelona

## Resum

Podria semblar que lleis i complexitat fossin conceptes antagònics, que l'ordre implícit en les primeres fos rebutjat per la irregularitat explícita, aparent o real, de la segona. La complexitat, difícil de definir amb rigor, es caracteritza per la sensibilitat a les pertorbacions, per la manca de periodicitat en la dinàmica, el caràcter laberíntic de la geometria, la manca de proporcionalitat entre efectes i causes, la interacció subtil entre els diversos components del sistema, la capacitat de produir ordre col·lectiu i propietats emergents a partir de la interacció de desordres individuals, la possibilitat d'adaptació a l'entorn, i potser per algunes altres característiques encara no prou ben identificades. En aquest text veurem alguns dels intents, raonablement reeixits, de caracteritzar i classificar aquests diversos aspectes de la complexitat, i dels resultats que se n'obtenen, i apuntarem algunes de les perspectives en aquest camp en expansió de la ciència i les seves sintonies amb la cultura actual.

## Introducció

El títol «lleis de la complexitat» invita a reflexionar sobre què és una llei de la naturalesa i sobre què entenem per complexitat. La idea de llei de la naturalesa ha rebut molta atenció per part de científics i de filòsofs de la ciència, tant pel que fa al seu caràcter de realitat autèntica o de convenció humana, com per la seva manifestació de regularitat i permanència sobre el fons canviant i variat de l'univers. Algunes de les lleis de la naturalesa, en especial les de la física, tenen formes matemàtiques molt precises, mentre que en altres camps, com la biologia, estan formulades segons enunciats verbals o regles no pròpiament quantificades. La importància de les diverses lleis depèn de la seva precisió, de la consistència amb altres lleis i amb les dades experimentals, de l'abast del seu

camp d'aplicació, del seu poder predictiu, de la seva simplicitat i fertilitat i de la diversitat de demostracions independents que en podem fer.

En el camp de la física, per exemple, podem pensar en lleis de conservació (quantitat de moviment, energia), lleis d'evolució (Llei de Newton, balanç de matèria), lleis que especifiquen les forces fonamentals (gravetat, electromagnetisme), i lleis empíriques que descriuen forces derivades (elasticitat, fricció) o fluxos diversos (difusió, transport de calor). En biologia, tenim presents els enunciats bàsics de la biologia molecular, segons els quals la informació biològica passa de DNA a RNA i a proteïnes, o de l'evolució, segons el qual mutacions més herència més selecció natural porten a l'evolució de les espècies: uns enunciats no directament quantitatius, però amb un contingut molt universal i un gran poder d'organització del coneixement. En el domini de la complexitat, la física aprèn de la biologia, en el sentit de buscar lleis generals que, per ara, són sovint de caràcter qualitatiu, descriptiu, mentre que la biologia aprèn de la física, en el sentit d'incrementar els seus aspectes quantitatius. Per això, l'estudi de la complexitat estableix veritables possibilitats de diàleg entre ciències diverses.

Parlar de lleis de la complexitat fa examinar quina mena de regularitats s'han trobat en aquest camp. Una de les característiques que més centren l'atenció dels estudis esmentats és l'aparició d'estructures i comportaments emergents a partir de la interacció col·lectiva d'un nombre considerable d'elements. Per això, cal recordar que una qüestió essencial en l'estudi de la naturalesa es refereix a les variables que especifiquen els estats dels sistemes, i que depenen, en general, del nivell de descripció adoptat. Un exemple clàssic és donat pels sistemes físics constituïts per moltes partícules, que poden ser descrits a nivell macroscòpic, amb unes poques variables que segueixen les lleis de la termodinàmica, o a nivell microscòpic mitjançant les lleis de la mecànica, prenent com a variables les posicions i velocitats de les partícules. Fent de pont entre aquests dos nivells hi ha la mecànica estadística, que té com a objectiu explicar les lleis observades a nivell macroscòpic a partir del comportament col·lectiu de les partícules microscòpiques que constitueixen el sistema.

Aquesta diversitat de nivells, i el pas dels uns als altres, mereix alguns comentaris que són útils com a introducció als estudis de la complexitat: 1) En els sistemes macroscòpics, distingim diversos estats d'agregació, com ara sòlid, líquid i vapor, que no tenen sentit per a les partícules individuals i són, per tant, propietats emergents. 2) Cada nivell de descripció té lleis pròpies. En el cas de la termodinàmica, les dues lleis principals són el principi de conservació de l'energia, i el principi de

l'augment de l'entropia en sistemes aïllats. La primera llei pot ser vista com una conseqüència immediata de la conservació de l'energia a nivell microscòpic, mentre que el segon principi és específic del nivell macroscòpic, ja que l'entropia només està definida per a col·lectivitats de partícules, però no per a una sola partícula. 3) L'entropia d'un sistema macroscòpic pot ser interpretada microscòpicament, però no en funció de propietats d'una sola partícula, sinó de conjunts de partícules. Les interpretacions més usuals es refereixen al desordre del sistema (relacionat amb el nombre de microestats compatibles amb un macroestat donat), a la informació necessària per descriure un microestat concret donat el macroestat amb què és compatible, i a la diversitat de possibilitats microscòpiques de realitzar l'estat macroscòpic. La identificació microscòpica de l'entropia, però, no soluciona completament la inconsistència entre la reversibilitat del comportament microscòpic dels elements del sistema i la irreversibilitat del seu comportament macroscòpic.

També cal tenir en compte altres punts, que seran útils en la nostra anàlisi posterior: 4) En termodinàmica, el sistema pot passar d'un estat d'agregació a un altre, a temperatures i pressions determinades. En aquestes transicions de fase hi ha una competició entre la minimització de l'energia del sistema i la maximització de la seva entropia, expressada pel criteri de la disminució de l'energia lliure. A temperatura baixa predomina la tendència a minimitzar l'energia (cosa que afavoreix les estructures sòlides), mentre que a temperatura prou elevada venç la tendència a maximitzar el desordre (duent així a l'estat líquid o gasós). Un altre exemple típic és un sistema d'imants microscòpics amb interacció ferromagnètica; a baixa temperatura domina l'ordre, i per tant hi ha imantació no nul·la, mentre que alta temperatura predomina el desordre, i la imantació espontània és nul·la. Just en la temperatura crítica l'estat és molt complex, amb correlacions de llarg abast, grans fluctuacions de la imantació i estructures transitòries a totes les escales. 5) En situacions prou allunyades de l'equilibri, molts sistemes tendeixen a estructurar-se, tot formant estructures dissipatives que també són propietats emergents del sistema, però que, a diferència de les estructures d'equilibri, només es mantenen mentre alimentem el sistema. L'exemple típic són les estructures convectives de Bénard en fluids viscosos escalfats per sota. Si el flux de calor és petit, el fluid roman en repòs i sense estructura; si és prou gran, es produeix un moviment de convecció en estructures ordenades. Aquest llindar depèn de la competició entre dos factors: la dilatació del fluid calent de la part inferior, que tendeix a pujar, i la fricció viscosa, que tendeix a frenar el moviment.

L'estructuració fora de l'equilibri és de caràcter dinàmic i col·lectiu (un dels marcs teòrics proposat per al seu estudi és anomenat sinèrgica). Les estructures dissipatives són estudiades a partir de l'estabilitat de les solucions d'equacions cinètiques de camps molt diversos (hidrodinàmica, cinètica química, òptica quàntica, dinàmica de poblacions, etc.), però no es coneixen criteris generals concrets que puguin ser formulats, per exemple, com la maximització d'alguna magnitud concreta. Fora de l'equilibri, no és possible, en general, definir l'entropia, i no se sap si es maximitza el desordre molecular compatible amb les restriccions que actuen sobre el sistema. L'estudi de les estructures dissipatives és el primer pas vers l'estudi de les estructures emergents característiques de la teoria de la complexitat, amb la qual comparteix l'interès pels fenòmens fora de l'equilibri.

### **Descripció i característiques de la complexitat**

Definir la complexitat en termes unívocs i rigorosos és difícil, i més encara establir-ne alguna mesura quantitativa. En termes generals, diem que un sistema és complex quan les seves propietats estructurals o funcionals conjuntes no poden ser compreses completament a partir dels comportaments individuals. Es tracta de situacions que presenten ni molt d'ordre (com passa en un cristall, un sonet, o l'autoritarisme centralista), ni molt desordre (gas, prosa, anarquia localista), sinó de situacions intermèdies (punts crítics, vers lliure, autonomia o interdependència), en què no hi ha un ordre total però sí correlacions entre variables diverses i llocs diversos, i patrons de formes que es repeteixen a diverses escales, però no de forma regular. Habitualment, es tracta de sistemes amb un nombre de components relativament elevat, amb una interacció elevada entre els components, i amb una capacitat d'adaptació a l'exterior del sistema.

Hi ha diverses mesures de la complexitat. Unes es basen en la complexitat algorísmica de Chaitin-Kolmogorov (1965), és a dir, en la informació mínima necessària per descriure un estat o una trajectòria del sistema, la qual depèn, en general, del tipus d'algorisme de descripció. Si el sistema està molt ordenat, o molt desordenat, la informació rellevant és breu. Un altre indicador és la complexitat lògica de Bennet (1985), que reflecteix el temps que necessita un ordinador per dur a terme el programa que especifica el sistema, o el temps que tardaria un observador a discriminar la part regular i la part desordenada del comportament del sistema. Una mesura semblant és utilitzada per descriure la dificultat de problemes matemàtics, segons com augmenta el nombre

d'operacions lògiques per resoldre'l en augmentar el nombre d'incògnites. Aquest grau de dificultat depèn dels algorismes emprats; per exemple, alguns algorismes quàntics poden reduir molt el temps necessari per dur a terme una operació com ara descompondre un nombre en producte de nombres primers. Altres mesures de la complexitat es basen en les correlacions entre els valors de magnituds associades a partícules diferents del sistema. Pel que fa a la complexitat purament geomètrica, s'acostuma a recórrer a les dimensions fractals introduïdes per Mandelbrot (1975), que també són utilitzades per classificar la complexitat dinàmica del sistema en situacions de caos determinista.

Aquí no utilitzarem mesures de complexitat, sinó que ens interessarà subratllar les característiques generals de la complexitat que susciten més atenció en els estudis actuals. Les situacions qualificades de complexes presenten una o més de les característiques següents, que detallarem més a la secció següent:

- 1) Dificultat de predicció i de control.
- 2) Comportament no lineal.
- 3) Estructura i dinàmica no periòdiques.
- 4) Coexistència de comportaments ordenats i irregulars.
- 5) Comportament col·lectiu: estructures emergents.
- 6) Jerarquia d'estructures espacials o temporals.
- 7) Capacitat d'adaptació a l'entorn.
- 8) Ús de l'ordinador, en lloc de telescopi o microscopi.

Les quatre primeres característiques reberen molta atenció en el context de la complexitat dinàmica de la teoria del caos. Les quatre segones centren els estudis més actuals, especialment pel que fa a les estructures emergents i a la capacitat d'adaptació a l'entorn.

### **Quina mena de lleis coneixem i busquem en la complexitat?**

Examinarem ara quina mena de lleis coneixem en el domini de la complexitat, en la formulació de les quals té un paper important la definició i l'ús de magnituds adients i les relacions que tenen entre si. Seguirem els vuit aspectes presentats a la secció precedent.

- 1) La primera característica dels sistemes complexos és la dificultat de predir-ne i controlar-ne el comportament, a causa d'una gran sensibilitat a les condicions inicials o a una multiplicitat de possibles estructures emergents. Aquesta dificultat, intrínseca al sistema, es veu



accentuada per les possibles pertorbacions exteriors. En alguns casos, la complexitat dinàmica no és deguda a un nombre elevat de variables: en sistemes discrets, n'hi ha prou amb una de sola, mentre que en sistemes continus, passar de dues variables a tres pot dur al caos. Per això, aquest pot ser considerat com un comportament emergent, que apareix en afegir una tercera variable a alguns sistemes (o una tercera partícula, en el cas dels problema dels tres cossos en interacció gravitatòria). En aquest aspecte les lleis es refereixen a la caracterització de la sensibilitat de les trajectòries a pertorbacions mitjançant els exponents de Lyapunov (que descriuen l'increment de la separació entre dues trajectòries, inicialment properes, en funció del temps) i la relació d'aquests amb la pèrdua d'informació per unitat de temps o amb magnituds del sistema que caracteritzen les seves propietats de transport, com ara el coeficient de difusió.

- 2) Una segona característica dels sistemes complexos és el comportament no lineal, és a dir, la manca de proporcionalitat de l'efecte a la causa. La diversitat de possibles comportaments no lineals és immensa: entre les situacions més típiques podem indicar un creixement exponencial de l'efecte amb la causa, o l'existència d'un llindar, una saturació, o un màxim. En aquesta faceta, l'objectiu a assolir és caracteritzar els tipus de no-linearitat que regeixen la dinàmica d'un sistema donat.
- 3) En circumstàncies habituals, l'estructura i dinàmica dels sistemes complexos no són periòdiques, però presenten recurrències subtils a escales diverses, que fan que la irregularitat no sigui total. L'exemple típic és el caos determinista, és a dir, situacions en què sistemes deterministes són molt sensibles a les pertorbacions. Entre aquests sistemes hi ha característiques comunes remarcables. Una d'aquestes es presenta en la cascada de bifurcacions cap al caos, en què, a mesura que augmenta un cert paràmetre, el sistema tendeix a un valor límit, o a un cicle de dos valors, o de quatre, o de vuit, etc., i els valors del paràmetre per als quals es produeixen aquestes bifurcacions tenen unes característiques comunes en sistemes molt diversos (hidrodinàmics, òptics, magnètics, químics, ecològics, per exemple). El descobriment d'aquestes relacions per part de Feigenbaum el 1975 suposà un gran impuls per a l'estudi del caos determinista, ja que revelà una llei, o regularitat, subjacent a una àmplia diversitat de sistemes en règim de comportament molt complex.

- 4) Els sistemes complexos presenten comportaments ordenats o irregulars, segons els valors dels paràmetres que intervenen en la seva dinàmica o en la seva interacció amb el medi. En termes tècnics, diem que el sistema pot tenir diversos atractors de diversos tipus: puntuals (el sistema tendeix a un estat), cicles límit (tendeix a una seqüència periòdica d'estats) o atractors estranys (tendeix a un comportament irregular amb una complexitat caracteritzada per una dimensió fractal). El conjunt d'estats inicials que tendeixen vers un cert atractor constitueixen el domini d'atracció de l'esmentat atractor. Els dominis d'atracció formen, ells mateixos, conjunts geomètrics de naturalesa fractal. Cada atractor, especialment pel que fa als atractors puntuals, pot estar caracteritzat per una magnitud concreta (energia, adaptació) de manera que, en expressar aquesta magnitud en funció de cada estat del sistema, som conduïts a un paisatge d'energia (o d'adaptació) molt irregular, amb pics i valls i colls que descriuen els diversos dominis d'atracció. Pel que fa a les lleis, voldríem poder especificar, per a cada sistema, quants atractors té, de quin tipus són, quins són els dominis d'atracció respectius, i quines possibilitats hi ha de transició entre atractors.
  
- 5) Una de les característiques dels sistemes complexos més estudiades en l'actualitat són les estructures emergents, en què un nombre considerable de parts interactuen de forma coherent, tot donant estructures autoorganitzades que esdevenen les protagonistes d'un nivell de descripció més elevat. Els comportaments emergents es presenten en moltes àrees de la ciència, com per exemple: en biologia, la jerarquia d'ecosistemes/ comunitats/ organismes/ òrgans/ cèl·lules/ genoma/ gens; en ciències humanes: societat mundial/ societat internacional/ societats locals/ empreses/ individus; en tecnologia, xarxa d'ordinadors/ ordinador/ microxips/ circuits integrats/ transistors/ electrons (però en aquesta darrera jerarquia els diversos nivells no sorgeixen d'una autoorganització del sistema, sinó d'un procés de fabricació o organització des de l'exterior). Així, en el funcionament de la cèl·lula, les molècules no actuen independentment, sinó que les seves reaccions s'organitzen en cicles metabòlics; al cervell, milers de neurones actuen acoblament en diferents àrees amb tasques específiques; en el genoma, hi ha interaccions entre gens diversos, que s'activen o es desactiven conjuntament segons les condicions ambientals; en ecologia, les interaccions entre les diverses espècies són essencials en el funcionament de l'ecosistema.

Les relacions entre els diversos nivells de descripció (dels éssers vius, de les col·lectivitats socials) constitueixen, des de fa molt de temps, un tema de reflexió per a la filosofia de la ciència, i tenen un interès especial en les teories de la complexitat. En anar d'un nivell inferior (més variables) a un de superior (menys variables), ens preguntem si podem deduir els nivells superiors de descripció a partir dels inferiors. En general, no ho podem fer sense especificar les condicions de contorn adients, i cal tenir en compte que: *a)* A cada nivell de descripció, cal identificar les variables més adients, les entitats rellevants i les regularitats entre si (per exemple: molècules/ lleis de la química; organismes/ lleis de la biologia). En sistemes complexos, no podem predir unívocament les estructures de nivell superior a partir dels components de nivell inferior, ja que poden ser diverses. *b)* Un cop conegudes aquestes entitats i les relacions entre si, podem buscar mecanismes en el nivell inferior que expliquin les regularitats del nivell superior. Tot i així, la història hi té un paper important (per exemple, la presència exclusiva, en els organismes vivents, d'aminoàcids levògirs i sucres dextrògirs; les peculiaritats del codi genètic; les bifurcacions en l'evolució; les pertorbacions aleatòries de volcans o de meteorits; l'aprenentatge). *c)* Sorgeixen les preguntes de com es produeix la sincronització o l'adaptació mútua entre diverses entitats que s'ajunten per donar-ne una de més general, i com es fan compatibles els beneficis de l'individu amb els del conjunt (per exemple, en passar de gens independents a genoma; de cèl·lules procariotes a cèl·lula eucariota; de cèl·lules independents a organisme pluricel·lular; de cèl·lules semblants a cèl·lules diferenciades; d'individus independents a poblacions).

En anar d'un nivell superior a un d'inferior, cal tenir en compte que: *a)* no resulta immediat esbrinar els components del nivell inferior ni les lleis que segueixen, com ho manifesten prou bé les dificultats que ha calgut vèncer per conèixer les lleis d'interacció entre les partícules elementals. Per fer-ho, cal extrapolar les condicions d'observació (per exemple, en el cas de les partícules elementals, cal treballar a més energia, o, en el cas de les cèl·lules i les macromolècules, calen microscopis més potents). *b)* En el cas de les estructures emergents, hi ha una retroacció de l'estructura global sobre els individus particulars, que poden modificar les condicions d'interacció entre si (per exemple, l'abundància i persistència dels diferents tipus de neurotransmissors, o la volatilitat i difusió de les feromones en colònies d'insectes).

Les lleis que voldríem establir es referirien a les relacions entre les dinàmiques del sistema a diferents nivells de descripció, com per exemple, relacionar la dimensió fractal de la dinàmica conjunta d'una

xarxa neuronal amb la seva connectivitat; o determinar el nombre de cèl·lules diferents en un organisme, donat el nombre de gens del seu genoma; o estudiar la fragilitat d'una xarxa metabòlica o d'una xarxa de comunicacions donada la seva connectivitat corresponent. En general, doncs, voldríem poder comprendre bé les lleis que regeixen cada nivell de descripció, les seves condicions de contorn, i el pas entre nivells diferents.

- 6) La complexitat dels sistemes caòtics no és robusta, perquè es presenta només en una interfície entre estats ordenats i desordenats, però hi ha una tendència remarcable dels sistemes a situar-se precisament en aquesta frontera de l'estabilitat. Per exemple, la relació entre el nombre d'espècies  $S$  i la connectivitat  $C$  d'una xarxa tròfica presenta una frontera d'estabilitat en una línia donada per  $S = k/C$ , on  $k$  és una constant, de forma que per sota d'aquesta corba els sistemes són estables, i per sobre, inestables. En lloc de trobar sistemes arreu de la zona estable, com podríem esperar, la majoria d'aquests es troben just en la línia de frontera d'estabilitat, és a dir, en el que s'ha anomenat el límit del caos. Un avantatge d'estar en aquesta línia seria que en ella hi ha alhora estabilitat i creativitat, és a dir, on la capacitat d'obertura i d'adaptació a l'entorn són màximes (com passa també, per exemple, al cervell, el cor o el sistema immunitari, que han de donar resposta a pertorbacions molt diverses).

La teoria del caos no explica aquesta tendència i calen, doncs, noves teories. Una de les més reeixides és l'anomenada criticalitat autoorganitzada, en què els sistemes se situen espontàniament en la frontera de la complexitat. L'exemple canònic és una pila de sorra: en deixar caure grans de sorra amb un ritme constant sobre el cim de la pila, aquesta arriba a un pendent crític constant en què es van produint allaus de moltes intensitats diferents, és a dir, que impliquen el moviment de nombres molts diversos de grans de sorra.

Pel que fa a les lleis, aquí s'observa que la probabilitat relativa de tenir una allau de  $S$  grans de sorra està donada per una llei potencial de la forma  $Pr(S) \propto S^{-\alpha}$ , on  $\alpha$  és un exponent que, en el cas de la pila de sorra, és proper a la unitat. En aquesta mena de lleis, els esdeveniments «excepcionals» són molt més freqüents que en la distribució gaussiana usual, i no estan caracteritzades per una escala definida. Aquestes lleis són molt universals, ja que són trobades en fenòmens tan diversos com incendis forestals, terratrèmols, biodiversitat, extincions, epidèmies, o xarxes tròfiques, fluvials o de comunicacions; un dels objectius és esbrinar el valor de l'exponent per a diversos tipus de sistemes.

- 7) Interessa molt com els sistemes complexos es relacionen amb l'ambient, i s'hi adapten, tot modificant les seves estructures internes. Podem veure la diferència entre un sistema físic clàssic amb propietats emergents, com un ordinador, format per transistors homogenis, no adaptatius, amb baixa connectivitat, i amb separació entre memòria i computació, i les xarxes neuronals, biològiques o artificials, compostes per elements variats, adaptatius (plasticitat), amb connectivitat elevada, en què memòria i computació (programari i maquinari) interaccionen entre si. En aquests sistemes, el programa de control es desenvolupa a si mateix sota la influència de l'ambient i va incrementant l'adaptació del primer al segon. Exemples típics i importants de sistemes adaptatius complexos són el sistema immunitari, el cervell, i certs aspectes de l'economia. En aquest camp, les lleis que voldríem conèixer caldria que descriguessin els processos d'adaptació o d'aprenentatge, com per exemple la regla de Hebb en les xarxes neuronals, i que aclarissin les estratègies d'adaptació, que poden passar, per exemple, per un increment en la compartimentació (en la cèl·lula, nínxols ecològics, en el cervell) o de la redundància, un enfortiment dels enllaços entre processos reguladors paral·lels, o més robustesa dels components. També interessa, és clar, la retroacció del sistema sobre l'ambient (d'una població sobre el seu entorn geogràfic, per exemple), en lloc de considerar que l'ambient exterior és immutable.
- 8) En l'estudi de la complexitat, els ordinadors han tingut un paper comparable als dels telescopis en astronomia i dels microscopis en biologia cel·lular. Ordinador en lloc de telescopi o microscopi. En principi, podríem pensar que aquesta utilitat ha estat deguda a la possibilitat de visualitzar les solucions numèriques d'equacions complicades que no hauríem pogut resoldre per mètodes analítics, o, també, arran de les possibilitats immenses que ha obert la simulació per ordinador, que permet esbrinar quin seria el comportament d'un sistema descrit per un cert nombre d'equacions, mètodes que, fins i tot, estan reemplaçant en part (i potser amb excés) els experiments reals, i que, en el camp de la biologia, han iniciat el camp de l'estudi «in silico», és a dir, en el silici de l'ordinador. Ara bé, la relació entre ordinador i complexitat supera amb escreix la simple observació o simulació, ja que els ordinadors són, o poden esdevenir per si mateixos, sistemes complexos. Per exemple, un maquinari del tipus xarxa neuronal fa que en alguns aspectes l'ordinador passi a funcionar com un cervell (simplificat), amb capacitats d'adaptació i d'au-

toaprenentatge; un altre exemple són els algorismes genètics, desenvolupats per Holland des del 1960, en els quals els mateixos programes d'ordinador van combinant-se i competint entre si en la resolució de diverses tasques, de manera anàloga a l'evolució biològica.

### Què més voldríem saber?

Exposades aquestes idees generals de diversos tipus de lleis de la complexitat, convé fer notar alguns aspectes oberts que poden il·lustrar sobre algunes grans línies de l'estat actual del camp. Ho resumirem en unes quantes qüestions, d'entre moltes altres de més específiques que es presenten en camps concrets:

#### 1) *Classes d'universalitat en els exponents de les lleis d'escala?*

Tal com passa en els fenòmens crítics en equilibri, els exponents de les lleis d'escala per a la probabilitat dels fenòmens complexos són independents de la majoria de detalls de les interaccions, de manera que són iguals per a sistemes molt diversos. Per exemple, les xarxes fluvials estan caracteritzades per un exponent  $3/2$ , i les xarxes vasculars (venes, bronquials), per un exponent  $4/3$ , exponents que depenen exclusivament de la dimensionalitat del sistema, i que optimitzen la capacitat de transferència d'aigua, sang o aire. Ens preguntem de quines característiques de les interaccions depenen en general, els exponents, cosa que permetria classificar fenòmens complexos en classes d'universalitat. Entre altres qüestions menys generals, ens preguntem pel valor dels exponents de xarxes concretes, com ara les xarxes tròfiques, l'exponent característic de les quals està obert a debat. La majoria de lleis d'escala potencials estan limitades a pertorbacions lentes en comparació de la resposta. Ens preguntem, doncs, què passa en altres situacions, com per exemple en el cas que la força externa que actua sobre el sistema sigui periòdica o caòtica, com passa, per exemple, amb el vents, les onades i les tempestes en el medi ambient.

#### 2) *Hi ha criteris d'optimització?*

En termodinàmica de l'equilibri, els sistemes tendeixen a la mínima energia lliure, de manera que la competició entre mínima energia i màxima entropia dona les condicions de transició de fase o d'evolució del sistema, en general. Ara bé, fora de l'equilibri, no coneixem criteris tan generals, ja que els d'equilibri no se satisfan. Podem pensar en magnituds molt diverses que potser tendeixen a ser optimitzades, per exem-

ple, rendiment, potència, flexibilitat, accessibilitat, o propagació d'informació. Quines d'aquestes magnituds seran optimitzades, si és que realment alguna ho és, depèn de les disponibilitats de temps, d'espai i de nutrients del sistema. En particular, ens podríem preguntar fins a quin punt la maximització de complexitat podria ser un criteri d'evolució. El problema rau en les diferents maneres de definir la complexitat i, d'altra banda, en el fet que en l'evolució certament augmenta la complexitat mitjana del conjunt dels organismes vivents, però no pas la complexitat de cada espècie concreta.

### 3) *Podrem aconseguir capacitat de predicció?*

Hem comentat que mecanismes bàsics molt diferents duen a fenòmens globals molt semblants, o a lleis d'escala amb el mateix valor de l'exponent. Des del punt de vista de la classificació de la complexitat això és molt avantatjós, però en canvi suposa una limitació greu per aprofundir en el mecanisme bàsic real com per dur a terme prediccions. Per exemple, són ben conegudes algunes lleis d'escala que relacionen el nombre de terratrèmols segons l'energia alliberada. Recentment, s'ha aconseguit trobar lleis d'escala per a la separació temporal entre terratrèmols. Ara bé, aquestes lleis generals no permeten saber quan es produirà un terratrèmol d'una intensitat donada en un lloc concret, que és, precisament, allò que caldria saber per tal de desallotjar a temps les zones afectades i salvar de la mort milers de persones.

### 4) *Estabilitat i control d'estructures complexes?*

Hem comentat la dificultat de predir quines seran les estructures emergents, a partir del coneixement dels components i de les seves interaccions. En moltes ocasions hi ha una diversitat d'aquestes estructures, i quina d'elles serà el resultat final depèn de detalls molt precisos de la història del procés. Un cop tenim aquestes estructures, voldríem saber-les controlar i utilitzar-les (per exemple, per fer nous ordinadors amb maquinari de xarxes neuronals). Ens preguntem, doncs, per l'estabilitat i el control de les estructures emergents, i si, per exemple, fluxos elevats d'informació contribueixen a estabilitzar o desestabilitzar el sistema (qüestió de gran interès en l'àmbit cultural en una època de tant d'augment dels fluxos d'informació com la nostra). També ens podem preguntar pel paper de les inhomogeneïtats espacials en la complexitat, tema d'interès en el diàleg entre el que és local diferenciat i el que és global homogeneïtzador. Una tercera qüestió consisteix a estudiar no tan sols l'adaptació de les estructures emergents al medi exterior, sinó també la retroacció

d'aquestes sobre el medi, i que porten a una coevolució íntimament entrellaçada. Com hem dit, podríem especificar moltes altres qüestions obertes, especialment qüestions particulars referides a tipus concrets de sistemes, però això excediria l'abast que ens hem proposat en aquest text.

## Conclusions

L'estudi de la complexitat és un dels principals nuclis actuals d'unificació del coneixement entre àrees tan diverses com la física, química, biologia, economia, ciències socials, geologia, climatologia, tal com fa poc ho fou la teoria del caos i, abans d'aquesta, la sinèrgica. L'estudi esmentat suposa diverses qüestions generals de reflexió, en els plans epistemològic, conceptual i pràctic.

### *a) Qüestions epistemològiques*

Tres de les qüestions epistemològiques més immediates que planteja l'estudi de la complexitat es refereixen als límits del reduccionisme i de la predicció, al paper de l'observació, i a la qüestió de fins a quin punt podem parlar amb propietat de lleis de la complexitat. Ja hem parlat amb un cert detall dels límits del reduccionisme, tot insistint en la necessitat d'interessar-se pel comportament global del sistema a diversos nivells de descripció i identificar les lleis a cada nivell, abans de voler deduir-les a partir del nivell de descripció més bàsic. En altres paraules, hem insistit en la conveniència de combinar un estudi que vagi de nivells inferiors a nivells superiors de descripció amb estudis que apuntin en sentit oposat. La tendència actual —si més no, anterior a l'esclat dels estudis de la complexitat— és la tendència reduccionista de partir del nivell més elemental per anar cap als nivells superiors. L'estudi de la complexitat també planteja els límits de la capacitat de predicció en la ciència, ja que ensenya la dificultat o impossibilitat de predir el futur en els sistemes caòtics, i les estructures i funcions del nivell superior en funció de les propietats del nivell inferior. En aquest cas, la missió de la ciència no és tant predir com explicar el funcionament del conjunt en funció de les propietats dels components i les seves interaccions en les condicions d'interès i tenint en compte el medi i la història.

En el camp de la complexitat, el paper essencial de l'observació queda reforçat, tant pel que fa a la necessitat d'identificar adequadament les variables més adients per a cada nivell de descripció, com per la necessitat de fer un seguiment constant del sistema caòtic, ja que només en podem predir satisfactòriament l'evolució per a intervals breus i cal anar



actualitzant amb una freqüència adient les condicions inicials de cada nou interval de predicció. En tercer lloc, ens preguntem si realment hi ha lleis de la complexitat, o si només estem parlant d'analogies entre aspectes diversos del comportament dels sistemes complexos. Efectivament, en la termodinàmica de l'equilibri hi ha un criteri general per determinar els estats d'equilibri i les transicions de fase, donat per la minimització de l'energia lliure. En canvi, en sistemes complexos no tenim una llei general, sinó una sèrie de paral·lelismes i analogies que ens permeten relacionar sistemes molt diversos. Aquestes analogies, però, tenen un cert poder predictiu, ja que podem parlar de quin serà el comportament general més probable d'un sistema a partir de l'estudi del comportament d'un sistema diferent en condicions semblants.

### *b) Qüestions conceptuals*

En el camp dels fenòmens emergents, sorgeixen algunes de les preguntes més ambicioses de la ciència, i més obertes al diàleg cultural, especialment la relació entre matèria i vida, entre cervell i ment, entre individu i societat. Alhora, la complexitat presideix el marc general dels paradigmes culturals, econòmics i polítics del nostre temps, complexitat incrementada per l'acceleració del progrés tecnològic, i per l'increment de fluxos d'informació i de migracions. Pel que fa a l'estudi de l'evolució, la complexitat pot aportar algunes novetats respecte de l'esquema clàssic que considera les mutacions, l'herència i la selecció com les bases principals de l'evolució; l'aparició d'estructures emergents podria explicar en alguns casos l'aparició de formes determinades com una tendència interna del sistema i no com a resposta a cap selecció ambiental.

### *c) Qüestions pràctiques*

L'estudi de la complexitat té implicacions profundes en diversos camps pràctics. Així, l'estudi dels ecosistemes i l'explotació dels seus recursos naturals ha de tenir en compte les noves perspectives de la teoria de la complexitat, que ens ensenya, per exemple, el paper important que una reducció de l'extensió d'un ecosistema pot tenir per a la seva composició i diversitat d'espècies. En l'estudi de l'economia, especialment la relacionada amb factors més innovadors i que està associada amb variacions més ràpides, és important tenir en compte les visions de la complexitat, i ser conscients que molt sovint no podem predir els resultats concrets, però sí que podem explorar les condicions més favorables per tal que certes innovacions esdevinguin possibles. Finalment, la consideració de

la complexitat és necessària per a la pervivència de les cultures en un món amb moviments homogeneïtzadors molt intensos, deguts a les facilitats de moviment d'informació, de capitals, d'idees i de persones.

### **Bibliografia**

- BAK, P. *How nature works*. Berlín: Springer, 1998.
- GELL-MANN, Murray. *The quark and the jaguar*. Nova York: Freeman, 1994.
- GREGERSEN, N.H.; GÖRMAN, V. (eds.). *Design and disorder. Perspectives from science and theology*. Londres: T&T Clark, 2002.
- KAUFFMAN. *At home in the universe: The search for laws of self-organization and complexity*. Nova York: Oxford University Press, 1998.
- LEWIN, R. *Complejidad. El caos como generador de orden*. Barcelona: Tusquets, (Metatemas), 1995.
- NICOLIS, G.; PRIGOGINE, I. *Exploring complexity. An introduction*. Nova York: Freeman, 1989.
- SOLÉ, R.; GOODWIN. *Signs of life. How complexity pervades biology*. Nova York: Basic Books, 2000.
- WAGENSBERG, J. *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Barcelona: Tusquets (Metatemas).
- WALDROP, M.M. *Complexity. The emerging science at the edge of order and chaos*. Nova York: Viking, 1992.

També són d'interès generals els dossiers dedicats a la complexitat de les revistes *Science* 284 (2 d'abril del 1999) i *Nature* 410 (8 de març del 2001).

# Complexitat i control en el desenvolupament embrionari

Jaume Baguña

Departament de Genètica  
Universitat de Barcelona

## Introducció

Abans de parlar de complexitat i control en el desenvolupament embrionari, cal definir primer què s'enten per desenvolupament embrionari. Breument, el desenvolupament és el procés necessari per produir (generar) un nou individu a partir d'una cèl·lula inicial o zigot. Aquesta cèl·lula inicial prové de la fusió de les cèl·lules germinals (l'òvul i l'espermatozoide) dels seus progenitors (mare i pare). A partir del zigot i fins a arribar a l'individu adult, l'embrió passa per un seguit d'estadis (clivellament, blàstula, gàstrula, etc.) invariants per a tots els organismes.

Tres característiques generen l'extrema complexitat del desenvolupament embrionari: 1) Passar d'una cèl·lula única (el zigot) a un conjunt molt gran de cèl·lules (l'individu adult), mitjançant la *multiplicació o proliferació cel·lular*. Un humà adult té  $10^{14}$  (100 bilions) de cèl·lules, i la senzilla mosca *Drosophila*,  $10^6$  (1 milió). Si la complexitat depèn del nombre d'unitats (cèl·lules) i de les relacions (interaccions) que s'estableixen entre aquestes, és evident que al llarg del desenvolupament hi ha un gran augment de complexitat. 2) Les cèl·lules de l'adult no són iguals, ja que n'hi ha uns seixanta tipus diferents en la mosca i uns trescents en els humans. Aquesta diversificació, anomenada *diferenciació cel·lular*, incrementa molt la complexitat. 3) Finalment, l'increment en nombre i diversitat de cèl·lules no duu a una estructura final o fenotip qualsevol, sinó al fenotip propi de cada espècie. Això implica mecanismes molt precisos de control de la proliferació i diferenciació de cèl·lules en l'espai embrionari. És el que s'anomena *morfogènesi o formació del patró*, de bon tros el procés més complex de tots.

La complexitat creixent del desenvolupament embrionari necessita un programa molt estrictament controlat. L'existència d'aquest programa es dedueix de la presència d'etapes invariants, irreversibles, al llarg

del desenvolupament i del fet que, mitjançant aquest procés, cada espècie s'ha anat reproduint i perpetuant, amb més o menys èxit, durant milers o milions de generacions al llarg de l'evolució. El problema és saber qui, i quan i com, controla aquesta complexitat creixent al llarg del desenvolupament.

### Les unitats del desenvolupament: cèl·lules i gens

Per analitzar i entendre qualsevol procés complex, és convenient descompondre'l en unitats discretes. En el desenvolupament embrionari, aquestes unitats són les *cèl·lules* i els *gens*. Dèiem abans que la mosca *Drosophila* té  $10^6$  cèl·lules. Per entendre-ho d'una manera gràfica més propera a la nostra experiència quotidiana, si equiparéssim una cèl·lula amb una persona, el cos d'una mosca equivaldria a la massa aplegada durant la manifestació de Barcelona del febrer del 2003 contra la guerra a l'Iraq. I en el cas dels éssers humans, amb 100 bilions de cèl·lules, si ajuntéssim l'equivalent en persones (comptant 4/5 persones per metre quadrat), aquest ocuparia el territori de tot el Canadà i els Estats Units. A diferència d'un aplec de persones, el conjunt de cèl·lules d'una mosca és estable, ben integrat, i estructurat per tal que cada part i cada cèl·lula estiguin en el lloc adequat fent la funció adequada. La pregunta elemental és: com ho fan, això, les cèl·lules?

Anem a les altres unitats: els gens. Quants gens té una mosca i quants els humans? De la *Drosophila* se'n sap el nombre gairebé exacte; uns 14.850. De l'ésser humà es calcula que n'hi ha de 25.000 a 35.000. En ambdós casos és evident que hi ha moltes més cèl·lules que gens; en altres paraules i dit molt planerament, no hi ha un gen per cada cèl·lula. Però, si ens fixem en el nombre de tipus cel·lulars diferents (60 per a la mosca i uns 300 per a l'home), és evident que «tocarien» de 100 a 200 gens per tipus cel·lular, nombre més que suficient per fer-los diferents entre si. Cal tenir en compte, però, que amb un milió de cèl·lules d'uns seixanta tipus diferents es poden fer, a més de mosques, organismes prou diferents: cargols, cucs, altres insectes, etc. Per tant, a més de fer proliferar les cèl·lules i produir tipus cel·lulars diferents, els gens controlen un procés de molt més abast: fer que aquests tipus cel·lulars apareguin en nombres, llocs i moments concrets generant morfologies concretes. Per entendre això, cal entendre abans què fan les cèl·lules i què fan els gens.

### Propietats de les cèl·lules i dels gens

Què fan les cèl·lules? Cada tipus cel·lular de l'adult té una morfologia característica que el fa distingible de la resta. Però, a més de la morfo-

logia, i molt especialment durant el desenvolupament embrionari, les cèl·lules canvien de forma, es mouen, migren, es moren, s'agreguen en epitelis i teixits, es comuniquen entre si, es multipliquen i es diferencien. Tot aquest repertori de propietats es coneix com a comportament cel·lular. I què fan els gens? I, abans de tot, què és un gen? Un gen és un fragment de DNA que codifica per a una o mes proteïnes, que són la base estructural i funcional de les cèl·lules. Cada proteïna té una funció característica: enzim, proteïna de membrana, proteïna del citoesquelet, transductora de senyals i, molt especialment, reguladora de l'activitat d'altres gens. Alhora, cada gen es compon de dues regions: la part codificant i la part reguladora. Aquesta darrera, sovint gran i complexa, és contigua a la regió codificant i és on s'uneixen diferents molècules (bàsicament proteïnes) activadores i/o inhibidores de l'activitat del gen. La unió d'aquest seguit de proteïnes fa que el gen s'expressi o no i, si ho fa, que ho faci en un grau determinat, en una àrea específica de l'embrió i en un moment concret del desenvolupament.

Ara ve la pregunta clau: tenint en compte que el DNA de totes les cèl·lules és el mateix, com ho fan els gens perquè les cèl·lules tinguin comportaments diferents? L'exemple paradigmàtic és la diferenciació cel·lular. Sabem que cèl·lules diferents contenen proteïnes diferents. Així, la cèl·lula muscular estriada conté, entre d'altres, actina, miosina, tropomiosina i titina, adequades per contreure's i relaxar-se. La neurona conté neurotransmissors, neurofilaments i sinaptines, ideals per trametre informació. I la cèl·lula epidèrmica té queratina, cadherina, connexines o integrines, entre altres, perfectes per limitar i aïllar l'organisme de l'exterior. I com esdevenen diferents les cèl·lules? Això passa mitjançant l'activació de grups de gens concrets en cada tipus cel·lular. Com que totes les cèl·lules tenen la mateixa dotació gènica, la diferenciació cel·lular només pot ser deguda a una activació diferent dels gens en els diferents tipus de cèl·lules. I això duu a una pregunta prèvia: per què s'activen grups de gens diferents al llarg de la diferenciació de cada tipus cel·lular? La resposta és que cada tipus cel·lular es forma en un lloc concret de l'embrió; per exemple, les cèl·lules epidèrmiques es formen a partir de l'ectoderm de l'embrió, una cèl·lula muscular ho fa a partir del mesoderm, i una neurona ho fa a partir de l'anomenat ectoderm neurogènic. I cada un d'aquests teixits de l'embrió presenta ja una incipient diferenciació que fa que només doni lloc a determinats tipus cel·lulars. Alhora, això depèn de l'expressió prèvia d'una sèrie de gens en etapes més inicials del desenvolupament embrionari. I així podríem seguir fins a arribar al zigot i a la informació inicial que conté.

En resum, les dues grans qüestions que el desenvolupament planteja encara avui en dia són: 1) com s'activen diferencialment els gens?, i 2) quins són els programes genètics que controlen els llocs i els moments precisos en que han d'aparèixer els diferents tipus cel·lulars que configuren els fenotips específics de cada espècie?

### Característiques generals dels sistemes i xarxes de regulació genètica

En primer lloc, els gens són «xips» que integren informació de tipus molt divers i generen sortides en l'espai i el temps que, molt simplificadament, es poden considerar com les d'u/zero (activació/inhibició) d'un sistema bolea. Un dels exemples més ben estudiats és el gen *endo 16*, un gen específic de l'endoderm larvari de l'erició de mar. Aquest gen té una regió reguladora força complexa amb diferents mòduls (A a F) de seqüències reguladores, a les quals s'uneixen proteïnes codificades per altres gens. Quan determinades proteïnes s'uneixen als mòduls A i B, el gen s'activa a l'endoderm en etapes inicials (A) o tardanes (B). Alhora, *endo-16* mai no s'expressa a l'ectoderm ni al mesoderm. Això es deu al fet que en aquests teixits determinades proteïnes s'uneixen als mòduls C, D i E fent que el gen no s'expressi en aquells. D'aquesta manera, *endo-16* s'expressa on és necessari (endoderm = A+B), bé en etapes inicials (A) o tardanes (B), i no s'expressa on no cal (ectoderm i mesoderm = C+D+E). Un aspecte clau, encara poc estudiat, és el nombre real de connexions o entrades (= proteïnes que interactuen amb la zona reguladora) que tenen els gens. Mentre que hi ha gens amb poques entrades, n'hi ha alguns potencialment amb moltes (més de deu ó quinze), tot i que mai no intervenen alhora.

En segon lloc, els gens codifiquen per proteïnes, i un bon nombre de proteïnes regula l'expressió d'altres gens. Això vol dir que la relació entre gens és una relació en xarxa. Així, un gen s'activa quan s'hi uneixen proteïnes activadores, però no ho fa si hi ha altres proteïnes, en aquest cas inhibidores. Alhora, un gen pot ser activat individualment per diferents proteïnes o per una combinació d'aquestes, combinacions que són diferents en diferents llocs i moments. A més, el gen en qüestió pot regular altres gens a través de la proteïna que ha produït. Si unim els dos conceptes, és a dir, que un gen pot estar regulat per diversos gens i que simultàniament regula altres gens, tenim una xarxa que pot ser extremament complexa, d'una complexitat tan gran, que necessàriament requereix un ordre, una topologia. Altrament, si tot connectés amb tot, la xarxa es bloquejaria i esdevindria inviable.

En els darrers quinze anys, l'estudi de xarxes reals de gens que controlen processos del desenvolupament com la segmentació i la neurogènesi a *Drosophila*, l'establiment de la polaritat axial i la formació de la vulva al nemàtode *Caenorhabditis elegans*, la formació del mesoendoderm i l'endoderm a l'eríçó de mar, i nombrosos exemples de diferenciació cel·lular terminal a vertebrats han permès deduir les següents característiques generals de les xarxes de regulació gèniques durant el desenvolupament:

- 1) jerarquia i combinatòria,
- 2) retroalimentació, tant positiva com negativa,
- 3) efectes quantitius per lllindar (requeriment de concentracions específiques d'una molècula per activar diferencialment els gens),
- 4) repressió diferencial.

Que el genoma necessari per al desenvolupament està organitzat jeràrquicament és un fet evident: hi ha moltes seqüències del tipus el gen A regula al B, el B al C, i el C al D, etc. Aquest exemple, però, és purament lineal. En realitat, la regulació és en forma d'una xarxa que combina jerarquia i combinatòria, ja que el gen A pot activar alhora B, C i D, però per activar el gen E es necessita el B i el C alhora. I per activar el gen F es necessiten C, D i E, etc. *Jerarquia i combinatòria* són característiques clau de les xarxes gèniques del desenvolupament.

La presència de *retroalimentació* (en la literatura anglosaxona *feed-back*) en les xarxes genètiques del desenvolupament deriva d'un fet molt simple. En una seqüència lineal d'activació gènica (A, B, C, ... N), per tenir activat el gen N s'hauria de tenir sempre activat el gen inicial, el gen A. A la llarga, això representaria un despesa excessiva i mantindria actius gens innecessaris que generarien massa soroll. La solució ha estat establir *feed-backs* autoactivadors de tal manera que, si A activa B, i B activa C, B s'activa a si mateix i aleshores A ja no és necessari, ja que B s'activa sense A. Una altra manera és per *feed-backs* transactivadors o per *feed-backs* inhibidors d'un gen sobre gens previs de la cadena. Una altra variant interessant és l'autoinhibició de l'activitat gènica; és a dir, la mateixa proteïna s'uneix a la regió reguladora del mateix gen, i n'inhibeix l'expressió. Aquest tipus de gens, sovint interactuant amb gens activadors, produeixen comportaments cíclics bàsics per explicar la segmentació en artròpodes i vertebrats, i els ritmes circadians i altres tipus de ritmes en molts organismes. En general, podem dir que les retroalimentacions positives permeten estabilitzar estadis i fer avançar el desenvolupament, mentre que les retroalimentacions negatives generen comportaments cíclics.

Els anomenats *efectes llindar* són efectes quantitius generats quan una proteïna, distribuïda en forma de gradient de concentració al llarg d'un eix embrionari o d'un teixit, activa diferents gens segons la concentració. Això es deu al fet que les zones reguladores dels gens tenen més o menys afinitat per la proteïna. Si l'afinitat és alta (p. ex., el gen A), el gen s'activa a partir de concentracions baixes de la proteïna; si és baixa (p. ex., el gen B), el gen ho fa a concentracions més altes. D'aquesta manera, i a partir d'una proteïna única, es generen zones o dominis embrionaris d'expressió gènica diferencial: una zona sense gens actius, una zona d'expressió del gen A, una altra del A i el B, una amb el A, el B, i el C, etc.

Finalment, per evitar l'expressió de gens en llocs on no hi han de ser, són freqüents els mecanismes de *repressió diferencial*. El resultat és que, en comptes de mantenir diferents gens activats simultàniament al mateix lloc, només n'hi ha un que ho està. Seguint l'exemple abans esmentat, un cop B s'activa, B inhibeix a A, i queda només B activat en la seva zona d'expressió. Si un altre gen (p. ex., C) s'activa a concentracions encara més altes, C inhibirà B i A i quedarà només C activat en la seva zona d'expressió. Cal dir que la repressió diferencial opera també mitjançant altres mecanismes. El resultat, però, és el mateix: refinar, cada cop més subtilment, el patró d'expressió dels gens.

### Propietats generals dels sistemes en desenvolupament

A diferència de les xarxes metabòliques cel·lulars, de les xarxes tròfiques o de interrelacions als ecosistemes i de les xarxes neuronals, les xarxes gèniques que controlen el desenvolupament són extremament dinàmiques, i l'expressió dels seus elements és recurrent i combinatorial seguint un programa invariant d'activació de gens i blocs de gens necessaris per a cada estadi i per a cada regió, mòdul, teixit i, finalment, tipus cel·lular. En altres paraules, la complexitat creix a mesura que augmenta el nombre de cèl·lules i de tipus cel·lulars i, amb aquestes, el nombre possible d'interaccions.

¿Podem deduir ja alguna propietat general comuna a les xarxes gèniques del desenvolupament? Avui dia, només hi ha dues propietats clares: 1) la presència de nombrosos mecanismes intergenètics de *feed-back* positiu que estableixen l'embrió en un estat gènic diferent i en fan avançar el desenvolupament i l'alliberen de les entrades transitòries inicials; aquest fet permet explicar alhora la invariança i la irreversibilitat del desenvolupament, i 2) la presència de nombrosos efectes de llindar d'activació, juntament amb mecanismes de repressió transcripcional i/o traduccional per evitar que un estat d'expressió gènica aparegui en altres



àrees de l'embrió. Aquesta propietat explica l'aparició progressiva en el temps i restringida en l'espai de dominis d'expressió gènica, base de la complexitat estructural de l'embrió i de l'organisme adult.

### Algunes paradoxes finals sobre gens i complexitat

*Paradoxa 1.* Hi ha relació entre el nombre de tipus cel·lulars i el nombre de gens? Les dades referides a cinc espècies prou diferents es mostra a continuació:

Organisme	Nombre de gens	Tipus cel·lulars diferents
Llevat	6.000	1
Mosca	14.850	60
Cuc	17.850	40
Planta	27.000	30
Home	35.000	300

És evident que, tot i observar-se una certa progressió, hi ha exemples contraris que no permeten inferir cap relació clara i molt menys lineal.

*Paradoxa 2.* Hi ha relació entre el nombre de gens i la complexitat morfològica? La complexitat morfològica és difícil de mesurar, tot i que una idea «intuïtiva» l'associa sovint al nombre de tipus cel·lulars. A continuació resumim les dades de quatre espècies animals prou diferents en complexitat morfològica:

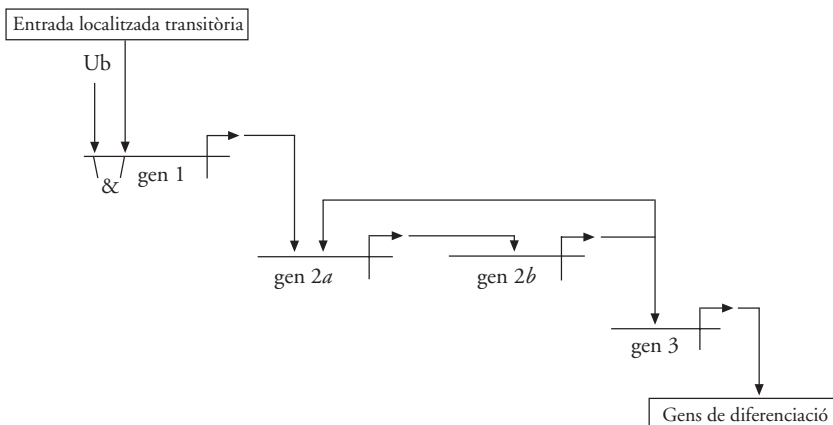
Organisme	Gens	Morfologia
Esponja	12.000	Primitiva
Corall	18.000	Primitiva
Mosca	14.850	Intermèdia
Home	35.000	Complexa

Sorprenentment, una esponja, organisme molt senzill amb només 4 o 5 tipus de cèl·lules, té ja vora de 12.000 gens, i un organisme simple com el corall té més gens (18.000) que la mosca (14.850). En resum, no hi cap relació clara entre nombre de gens i complexitat morfològica.

*Paradoxa 3.* Un altre exemple paradigmàtic és la «típica» comparació entre l'home i el ximpanzé, que, tot i diferir només en un 1,0% del seu genoma funcional (codificant), presenten diferències morfològiques i funcionals ben apreciables. A què es deurien aquestes diferències amb tan poc canvi genètic?

La resposta a cada una de les tres paradoxes rau probablement en les següents característiques dels gens i de les xarxes genètiques:

- 1) Els gens dels organismes més complexes semblen estar més connectats entre si mitjançant regions reguladores més complexes. És a dir, les diferències cal cercar-les més en el nombre i intensitat de les connexions que en el mer nombre de gens.
- 2) Els organismes més complexos estan formats per mòduls morfològics (segments, artells, extremitats, etc.) repetits moltes vegades que utilitzen els mateixos programes genètics amb lleugeres variacions. Això permet diversificar tipus cel·lulars i morfologies sense incrementar necessàriament, o excessivament, el nombre de gens.
- 3) Les diferències entre espècies morfològicament properes (p. ex., home i ximpanzé) no depenen de variacions en el nombre de gens ni en el nombre d'interaccions genètiques, sinó en canvis (sovint subtils) a les zones reguladores de gens clau que generen canvis d'expressió gènica en l'espai i el temps, base de noves morfologies.



Esquema, molt simplificat, d'una cadena jeràrquica d'activació de gens (gen 1, gens 2a i 2b, gen 3, i gens finals de diferenciació), on es mostren algunes de les característiques bàsiques dels sistemes de regulació gènica al llarg del desenvolupament. Així, el gen 1 és activat per un senyal ubic (Ub) + un altre senyal transitori (combinatòria). El gen 1 activa al gen 2a, que, al seu torn, activa el gen 2b. Mentre activa el gen 3, el gen 2b també activa per *feed-back* positiu al gen 2a. D'aquesta manera es crea una activació mútua entre els gens 2a i 2b que els fa independents de l'activació per part del gen 1. La resultant d'aquest senzill esquema és la progressió d'un estat d'expressió gènica a un altre fins a arribar a l'activació dels gens de diferenciació.

## Xarxes de mobilitat

Joan López Redondo

Institut d'Estudis Regionals i Metropolitans de Barcelona

La mobilitat ha funcionat sempre en xarxa, però la manera com aquesta xarxa s'ha estructurat no sempre ha estat tan complexa com en l'actualitat. En les darreres dues dècades la mobilitat ha experimentat un profund procés de transformació que ha derivat en l'actual model. Aquest procés es pot caracteritzar per tres característiques fonamentals: 1) cada dia ens movem més i, a més, recorrem distàncies més llargues; 2) els orígens i destins són cada cop més diversos, en una progressiva relació de «tots contra tots»; i 3) els desplaçaments mostren una creixent complexitat, tant pel que fa als mitjans utilitzats, com als seus recorreguts.

### L'augment de la mobilitat

Quina evidència tenim sobre la qual recolzi aquesta afirmació? Els tècnics usem un indicador molt senzill, l'anomenat «percentatge d'autocontenció». En el cas de la mobilitat laboral, aquest percentatge es defineix com la proporció de població ocupada resident en un municipi que, a més, hi treballa. La mateixa definició es podria aplicar als desplaçaments per motiu d'estudis, de compres, de lleure, etc. i parlaríem de percentatge d'autocontenció pels estudis, pel lleure, etc. Un percentatge d'autocontenció elevat indica que els municipis són tancats; al contrari, una baixa autocontenció indica una tendència a sortir fora del municipi, a moure's molt.

Què ha passat a Catalunya en els darrers anys? Segons les dades del Padró d'habitants del 1996, entre el 1986 i el 1996 l'autocontenció mitjana dels municipis de Catalunya va baixar del 70,6 fins al 57,6%. Això vol dir que pràcticament una de cada dues persones ocupades de Catalunya treballava fora del seu lloc de residència l'any 1996. Sobre el territori es pot observar que els nuclis més grans de població tenen una elevada autocontenció, mentre que al seu voltant trobem municipis més

oberts: la seva població tendeix a desplaçar-se cap a les ciutats properes per anar a treballar. Aquest patró general, observat el 1986, va derivar, com s'ha esmentat, cap a una important davallada dels percentatges d'autocontenció el 1996. Per exemple, en el mapa de la regió metropolitana de Barcelona, amb les set comarques i els 164 municipis, veiem que l'any 1986 els pobladors dels municipis veïns de la metròpoli mostraven ja una clara tendència a anar a Barcelona, mentre que els més llunyans presentaven poca mobilitat. Una dècada més tard, s'eixampla l'àmbit d'influència de la ciutat i les persones vénen de més lluny a treballar a Barcelona. A més, aquests desplaçaments fora del municipi afecten un ventall d'activitats cada cop més gran: el treball, les compres, el lleure, els estudis, la pràctica d'esports, etc. Aquest exemple de Barcelona és paral·lel al que es produeix en altres ciutats de Catalunya. Conclusió: ens movem més i les distàncies son més grans.

### Cap a estructures complexes

El segon aspecte és la multiplicació de les destinacions. La manera més habitual d'estudiar-ho és a partir del que anomenem el «primer flux». Cada municipi té un contingent de població que treballa al mateix municipi, i un altre que va a treballar a fora. Ordenant de major a menor les destinacions i seleccionant el primer flux de la llista, ho podem representar sobre una cartografia i obtenim un mapa de relacions de mobilitat. Aquest mapa mostra que, malgrat que ha baixat l'autocontenció, gairebé sempre la destinació més important és el mateix municipi (l'excepció la constitueixen les ciutats amb forta especialització residencial). Si deixem de banda el mateix municipi i representem el primer flux extramunicipal, apareixen determinades centralitats (Barcelona, Vic, Manresa, Sabadell, Terrassa, Mataró, Vilafranca, Vilanova i Granollers, entre d'altres) que articulen al seu voltant àmbits d'escala supramunicipal i fins i tot comarcal. Malgrat aquest aparent ordre, la mobilitat tendeix a desestructurar-se: es multipliquen els orígens i els destins i trobem un panorama molt complex de mobilitat en xarxa, en una estructura de «tots contra tots». Com ho podem identificar i descriure? Tècnicament aquest fet és observable a partir de l'aplicació d'un mètode conegut com a «selecció de fluxos significatius», que permet distingir els fluxos estadísticament importants dels que no ho són. A Catalunya, l'any 1986 la majoria de municipis tenien un únic flux significatiu. Únicament a la zona més poblada dels municipis propers a Barcelona hi havia un ventall més ampli de destinacions i la mobilitat no estava tan clarament canalitzada cap a un únic punt. L'any 1996, però, aquesta situació ha

canviat força: cada vegada més municipis dispersen més la població en diferents destinacions, tot donant com a resultat estructures de mobilitat encaminades a la multidireccionalitat. I aquest fet, com veurem, posa importants problemes en la gestió de la mobilitat.

Al mateix temps, aquests desplaçaments s'encadenen en seqüències progressivament més complexes de trajectes. Lluny de representar una connexió directa entre dos punts, els desplaçaments utilitzen diversos mitjans per enllaçar diferents trajectes que permetin completar aquesta connexió. I, una cosa que encara planteja més problemes, la majoria d'aquests moviments han perdut fidelitat tant pel que fa a la destinació final com al temps: els desplaçaments d'avui seran diferents dels que farem demà, perquè anirem a llocs diversos, en moments del dia diferents i fent servir mitjans de transport també diferents.

La dispersió dels fluxos i l'increment de la seva complexitat ha comportat el pas d'una situació de mobilitat concentrada i lineal, fàcil de gestionar i de col·lectivitzar, a una situació de multiplicitat de destinacions i de cadència variable, és a dir, cap a un model en xarxa on s'individuallitzen els desplaçaments. És molt difícil dotar adequadament un tal funcionament de transport col·lectiu, ja que necessita unes masses crítiques que el facin rendible. En un escenari on hi ha una singularització dels fluxos, el transport privat esdevé, per la seva més gran flexibilitat, el gran beneficiat. Això explica la tendència dels darrers anys a un augment del transport privat enfront del transport col·lectiu. Entre el 1986 i el 1996 l'augment de les distàncies recorregudes ha provocat una pèrdua de pes dels desplaçaments a peu, pèrdua que ha estat recollida pel transport privat, mentre que el transport col·lectiu s'ha mantingut igual.

### **Causes del model actual de mobilitat**

Per què es produeixen aquests canvis en les pautes de mobilitat? En primer lloc, perquè és possible: hi ha hagut un gran increment de l'accessibilitat en els darrers anys gràcies a la construcció o ampliació de moltes infraestructures viàries importants, alhora que ha augmentat el nivell de vida dels ciutadans tot afavorint la motorització. Pel que fa al transport col·lectiu, s'han produït també notables millores, no tant en l'extensió de la xarxa, sinó sobretot en l'augment de freqüència, d'intercanviabilitat i de versatilitat en els desplaçaments. No obstant això, aquests increments d'accessibilitat perden els seus avantatges molt ràpidament, ja que l'increment d'accessibilitat significa que una determinada distància pugui ser recorreguda en un temps més breu, però vol dir també que, en un mateix període de temps, es poden recórrer distàncies més llargues.

I així, mentre que els planificadors i gestors de la mobilitat miren d'incrementar l'accessibilitat per tal que els ciutadans inverteixin menys temps en els desplaçaments, nosaltres aprofitem això per anar més lluny. No tendim a valorar els desplaçaments en distància, sinó en temps, tot adjudicant un límit màxim de temps per fer les diferents tasques. Si les infraestructures milloren i podem augmentar la velocitat del desplaçament, la tendència és a anar més lluny destinant-hi el mateix temps. A Barcelona, entre el 1986 i el 1996, les distàncies que es recorrien per anar a treballar van augmentar un 23%. En canvi, el temps emprat per anar a treballar es va mantenir estable.

La segona gran causa d'aquest augment de la mobilitat és la nostra pròpia voluntat de desplaçar-nos. Al llarg dels darrers anys, s'ha produït un increment del nivell de vida dels ciutadans, així com una sofisticació de l'activitat productiva que ha comportat un increment del nivell d'exigència. Cada vegada afinem més en el que volem, i en quan i com ho volem. Tot això va en detriment del «on ho volem». Ens movem més perquè volem uns productes determinats i no ens fa res incrementar la mobilitat per satisfer aquests desigs.

Finalment, fins a cert punt, hi estem obligats per la manera en què s'estructura el territori. Per escassetat de sòl, per qüestions econòmiques (alts preus de l'habitatge a les àrees urbanes més densificades) o per canvis en el sistema de valors, moltes famílies han hagut d'instal·lar-se fora de Barcelona, mentre que les activitats, especialment les industrials, han fet en bona part el mateix. S'ha produït, d'aquesta manera, una segregació dels usos, de forma que el que abans era compacte ara està escampat en el territori. L'increment d'accessibilitat ha provocat, així, una redistribució de les activitats en el territori.

És a dir, i simplificant força les causes, podem dir que ens movem més i més lluny perquè podem (increment d'accessibilitat) i perquè volem (increment del nivell d'exigències), però també en certa manera perquè hi estem obligats (segregació d'usos en el territori).

### **Conseqüències del model**

Els costos de la mobilitat han estat sovint identificats i avaluats pels experts: costos econòmics, de temps, de sinistralitat, de contaminació, de consum de recursos, i de consum de sòl (tot provocant l'esquarterament del territori i el trencament de la connectivitat natural). Aquests costos es multipliquen, a més, pel funcionament en xarxa de la mobilitat que hem descrit més amunt, i pel fet que es tendeix a basar de manera creixent en mitjans de transport motoritzats i individuals.

Al costat d'aquests costos, però, no hem d'oblidar que la mobilitat també té uns beneficis, com per exemple, un increment de les oportunitats per a les persones, en oferir-los la possibilitat d'escollir sobre un ventall més ampli el lloc on realitzar les seves activitats de treball, d'estudi, de lleure, etc. Individus que abans no podien fer determinades activitats perquè no hi havia oferta al seu entorn proper, veuen ara ampliables les seves possibilitats gràcies a una major capacitat de desplaçar-se.

Tenint en compte l'existència d'aquests costos i aquests beneficis, cal preguntar-se si el nou model de mobilitat és en definitiva positiu o negatiu. Per contestar hem de tenir en compte que els individus, a l'hora de desplaçar-nos, fem un balanç valorant els costos i els avantatges. Si el resultat d'aquest balanç és positiu, ens desplaçarem. Des d'aquesta interpretació, i tenint en compte que la mobilitat ha augmentat i la manera com ho ha fet, podem arribar a concloure que la mobilitat és positiva.

Hi ha, però, alguns matisos que poden fer canviar força el resultat final de l'equació. Així, en primer lloc, la majoria dels ciutadans no disposen d'informació perfecta i completa dels costos de la mobilitat. S'acostumen a tenir en compte els costos econòmics, potser també els costos en temps, o la sinistralitat, però gairebé mai no es tenen en compte els costos ambientals, com ara l'ús de recursos no renovables, l'emissió de contaminants, o l'ús del territori. Però, àdhuc si consideréssim totes aquestes qüestions ambientals dins del nostre balanç i ens sortís positiu, encara caldria considerar un altre aspecte: quan sumem la voluntat de desplaçar-se de tots els individus, la situació deriva cap a la congestió. I la congestió multiplica els costos. Tot i així, i fins i tot si el resultat fos encara positiu, hauríem de considerar que aquest aspecte positiu ho és per a nosaltres, però potser no ho és per a terceres persones: els beneficis de la mobilitat recauen exclusivament sobre els qui es desplacen, però els costos repercuteixen sobre tothom, tant si es belluguen com si no ho fan. D'aquesta manera, hi ha una part de la població que paga els costos (ambientals, de contaminació, etc.) de la mobilitat sense gaudir, en canvi, dels beneficis d'aquesta.

### **Quines solucions hi ha per pal·liar els efectes negatius de la mobilitat?**

Per pal·liar aquests efectes negatius s'han aplicat diverses mesures, i se n'estan discutint moltes altres, entre les quals hi ha les següents:

- 1) Mesures directes, que miren d'afavorir el transport col·lectiu, o la col·lectivització dels desplaçaments. Aquí inclouríem la millora de

la xarxa de transport col·lectiu i la intermodalitat que s'ha posat en funcionament en els darrers anys. Hi ha la intermodalitat entre mitjans públics, com ara la integració tarifària, que tan bons resultats ha donat; o, a més de la intermodalitat públic-públic, també la de caire públic-privat, que reconeix que la mobilitat en xarxa no es pot servir en la seva totalitat amb el transport públic i promou la combinació de transport privat i públic com, per exemple, amb el *park and ride*, o sigui amb pàrquings al costat de les estacions de ferrocarril; o el vehicle compartit; o flotes de vehicles per la ciutat a disposició per a qui en vulgui fer ús, en el que s'ha anomenat *car-sharing*.

- 2) Polítiques conscients del fet que el transport públic veu limitada la seva capacitat per satisfer una demanda de transport molt individualitzada, i que tendeixen, per tant, a minimitzar els efectes del transport privat, tant pel que fa al disseny dels vehicles (tot reduint-ne la contaminació o el soroll) com al de les infraestructures (per tal de reduir-ne l'impacte).
- 3) Finalment, polítiques d'ordenació del territori buscant la planificació de la ciutat compacta i diversa, que, de fet, és la tradicional a la Mediterrània. Polítiques per planificar els serveis per poder-los utilitzar amb mitjans no mecanitzats, en desplaçaments a peu, amb bicicleta, etc.

Amb la consideració seriosa d'aquestes propostes podem mitigar el gran impacte econòmic i ambiental de l'insostenible model actual.



# Models senzills per entendre sistemes ecològics complexos

Josep Piñol

Centre de Recerca Ecològica i d'Aplicacions Forestals (CREAF)  
Universitat Autònoma de Barcelona

## Introducció

En un sistema ecològic hi ha molts actors implicats, molts individus de moltes espècies diferents que interaccionen de moltes i variades maneres. Unes espècies comparteixen els mateixos recursos i entren en competència per aquests, d'altres es mengen (interacció depredador-presa), i d'altres s'ajuden establint les relacions anomenades mutualistes. D'altra banda, les espècies viuen en un medi sotmès a uns factors variables externs, com el clima o l'acció de l'home. I, a més, tot això es complica perquè aquestes espècies es troben en un entorn heterogeni en l'espai, i sotmeses a una elevada variabilitat temporal.

Malgrat que, com veiem, aquesta realitat és molt complexa, els models no tenen per què ser-ho. I, en aquest sentit, hi ha una regla d'aplicació general: com més s'assembla un model a la realitat (i és, per tant, més complex), més difícil és d'entendre. En conseqüència, si una de les finalitats dels models és entendre la realitat, els models complexos no ens hi ajuden pas.

Jo entenc que un model és la representació d'algun aspecte de la realitat. Aquesta representació pot ser simplement en forma d'unes idees o unes frases. Però, anant una mica més enllà, podem formular-lo amb unes equacions matemàtiques i així obtenir més poder explicatiu i predictiu. Aquestes equacions, si són senzilles, es poden resoldre analíticament i tenim un resultat definit. Sovint, però, no s'arriba a aquest resultat i les hem de resoldre numèricament amb l'ajuda dels ordinadors. Aleshores, un model acaba essent un programa d'ordinador que fa una sèrie de càlculs. Les finalitats dels models són, d'una banda, entendre el que estem estudiant i, de l'altra, poder fer prediccions.

En els models senzills que presentaré, del que es tracta és d'identificar els processos rellevants en cada cas. Ens interessa centrar-nos en els

aspectes essencials i deixar fora la resta. No és una tasca fàcil, ja que d'entrada no sabem què és important en cada cas.

Jo utilitzo, a les meves classes d'ecologia, una col·lecció d'*applets*, o programes que es poden executar per Internet. Això té l'avantatge que els estudiants poden fer des de casa el mateix que es fa a classe. Són models senzills d'ecologia general, fàcils d'utilitzar, gratuïts per a qui vulgui ensenyar o aprendre ecologia, i no requereixen instal·lació. Els podeu trobar a l'adreça: <http://www.creaf.uab.es/jpinol>.

A continuació tractarem aquestes idees generals sobre els models amb dos exemples. El primer se centra en la comunitat d'artròpodes de les capçades dels arbres d'una plantació de cítrics, i el segon és sobre els incendis forestals.

### Comunitat d'artròpodes

Hem estudiat una comunitat d'artròpodes de les capçades dels arbres d'una plantació de mandariners. Com hem dit anteriorment, la natura és complexa i els sistemes ecològics són complicats. Per simplificar, n'hem triat un de més senzill (un sistema agrícola és més senzill que un sistema forestal, un prat o qualsevol altre sistema natural) amb la idea de reduir la complexitat i abordar-lo millor. Els objectius, en aquest treball, han estat: 1) estudiar la comunitat al llarg del temps per saber com s'estructura, i 2) com que és una plantació de cítrics ecològica, tractar de millorar el control de plagues per sistemes naturals.

A les capçades, hi trobem una gran varietat d'artròpodes, dels grups dels psocòpters, homòpters, coleòpters, himenòpters, dípters i de les aranyes. Els psocòpters són molt abundants, tot i que són poc coneguts. Són brostejadors que aparentment no afecten l'arbre, ja que mengen el que hi ha a la superfície de fulles i troncs, com per exemple fongs o pol·len. La seva dinàmica, en els tres anys d'estudi, presenta un màxim a la primavera. Tot i així, aquesta pauta no es veu en el darrer any, cosa que concorda amb el fet que les generalitzacions són molt difícils en ecologia. Els homòpters inclouen les principals plagues dels cítrics: el pugó (tres espècies), la mosca blanca i la caparreta. Les aranyes són depredadors generalistes, que mengen pugó però també tot el que poden arrebregar. Les aranyes presenten una abundància relativament constant al llarg del temps. Els principals coleòpters són els coccinèlids (les marietes). Són els principals depredadors de pugó i d'altres insectes plaga, i per tant són beneficiosos per al pagès. Els himenòpters es poden dividir en dos grups: 1) les formigues, que tenen cura del seu ramat de pugó en una relació mutualista per la qual obtenen aliment del pugó i, a canvi,

el protegeixen de depredadors, i 2) els parasitoides. Els parasitoides es caracteritzen perquè la femella pon els ous dins de larves d'altres insectes. Des d'aquest punt de vista, els parasitoides són interessants per al control de plagues, ja que dipositen els ous sobre larves de plagues, a les quals maten. D'heteròpters (xinxes) n'hi ha molts, alguns són depredadors de pugó, d'altres són plagues, i encara n'hi ha que són neutres. Altres depredadors són neuròpters, com la crisopa, la qual, tant en forma adulta com de larva, és una voraç depredadora de pugó.

En conjunt, en aquesta plantació tenim classificades 66 espècies d'artòpodes, però estimem que, en el total del que hem mostrejat fins ara, en devem tenir unes 180-200. De manera que, tot i que nosaltres preteníem estar davant d'un sistema senzill, tenim un nombre molt considerable d'espècies.

Com s'organitzen aquestes espècies? En ecologia, una manera d'organitzar les espècies és en una xarxa tròfica, segons qui menja a qui. En el nostre sistema tenim una única espècie vegetal, els mandariners. La plaga principal és la del pugó, acompanyat d'altres plagues, com les caparretes. A més, hi ha altres herbívors que no es poden considerar plagues. En un altre nivell tròfic trobem els depredadors del pugó, com les marietes i altres depredadors. Després tenim les aranyes, que depreden tots els insectes. Els parasitoides ataquen pràcticament tots els insectes. Les formigues, com s'ha dit, tenen una relació mutualista amb el pugó, però a vegades també el maten. D'altra banda, les formigues, en la seva dèria per protegir els ramats de pugó, també eliminen altres depredadors d'aquest. A part, hi ha animals brostejadors o detritívors, que no afecten l'arbre però que entren a la xarxa tròfica en ser depredats per altres insectes.

En el model podríem destacar les abundàncies de cadascuna de les espècies i els fluxos de depredació entre aquestes. No obstant això, aquestes abundàncies varien amb el temps. Al març hi ha un 80% de psocòpters, però al juny el que domina és el pugó i els seus depredadors. A l'agost ja no queden pugons i dominen les aranyes i els coleòpters, amb alguns himenòpters. Al novembre la comunitat és més diversa, amb aranyes, himenòpters, coleòpters i colèmbols. Com es pot veure, som davant d'una comunitat molt dinàmica. Ara mateix, no entenem ben bé totes les interaccions d'aquesta comunitat, ja que n'hi ha moltes que no les coneixem prou. Però n'entenem algunes, i d'aquestes en podem fer models senzills. Ara presentaré alguns resultats aplicant el model exponencial i el model depredador-presa. També posaré un exemple d'interaccions de signe oposat per valorar com queda el balanç entre interaccions de signe positiu i interaccions de signe negatiu.

El model exponencial de creixement de poblacions és senzill. Simplement diu que el creixement d'una població és proporcional a la mida de la població ( $N$ ).

$$\text{Creixement} = r \cdot N$$

El paràmetre  $r$  s'anomena taxa instantània de creixement. La forma com s'acostuma a presentar el model exponencial és:

$$N_t = N_0 \cdot e^{rt}$$

Aquest model és característic de poblacions que poden créixer sense res que les limiti, és a dir, disposant de recursos il·limitats i sense enemics. Doncs bé, en aquests mandariners, el pugó creix exponencialment fins que arriben els depredadors. Aleshores els pugons desapareixen.

Aquest model també es pot aplicar al creixement de la humanitat. Entre l'any 1000 a.C. i el 1500 d.C. la població humana ha crescut de forma exponencial. Però més recentment, en el segle XX, el creixement exponencial encara s'ha accentuat. Actualment, s'afegeixen cada mes a la població mundial uns 6,5 milions de persones, l'equivalent de la població de Catalunya,

Un altre dels models a què volia referir-me és el de depredador-presa de Lotka i Volterra. El model és bàsicament semblant a l'exponencial, al qual s'afegeix un terme per a la interacció, i on  $P$  representa les preses i  $D$  els depredadors, i  $q$  és la taxa de mortalitat del depredador.

L'equació per a les preses és:

$$\text{Creixement de preses} = (r \cdot P) - (a \cdot P \cdot D),$$

on el primer terme de l'equació representa el creixement exponencial que tenen les preses i el segon inclou les pèrdues per depredació, amb signe negatiu, ja que la interacció depredador-presa fa disminuir el creixement de les preses.

L'equació dels depredadors és:

$$\text{Creixement dels depredadors} = (-q \cdot D) + (b \cdot D \cdot P).$$

El model de Lotka i Volterra considera que, si només hi ha depredadors, aquests es van morint per manca d'aliment (d'aquí el signe negatiu del primer terme de l'equació), però que, si els depredadors fan contacte amb preses, augmenta la població dels primers.

Quines conseqüències té això per a la dinàmica de les poblacions de preses i de depredadors? De la interacció depredador-presa en resulten

unes oscil·lacions degudes al fet que, si hi ha moltes preses, augmenten els depredadors, i també al fet que, si hi ha molts depredadors, disminueixen les preses. Quan les preses ja han disminuït prou, els depredadors disminueixen, i si aquests disminueixen, les preses tornen a augmentar i recomença el cicle.

En els nostres mandariners tenim una presa, *Icerya purchasi* (caparreta acanalada), i un depredador (*Rodolia cardinalis*, marieta) que presenten un cicle depredador-presa com el descrit anteriorment. Aquest cicle figura en molts llibres de text com a exemple de control biològic de plagues. La caparreta és d'origen australià, i va arribar cap als anys 1880 als EUA, on va arrasar els conreus de cítrics de Califòrnia. Els pragmàtics americans van enviar un entomòleg a Austràlia per trobar depredadors de la caparreta. Van trobar la marieta i la van introduir a Califòrnia, on va controlar la plaga amb molt d'èxit.

Finalment, com a darrer exemple de la comunitat d'artròpodes dels mandariners, us presentaré un exemple d'un experiment per intentar controlar el pugó d'una forma compatible amb l'agricultura ecològica. Empesos per l'observació del fet que la formiga i el pugó són mutualistes, vam formular la hipòtesi que, si perjudicàvem les formigues, també perjudicàriem els seus amics pugons. Com que les formigues fan el niu al terra, vam col·locar cola entomològica al tronc per evitar que pugessin fins a les branques on es troben els pugons. Vam pensar que, eliminant les formigues, hi hauria més depredadors dels pugons i que això els perjudicaria. A la pràctica va passar justament a l'inrevés: els arbres sense formigues tenien més pugó que els que en tenien. Això constitueix un exemple més de la complexitat que ens ocupa. Nosaltres volíem eliminar uns mutualistes; però, de fet, vam eliminar els mutualistes; i, alhora, involuntàriament, també vam eliminar un depredador de pugons. Els mutualistes afavoreixen el pugó, i per tant pensàvem que la seva absència havia de perjudicar-lo. Però va resultar que la cola entomològica també feia fora un depredador del pugó (la tisorettes, un dermàpter), i aquesta absència va afavorir el pugó. En aquest cas en particular, va pesar més l'absència del depredador que la presència dels mutualistes, i per tant va augmentar la presa, es a dir, el pugó.

Hem parlat d'una comunitat senzilla i, malgrat això, hem vist que encara té una complexitat notable, amb moltes espècies, moltes interaccions i alguns efectes inesperats. També veiem que aquesta comunitat constitueix un bon sistema experimental per a l'estudi de les interaccions com ara la depredació, el mutualisme o la competència, i la dinàmica d'aquesta comunitat es pot explicar bé amb uns models senzills.

## Els grans incendis forestals

Al nostre país, i arreu del món, ens trobem que la major part de la superfície cremada és deguda a pocs, però molt grans, incendis. Considerem com a gran incendi el que afecta més de mil hectàrees cremades. A Tarragona, només un 1,5% dels focs és responsable del 65% de la superfície cremada. Aquests focs preocupen perquè són molt destructius, afecten grans extensions de bosc i propietats privades i, arran de la seva virulència, provoquen accidents mortals. Com solucionar el problema dels grans incendis? S'han fet moltes propostes. Hi ha qui diu que s'haurien de tenir més mitjans d'extinció, hi ha qui diu que s'han de controlar més bé les ignicions, i hi ha qui pensa que el que s'ha de fer és no tenir tant de combustible al bosc. Davant de tantes propostes, podem fer un petit model per intentar valorar les opcions. La variable dependent seria el nombre d'incendis. Si tenim més ignicions, més combustible i una meteorologia adversa, tindrem més incendis. Per contra, amb més capacitat d'extinció tindrem menys incendis. A vegades, es canvia la variable de nombre d'incendis per la de superfície cremada. I es considera, de forma anàloga al cas anterior, que, si tenim més ignicions, més combustible, una meteorologia adversa i menys capacitat d'extinció, tindrem més superfície cremada. Fins i tot a vegades es fa un pas més enllà i se substitueix la variable «superfície cremada» per la de «grans incendis», dient el mateix. Però aquí l'analogia no és tan senzilla; hi falten les interaccions. Per exemple, les ignicions tenen un efecte sobre l'acumulació de combustible: si hi ha més ignicions, s'acumula menys combustible, i si hi ha menys combustible, hi haurà menys grans incendis. Per tant, les ignicions influeixen en els grans incendis de dues maneres oposades: augmentant-los, com hem vist al principi, i disminuint-los, per aquest efecte sobre l'acumulació de combustible. Un cas similar d'efectes oposats passa amb l'extinció: si hi ha més extinció, afavorim l'acumulació de combustible, i, si hi ha més combustible, hi haurà més incendis; però al principi havíem vist que més extinció implicava menys incendis. Així, no sabem quin serà l'efecte dominant, si el que afavoreix els incendis o el seu contrari.

En aquest punt, vull introduir el treball de Minnich que des de fa uns vint anys està investigant aquests problemes. Va fer una comparació entre el sud de Califòrnia (EUA) i la Baixa Califòrnia Nord (Mèxic), dues zones a tocar però que corresponen a dos països diferents i que han usat estratègies oposades d'extinció d'incendis durant tot el segle XX. Als EUA, quan hi ha un foc, el van a apagar immediatament, mentre que a Mèxic, quan hi ha un foc, el deixen cremar. Malgrat aquestes radicals

diferències de gestió, Minnich va trobar que crema aproximadament la mateixa superfície a les dues zones, un 1,4% del territori cada any. També va veure que al sud de Califòrnia (EUA), els incendis són més grans. Minnich formula aleshores «la paradoxa de l'extinció», que diu: els grans incendis són conseqüència de l'extinció. O que, si no apaguéssim els focs, no tindríem tants grans incendis. La raó és que, quan apaguem els incendis, permetem l'acumulació de combustible. Aleshores, quan arriba un any de climatologia molt adversa, aquestes condicions ambientals desfavorables, junt amb la gran quantitat de combustible, fan que l'incendi esdevingui incontrolable, i molt gran. Una conseqüència pràctica i molt important d'aquesta hipòtesi és que una manera molt eficaç de lluitar contra els grans incendis és reduint la quantitat de combustible, per exemple, per mitjà de cremes prescrites, o amb la introducció de la ramaderia o la reducció mecànica del combustible. De totes maneres, aquesta hipòtesi encara no està demostrada. També hi ha una hipòtesi alternativa. La hipòtesi de Minnich considera que els grans incendis succeeixen perquè hi ha una gran quantitat de combustible, preparat per cremar, i que el foc prescrit, en tant que redueix combustible, és una eina eficaç. La hipòtesi alternativa, en canvi, considera que els grans incendis tenen lloc quan hi ha una meteorologia molt adversa, i això fa que cremi tot, tant si hi ha molt combustible com poc; en aquest cas, els focs prescrits, que redueixen combustible, no ajudarien a evitar-los.

Podem testar aquestes hipòtesis? Normalment, en ciència fem experiments, però en aquest tema no podem fer-los per l'extensió espacial i temporal que representen i el risc que hi va associat. En canvi, sí que podem fer una exploració a través de models. A continuació presentaré un model per reproduir el règim de focs a llarg termini en una regió. Per règim de focs, entenem el nombre d'incendis, la superfície que crema i la mida de l'àrea cremada. Amb el model calibrat, podrem analitzar separatament els diferents factors implicats: la meteorologia, el nombre d'ignicions, el creixement de la vegetació, l'efecte dels bombers, o el de les cremes prescrites. Aquest model es pot utilitzar per Internet si accediu a: <http://www.creaf.uab.es/jpinol/FireRegime>.

El model parteix d'una superfície homogènia amb l'única diferència de l'edat de la vegetació. Cada any hi ha una quantitat determinada d'ignicions. Quan hi ha una ignició, el foc pot propagar-se o no. Si es propaga, es converteix en incendi, i aleshores els bombers poden extingir-lo o no, depenent de la mida i de la seva capacitat d'extinció. La capacitat d'extinció i l'existència de cremes prescrites són paràmetres que s'inclouen *ad hoc*. Al final de l'any, la vegetació que no ha cremat és un any més vella, i torna a començar el cicle. La propagació depèn de la mete-

orologia de l'any i de l'edat de la vegetació, que fa que hi hagi més o menys combustible. El model només intenta reproduir el nombre d'incendis, la superfície cremada i la distribució de l'àrea cremada en classes de mida. En aquest sentit, és un model senzill que intenta reproduir un sistema molt complex quant a topografia, vegetació, acció humana, usos del sòl, meteorologia, etc.

El model, l'hem aplicat a la província de Tarragona. Observem que en la situació actual hi ha 71.763 ha cremades en cinquanta anys, xifra que representa unes 1.500 ha a l'any. Quan provem l'efecte d'incrementar la capacitat d'extinció, obtenim que cremen 86.300 ha en cinquanta anys, una àrea molt semblant al cas anterior. Si preteníem reduir la superfície cremada i els grans incendis, no ho hem aconseguit.

Podem provar una altra situació, deixant la mateixa càrrega de bombers i augmentant les cremes prescrites. Els resultats indiquen que, a més foc prescrit o altres tècniques de reducció de combustible, hi ha menys superfície cremada en focs salvatges (és a dir, es produeixen menys grans incendis), mentre que l'àrea cremada total sumant la de les cremes prescrites i les de focs salvatges es manté igual. Aquesta simulació l'hem provat a Tarragona, Portugal, Califòrnia i el sud de França. En totes les zones hem obtingut que l'àrea total cremada és independent de l'esforç utilitzat per reduir-la. Respecte de la superfície que a llarg termini es crema cada any, no hi podem fer res, i sembla dependre de la climatologia de la zona i del tipus de vegetació. Però l'extinció incrementa lleugerament els grans incendis, i el foc prescrit o la gestió del combustible redueix dràsticament el nombre de grans incendis. Aquest model és compatible amb la hipòtesi de Minnich, però no amb la de la meteorologia. Això té unes conseqüències pràctiques molt importants: bàsicament, ens diu que, en lloc d'anar a apagar focs, hem de posar els bombers a treballar en la reducció del combustible.



# Intel·ligència artificial

Josep M. Garrell

Departament d'Informàtica  
Universitat Ramon Llull

## Perspectiva històrica

L'origen de la intel·ligència artificial es pot situar aproximadament l'any 1956, quan un grup integrat per John McCarthy, Marvin Minski i Herb Simon confluïren en uns objectius bàsics: elaborar programes que fessin coses o tasques que es consideren intel·ligents. Acordaren posar el nom d'intel·ligència artificial als resultats de les seves investigacions.

L'agrupació de tècniques que ells van decidir que serien intel·ligents són les que permeten construir un comportament d'una manera artificial, el qual, observat en un ésser humà, seria considerat intel·ligent. També és cert que el que considerem intel·ligent en els humans es mou en una banda difusa. No obstant això, es van començar a fer algunes troballes que van donar nou impuls a les investigacions. Entre els primers desenvolupaments hi figuren els jocs d'escacs. Aquests sempre s'han considerat un exemple de la destresa, l'habilitat i la intel·ligència pròpies de l'home. Els jocs d'escacs aglutinen diferents tècniques que els fan molt atractius des del punt de vista de la programació. La programació de màquines per jugar als escacs ha avançat tant, que, avui dia, els millors jugadors del món ja no poden guanyar jugant contra un ordinador.

A mitjan anys cinquanta o principi dels seixanta, es van produir dos fets que van fer possible allò que pocs anys enrere només era una utopia. D'una banda, la potència de càlcul va augmentar espectacularment, i es començà a disposar de màquines suficientment potents per fer càlculs rapidíssims, i, de l'altra, es va produir una adequada formalització de la teoria de la lògica matemàtica. Aquesta combinació de potència de càlcul i de lògica matemàtica va permetre un gran desplegament en l'activitat referent a la intel·ligència artificial.

En el tema d'automatització de processos, cal dir que un ordinador fa coses extremament simples, però les fa d'una manera molt ràpida.

Són processos que en aquestes velocitats tan ràpides donen una potència que abans no teníem. Però és virtut nostra saber organitzar els processos per obtenir els objectius que ens interessin. Alguns exemples d'ús ben coneguts serien la tramesa de correu o la gestió de comptes bancaris. En temes científics tindríem els càlculs orbitals o els càlculs balístics.

Respecte de la lògica matemàtica, es tracta d'un camp molt antic (els grecs ja l'havien resolt) que recentment s'ha aconseguit formalitzar millor. La lògica matemàtica té molt àmplia aplicació, però pel que aquí ens ocupa permet descriure les regles que codifiquen els coneixements i utilitzar determinats mecanismes per treballar amb els fets o amb les regles. Seria l'equivalent a «raonar». Per veure un exemple senzill: diem que «si plou i fa sol, les bruixes es pentinen». Simplificant el procés lògic, tenim que si passa A, i a més passa B, aleshores passa C. No hi ha intel·ligència, sinó que el resultat s'obté d'aplicar una regla determinada. Cal una representació del coneixement i cal explicitar-lo en forma de regla. Si som capaços d'integrar els dos aspectes (rapidesa de càlcul i lògica matemàtica), s'arriba a una gran potència en intel·ligència artificial.

### Sistemes experts

A partir d'aquí es van crear sistemes que contenien una multitud de regles, i on els fets no necessàriament havien de ser categòrics. Es va començar a construir el que primerament es va anomenar «programes raonadors» i després «sistemes experts». L'objectiu d'un sistema expert és automatitzar l'experiència d'un expert humà, el seu saber fer bé una determinada tasca perquè la pugui fer una màquina. De sistemes experts n'hi ha hagut moltíssims, tot i que van anar de baixa a partir d'una determinada època. Un d'aquests és ELIZA, que es pot trobar a Internet a l'adreça [www-ai.ijs.si/eliza/eliza.htm](http://www-ai.ijs.si/eliza/eliza.htm). ELIZA, creat com si fos un joc, intenta simular les reaccions d'un psicoanalista: detecta certes frases, paraules o construccions sobre les quals demana més informació, i es pot acoblar a un sintetitzador de veu per fer més real la consulta. Un altre sistema expert és el Mycin, que està dissenyat per fer diagnòstics de malalties bacterianes a partir d'uns símptomes. Un altre és el Prospector (1979), que es va aplicar en l'àmbit de la geologia per ajudar a descobrir jaciments. Prospector va tenir encert a predir el més gran jaciment de molibdè que mai s'hagi descobert.

Els sistemes experts van tenir un èxit rotund en una època determinada. Fins i tot van sorgir noves disciplines, anomenades «enginyeries del coneixement», que intentaven codificar el coneixement de determi-

nats experts humans. Però el seu moment àlgid va anar seguit d'un fracàs estrepitos. I és que els sistemes experts no incorporen el sentit comú, no inclouen observacions que sobresurten de la realitat palpable a la percepció humana. Per exemple, un sistema expert pot demanar de manera insistent una analítica a un... cadàver! O bé les preguntes de la terapeuta ELIZA es queden encallades en un diàleg circular sense sortida... La credibilitat va caure en picat i la decepció va ser molt gran.

Què hi ha darrere un sistema expert?

Primerament hi ha un mòdul d'adquisició de coneixement que intenta adquirir i representar el coneixement d'un expert humà, tot formant una base de coneixement. Una base de coneixement pot ser moltes coses, per exemple, pot ser un conjunt de regles organitzades lògicament.

Després tenim un usuari que vol utilitzar aquesta expertesa. Per poder fer les consultes es genera una interfície entre la màquina i l'usuari de la forma més amigable possible (per exemple, amb multimèdia, amb ratolí, sintetitzador de la parla, etc.). Posaríem un motor d'inferència (un sistema que encadena regles) i una memòria de treball per seguir el fil de tot el raonament. Probablement, hi afegiríem també un mòdul explicatiu.

En el fons es tracta de peces petites, que es combinen entre si per formar una sistema més complex. Però van fracassar en no poder simular bé l'expertesa, i fins al cap de força temps no es va començar a veure la solució al problema.

## Aprentatge artificial

La via de sortida es va obtenir en plantejar de nou el concepte d'intel·ligència artificial, de preguntar-nos de nou sobre les característiques fonamentals de la intel·ligència artificial. La definició d'intel·ligència artificial provingué, ara, del camp de la psicologia, que considera que la característica essencial de la intel·ligència és aprendre davant de situacions noves, la capacitat de sortir-se'n en situacions no previstes. Si la situació és vella i coneguda, apliquem l'experiència, patrons o regles que ja tenim assimilats, perquè ens doni la solució. Però, si la situació és realment nova, això ja no és possible i aquí cal intel·ligència resolutiva. Això ens obre una nova perspectiva, la de l'aprenentatge artificial (en anglès, *machine learning*), que té com a objectiu construir sistemes que siguin capaços d'adaptar-se dinàmicament i sense un entrenament previ a situacions noves.

En el fons, l'aprenentatge combina diverses coses, però en síntesi tenim dues característiques: 1) no hi ha aprenentatge sense selecció d'allò

que és bo i representatiu, i això es discrimina d'allò que és dolent, i 2) presenta un procés d'adaptació de la conducta a noves situacions.

En hem mogut de l'enfocament tradicional de la intel·ligència artificial d'una visió «de dalt cap avall», la qual, per resoldre el problema d'un determinat domini, agafa el problema i el fragmenta en trossets petits intentant representar el seu coneixement i posar les regles de la relació. No obstant això, en descompondre el problema en coses tan petites, al final ens podem trobar amb solucions que no tenen significat. L'enfocament modern és, per contra, «de baix cap amunt» i es basa en l'aplicació de tècniques d'aprenentatge artificial. A partir d'observacions puntuals s'intenta construir un model general. En lloc de demanar a l'expert humà sobre els passos que fa per resoldre un problema per tal de codificar aquesta informació, se li demana informació sobre què ha passat històricament davant d'un problema determinat. A partir d'aquestes observacions històriques es poden construir les regles. Aquest enfocament permet resoldre problemes que abans no tenien solució. En l'enfocament tradicional, ens podem preguntar qui és l'intel·ligent, la màquina o la persona que l'ha construït. Jo ho tinc molt clar: la persona ha de ser intel·ligent, el sistema no té gaire intel·ligència, i la qualitat total del sistema dependrà d'una multitud de factors.

Així doncs, l'objectiu de l'aprenentatge artificial és construir dinàmicament sistemes que es puguin adaptar. El procés que segueix un sistema d'aquestes característiques ha de partir d'una sèrie d'exemples, de l'enregistrament de coses que han passat i de com han estat resoltes. A continuació s'hi col·loca un algorisme d'aprenentatge que utilitza l'experiència històrica per construir el sistema entrenat. Aquest sistema entrenat és el que ens donarà la solució.

Per veure-ho amb un exemple concret: nosaltres hem treballat en un sistema per al diagnòstic del càncer de mama. Ens servim d'una sèrie de diagnòstics històrics amb dades de biòpsies o mamografies. Tenim les dades i proves mèdiques i també el diagnòstic de l'expert. Introduïm l'algorisme d'aprenentatge i, així, construïm el diagnosticador automàtic, que davant d'un nou cas, en fa la diagnosi. Com deia al principi, en la intel·ligència artificial hi ha d'haver raonament i representació del coneixement, però el nucli dur on es fa la principal activitat de recerca avui en dia és en l'aprenentatge artificial.

### **Reflexió sobre la intel·ligència artificial en el cinema**

El cinema ha tractat, sovint molt injustament, el tema de la intel·ligència artificial. Per tant, és probable que tots tinguem una imatge esbiai-

xada del que permet fer la intel·ligència artificial a partir de les pel·lícules que hem vist. No fa gaire vam celebrar l'any Kubrick pel film *2001. Odissea a l'espai*. En aquest film hi havia un ordinador que detectava els estats d'ànim dels astronautes i decidia autodefensar-se. Tenia autoestima, poder de suggestió, d'espionatge, etc., unes capacitats d'intel·ligència artificial totalment inimaginables. A *La guerra de les galàxies*, veiem robots que fan de tot; no obstant això, mai no els veiem carregant bateries. Finalment, a la pel·lícula *Intel·ligència artificial* de Steven Spielberg, el protagonista és una mena de robot de forma humana que en el fons té sentiments, no vol morir..., presenta un comportament humà totalment impossible.

En el fons ens hauríem de fer la pregunta: volem robots humans o no en volem? On arribarem amb la intel·ligència artificial? La resposta és que arribarem allà on vulguem, on creguem que és realment útil d'arribar. Per posar la qüestió de forma molt simple: val la pena de prendre cafè amb un ordinador? Ens acontenta la companyia d'un robot? Jo prefereixo un ésser humà amb el qual puguem compartir moltes coses. I, en intel·ligència artificial, probablement mai no arribarem a això. En canvi, si apliquem aquestes eines per resoldre problemes concrets, com el de fabricar diagnosticadors que vagin bé, o per fer robots que naveguin allí on l'ésser humà no vol o no pot entrar, en aquests aspectes podem tenir èxit.

### **Exemples de sistemes d'aprenentatge artificial**

Ara, presentaré uns exemples actuals i molt propers sobre dos projectes finançats pel Fondo de Investigaciones Sanitarias, o el Ministeri de Ciència i Tecnologia i que treballem al nostre Departament d'Informàtica de la Universitat Ramon Llull. El primer, que ja hem esmentat anteriorment, és el projecte sobre el diagnòstic del càncer, una feina que fem en col·laboració amb la Universitat de Girona i amb metges de l'Hospital Josep Trueta de Girona. Hi ha molt d'interès en aquest projecte perquè el càncer afecta un segment molt ampli de la població femenina i hi ha una gran demanda de consultes. Tal com hem explicat anteriorment, apliquem l'aprenentatge artificial per diagnosticar càncer de mama a partir de les dades que tenim. Primerament vam abordar el problema a partir de les biòpsies; però, com que és una prova força intrusiva, actualment estem treballant sobre les imatges de mamografies. Donada una imatge del teixit, fem el diagnòstic i una valoració qualitativa: altament cancerigen, moderadament cancerigen, etc. La idea és incorporar als aparells de mamografia (mamògrafs digitals) la possibilitat que, a més

de mostrar la imatge, en facin la valoració d'afectació per càncer. Amb això, podríem accelerar els processos clínics i augmentar la qualitat del servei. A més, si podem recollir i introduir l'experiència dels oncòlegs més reconeguts dins de l'aparell de diagnòstic, això pot servir de guia per als metges que han de treballar amb les imatges i amb la informació de l'aparell.

Respecte dels resultats, estem obtenint prop d'un 90% d'encert, cosa que ens satisfà molt. No obstant això, cal matisar que s'ha de distingir entre els falsos positius i els falsos negatius: en el darrer cas, si et diuen que no tens la malaltia i sí que la tens, pots morir. Per tant, en aquests casos s'empra una multitud de mesures addicionals, per no donar diagnòstics erronis.

Com funciona el sistema? Tal com hem mencionat anteriorment consta d'uns diagnòstics històrics, un algorisme d'aprenentatge i un diagnosticador automàtic. També s'hi pot incloure un sistema perquè hi hagi una realimentació i reaprenentatge revisant-ho amb el suport del metge.

Un altre exemple en el qual treballem és en la predicció de l'evolució de l'aprenentatge d'un alumne. En un entorn presencial, el professor té elements per veure el funcionament de l'alumne i el seu aprenentatge. En entorns d'ensenyament no presencial, el contacte directe es perd. Nosaltres ens plantejem si podem saber el que fa l'estudiant, i el seu risc de fracàs, tenint en compte algunes dades: si navega per determinats materials, si es posa en contacte amb els professors o amb altres alumnes, etc. Podem seleccionar els factors de risc per veure els que seguiran i els que no, i els que estan en una franja de «recuperables». Aquesta aproximació pot millorar el procés de l'ensenyament i reduir el fracàs acadèmic.

## Modes d'implementació

Finalment, ara m'agradaria intentar respondre a la gran pregunta: com es pot fer tot això? Hi ha moltes maneres d'abordar-ho, però jo em centraré en dues famílies de tècniques que són les que nosaltres usem més. L'aprenentatge basat en casos consisteix a fer una analogia, una de les maneres amb la qual nosaltres, els humans, resolem més problemes. En el fons, per resoldre un problema nou, nosaltres recordem si en el passat ens hem trobat amb un problema de característiques similars. Si l'hem trobat, aleshores directament ens plantejem què vam fer en aquell moment i hi apliquem la solució pertinent. Això, una màquina també ho pot fer: li podem introduir una sèrie de casos històrics, exemplars, i fer-li intentar recordar. Ara bé, la clau és: com recordar? Hi ha la memòria.

Per exemple, si en intentar resoldre un problema hem actuat d'una manera que ens ha portat a resultats negatius, ja no continuarem per aquí. Per tant, és molt important el que tenim a la memòria, i com ho recordem. Aquí apareixen qüestions molt espinoses, com la de comparar una situació present amb una situació passada. Ens podem trobar en situacions on no tinguem totes les dades perquè només coincideixi parcialment el que ocorregué en el passat i el que s'observa ara. Ens hem de basar en la possibilitat de recordar i en la de comparar les experiències.

Respecte del concepte de memòria, nosaltres, els homes, tenim una capacitat de memòria que no és il·limitada. D'igual forma, tampoc no es pot posar de tot en una màquina. Què hi posem a la memòria és crucial perquè la màquina funcioni bé en el futur. Si trobem dues casuístiques que s'assemblen molt i en les quals, a més, la solució és similar, probablement podem fer una abstracció, i només guardar-ne una que sintetitza les dues. Per tant, en el sistema artificial hi ha moltes coses que recorden la nostra manera de funcionar.

Per acabar, faré uns comentaris sobre la computació evolutiva. Es tracta d'una família de tècniques molt amplia, relativament nova (partir dels anys 1990). Requereixen tanta potència d'ordinador, que fins ara no havia estat possible d'utilitzar-les. S'inspiren en dos principis bàsics de la natura, l'evolució natural de les espècies i l'herència genètica, per construir una determinada tecnologia. Sobre l'evolució natural, s'aplica el mateix que va proposar Darwin: s'entén que la natura selecciona al llarg del temps els individus considerats bons (o aptes), mentre que als inaptes no els dóna tantes oportunitats de sobreviure. Entenem per qualitat de la solució, igual que els biòlegs, el fet de viure més anys, tenir més fills, acaparar més recursos, etc. Sobre l'altre aspecte, el de l'herència genètica, s'entén que els fills s'assemblen als pares.

I a la pregunta de què serà un individu en aquest procés, responem que serà la solució al problema d'existir. Com que hi hauria d'haver alguna cosa que seleccionés si és bo o dolent, el que fem és anar fent evolucionar el programa al llarg del temps. I evoluciona a còpia de reproduir-se i d'anar introduint novetats en aquest procés. Les novetats són senzillament combinar les característiques genètiques dels pares, i introduir-hi mutacions a l'atzar, algunes de bones i altres de dolentes. Les bones generalment consisteixen en petits canvis acumulatius al llarg del temps. Una màquina programada basant-se en això, funciona i dóna solucions. L'evolució de les solucions estarà donada per quant de bones o de dolentes són respecte del nostre problema. En aquest camp hi ha una multitud de tècniques: algorismes genètics, programació genètica o vida artificial. En el darrer cas, sota aquest nom una mica pompós, el que es

fa és construir un entorn artificial en el qual hi ha diferents sistemes (agents, robotets) que han d'aprendre a estar aquí. Es tracta que aquests robots aprenguin que han de menjar, que han de cooperar per aconseguir el menjar, que han d'evitar els perills, etc. Podem construir un sistema artificial i veure com va aprenent a solucionar un determinat problema, per exemple, la supervivència. En aquest tipus de treball, nosaltres proposem als alumnes que construeixin una formiga artificial, que ha de resoldre el problema de buscar menjar, cosa que comporta una despesa d'energia, però si es queda quieta es mor. Al cap d'un temps d'evolució es poden trobar solucions.

Veiem, doncs, que la vida artificial pot funcionar tot imitant la biologia del món real.



## Art, ciència i complexitat

Martí Domínguez

Director de la revista *Mètode*  
Jardí Botànic  
Universitat de València

El que voldria explicar-vos en aquesta xerrada és un dels temes que més m'apassionen per la imbricació que desvetlla entre el món de la ciència i el de les humanitats. Intentaré descobrir-vos un món complex perquè, a partir d'ara, quan aneu als museus, aneu descobrint detalls que fins ara us havien passat desapercebuts, detalls que fan referència a la ciència, l'art i la complicitat que s'estableix entre aquests dos móns. També voldria descobrir-vos un llenguatge simbòlic, present en una sèrie de quadres del renaixement i basat en símbols naturalístics.

Per exemple, Piero della Francesca, pintor del 1400, home d'una gran cultura i una gran saviesa, tenia un ús de la perspectiva molt desenvolupat i també era un excel·lent matemàtic. La taula de Piero della Francesca que es troba en la galeria Brera, a Milà, és presidida per una Verge que, tot i que és al centre, es troba una mica allunyada i estàtica. Hi destaca també un personatge situat de perfil a primer pla: el duc d'Urbino, Frederico de Montefeltro, un dels mercenaris més feroços i cruels del Renaixement, que sempre surt de perfil als quadres perquè li faltava part del rostre per les ferides d'un combat. El duc d'Urbino hi és representat amb tota la força i magnificència (armadura, espasa, gest altiu), ja que era el patró que encarregà el quadre. Era un fet freqüent al Renaixement que els mecenes paguessin els pintors per ser representats en els quadres, com en aquest cas apareix el duc. Si ens fixem en alguns detalls del quadre, veurem l'actitud una mica distant de la Madona i, sobretot, crida l'atenció el seu gest amb el nen, en sorprenent equilibri als seus braços. El nen té un destacat collar de corall roig al voltant del coll. Aquest detall semblaria una anècdota intranscendent però, en canvi, és un missatge important del pintor. No podem passar indiferents davant d'aquest collar, perquè Piero della Francesca usa aquest símbol repetidament en altres quadres. Els pintors italians empen el corall roig, com també ho fa un pintor anònim en una taula de la catedral de

València, on el nen li està mostrant el collar a la Verge com dient-li: Mira, mira què tinc al coll! El corall té un missatge, és un element d'un llenguatge ple de significat particularment dirigit a la gent del poble que el comprenia bé. El corall té l'aspecte d'un arbre però, paradoxalment, és marí. Per tant, representaria dos simbolismes: el de l'arbre, eix del món, i el de l'oceà o abisme. Per altra banda, pel seu color roig també es relaciona amb la sang. Segons alguns estudiosos de la simbologia, el corall representaria, en certa manera, el poder diví, tant en la terra (en tant que arbre terrestre) com a les profunditats del mar. En breu, el corall simbolitzaria el poder omnipotent de Déu.

Un altre detall important, o més ben dit inquietant, és l'ou d'estruç que Piero della Francesca pinta sobre el cap de Frederico d'Urbino. El pintor havia d'estar molt segur del que feia per pintar un ou penjant sobre el cap de l'home amb més males puces de la història del Renaixement! Segons Pierre de Beauvais, l'estruç representa l'home que viu en caritat i que és pacient i humil, sobri i piadós. En paraules textuals: «virtuts que alcen l'ànima i la condueixen a la vida, és a dir a un goig perdurable i permanent sense final i, quan l'ànima es troba en aquest estat d'alegria, és covada i alimentada per la vida, per l'autèntic sol de justícia tal com l'ou d'estruç és covat per la calor del sol». Com coven els ous els estruços? Segons Aristòtil, els estruços soterran els seus ous sota l'arena del desert i és la calor del sol la que els cova, de la mateixa manera que l'ànima del bon cristià serà covada pel sol de la justícia, pel sol diví. És a dir, l'ou d'estruç que es troba sobre el cap del duc simbolitzaria el sol diví protector. Altres interpretacions suggereixen que l'estruç és un símbol de concentració perquè és un au que mai deixa de vigilar el seu niu, i, tal com diu Federico Revilla al seu diccionari d'iconografia, en moltes esglésies es penjaven ous d'estruç a l'entrada per recordar els fidels que no havien de descuidar ni un sol moment l'oració a Déu. Amb aquesta disquisició vull indicar que aquest ou i el corall no són detalls qualssevol, sinó que al darrere hi ha un llenguatge, una simbologia i una literatura naturalista que el poble coneixia.

En aquesta època, prèvia a la Il·lustració, tot era possible, tot era factible, i àdhuc qüestionable. Era un món de foscor i d'absència, un xic inquietant. Ho era tant, que els pintors es plantejaven si Adam i Eva havien de tenir melic o no. A la fe s'unia de sobte la més evident deducció científica: si eren fills de Déu, i per tant, de naturalesa no humana, no poden tenir melic; però heu vist mai pintat alguna vegada un cos sense melic? El cas és que, pragmàtics, els pintors recobrien les parts pertinents d'Adam i Eva amb una fulla de vinya o d'un altre vegetal per evitar haver de donar excessives explicacions.

Però, una altra pregunta respecte d'Adam i Eva és: Quin era l'arbre del paradís? Quina era la fruita prohibida? Si distingim els dos grans moviments pictòrics de l'època, el món flamenc i el món italià, veiem que empren diferents recursos per abordar aquest tema. En el món flamenc la poma és clarament la fruita prohibida, i la serp és un esperit malèfic i, per tant, un esperit femení. Si anem al llibre *Sobre errors vulgars* (1646), de Thomas Browne, un dels grans creadors de l'idioma anglès, diu que el fruit del paradís fou una poma, tal com ho confirma la tradició perpetuada pels escrits, versos i imatges. Alguns han estat tan mals coneixedors de la prosòdia com per derivar de poma (*Pyrus malum*) la paraula «malum», és a dir dolent o roí, ja que aquest fruit fou el causant de la primera ocasió de pecat. D'altra banda, la pintura italiana havia evolucionat cap a un altre camp, i la fruita amb la qual Eva és temptada és una figa. Al Gènesi no s'especifica la fruita de la temptació, tal com es veu en el paràgraf següent: «La serp [...] preguntà, doncs, a la dona: “Així, ¿Déu us ha dit que no mengueu dels fruits de cap arbre del jardí?” La dona va respondre: “Podem menjar dels fruits de tots els arbres del jardí, però dels fruits de l'arbre que hi ha al mig del jardí Déu ha dit que no en mengem ni els toquem, perquè moriríem.” La serp li va replicar: “No, no moriríeu pas! Déu sap que, si un dia en menjàveu, se us obririen els ulls i seríeu com déus: coneixeríeu el bé i el mal.” Llavors la dona, veient que el fruit de l'arbre era bo per a menjar i feia goig de veure, i que era temptador de tenir aquell coneixement, en va collir i en va menjar; i en va donar també al seu home, que en menjà amb ella. Llavors a tots dos se'ls obriren els ulls i es van adonar que anaven nus. Van cosir fulles de figuera i se'n feren faldars.»

Jan Van Eyck, molt conegut en la història de l'art i que des del meu punt de vista és comparable a Miquel Àngel o Leonardo da Vinci, va pintar el políptic de Gant. Gant, a Flandes, era una ciutat important, amb un bon port comercial i habitants molt rics i benestants. Els patrons de Gant pagaren un políptic espectacular, un dels més enlluernadors i fantàstics quadres, ple de detalls i de miniatures, ja que Van Eyck era un miniaturista excepcional, en part gràcies a la utilització de l'acabada de descobrir pintura a l'oli. També, Van Eyck era un gran coneixedor dels llenguatges dels símbols. En l'*Adoració del Corder Místic* representa tots els profetes que han parlat de l'arribada del redemptor; hi representa també els mecenes, els soldats, el poble d'Israel, i al fons un paisatge de gran detall, un escenari que recorda el paisatge mediterrani (Van Eyck havia viatjat a València; per tant, s'hi havia pogut inspirar). Gràcies a la pintura a l'oli, Van Eyck va poder pintar aquests detalls, i va representar Adam i Eva d'una forma tan real, que podria dir-se una fotografia, i

estem parlant del 1430! Si ens fixem en la planta amb què Adam s'oculta el sexe, veiem que es tracta d'una fulla de figuera. Ara bé, si ens fixem en Eva, pintada amb una sorprenent turgència i eroticitat, veiem que a la mà hi té un fruit de poncemer (*cidro*, en castellà; *Citrus medica*, en nominació científica). Van Eyck, que era un home savi i erudit, no va pintar una figa qualsevol ni una poma, sinó que, amb ambició de transcendir, pintà la fruita sagrada dels jueus, la que empren en tots els rituals, la mateixa fruita que duu Virgili, l'únic profeta romà que va advertir de l'arribada del salvador o messies: el poncemer. La fruita d'Israel és el poncemer; per tant, era la fruita que li corresponia a Eva.

En el museu del Prado hi ha un Dürer que representa també Eva. Aquí Eva no té a la mà ni una poma ni un poncemer: Dürer hi pinta una taronja.

El que interpreta el savi Thomas Browne sobre aquesta qüestió en el llibre anteriorment citat és que en realitat la descripció de la temptació del fruit que varen tastar Adam i Eva és una representació al·legòrica. Tanta complicació buscant la fruita sagrada del paradís, i aquest fruit probablement ens remeti al fruit del sexe.

Hugo van der Goes va pintar el tríptic Portinari, on va introduir una sèrie d'elements que van enlluernar Piero della Francesca, que les va recollir en el seu darrer quadre, la *Nativitat*, entre els quals destaca el distanciament entre el nen i la Verge, i el nen sembla que demani atenció, tan desvalgut com es troba. Sant Josep apareix en segon terme. Amb gest de preocupació observa una garsa, ocell de mal averany, posada al sostre de l'estable. Als peus del nen, un grup d'àngels entona càntics i vora seu hi ha tres cadernereres. Piero della Francesca aquí va oposar dos elements simbòlics clarament distints: la garsa, que segons la llegenda era un ocell bellíssim de cant harmoniós, però durant la passió de Crist va gosar cantar i per això va ser castigada amb una veu ronca i un plomatge fosc. I, d'altra banda, les cadernereres, que, segons la tradició cristiana, van auxiliar Crist durant la passió, essent el roig de sota la gorja i del front una evocació de la seva sang. Les cadernereres apareixen en multitud de quadres de pintors del Renaixement, en Nativitats o en representacions de la Sagrada Família, com la més antiga, deguda a Simone Martini, pintor del segle XIV. Altres pintors que representen cadernereres són: Pere Serra (la seva Madona amb nen es pot veure al MNAC), Filippo Lippi, Benozzo Gozzoli, Garofalo, Carpaccio, Signorelli, Lorenzo di Credi, Crivelli, Tiépolo, Ghirlandaio i Rafael. Aquest darrer pinta la bellíssima *Madonna del cardellino*, on Sant Joan li acosta a Jesús una petita cadenera, i el nen amb un gest dramàtic i transcendent l'acarona com dient: «Ai, Joanet! Si tu sabessis què representa aquesta caderne-

ra...» Aquest es el zenit de la història simbòlica de la cadenera. Bronzino, en un acudit intel·lectual, pinta la cadenera sense roig tot fent el raonament que si el nen Jesús encara no havia sofert la passió, la cadenera no podia haver tocat la sang de Crist i, per tant, no podia tenir el roig.

Per acabar, m'agradaria entretenir-me un moment en el quadre de Boticelli de l'*Adoració dels Reis Mags*, on retrata gran part de la família Medici. Boticelli hi surt també, destacant a la dreta amb posat arrogant i un gest altiu i segur. Sobre el mur del portal hi ha pintat un paó, símbol de la cristiandat, i en una escaleta, just al costat de la Verge, hi ha posat amb tota cura una planta, el melic de Venus (*Umbilicus rupestris*). Es tracta d'una planta rupícola que creix entre les roques, en els marges mig enderrocats o en els murs de vells edificis, per la qual cosa no és d'estranyar que Boticelli la representi enmig del mur. No obstant això, l'autor no la va pintar perquè sí, sinó que segons la medicina hipocràtica s'emprava el melic de Venus per engendrar barons. L'espiga floral, erecta i florida, és evocadora del sexe masculí. En l'obra de Ghirlandaio, en la seva *Adoració dels Mags*, també va ser representada aquesta planta, però en aquest cas en els graons de l'establia. En ambdós casos no es veu el sexe del nen, lleugerament ocultat. D'aquesta manera, amb el simbolisme del melic de Venus, els dos pintors eviten el difícil paper d'evidenciar que la criatura nascuda era un mascle.

Tot això és per a dir-vos que, a través d'aquests símbols, els quadres dialoguen amb les persones. En aquest breu espai de temps només us n'he pogut donar cinc cèntims. En realitat, hi ha un repertori molt més ampli. De tota manera, espero haver-vos desvetllat la manera com, en el Renaixement, s'establia un fructífer diàleg entre l'artista i el públic.

# El Pla Hidrològic Nacional: un cas de no-apreciació de la complexitat

Narcís Prat

Departament d'Ecologia  
Universitat de Barcelona

El títol d'aquesta presentació fa referència a la no-apreciació de la complexitat, la qual pot resultar tant de la ignorància com d'una manca d'interès en apreciar-la, en el sentit que així se'n deriven unes conclusions diferents (potser interessades) respecte de les que s'obtidrien apreciànt-la. Amb el Pla Hidrològic Nacional (d'ara endavant PHN) no sé exactament el que ha passat. Al final d'aquesta xerrada espero que pugueu opinar sobre el particular amb més elements a la mà.

## Cronologia breu del PHN

Entre els anys 1998 i 1999 es van aprovar els plans de conca, un pas previ i necessari per tirar endavant el PHN, ja que, abans de fer propostes nacionals, calia quantificar l'aigua disponible a cada conca i acordar a què es destinava. A continuació es va publicar el *Llibre blanc de l'aigua*. Aquest llibre feia un balanç de les dades hidrològiques i explicava quina era la situació a Espanya. El setembre del 2000 es va aprovar el PHN al Consejo Nacional del Agua. Aquesta aprovació es justificava amb cinc volums de documents tècnics. Tan bon punt es va publicar el PHN va reaccionar la Plataforma en Defensa de l'Ebre. Entre el setembre del 2000 i l'abril del 2001 es produïren moltes mobilitzacions que, no obstant això, no van poder impedir que s'aprovés el PHN al Congrés de Diputats. L'any 2001 el PHN es va publicar al BOE, i el 2003 se'n va fer l'estudi d'impacte ambiental i posteriorment la Declaració d'impacte ambiental.

Un pla hidrològic per a un país com Espanya és evidentment molt complex. En conseqüència, hi ha diferents maneres de considerarlo. En el cas que ens ocupa, es van produir accentuades divergències entre les propostes del Govern i les de grups més ambientalistes. Entre aquestes dues perspectives, que mantenien dues apreciacions molt diferents

de la complexitat, no s'havia produït un debat a Espanya, i això era degut a la rotunda negativa per part del Ministeri de Medi Ambient (del Govern Aznar 2000-2004). Així, a escala estatal, la posició del Ministeri no havia pogut ser contrastada respecte dels que no crèiem en el PHN. No obstant això, a instàncies de la Unió Europea l'octubre del 2003 es va obrir un debat del qual parlaré una mica més endavant.

## El PHN

La memòria tècnica del Pla Hidrològic presentada el setembre del 2000 consta, com hem dit, de cinc volums, dels quals tres són d'hidrologia (s'ocupen de les aigües subterrànies, de les aigües superficials, de la història de tots els transvasaments, etc.). Entre tota aquesta documentació, només hi ha un volum de dues-cents cinquanta planes sobre el medi ambient. I en aquest, només hi ha sis pàgines que parlin de la complexitat dels éssers vius que es veuran afectats per aquest Pla: tota una demostració de la poca apreciació del Ministeri respecte de les qüestions ambientals, cosa, d'altra banda, no gaire sorprenent tenint en compte que els autors del Pla eren bàsicament enginyers de camins. La idea que impregna tot el PHN és la de la redistribució de l'aigua. Podem posar per exemple d'aquesta idea el raonament següent: com que el Pla de la conca de Múrcia diu que a la conca li falten 1.000 hm<sup>3</sup> i el Pla de l'Ebre no diu res, i sembla que a aquest darrer riu li sobri aigua que va a perdre's al mar, aleshores aquesta aigua sobrera cal que la traspassem a la zona deficitària, on farà un benefici.

Però, li sobra aigua a l'Ebre? Les dades que tenim mostren que el cabal de l'Ebre ha anat baixant en els darrers decennis, i, que els anys recents, com el 2002, són els més secs d'una sèrie de més de cinquanta anys. Per què baixa el cabal? Al principi del segle XX, els camps de l'Aragó i de l'Urgell no eren de regadiu. Ara es reguen, i de l'aigua de reg una gran part s'evapora, i queda, per tant, menys cabal per drenar pel riu. Hi ha una relació entre la quantitat de camps de conreu i l'aigua que desapareix del riu. Si en el futur es continuen ampliant els regadius, el riu encara portarà menys aigua.

El PHN pretén fer més embassaments a l'Ebre. Això significa guardar més aigua, generar menys crescudes i tenir l'aigua més regulada i més concentrada. El PHN també preveu un increment dels regadius a l'Aragó i a Catalunya. La memòria del Pla es basa en una modelització hidràulica i en un balanç que té en compte totes les partides d'entrada i sortida d'aigua. L'entrada és la quantitat de precipitació, i les sortides han de considerar l'evapotranspiració, el consum actual i futur dels rega-

dius, i el cabal ecològic que cal deixar en el riu. Les conclusions d'aquest balanç són que hi ha 5.200 hm<sup>3</sup> d'aigua excedent; per tant, d'aquesta quantitat se'n pot derivar una part, estipulada en 1.200 hm<sup>3</sup>, per al transvasament.

Possibles afeccions, com per exemple la de l'expansió de la falca salina al delta de l'Ebre, no són considerades com un problema, ja que només es preveu derivar l'aigua del maig a l'octubre, l'època de màxim cabal del riu. Quan els interroguem pels efectes del canvi climàtic, no sembla que això constitueixi un impediment important, ja que el model usat pels planificadors indica que la pluja no variarà en els propers cinquanta anys. Sí que es reconeixen els problemes que puguin afectar el delta de l'Ebre; però, com que la majoria d'aquests ja hi eren abans, argumenten que no es deixarà d'aplicar el Pla per una cosa que ja ocorria habitualment.

Per tant, la proposta del PHN pel que fa a l'Ebre és que el riu sigui com un dipòsit amb una aixeta. En la votació en el Consejo Nacional del Agua, el 60% dels components van votar a favor del Pla. El CNA és un consell format per persones del Ministeri de Medi Ambient, per polítics i representants de les comunitats autònomes, i per un conglomerat format per usuaris de les hidroelèctriques, usuaris agrícoles, ecologistes i científics. En molts d'aquests sectors, a l'hora de votar, es va produir un mercadeig de contrapartides a canvi del vot. Els científics, en canvi, van votar amb coneixement i amb la convicció que no s'havia abordat tota la complexitat de la problemàtica.

### Efectes del Pla sobre el delta de l'Ebre

Un entrebanc important del Pla, que podria impedir el finançament europeu, és que hi hagi afeccions ambientals en els ecosistemes; en el cas que ens ocupa, això faria referència concreta als possibles efectes sobre el delta de l'Ebre. Si es pot demostrar que el transvasament perjudica el Delta, aleshores estem en condicions d'argumentar el punt de vista ambientalista davant la Unió Europea (d'ara endavant UE). Les accions de la Fundació Nova Cultura de l'Aigua i dels ecologistes han anat en aquest sentit. Els estudis científics realitzats per diversos grups, vehiculats per diferents col·lectius ecologistes cap a la Unió Europea, van crear un estat d'opinió i van fer possible que el problema sortís a la llum pública. Alhora, la contribució científica va ajudar aquests col·lectius a mostrar a la UE els problemes que generava el PHN.



## El PHN genera un problema ambiental al Delta?

A la part baixa del riu i al Delta hi ha zones de qualitat acceptable de l'aigua, malgrat les centrals nuclears. Al Delta hi trobem un conjunt d'ecosistemes molt interessants, variats i que suporten unes activitats econòmiques importants, com ara l'arròs, els musclos o la pesca. Es tracta d'un sistema acoblat a unes activitats de fa molts anys i que manté una certa complexitat de funcionament. Cal conèixer si amb l'aplicació del PHN es derivaran efectes negatius sobre aquest sistema.

Una de les primeres coses que es va fer, i finançada pel mateix MMA, fou resumir l'estat actual dels coneixements sobre què hi havia al Delta l'any 2001. Vam buscar una sèrie d'especialistes de diferents aspectes del Delta, i, només en temes de geologia, biologia, física i química a la Universitat de Barcelona, vam trobar més de seixanta tesis realitzades. Amb aquesta informació vam plantejar si hi hauria possibles afectacions al Delta per part del PHN. Una vegada fet l'estudi, el vam entregar al MMA, però no en vam obtenir cap resposta. Des del 2000 al 2003, el Ministeri va anar afegint estudis, com la declaració d'impacte ambiental i estudis de mesures correctores, sempre sobre la base que el transvasament era inamovible, sense debatre en cap moment la qüestió amb els col·lectius científics que havien redactat l'informe del 2001, en què mostraven les problemàtiques que es podrien generar.

La UE, vistes les diferències entre les dues parts, proposà de parlar-ne. La primera pregunta que plantejà fou sobre la quantitat d'aigua de l'Ebre, i sobre les causes de la seva variabilitat. És evident que el riu porta menys aigua a causa de l'increment de l'ús agrícola, i també s'ha de considerar el canvi climàtic, ja tingut en compte pels tècnics del Ministeri. A part hi ha un aspecte molt important que cal considerar: els enginyers no treballen amb el cabal real que porta el riu, sinó que consideren l'anomenat *cabal en règim natural*, el cabal virtual que tindria l'Ebre si ningú en derivés aigua. El cabal natural s'ha calculat en 18.000 hm<sup>3</sup> any<sup>-1</sup>. Segons el seu model, l'any 2025 l'Ebre no experimentarà canvis en el règim natural, ja que els seus models indiquen que plourà el mateix i la seva definició no en preveu l'ús. Nosaltres no compartim aquest plantejament, ja que en els darrers cinquanta anys s'ha abandonat el conreu a moltes zones agrícoles de l'Aragó i han sorgit boscos que fan que l'aigua s'infiltri i s'evapotranspiri, i minvi l'escolament cap al riu, tal com han mostrat els estudis del Dr. Francesc Gallart i col·laboradors de l'Insitut Jaume Almera, del CSIC. Per tant, el règim natural del riu no és el mateix ara que fa cinquanta anys i no serà el mateix d'aquí a cinquanta anys. Aquest debat és un debat fort, potent, difícil, que ha

acabat amb unes posicions irreconciliables entre el Ministeri i els grups ambientalistes. En el futur, a més, tindrem una disminució de cabal deguda al canvi climàtic, ja que hi haurà un augment de l'evapotranspiració lligat a l'augment de la temperatura.

La segona pregunta dels tècnics de la UE fa referència al cabal ecològic. Ja hem vist que el riu portarà cada vegada menys aigua, però ara la qüestió és determinar quanta aigua ha de portar el riu per poder mantenir les comunitats que s'hi assenten. Ens podem preguntar si els 100 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> adjudicats pel Pla són suficients, o si potser n'ha de portar més. Necessitem un criteri. La idea del Ministeri, recollida en el PHN, és que amb un cabal ecològic de 100 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> n'hi ha prou, ja que aquest és el cabal necessari perquè la falca salina es quedi a Deltebre. Nosaltres, en canvi, vam plantejar-nos: si hem de definir un cabal ecològic per a l'Ebre, aquest cabal quins objectius ha de tenir? Vam considerar que el cabal ecològic havia de garantir la sostenibilitat ecològica i socioeconòmica de l'aigua. Es necessita aigua per controlar la falca salina, es necessiten cabals d'avinguda hivernal perquè el riu sigui dolç en l'època de plantar l'arròs, es necessita aigua per a activitats socioeconòmiques (per a l'activitat agrícola, sobretot), es necessiten avingudes per al transport de sediments, també es necessiten avingudes per garantir les pesqueries a les badies circumdants, i, finalment, es necessita que aquesta aigua sigui de bona qualitat. La definició del cabal ambiental és un assumpte complex que s'ha abordat de manera excessivament simple al PHN.

## El riu Ebre avui

Els estudis fets sobre la qualitat fisicoquímica de l'aigua del riu ens mostren una elevada salinitat en certes èpoques de l'any, superior al nivell de potabilitat (l'aigua del transvasament a Tarragona no és gaire bona). A més, en anys secs augmenta la concentració de sals i empitjora la qualitat. Una de les conseqüències del PHN és que, amb menys cabal i més activitat agrícola aigua amunt, la salinitat augmenta, cosa que impedirà que s'acompleixin els estàndards de qualitat. Avui en dia la qualitat ja és dolenta: no compleix la Directiva europea per a la vida dels peixos. L'aigua del Segre ho dilueix una mica però, quan entri en funcionament el canal Segarra-Garrigues, la dilució serà molt menor. En resum, la qualitat de l'aigua de l'Ebre actualment no és gaire millor que la del Llobregat i és molt pitjor que la del Ter.

Una de les estratègies per evitar el transvasament és protegir la ribera com a parc natural, de forma que qualsevol actuació que s'hi vulgui fer hagi de passar una supervisió per part del Parc. I cal destacar que el riu

manté actualment una elevada vàlua en els seus boscos de ribera. D'altra banda, tractant-se d'una franja estreta, es produeix sovint força erosió deguda a la variació de cabal segons les necessitats de generar energia per les centrals hidroelèctriques.

Un assumpte interessant és la protecció del mol-lusc d'aigua dolça (*Margaritifera auricularia*), que s'ha extingit a tot Europa i ara només es troba a l'Ebre, juntament amb la del peix *Salaria fluviatilis*, que li serveix d'hoste en el moment de la reproducció. Pel fet que són espècies estrictament protegides, si podem demostrar que el transvasament les pot perjudicar, la Comissió Europea ha de considerar molt atentament les conseqüències de les obres de transvasament. Si la Unió Europea finança el transvasament i després es demostra que hi ha perjudicis ambientals, la UE es veurà compromesa, ja que haurà donat diners en contra de la seva política ambiental. Per protegir la *Margaritifera* es necessita un cabal important, ja que altrament les sorres del fons s'omplen de fang i li impedeixen l'arribada d'oxigen. Per evitar això és necessari que cada any hi hagi almenys una crescuda important (e.g. de més de  $1.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Nosaltres creiem que els rius han de poder gaudir d'un règim de cabals variable, alternant crescudes i períodes d'estiatge. Des del MMA es respon a la qüestió de la *Margaritifera* amb la proposta de fer la presa d'aigües en un punt aigua avall. En lloc de fer-la a Xerta, es proposa fer-la a l'illa de Vinallop, molt més avall. Aquest canvi suposa una despesa energètica important sobre el projecte original, ja que obligarà a bombejar l'aigua cap amunt per portar-la a Xerta.

D'altra banda, la *Dreissena polymorpha*, el musclo zebra, és una espècie invasora que ha aparegut a l'Ebre ara fa uns dos anys. Les seves larves planctòniques suren a l'aigua; per tant, si es fes el transvasament, aquesta espècie s'escamparia per les aigües de Múrcia i Almeria. La solució del MMA era posar a les canonades uns filtres de 100-150  $\mu\text{m}$ , però això fa impossible la circulació amb un cabal  $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Malgrat que el MMA digui que prendrà totes les mesures oportunes, molt difícilment es podrà evitar que la *Dreissena* s'escampi.

La falca salina constitueix un aspecte molt important en la discussió sobre la complexitat. El delta és de formació recent, dels darrers tres mil anys. El riu excava el seu llit per sota del nivell del mar; per tant, si no hi ha cabal del riu, l'aigua del mar entra fins a Tortosa. L'aigua dolça empeny l'aigua salada cap a mar; però, quan disminueix el cabal, com que l'aigua de mar és més densa, tendeix a entrar al riu per sota de l'aigua dolça que surt, i es forma la falca salina. Com menys aigua dolça baixa, més endins entra la falca salina. Per exemple, amb uns cabals de  $125\text{-}150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a Deltebre, l'aigua dolça omple el fons i l'aigua salada no pot pujar més.

Per contra, amb menys cabal la falca salada entra més amunt i pot superar fins i tot Amposta. Per tant, la intrusió de la falca salina depèn del cabal del riu, i per aquesta correlació amb el cabal podem saber exactament la posició de la falca.

Hi ha d'haver falca salina o no? Segons el Ministeri, la falca salina és natural, ja hi era abans, com van mostrar uns estudis fets el 1940. No obstant això, no hi havia falca salina tot l'any, com va ocórrer l'any 2002, sinó que variava segons el cabal. Amb cabals variables, la falca pot ser-hi durant dos o tres mesos. Nosaltres proposem que la falca no entri més amunt de l'illa de Gràcia. I, per aconseguir això, necessitem com a mínim  $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  durant nou mesos. També creiem que hi ha d'haver un període sense falca, i per arrossegar-la totalment fins a mar hem de deixar anar  $400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  durant almenys tres mesos. Això suma més de  $6.000 \text{ hm}^3 \text{ any}^{-1}$  en total que necessitem per mantenir la falca salina més avall de l'illa de Gràcia tot l'any i que hi hagi com a mínim dos mesos sense falca salina a l'estuari.

D'altra banda, hem de tenir en compte que la falca salina va acompanyada pel problema de l'eutrofització. L'aigua del riu conté molt fòsfor, nutrient important per al desenvolupament d'algues. Quan està formada la falca salina, l'aigua salada del fons no es barreja amb l'aigua superficial i es va esgotant l'oxigen del fons. En aquestes condicions reductores el sulfat passa a sulfhídric, que és una substància altament tòxica. En fondària es forma una capa d'aigua sense oxigen, on no poden viure altres organismes que alguns bacteris especialitzats. Per tant, és molt perjudicial deixar el riu durant nou mesos sense oxigen. Per evitar-ho cal que, de tant en tant, es faci un desembassament d'aigua que netegi i s'endugui la falca salina. Calculem que són necessaris com a mínim  $7.500 \text{ h}^3 \text{ any}^{-1}$  per fer funcionar així el riu.

Pel que fa a l'estat ecològic del riu, podem dir que fins a Tortosa està força bé quant a invertebrats, però de peixos està malament. De Tortosa cap avall, el riu està molt malament en tots els aspectes. En aquests moments, l'Ebre, tot i ser un dels grans rius europeus, en temes de fauna i flora està força deteriorat, el seu estat ecològic no és bo.

## El delta de l'Ebre

El Delta es va formar fa entre dos mil i quatre mil anys gràcies als sediments que portava el riu. Però la dinàmica sedimentològica s'estroncà quan construïren els pantans de Mequinença i Riba-roja. Si volem mantenir el Delta, l'Ebre ha de portar sediments. El MMA creu que això és un problema molt difícil de resoldre, que s'ha d'estudiar i quantificar

molt bé. Nosaltres pensem que la solució és que el riu tingui crescudes durant les quals es mobilitzarien i transportarien sediments dels embassaments. Estudis previs calculen que amb cabals de  $1.500$  i  $2.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  durant un mes es pot transportar la quantitat de sediments necessària per mantenir el Delta.

Els arrossars són part consubstancial del Delta actual. Tenen un paper hidrològic per l'entrada d'aigua d'inundació a l'estiu. El PHN destina als arrossars el mínim cabal, el que està gastant ara. Nosaltres pensem que hi hauria de passar aigua dolça tot l'any, ja que la inundació dels arrossars a l'hivern constitueix un hàbitat important per als ocells hivernants. A més, els sistemes naturals que queden també necessiten aigua per conservar-se i per crear nous aiguamolls. La nostra proposta és que tota la línia de la costa tingui una franja d'aiguamolls que serveixin de defensa contra l'entrada d'aigua salada.

D'altra banda, cal tenir en compte també que a les badies hi ha els cultius de musclos. En aquestes badies l'aigua dolça del riu surt per la boca i és aigua rica en nutrients. Per sota entra aigua salada neta, amb pocs nutrients però rica en oxigen. Aquest moviment renova el fons de la badia. Quan es tanquen els canals, com en el moment de la collita d'arròs, aquest dinàmica s'atura i, en esgotar-se l'oxigen, moren els musclos. Si volem mantenir el cultiu de musclos, hem de mantenir sempre un flux d'aigua dolça cap a mar. Necessitem un cabal d'aigua per mantenir les activitats humanes en el Delta.

Un altre aspecte que també s'ha de considerar és la relació entre l'aigua del riu i la pesca. Estudis de l'Institut de Ciències del Mar realitzats amb fotos per satèl·lit mostren que a la primavera l'aigua dolça del riu rica en nutrients entra dins del mar, en canvi a l'estiu es queda prop de la boca amb poca aportació de nutrients a l'ecosistema pelàgic. Aquests estudis han vist que hi ha una relació entre el cabal del riu i la pesca de l'anxova de l'any següent. Les anxoves es pesquen quan tenen un any i es reproduïxen just abans de pescar-les. Si l'aigua rica en nutrients entra al mar, hi ha més plàncton, que constitueix l'aliment de l'anxova. Per tant, per mantenir la pesca necessitem que a la primavera hi hagi crescudes.

## Resum

Resumint, el PHN considerava suficient un cabal ecològic de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ( $3.100 \text{ hm}^3 \text{ any}^{-1}$ ), i amb això es calculava que hi havia  $5.200 \text{ hm}^3 \text{ any}^{-1}$  d'aigua sobrera respecte del cabal en règim natural. Segons els nostres càlculs, que tenen en compte el cabal necessari per mantenir a ratlla la

falca salina, la renovació amb crescudes per treure falca i arrossegar sediments, el cabal per als usos agroambientals del Delta, l'entrada de l'aigua a mar per a les activitats de pesca i conreu de musclos, etc., ens n'anem a 10.000-12.000 hm<sup>3</sup> any<sup>-1</sup>. El CPIDE (ConSORCI per a la Protecció Integral del Delta de l'Ebre), òrgan previst en el PHN per fer estudis per establir el cabal ecològic de l'Ebre, amb estudis previs a l'any 2003, va concloure també que no hi havia excedent suficient per al transvasament. Tot i així, l'antic sotsdirector general d'Obres Hidràuliques (l'autor del PHN) creia que el Pla s'havia de tirar endavant, i que si la canalització ja estava feta i no es podia fer servir perquè no hi havia cabal suficient, no passava res!

El riu ha de tenir el seu cabal de base, aigua per als arrossars i les seves crescudes, i per garantir la sostenibilitat ecològica i econòmica de la zona. El sistema és realment molt més complex que el que el MMA del Govern Aznar ens volia fer creure. Normalment les meves xerrades s'acabaven aquí. Ara però, al març 2004 han guanyat uns altres (PSOE) que reconsideraran el PHN. La situació futura és molt esperançadora.

Tota l'estona he usat com a fons de pantalla una imatge de l'Ebre desenfocada. Esperem que, amb les accions del nou Govern, l'Ebre s'enfoqui, i que pugui continuar essent un riu en lloc de ser un tub amb una aixeta.

## Nota

Aquesta xerrada es va fer poc temps després que hi hagués un relleu de govern i en un moment en què encara no s'havia derogat el transvasament. Algunes de les frases dites en la conferència en present s'han passat a pretèrit. Cal tenir en compte que aquest document és una transcripció de la xerrada i que no és fàcil fer la conversió del que es va dir a les noves circumstàncies sorgides dels canvis produïts després del 14 de març del 2004.

# El cervell i la complexitat de la conducta humana

Nolasc Acarin

Secció de Neurologia de l'Hospital de la Vall d'Hebron.  
Facultat de Humanitats  
Universitat Pompeu Fabra

## Introducció

El meu interès pel que és la consciència i quin és el seu suport físic en el cervell va començar arran de la meva experiència com a neuròleg amb persones afectades per demències i a qui se'ls va deteriorant la capacitat de consciència. Però aquí se'm demana de parlar de la complexitat de la conducta humana, i, per tant, el primer que he de fer és plantejar-me com enfocar la qüestió referent a aquesta complexitat. Segons el diccionari de la RAE, tenim dues definicions de *complexitat* que ens van bé: 1) conjunt de diversos elements, i 2) el que està compost per elements diversos. Addicionalment, en un sentit més catastròfic, tenim la famosa dita de Parkinson que diu que tota evolució esdevé una entitat molt complexa, de la qual es passa al desastre i posteriorment a la desaparició.

Si la complexitat és el contrari de la simplicitat, una molècula és complexa perquè està composta de diversos elements, els àtoms. Pel que fa al que a mi m'interessa, en l'accepció considerada des del punt de vista neurològic, la complexitat comporta un encabdellament entre elements. A la vida tot és complex com tot és incert, però cal arribar al cervell humà per poder parlar de complexitat en el sentit d'encabdellament de xarxes neuronals.

Els insectes tenen un gangli format per un nombre poc important de neurones, i, no obstant això, les abelles transmeten una gran quantitat d'informació, com on és l'aliment, quant n'hi ha, etc. en un petit vol a l'aire d'uns mers 32 segons. En els peixos, per posar un altre exemple, un salmó que neix en un determinat riu, torna per fresar l'any següent al mateix riu amb un error màxim de 50 metres, i entremig ha efectuat un viatge de milers i milers de quilòmetres fins al mar dels Sargassos. En el petit cervell del salmó alguna cosa funciona per fer-li trobar aquest origen.

## El sistema nerviós

El sistema nerviós se sustenta en les xarxes neurals. Posat de forma molt simple, tenim una connexió lineal entre el cos d'una neurona, l'axó i les dendrites. Les neurones tenen la qualitat de convertir els estímuls químics en senyals elèctrics que es van transmetent entre les neurones. En una configuració lineal, s'estimula una neurona, i el corrent circula linealment en una sola direcció. En realitat, però, això no funciona així. En alguns bivalbes (*Aplysia*) hi ha circuits d'aquests tipus i, per la seva simplicitat, s'utilitzen per fer estudis sobre la memòria. En altres animals, i ja no diguem en el cervell humà, els circuits es ramifiquen enormement, i es formen infinitat de bucles. Els circuits simples es compliquen en una xarxa on s'estableixen retroaccions que modulen sistemes i subsistemes dins del gran sistema nerviós. Ens trobem que, junt amb l'acció, hi ha la modulació, l'una va sempre amb l'altra. Per exemple, en caminar fem un moviment i el modulem amb tota una sèrie d'altres moviments equilibradors per tal de no caure a terra. D'altra banda, també hi ha reaccions molt simples com són els reflexos medul·lars, una pulsació que arriba a la medul·la i fa una resposta automàtica sense passar pel cervell. Aquesta seria la resposta nerviosa més simple en l'organisme.

Tenim, doncs, subsistemes dins el sistema nerviós, els quals, en una classificació relativament poc acadèmica, serien:

- 1) El sistema nerviós autònom (o vegetatiu), que controla el funcionament dels òrgans bàsics (la digestió, la respiració, l'excreció d'orina, la vasodilatació de venes o artèries, la freqüència cardíaca, etc.). Aquest sistema estava menyspreat antigament, en contraposició al sistema important que s'ocupa de les funcions superiors (la memòria, el llenguatge, etc.).
- 2) El sistema neurohormonal, que fa referència a tota la part del cervell que s'ocupa del funcionament de les hormones. Les dones saben bé que en una situació d'estrès, d'ansietat o d'angoixa es deixa de menstruar. Enfront d'una ansietat (aspecte mental de la consciència) es deixa d'ovular i de menstruar. Evolutivament és interessant perquè això explica que en situacions de molt risc o perill (per exemple, en moments de guerra, quan es donen violacions i altres agressions) es retira la capacitat d'ovular, de menstruar i, en darrer terme, de gestar.
- 3) El sistema nerviós de relació. La conducta és bellugar-se, ja que sense moviment no hi ha conducta.
- 4) El sistema de la percepció sensorial. El cervell es pot dividir entre la part anterior, on hi ha la part dedicada a la conducta, i la part pos-



terior, que és la part sensorial. Allò que ens arriba pels sentits va a parar en diferents zones de la part posterior. I, en funció de la qualitat i contingut de l'experiència aparent que ens arriba al cervell, se'ns provoca un sentiment, una reflexió, un raonament i unes decisions de conducta.

- 5) Sistema que fa referència a la cognició. Cognició es pot considerar sinònim de ment. La memòria, el raciocini, la capacitat de judici i el llenguatge són funcions superiors cognitives. Aquestes s'alteren en els malalts de demències i d'Alzheimer.

Finalment tenim altres qüestions, com ara la sexualitat, o la cultura i la tècnica, que es poden considerar com a producte del funcionament del cervell, fruit de la interacció de múltiples xarxes complexes neurològiques. D'aquesta activitat en resulta que els homes puguem establir hipòtesis, aprendre coses, deduir resultats, acumular coneixement, tenir idees i formular lleis universals. Aquesta capacitat per a la cultura i la tècnica ha donat un producte específicament humà com és l'economia. L'economia és la capacitat d'intercanviar coses traient-ne profit o compensant l'esforç d'haver aconseguit aquelles coses.

Val a dir que aquesta capacitat d'emmagatzemar i interrelacionar tants factors diferents (experiències sensorials, idees pròpies, invents, etc.) s'explica a partir de la identificació de les àrees d'associació. Aquestes àrees són situades en el còrtex cerebral, la part més superficial del cervell, que està plegada en nombrosos solcs. En els humans aquesta superfície és molt més gran que en els altres animals. Si poguéssim retallar el neocòrtex cerebral (1,2 cm de gruix) i l'estenguéssim damunt d'una taula, podríem veure les diferències entre diversos animals: per exemple, en un ratolí el neocòrtex constituïria una àrea com la d'un segell de correus, en un ximpanzé seria com un full DIN A4, i en els humans ocuparia un metre quadrat. Així doncs, veiem que gairebé tot l'1,2% de dotació genètica que ens diferencia del ximpanzé no té a veure amb diferències en els caràcters externs, sinó que la diferència fonamental és al cervell. El del ximpanzé té un volum d'uns 500 cm<sup>3</sup>, similar al d'un homínid de fa cinc-cents mil anys. L'*Homo antecessor* (descobert a Atapuerca) tenia un cervell de 1.000 cm<sup>3</sup>, mentre que el nostre en té un de 1.500 cm<sup>3</sup>. Des de mitjan segle XIX es coneixen bé les parts on s'emplacen les diferents funcions sensorials, com ara la part de l'olfacció, la part tàctil, la d'expressió o comprensió del llenguatge, etc. Un punt important és que, sumant totes les àrees identificades en aquestes funcions, només s'explica un 20% de la superfície del neocòrtex. Aleshores sorgeix la pregunta: per a què serveix el 80% restant? En el segle XIX a aques-

ta part se l'anomenava l'àrea blanca, en contraposició a les parts identificades, que s'havien pintat en diferents colors segons la funció descrita. Avui en dia ja sabem per a què serveixen les àrees blanques. Són les àrees d'associació, que serveixen per associar la informació que ens arriba, elaborar-la, relacionar-la, prendre decisions i establir les ordres finals per a la conducta. En definitiva, aquestes àrees serveixen per donar suport a la consciència.

Des de fa anys, els neuròlegs saben que, donades determinades lesions del còrtex, es perd la consciència, i s'entra en una situació que avui es considera situació de mort cerebral. La persona ha deixat de fer treballar el cervell i, malgrat que el cor li funcioni, mèdicament està morta. Així, la consciència és el que ens manté vius, àdhuc des del punt de vista legal. Aquest metre quadrat que conté la part blanca del cervell ens serveix per desenvolupar les funcions de la consciència. I, així, podem definir la consciència, no com a un producte eteri, sinó com l'experiència mental d'una sèrie de connexions elèctriques.

### Base física de la conducta

Si tota la conducta estigués determinada pels gens, com que n'hi ha pocs (uns 30.000-35.000 gens en l'home, pocs més que la *Drosophila*, que en té uns 27.000), aquesta hauria de ser forçosament molt senzilla, i, a més, hi hauria molts errors. El treball de la consciència i la conducta es fa a través del cervell, on hi ha uns cent mil milions ( $10^{11}$ ) de neurones que amplifiquen la variabilitat a què ens poden condicionar els gens. És cert que som segons són els nostres gens i que en funció d'aquests s'organitza la conducta, de tal manera que els patrons de conducta són universals en tots els homes, amb petites variacions d'acord a la cultura pròpia i l'entorn. No obstant això, en relació amb els gens sorgeix una pregunta: som exactament iguals? La complexitat és tan perfecta que ens fa iguals en tot? Els resultats són iguals per a tots? Doncs la resposta és: sí però... Els humans compartim el 99,9% de la dotació gènica, però hi ha una diferència important a considerar, la que fa referència als cromosomes del sexe, XX i XY. Aquesta diferència fa que la consciència i les pautes de conducta siguin diferents entre els sexes. Això ja se sabia de fa anys. El sistema neurohormonal que he esmentat abans, evidentment conté diferències segons se sigui un mascle o una femella, associat amb la funció hormonal i reproductora. Però és que hi ha més diferències. Per exemple, el nombre de fibres que connecten els dos hemisferis (l'anomenat cos callós) és molt més elevat en les dones que en els homes. Això presenta uns avantatges que tenen a veure amb l'ancestral rol feme-

ní de protecció i manteniment de les cries i de les relacions socials. El fet que hi hagi milions més de fibres de connexió al cos callós fa que les dones tinguin una més gran facilitat per copsar una situació determinada o els detalls d'una circumstància, fet que els proporciona una més gran capacitat per a la mediació. Aquesta capacitat d'intentar negociar solucions evitant enfrontaments fou un dels aglutinants de la història primitiva que van fer possible el comunitarisme, la vida col·lectiva en uns moments en què les tensions socials i familiars deuien ser molt altes. Això ha arribat tan enllà que, agafant l'exemple de les religions, que són un bon mirall per reflectir-nos tots nosaltres, en totes trobem al capdamunt, al costat d'un Déu totpoderós i a vegades sanguinari i justicier, un personatge femení que mira de mediar, d'intercedir i d'ajudar.

Per acabar em voldria referir a un estudi que vam fer fa uns vint anys en col·laboració amb un equip cardíologs i neuròlegs sobre persones que havien fet una síncope. Una síncope és una pèrdua sobtada de la consciència per manca d'irrigació al cervell. La síncope es produeix a vegades per una baixada de la pressió arterial, d'altres per un alentiment o una parada del cor; en tot cas, en les síncope es veu com un impacte emocional (per exemple, un acomiadament de la feina, la mort d'una persona estimada, un diagnòstic desfavorable, etc.) produeix un efecte fisiològic (alteració de la freqüència cardíaca, alentiment del ritme del cor) que pot arribar a produir la mort. Vam estudiar força la qüestió, i a mi particularment em va obrir una porta de comprensió molt interessant: la d'observar l'estreta correlació que es produeix en algunes persones entre el sistema sensorial (pel qual ens assabentem de la notícia) i una resposta vegetativa (la del funcionament del cor), que pot arribar a ser mortal. És un exemple per entendre la connexió entre les emocions i les vísceres.

### **La naturalesa humana**

Per acabar aquesta reflexió sobre la complexitat del sistema nerviós, de la conducta i de la consciència, m'hauria de referir a un altre aspecte, un assumpte que avui està sobre la taula i que fa referència a la naturalesa humana. La naturalesa humana no és altra cosa que el conjunt de caràcters que defineixen el nostre ésser. I que, en definir-lo, el diferencien del dels altres éssers vius; nosaltres som humans perquè tenim aquests caràcters. Podem establir una certa relació dels apartats que ens fan humans:

- 1) El llenguatge verbal simbòlic. Pot no ser tan pràctic com el vol de l'abella per coordinar-nos per a una acció determinada, però és impres-

- cindible per tirar endavant el treball cultural del qual és capaç el nostre cervell, com ara la transmissió de coneixement, l'aprenentatge, etc. Els ximpanzés viuen igual que els seus antecessors propers. En canvi, en l'home, entre generacions hi ha moltes diferències, especialment en les darreres generacions.
- 2) L'envelliment lent, i en les dones, la menopausa. Som l'únic animal que sobreviu el doble el període necessari per a la reproducció. Es considera que un fill als catorze o quinze anys ja es pot valer per si sol. Per tant, si procreem cap als vint anys, als quaranta ja podríem morir. Els altres animals es moren a l'edat equivalent als nostres quaranta anys, amb l'excepció de dofins, ximpanzés i elefants, que sobreviuen un 5% més d'aquesta edat i que, justament són els animals que tenen un cervell més semblant al nostre. No m'estendré en la menopausa, en la qual, alliberades les dones de la càrrega reproductiva, es converteixen en la mà d'obra experta pel que fa a l'experiència reproductiva.
  - 3) Tendència al comunitarisme, a formar comunitats amb interdependència que s'organitzen gràcies a la invenció de l'economia. Això en part sorgeix de la precarietat dels nadons, que neixen molt petits, ja que les dones tenen la pelvis estreta. L'home és el primer animal dels primats en què el nadó surt mirant enrere, i això fa que la mare no pugui parir tota sola, ja que, si estira el nadó, li pot trencar l'espinada. Això obliga a un sistema comunitari d'interdependència per a la subsistència.
  - 4) Capacitat d'autoconsciència. Intolerabilitat de la mort.
  - 5) La tecnologia. Podem fer el símil que el cervell fa cultura com el ronyó fa orina. Els homes transformem el medi i l'adaptem a les nostres necessitats.
  - 6) Finalment, m'agrada afegir un altre aspecte, que altres autors no comparteixen i que és la capacitat per a la perversió. No hi ha cap altre animal que sigui capaç de fer la tortura, la violació, com també per perpetuar-se en l'error com nosaltres. Tenim un cervell que al llarg de l'evolució s'ha anat expandint de forma desmesurada, i probablement sigui més gros del que necessitaríem per viure. Aquest cervell té capacitat per a la imaginació i la fantasia, i per elaborar hipòtesis, però també per ser pervers, tot elaborant fantasies perverses.

Aquests serien els sis caràcters que de forma més exclusiva definirien la naturalesa humana. I amb això acabo la presentació, que, a partir del nivell més simple de les xarxes neurals, ens ha portat a veure, d'una forma un xic sintètica, la complexitat del cervell i de la conducta.

# Complexitat dels ecosistemes: l'arquitectura de la biodiversitat

Pedro Jordano

Estación Biológica de Doñana, Sevilla  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

## Introducció

Els sistemes complexos són tremendament heterogenis però, d'altra banda, tenen un ampli grau de generalitat. Aquesta deriva del fet de compartir uns principis relativament senzills referents a semblances en la seva estructura i la seva dinàmica, com ara: 1) tenir un elevat nombre de components, i 2) que els seus components interaccionin entre si. En virtut d'aquestes dues característiques, considero que els sistemes ecològics en representen la quinta essència: els sistemes ecològics són complexos perquè normalment tenen un elevat nombre d'elements (diversitat), i perquè aquests presenten un elevat nombre d'interaccions entre si.

Avui en dia es parla molt de biodiversitat, entesa com el nombre d'espècies diferents que podem trobar en els ecosistemes. Però jo no parlaré d'aquesta biodiversitat, sinó que em referiré més aviat a les interaccions entre espècies. He titulat la conferència «Arquitectura de la biodiversitat» perquè crec que són precisament aquestes interaccions les que suporten i estructurin la biodiversitat, a pesar que no entrin normalment en la quantificació d'aquesta.

En ecologia, tradicionalment, l'estudi de les interaccions en les comunitats naturals s'ha estudiat des del punt de vista de les xarxes tròfiques. Aquestes xarxes estan organitzades al voltant de la transferència d'energia entre espècies, fonamentalment en les interaccions depredador-presa o herbívor-planta. Però, en realitat, en els ecosistemes les interaccions són molt més variades i riques. Enfocant només les relacions tròfiques, ignorem interaccions fonamentals com ara la simbiosi, el parasitisme, el mutualisme o el comensalisme, totes les quals són interaccions que no tenen implícita una relació de depredador-presa. Quan parlem de pèrdua de biodiversitat, ens preocupem per les extincions d'espècies. Però, si no incorporem dins de biodiversitat el concepte de les interac-

cions, se'ns està escapant una forma més subtil d'extinció, tal com veurem més endavant.

Els ecòlegs ens dediquem a l'estudi de les interaccions de les espècies entre si i de les espècies amb el medi. L'ofici és realment complicat. Si estudiem el nombre d'interaccions en una comunitat, a mesura que augmenta el nombre d'espècies, augmenta molt ràpidament el nombre d'interaccions que podem esperar.

### Descripció de les xarxes

La forma tradicional d'abordar les interaccions en xarxes d'alta complexitat, més enllà de les xarxes ecològiques, és a través de la seva topologia i el seu patró de connectivitat entre elements. Per descriure la xarxa, doncs, cal fixar-se en els nodes, els enllaços i la disposició de grups i subgrups de més forta connexió.

En ecologia, la informació de les xarxes estudiades es representa, generalment, en matrius on s'anota la presència o absència d'interacció entre parells d'espècies. En aquesta presentació no em centraré en les xarxes tròfiques habituals, sinó en el que anomenem xarxes bipartides. En aquestes, la relació s'estableix entre dos conjunts d'elements. En el nostre cas, per exemple, tindriem un conjunt de plantes i un conjunt d'animals en les relacions de mutualisme planta-animat. Exemples paradigmàtics d'aquestes són la pol·linització, on intervien el conjunt de plantes pol·linitzades i el dels insectes pol·linitzadors, o la dispersió de llavors, amb la intervenció dels vegetals productors de fruits i els animals dispersors. I hem de destacar que aquestes dues interaccions són crucials en el funcionament dels ecosistemes.

Aquestes xarxes bipartides poden tenir una gran complexitat, ja que poden comprendre un elevat nombre d'interaccions entre els elements. Com podem avançar en la comprensió quan tenim una troca de relacions tan embolicada? Hi ha un patró? Hi ha alguna regularitat en els diferents ecosistemes? Tradicionalment, les interaccions mutualistes es basen en el paradigma proposat per Darwin. Aquest gran científic, que tantes coses va observar en la natura, també es va fixar en les interaccions mutualistes entre les orquídiades i els seus pol·linitzadors, i va descriure una coevolució estricta per a cada parell orquídia-pol·linitzador. Però, generalment, a la natura, aquestes interaccions mutualistes entre parells d'espècies planta-animat es troben dins d'una xarxa complexa que comprèn les interaccions de tots els animals i totes les plantes de la comunitat, interaccions que varien enormement en els seus nivells de generalitat o d'especialització.

Per tant, un dels objectius d'aquests estudis és quantificar la complexitat de les interaccions. Una forma de fer-ho és simplement enumerant l'abundància dels diferents tipus d'interaccions: per exemple, de plantes amb un únic pol·linitzador o de plantes amb diversos pol·linitzadors. És a dir, quantificar la freqüència d'interaccions especialistes o generalistes, o, el que és el mateix, examinar com es distribueix la freqüència del nombre d'interaccions de cada node (espècie) de la xarxa. També podríem preguntar-nos com s'estructuren aquestes xarxes; per exemple, si predomina la tendència que tots els elements interaccionin amb tots en un model de cohesió general, o, en canvi, si hi ha subconjunts d'espècies que interaccionen més fortament entre si.

Per tant, podem quantificar la matriu d'interacció (amb 0 o 1 segons si hi ha interacció o no) i examinar la distribució de freqüències de les interaccions per espècie. Sumant els 1 (interacció), tenim el total d'interaccions per cada espècie d'animal o de planta. Els resultats mostren que la majoria d'espècies interaccionen amb molt poques espècies, mentre que n'hi ha unes quantes que tenen un nombre molt elevat d'interaccions. En els nostres estudis hem trobat que, si representem la variable «nombre d'interaccions per espècie» i la seva freqüència acumulada, a mesura que augmenta el nombre d'interaccions per espècie disminueix la probabilitat de trobar espècies amb aquest nombre d'interaccions. És a dir, es reproduceix el patró abans esmentat, patró que s'ha revelat general per a diferents tipus de sistemes. Per exemple, es troba també en la descripció de les connexions de xarxes de computadores unides a Internet, o en la xarxa de vols entre aeroports. En totes s'observen uns quants nodes hiperconnectats, i altres amb poques connexions. Això dona lloc al que s'han denominat « propietats invariants », és a dir, propietats que es repeteixen independentment de la naturalesa dels sistemes estudiats.

Aquesta distribució de la freqüència de connexions s'anomena «distribució lliure d'escala», la qual es diferencia acusadament del que passa en les xarxes construïdes a l'atzar. En una xarxa aleatòria, on els nodes estan units a l'atzar, si comptem el nombre d'enllaços per node, obtindríem una distribució normal, amb una mitjana i una desviació típica que serien bons descriptors de la distribució de les connexions. Les xarxes complexes, en canvi, no queden ben descrites per la mitjana, i es caracteritzen com s'ha dit per tenir uns quants nodes hiperconnectats i un alt nombre de nodes poc connectats. Aquestes distribucions es poden construir a partir d'una regla simple segons la qual en lloc d'agregar nodes a l'atzar, aquests s'agreguen preferentment a nodes que ja són rics en connexions (els rics es fan més rics, i els pobres, proporcionalment més pobres).

Les xarxes planta-animals també queden ben descrites per distribucions lliures d'escala. No obstant això, les xarxes biòtiques difereixen de les abiòtiques en el fet que presenten un truncament de la distribució lliure d'escala. És a dir, la probabilitat de trobar nodes amb un nombre molt elevat d'interaccions disminueix molt a partir d'un llindar en comparació del que caldria esperar si la distribució fos com la de les xarxes abiòtiques. Per aquest motiu, les distribucions en xarxes biòtiques s'anomenen distribucions d'escala àmplia. En els nostres estudis de diverses comunitats naturals hem anat trobant aquest mateix patró, i ens preguntem: perquè es produeix això? Per què les xarxes biòtiques es comporten de forma consistent entre si però difereixen també consistentment de les xarxes abiòtiques? Nosaltres hem vist que hi ha característiques de cada espècie que impedeixen la seva generalitat: hi ha unes «interaccions prohibides». Per veure-les ens hem de fixar en les matrius des del punt de vista dels zeros i preguntar-nos per què hi ha espècies que no poden interaccionar amb algunes altres. Hi ha interaccions prohibides que poden ser per constriccions del cicle vital, com per exemple de frugívors migrants transsaharians que a les nostres zones només hi són a l'estiu i, per tant, no poden interaccionar amb espècies de fructificació hivernal. Altres són restriccions de mida: hi ha fruits que són massa grossos per a determinats frugívors. Altres són limitacions d'accessibilitat, etc. Aquesta existència d'interaccions prohibides és el que provoca el truncament abans esmentat.

### Conseqüències d'aquestes topologies

Hem parlat de similituds i diferències entre les xarxes biòtiques i abiòtiques, i ens preguntem quines són les implicacions d'aquestes similituds i diferències. Mitjançant models teòrics s'ha posat de manifest que, depenent de peculiaritats d'estructura i tipologia de les xarxes, variarà el comportament dinàmic d'aquestes.

Particularment, és interessant observar com es comporta la xarxa respecte a la pèrdua de nodes. En el nostre cas referent a comunitats naturals, correspondria a l'extinció d'espècies. Albert *et al.* (2000), en un article publicat a *Nature*, van fer una simulació comparant el comportament de xarxes aleatòries i xarxes de distribució lliure d'escala formades exactament pel mateix nombre de nodes i interaccions, i es preguntaven sobre el comportament de cada tipus de sistema enfront de pertorbacions. Es van fer preguntes com quants nodes s'havien d'eliminar fins a col·lapsar la xarxa, o com variava la connexió de la xarxa a mesura que augmentava el nombre de nodes eliminats. Els autors van trobar que les



xarxes aleatòries eren força robustes respecte a la pèrdua aleatòria de nodes, ja que es col·lapsaven quan s'havia fet un 30% d'eliminacions. I també van veure que hi havia poca diferència entre eliminar els nodes a l'atzar o «per atac», consistint aquest darrer en l'eliminació dels nodes segons un ordre de més connectivitat a menys. En canvi, en les xarxes de lliure escala van trobar que, si bé eren molt robustes respecte a la eliminació a l'atzar (col·lapsaven amb un 40% d'eliminacions), eren molt sensibles a les pèrdues «per atac», és a dir, a la pèrdua de nodes hiperconnectats (col·lapsant amb el 20% d'eliminacions). Les comunitats naturals, caracteritzades com s'ha dit anteriorment per distribucions d'escala àmplia, es trobarien entremig de les distribucions aleatòries i les de lliure escala. En aquestes comunitats, la pèrdua dels nodes hiperconnectats seria equivalent a la pèrdua d'espècies clau. Aparentment, les propietats biològiques de les espècies que governen les interaccions prohibides confereixen una robustesa més gran al sistema respecte a la pèrdua d'espècies clau.

En resum, trobem patrons interessants de similituds d'estructura i de comportament dinàmic en sistemes molt diferents. Les xarxes de mutualisme planta-animat, que no necessàriament són xarxes tròfiques, mostren una analogia molt clara amb altres sistemes en xarxa, tant biòtics com abiòtics, cosa que permet aprofitar l'aproximació metodològica d'estudi de les xarxes complexes per comprendre els processos evolutius de les xarxes. En el cas que ens ocupa, ens serveixen per estudiar com han evolucionat les xarxes d'alta diversitat de pol·linització o de dispersió de llavors, tot apartant-nos del paradigma de la interacció especialista estricta de parell d'espècies. Les regles bàsiques d'addició i evolució d'aquestes xarxes depenen probablement de propietats intrínseques de cada espècie que imposen restriccions biològiques a l'estructura de la xarxa. Aquest fet té implicacions importants des del punt de vista de la conservació, i s'ha de tenir en compte en les consideracions respecte als mecanismes d'extinció. Ja hem dit al principi que la biodiversitat no és solament la llista de les espècies que integren la comunitat, sinó que també ha de considerar com funcionen les interaccions entre aquestes.