

*Publicat originalment al vol. 20 (1966), p. 74-81*

## **APLICACIÓ DE LA CIBERNÈTICA A L'ESTUDI DE SISTEMES BIOLÒGICS AL NIVELL DE L'ECOSISTEMA**

RAMON MARGALEF

*Doctor en ciències, Barcelona*

Comunicació presentada el dia 12 de maig de 1964

Els sistemes dotats del que anomenem vida són, essencialment, sistemes cibernètics. Una sèrie de mecanismes de regulació garanteixen la conservació d'una estructura, d'una organització, enfront de les perturbacions que contínuament introdueix l'ambient. I això s'esdevé en tots els nivells de l'organització. A l'interior de la cèl·lula, els àcids desoxiribonucleics del nucli, els àcids ribonucleics missatgers, les proteïnes que formen, eventualment, fermentes, els metabòlits que resulten de l'activitat dels dits fermentes, constitueixen llargues cadenes causals que es tanquen repetidament sobre elles mateixes, constituint així un complex de circuits reguladors l'eficàcia dels quals veiem en la persistència amb què es conserven les formes orgàniques. Al nivell de l'organisme els mecanismes de regulació són innumbrables: regulació tèrmica, regulació de la composició del medi intern, etc., sense oblidar els complexos circuits del sistema nerviós. En un nivell més alt, en el nivell dels sistemes formats per individus que poden pertànyer a moltes espècies diverses, tal com es troben reunits i interactuen en un bosc, a les aigües d'un llac, i que és el nivell que estudia l'ecologia,

els circuits de regulació són igualment palesos. Potser l'exemple més senzill que podem posar és el d'un animal carnívor i l'espècie que li serveix d'aliment. A mesura que augmenta el nombre d'individus de l'espècie depredadora, augmenta l'explotació de l'espècie que li serveix de presa, i pot arribar un moment que, per manca d'aliment, la població del depredador comenci a declinar. Com a conseqüència, més tard, la població de la presa comença a refer-se, i ambdues poblacions van oscil·lant entorn d'una posició d'equilibri. La natura de les fluctuacions a què estan sotmeses depèn de la mena de lligams entre les espècies, de l'existència de connexions amb altres espècies, del retard en la resposta, etc., i és un tema d'estudi que entra plenament dins el camp de la cibernètica. En aquesta comunicació em limitaré a examinar algunes aplicacions de la cibernètica a l'ecologia, a dir, a l'estudi dels sistemes formats per poblacions de moltes espècies que s'influeixen mútuament dins un ambient natural. Un sistema superindividual d'aquesta mena s'anomena un ecosistema.

En general, quan hom parla de cibernètica, l'oient pensa en aparells de control,

en autòmats, en *robots*; quan hom parla de teoria de la informació, l'oient pensa en textos escrits, en missatges, en capacitat d'emmagatzemar observacions i notícies i difondre-les. En realitat, des d'un punt de vista més formal, ambdues disciplines es troben tan pròximes, que no en fan sinó una. Tots els sistemes orgànics ens ho evidencien ben clarament: l'organització, l'estructura, és quelcom d'improbable a què hom ha arribat després d'una llarga sèrie de decisions i que influeix damunt el futur d'alguna manera, és una informació. Però, ahora, aquesta informació és mantinguda i és renovada i ampliada per una sèrie de circuits cibernètics que són consubstancials amb aquella estructura.

Des d'un punt de vista més pràctic és oportú de fer-se el propòsit de no utilitzar les idees tretes de la cibernètica i de la teoria de la informació moguts per un desig de novetat, sinó solament quan aquelles idees poden aportar una contribució sensible a l'estudi dels problemes. No ens interessa d'especular si la capacitat d'un cervell humà, en tant que magatzem d'informació, pot estimar-se en bits, i trobem simplement joguines divertides les tortugues i altres autòmats que ens recorden el comportament dels organismes. Però prenem molt seriosament l'aplicació a l'estudi de la distribució de plantes i animals, en un bosc, en el plàncton, de les tècniques emprades per a l'anàlisi de llengües i estils literaris. És prou divulgat que, mercès a pacients anàlisis, és possible de caracteritzar una llengua, un estil, d'una manera purament estadística, segons la freqüència dels diversos mots i de les connexions i les distàncies entre els diversos mots en el context. Doncs bé: podem dir que el llibre de la natura és escrit en una llengua que empra les diverses espècies de plantes i animals com a mots, i que cada clap de la superfície de la terra, cada tros de bosc, és

escrit en un estil definit, usant en una combinació característica un nombre determinat d'espècies. Tenim, doncs, que en aquest aspecte de l'ecologia, la teoria de la informació ens donarà tècniques apropiades per a reconèixer els canvis d'estil. El problema de detectar un fragment inscrit en un text per un copista distint de l'autor principal de l'obra és absolutament equivalent al problema de detectar masses d'aigua o claps de bosc amb una estructura diversa del poblament.

Aquest exemple ha estat escollit també per fer veure com la necessitat que la teoria de la informació promet de satisfer, havia estat sentida pels ecòlegs molt abans que hom parlés de teoria d'informació i que es fessin anàlisis estadístiques de llengües i de textos. Un concepte desenvolupat cap als anys del 1930 per japonesos i anglesos és el de diversitat. La diversitat és una funció que caracteritza la riquesa d'espècies que hi ha en una comunitat natural, en un ecosistema. Tenim el valor mínim d'aquesta funció en el cas inversemblant —si no és en cultius de laboratori— en què tots els individus del sistema pertanyin a la mateixa espècie. El valor màxim seria en el cas, igualment improbable, en què cada individu pertanyés a una espècie distinta. La teoria de la informació ens dona una expressió molt més elegant que les emprades pels ecòlegs que havien usat el concepte per primera vegada: però el concepte, i ben correcte, existia.

La noció de diversitat pot discutir-se amb profit, perquè ens servirà d'introducció a d'altres qüestions fonamentals d'ecologia on el punt de vista cibernètic no és ornament, sinó llum. Per a un col·leccionista de papallones, posem per cas, una diversitat gran en una població de lepidòpters significarà la probabilitat d'obtenir més espècies, i sobretot més espècies rares, com a fruit d'un esforç determinat. Però el biòleg

ha d'acostumar-se a veure en la diversitat una expressió de la capacitat del sistema per a construir circuits de regulació, una mesura de les aptituds cibernètiques del sistema.

En un sistema d'alta diversitat poden existir més menes de relacions biològiques entre els elements que el formen, i, si és un ecosistema, més relacions tròfiques, de parasitisme, de simbiosi i antibiosi, etc. Un ecosistema pot considerar-se com un conjunt d'homeòstats (els individus) relacionats uns amb altres formant un superhomeòstat o homeòstat compost. Com més gran és la complexitat del sistema, és a dir: com més tipus d'homeòstats existeixin i major sigui el nombre de possibles i diversos circuits de regulació entre ells, més gran serà l'estabilitat del conjunt. És obvi, doncs, que els ecosistemes de més alta diversitat, com el bosc tropical, o els rocams de corall, mantenen una molt més gran estabilitat en el temps que no els ecosistemes de diversitat més baixa, com poden ésser el poblament d'una duna o el plàncton marí.

La noció de diversitat s'originà de la contemplació de com es distribueixen els individus en espècies, però la real organització de l'ecosistema es reflecteix també en d'altres plans, en els quals pot parlar-se igualment de diversitat. Podem parlar de diversitat química, referint-nos a com es distribueix la matèria orgànica total d'un ecosistema en diferents tipus de molècules. Un aspecte restringit de la diversitat química ha resultat d'un interès extraordinari en els estudis d'ecologia del plàncton. Una tècnica freqüent de valoració del plàncton vegetal consisteix a filtrar una quantitat d'aigua per separar el plàncton. El plàncton retingut sobre el filtre s'extreu amb un dissolvent orgànic que dissol les clorofil·les i els carotens. Després aquestes substàncies s'identifiquen i es mesuren. Hi ha plàncton de baixa diversitat de pigments, en el qual

la clorofil·la *a* representa una fracció predominant del total de pigments, i plàncton de diversitat més elevada, en el qual s'identifiquen molts altres pigments en proporcions considerables, essent més baixa la proporció relativa de la clorofil·la *a*. La diversitat de pigments és un bon indicador de propietats molt definides de les respectives poblacions. Un plàncton que creix ràpidament té una diversitat baixa, tant de pigments —predomini de la clorofil·la *a*— com d'espècies; un plàncton de dinàmica més lenta, relativament poc productiu, mostra una diversitat elevada, tant en els pigments com en les espècies.

Les relacions que acabem d'esmentar, entre producció i diversitat, parlen eloqüentment a favor de la introducció d'un punt de vista cibernètic en ecologia. La cibernètica ens fa veure les relacions estretes entre estructura i funció de l'ecosistema. En el curs del seu desenvolupament, l'ecologia no sempre ha sabut mantenir l'equilibri adequat entre ambdós aspectes. Durant un període molt llarg, els ecòlegs es preocupaven potser massa exclusivament de l'estructura dels ecosistemes, procurant de descriure'n la composició en espècies i la distribució d'aquestes. Ara sembla que el pèndol es decanta cap a l'altre costat, i hom parla molt de producció dels ecosistemes. En realitat, estructura i funció, composició i producció, informació i flux d'energia, són aspectes complementaris, la cara i la creu d'una mateixa moneda. Certament, el punt de vista cibernètic pot ajudar a evitar el divorci entre les dues direccions de recerca.

I aquest punt de vista cibernètic és essencial per a entendre correctament les relacions que existeixen entre diversitat —o riquesa d'organització— i flux d'energia —o producció. Hom pot construir anàlegs hidràulics, elèctrics o simplement mecànics d'un ecosistema. Són belles joguines que

poden servir per a ensenyar algunes propietats bàsiques dels ecosistemes. Una vegada hem acabat d'usar-los, els podem desar en un armari fins a la pròxima ocasió. En aquest punt fallen les seves analogies amb un ecosistema. Perquè un ecosistema no es pot «desar en un armari», és a dir, no pot conservar la seva estructura si no està en funcionament continu. Necessita canviar matèria i energia, i una condició bàsica per al seu manteniment és que en un sistema més ampli dins el qual es troba, l'entropia vagi augmentant. En termes més senzills direm que un ecosistema requereix un flux d'energia, i gairebé tota l'energia la treu de la llum del sol. Hom pot mesurar l'eficàcia d'un ecosistema: l'energia solar realment emprada per a mantenir un pes unitat de matèria viva (de biomassa) durant un període de temps unitat. Hi ha ecosistemes que per a mantenir un mateix pes de biomassa requereixen un flux d'energia més gran que d'altres. Doncs bé, aquest flux d'energia per unitat de biomassa és més gran en els ecosistemes de diversitat més baixa en tots els nivells. L'explicació no és difícil. Un sistema de baixa diversitat té una organització més pobre: en ell hi haurà elements poc especialitzats, més espècies omnívores, per exemple. Si la diversitat és gran, hom disposa d'un gran nombre de tipus d'espècies, amb una major especialització, hi haurà espècies estrictament adaptades a usar un aliment determinat i, per tant, l'aprofitaran més eficientment. Les relacions entre uns elements de l'ecosistema i altres poden ésser comparades a canals de comunicació, i si les relacions són moltes i estrictament especialitzades, hi ha menys perturbacions en la transmissió de la informació, i l'eficiència assolida és superior. Insistim una vegada més sobre el fet que les relacions entre funció i estructura en l'ecosistema solament apareixen clares en situar-nos en el punt de vista de la cibernetica.

Les consideracions anteriors ens preparen per a entendre un fenomen bàsic en ecologia, l'evolució progressiva de tots els ecosistemes vers estats de major complexitat, la qual cosa s'anomena successió ecològica. És el procés en virtut del qual es reconstrueix el bosc en un clap talat i posteriorment abandonat, o es té la fixació i la colonització progressiva d'uns sorral.

Imaginem un sistema complex d'elements interactuants, com un ecosistema, l'organització del qual requereix un flux d'energia per a mantenir-se, i que pot experimentar petits canvis o reorganitzacions al llarg del temps. En el cas d'un ecosistema seran la introducció de noves espècies, venint de lluny, o l'aparició de noves mutacions gèniques en les espècies que ja eren presents. Qualsevol nova reestructuració que permeti de reduir el flux d'energia —i, per tant, d'augmentar la biomassa que pot mantenir un flux d'energia donat— és immediatament acceptada i integrada al sistema d'una manera automàtica. Per això existeix una tendència constant vers un major grau d'especificitat en les connexions, i un millor aprofitament de l'energia. És una propietat general de tots els sistemes que s'han anomenat autoorganitzadors (*selforganizing*). No cal dir que aquests sistemes no són exclusius del vivent: la formació de meandres en un riu és un bonic exemple d'autoorganització. En tot cas, l'èxit del vivent ha consistit en la miniaturització de les estructures que ha permès a la vida d'assolir un contrast fabulós entre les propietats dels organismes i de la matèria inorgànica d'una escala de dimensions semblants.

De manera natural, un ecosistema va evolucionant gradualment vers aspectes de major complexitat, de major diversitat, i de menor flux d'energia per unitat de biomassa. Però rarament es donen les condi-

ons necessàries perquè aquesta successió ecològica pugui arribar fins a un límit avançat. En tot cas, això s'esdevé solament en ambients molt estables i que han conservat aquesta estabilitat des dels temps geològics, com en certs ecosistemes tropicals. Un ecosistema molt madur, molt organitzat, ha de tenir una estabilitat gairebé perfecta en el temps, i aquesta propietat no és compatible amb les alteracions més o menys cícliques que imposa l'ambient en una bona part del planeta. Podem entendre perfectament com en climes fluctuants els ecosistemes es veuen privats d'assolir un grau avançat de maduresa: és impossible de construir circuits massa afinats. Els boscos de les regions temperades tenen una diversitat menor i mantenen un flux d'energia relativament més gran que els boscos tropicals. Les fluctuacions en els nombres de dues espècies d'animals, un depredador i una presa, de què parlàvem abans, només es manifesten amb la claredat necessària perquè puguin servir d'exemples «de llibre» en ecosistemes pobrament organitzats, de les regions nòrdiques. En sistemes més madurs, cada espècie té tants lligams amb una munió d'altres espècies, que les fluctuacions en resulten summament atenuades.

Un altre aspecte interessant es relaciona amb l'explotació humana. Aquesta incrementa sempre el flux d'energia per unitat de biomassa i disminueix la diversitat. Qualsevol sistema explotat per l'home retorna a un estat de menor maduresa o organització, i l'home obté el rendiment major en ecosistemes que poden anomenar-se més o menys artificials, on la diversitat és mínima i el flux d'energia per unitat de biomassa màxim —cultius d'una sola espècie que se sega o es cull totalment.

La cibernètica il·lumina una sèrie d'aspectes de l'ecologia summament interessants. La diversitat en la distribució d'indi-

vidus en espècies, la diversitat de pigments, les relacions entre unes espècies i altres, la producció i la biomassa, les fluctuacions en els ecosistemes o llur evolució pausada en la successió, l'explotació de la natura per l'home, són aspectes que s'entrellacen molt més sòlidament des del nou punt de vista. Les conseqüències pràctiques són importants: la diversitat d'espècies i la natura dels pigments poden ajudar-nos a predir la productivitat i l'evolució probable d'un ecosistema. És possible de predir en línies generals els resultats de la intervenció humana en un determinat sentit sobre un ecosistema determinat.

L'ecologia que podem anomenar clàssica ha treballat intensament en l'examen «microscòpic» dels fenòmens: ha estudiat les activitats i la multiplicació de moltes espècies sota diverses temperatures, la influència de certs ions presents en el sòl sobre les plantes, etc. Les revistes d'ecologia són plenes de treballs de detall d'aquesta mena. Però quan es tracta d'entendre l'ecosistema enter, aquesta mena de dades són sovint de poca utilitat. Existeixen massa relacions sobre les quals estem molt poc informats, i la manera com totes elles actuen i es combinen en l'organització de l'ecosistema és difícil de copsar. És en aquest moment quan comencem a demanar-nos si és possible de fer afirmacions d'una altra casta, relatives a l'estructura «macroscòpica» del sistema, considerant caràcters com ara la diversitat, el flux d'energia, etc. En aquest nivell necessitem una mena de «mecànica estadística» per a tractar d'aquelles relacions elementals de què parlàvem. La cibernètica i la teoria de la informació són realment útils per a ajudar a precisar els conceptes, a donar-los contingut objectiu i fins a utilitzar-los en la pràctica.

## BIBLIOGRAFIA

Tractant-se d'una conferència de tipus molt general, solament indiquem com a referències tres treballs del mateix autor que tracten amb més detall d'alguns punts concrets.

- MARGALEF, R. (1957). «La teoria de la informació en ecologia». *Memoria de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*, 32: 373-449.
- (1962). «Modelos físicos simplificados de poblaciones de organismos». *Memoria de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*, 34: 83-146.
- (1963). «On certain unifying principles in ecology». *Amer. Nat.*, 97: 357-374.

## SOBRE L'AUTOR

**Ramon Margalef i López** (Barcelona, 1919-2004). Es llicencià (1949) i es doctorà (1952) en ciències naturals. Investigador a l'Institut de Biologia Aplicada (1946-1951), fou membre de l'Institut d'Investigacions Pesqueres (1951), que dirigí en 1966-1967, al qual donà un impuls considerable i un prestigi internacional. Fou catedràtic d'ecologia a la Universitat de Barcelona (1967-1985), i posteriorment professor emèrit, primera càtedra d'aquesta disciplina a l'Estat espanyol. Els seus camps d'estudi foren l'ecologia, la biologia marina i la limnologia, en els quals aplicà la teoria de la infor-

mació per quantificar l'organització dels ecosistemes. Féu aportacions també en l'estudi de la productivitat dels ecosistemes i en la seva resposta a les pertorbacions. Entre les seves publicacions cal destacar *Los organismos indicadores en limnología* (1955), *Perspectives in Ecological Theory* (1968), *Ecología* (1974), *Ecología marina* (1967), *La biosfera, entre la termodinámica y el juego* (1980), *Limnología* (1982), *Teoría de los sistemas ecológicos* (1991) i *Our Biosphere* (1997). Fou distingit amb nombrosos reconeixements acadèmics i amb els premis Hunstman de ciències de la mar (1980), el Ramón y Cajal per la investigació científica (1984), la Medalla Naumann-Thienemann de la Societat Internacional de Limnologia (1989), el Premi Fundació Catalana per a la Recerca (1990), el Premi Humboldt (1990), el Sant Francesc d'Assís de Medi Ambient (1993) i el Premi en Ecologia Marina de l'Institut Internacional d'Ecologia (1995), la Creu de Sant Jordi (1997), la Medalla d'Or del CSIC (2000) i la Medalla d'Or de la Generalitat de Catalunya (2003). Membre de l'Institut d'Estudis Catalans des de 1978, fou membre corresponent de diverses acadèmies, inclosa la US National Academy of Sciences (1985). Doctor *honoris causa* per les universitats d'Aix-Marseille (França) i Laval (Québec). El 2005 la Generalitat de Catalunya creà el Premi Ramon Margalef d'Ecologia i Ciències Ambientals.