




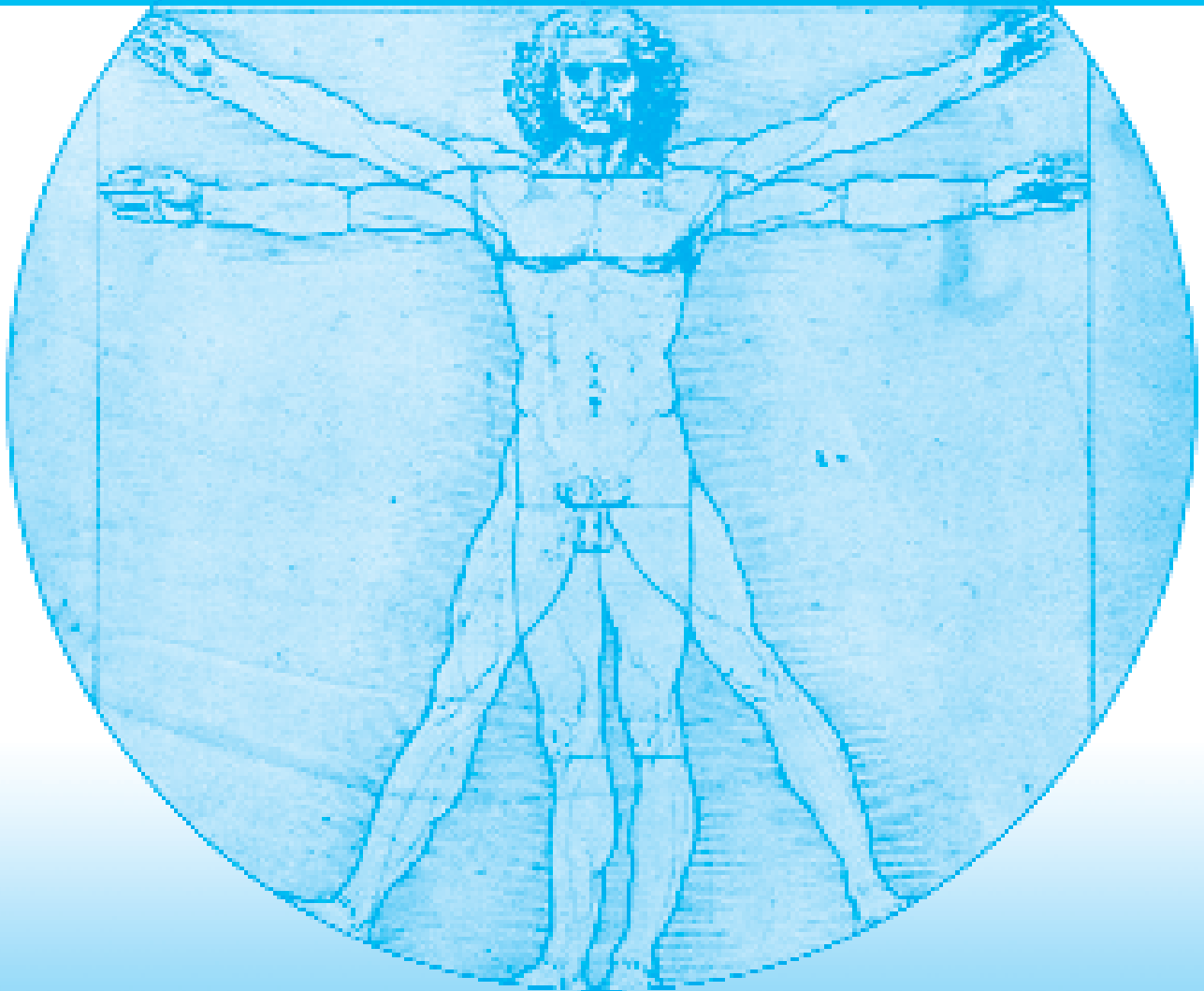
RAMON MARGALEF, EL "BIÒLEG DE LA BIOSFERA"

View metadata, citation and similar papers at [core.ac.uk](https://core.ac.uk)

brought to you by  CORE

provided by Revistes Catalanes amb Accés Obert

# La teoria ecològica i la predicció en l'estudi de la interacció entre l'home i la resta de la biosfera

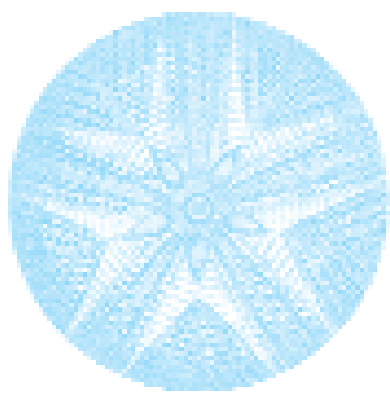




Ramon Margalef

Aquest article es va publicar l'any 1973 amb el títol «*Ecological theory and prediction in the study of the interaction between man and the rest of the biosphere*». Va aparèixer en la revista *Ökologie und Lebensschutz in internationaler Sicht* (H. Siolo, ed.): 307-353. Rombach. Freiburg. Ha estat seleccionat perquè sintetitza brillantment el pensament de Ramon Margalef.

#### El lloc de l'home en la teoria ecològica



Una fracció de la població humana que ha disminuït amb el pas del temps, però no tan ràpidament o de manera tan completa com de vegades se suposa, considera que el lloc que ocupa l'home en la naturalesa és molt especial, i que l'home és essencialment diferent dels altres organismes. Moltes activitats humanes necessiten una enorme extrapolació si s'han de comparar amb les activitats corresponents dels animals, i va semblar justificat col·locar l'home en un «regne» diferent del de la naturalesa. Aquest punt de vista té menys a veure amb actituds religioses que amb actituds humanes en general. Molts moviments filosòfics actuals, sense cap càrrega religiosa específica, rebutgen en extrem, tanmateix, acceptar l'home com un component del món físic, món que presenta arreu les mateixes regularitats, les quals podem aprehendre i sobre les quals podem construir una imatge intel·lectualment consistent.

Considerar l'home merament una part de l'excrescència viva de la Terra, que no requereix cap regla peculiar, resulta potser el primer i inevitable postulat per a la construcció d'una ecologia general. Això pot semblar una trivialitat, però penso que s'ha d'explicitar; perquè l'actual moviment a favor d'un punt de vista ecològic es troba impregnat en amplis sectors per l'acceptació de la gran separació que existeix entre l'home i la resta de la naturalesa, com s'ha indicat en el primer paràgraf. És cert que l'aliment produït pels ecosistemes «naturals» és un factor en l'existència i en el benestar humans. Les acti-

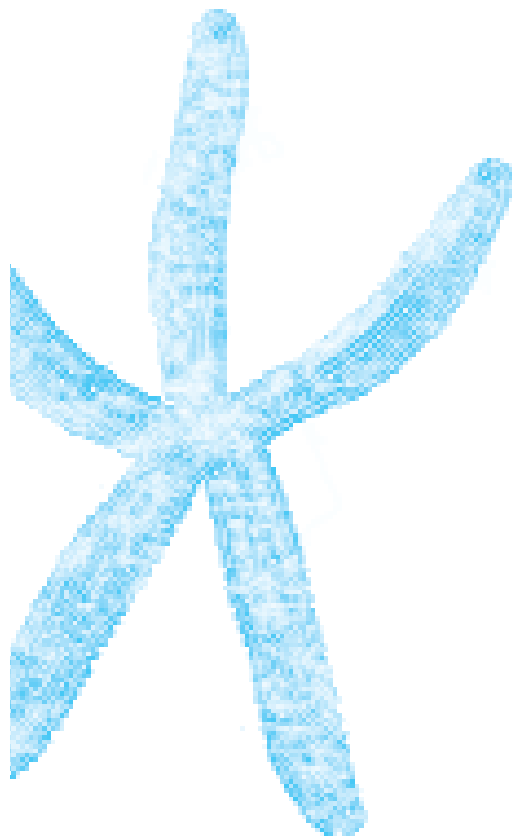
vitats de l'home representen un factor (i, de fet, un factor molt important) de modificació dels ecosistemes «naturals», que és eficaç a l'hora d'alterar i simplificar les comunitats, en la dispersió de les espècies antropofites, etc. Però amb massa freqüència es considera l'home i la resta de la naturalesa com una parella qualitativament diferent, regatejant l'un assegut davant de l'altre a ambdós extrems de la taula, l'home intentant controlar i afalagar la naturalesa per obtenir-ne més recursos, etc. Com que la conservació és abans de res un problema d'actitud i d'educació, el tipus de marc al qual ens podem referir en termes generals com ara «filosòfic» no deixa de tenir les seves conseqüències. Qualsevol tipus d'expressions i de models matemàtics utilitzats per descriure la interacció entre espècies ha d'aplicar-se i pot aplicar-se a l'home. En molts casos, la consideració d'activitats que *a priori* es podria suposar que són estrictament humanes, fa necessari un enfocament més ampli. Això significa que per construir una teoria ecològica és útil considerar totes les activitats de l'home. Només cal pensar, per exemple, en el gran ús d'energia (no en forma d'aliment) que és característic de l'home o, almenys, de l'home modern. Es pot considerar com un metabolisme extern o cultural, amb avantatges selectius evidents que es reflecteixen en la dinàmica de les poblacions. Una vegada fet així i introduït en les expressions corresponents, que s'amplien o es generalitzen per això, els ulls de l'ecòleg s'obren i aquest pot veure ara que aquest metabolisme extern es presenta així mateix, encara que en menor mesura, en els



.....

**Per construir una teoria ecològica és útil considerar totes les activitats de l'home**

.....



animals. Els animals ectotèrmics, que utilitzen l'energia solar per escalfar-se, o els insectes socials amb activitats de condicionament d'aire, transport i emmagatzematge, així mateix tenen una certa quantitat de metabolisme extern, important en la seva supervivència. Si la idea es porta més enllà, es pot veure de quina manera les diferents formes de metabolisme aquí considerades representen una extensió de la partició del metabolisme biològic o intern total en dues parts, 1) respiració i activitat general, i 2) creixement i reproducció. Si no fos pel cas extrem que l'home representa, potser mai no hauríem pensat a comptabilitzar un metabolisme extern, encara que amb seguretat té valor de supervivència per a les espècies que el presenten. La consideració de l'home proporciona una magnífica ocasió per generalitzar algunes expressions ecològiques, de manera que siguin aplicables no solament a sistemes que incloguin l'home, sinó també a qualsevol sistema. Aquesta perspectiva és desitjable en ecologia general, però a més pot contribuir a la construcció de models més realistes d'interacció entre l'home i la resta de la naturalesa, i pot resultar absolutament necessària per a una predicció encertada. I durant aquest procés ocorre que rarament, o potser mai, existeix un exemple de tipus d'interacció que sigui realment peculiar o exclusiu de l'home.

En el present moment de propaganda ecològica exacerbada s'ha centrat l'atenció en uns pocs temes, probablement perquè són més «interessants» o tenen més càrrega emocional. Els temes seleccionats són la població, la contaminació i, de vegades, la conservació. Tot això pot resultar dispersador; es poden oblidar els problemes reals, i els seleccionats poden generar indiferència o histèria. Molta gent està d'acord que el problema bàsic és d'educació i de gestió molt àmplia. Crec que tot aquest complex de problemes s'ha de situar dins d'un marc ecològic molt complet i sense restriccions. Aquest és l'enfocament i el propòsit de la present comunicació.

**Poblacions sotmeses a circuits reguladors locals**

.....

Els ecòlegs han usat l'expressió de la interacció entre les espècies i n'han abusat d'una manera relativament poc complicada. Té la forma d'una equació diferencial per a cada espècie, en la qual la taxa de canvi en el nombre total d'individus

que constitueixen la població es fa igual al resultat de diverses interaccions, positives o negatives, és a dir, algunes interaccions contribueixen a augmentar la població i d'altres a reduir-la. En la forma usual d'escriure aquesta equació, la intensitat de la interacció es fa proporcional al producte de les densitats dels elements que interactuen, en general espècies, encara que també pot tractar-se de la concentració d'algun element o compost en l'ambient. El producte segueix la prou coneguda llei d'acció de masses de la química.

Aquestes expressions tenen la forma general

$$dN_i / dt = aE N_i - bN_i^2 - cN_i N_j - dN_i N_k \dots$$

o bé

$$\frac{1}{N_i} \frac{dN_i}{dt} = C + \sum_{j=1}^n a_{ij} N_j$$

en la qual E pot representar els factors ambientals,  $N_i, N_j, \dots$  el nombre d'individus de les espècies  $i, j, \dots$ , i  $a, b, c, \dots$  són coeficients d'interacció, positius o negatius. En l'exemple exposat se suposa que l'augment de la població es deu a algun recurs ambiental E, i que totes les interaccions, incloent-hi les que tenen lloc entre membres de la mateixa espècie (el terme amb  $N_i^2$ ), tenen una influència negativa en la població.

Aquest model té una base raonablement lògica, en la mesura que els canvis en la densitat d'una espècie depenen de diverses interaccions, i la intensitat d'aquestes és proporcional, encara que mai de manera lineal, al producte de les concentracions dels elements interactuants. Fins i tot és possible suposar que E canvia a l'atzar; simulant així alguns efectes dels climes i altres factors ambientals. No obstant això, cal notar que el model només és útil si se centra l'atenció sobre un espai de temps relativament curt. En la seva forma completa, el model s'utilitza únicament per a fins d'exhibició, incloent-hi la simulació mitjançant computadores, ja que cap sistema ha estat estudiat de manera adequada per tenir una idea de totes les interaccions significatives, i molt menys de la importància d'aquestes a l'hora d'afectar la taxa de canvi del nombre d'individus. Quan la finalitat és l'aplicació, s'han proposat diferents tipus de simplificacions, que han tingut cert èxit. Un altre enfocament és una perspectiva estadística o «macroscòpica» d'un model molt complicat.

Si se suposa un estat estacionari, amb  $dN_i/dt = 0$ , i es divideix cada terme per  $N_i$ , cada equació diferencial condueix a un model de regressió múltiple, en el qual la densitat d'una espècie s'igualava a una combinació lineal de les densitats de les altres:

$$N_i = 1/b (aE - c N_j, d N_k \dots)$$

Es considera que això proporciona una justificació relativament tènue per a l'ús de regressions múltiples en l'estudi de comunitats, però en realitat no és gaire convincent, ja que els models de regressió resulten interessants i s'utilitzen de preferència precisament quan no hi ha un estat estacionari. Una altra simplificació condueix als models de Volterra <sup>15</sup> i Lotka <sup>4,5</sup>. Aquests models simplifiquen les expressions extraient dels ecosistemes parells d'espècies i limitant l'estudi de la interacció a les dues espècies de cada parell. Es pot tractar d'un sistema depredador/presa o bé de dues espècies que competeixen pel mateix recurs. Aquest últim cas equival a un sistema amb tres espècies (o amb tres compartiments, en un sentit més ampli), les dues espècies que competeixen, i el recurs comú pel qual competeixen. L'èxit que han tingut aquests models simplificats es deu, en part, al fet que no es disposava de cap model millor; però no cal ser excessivament cínic ja que en aquests models trobem certa utilitat. De fet, es poden aplicar a ecosistemes simplificats, com els que s'utilitzen en els experiments de laboratori, i poden ser útils així mateix en situacions reals, si se suposa que les espècies o compartiments conceptuals no són espècies sinó grups d'espècies, com quan es parla d'herba i herbívors, de peixos i pescadors, etc. Naturalment, l'home es pot incloure en aquest enfocament. La majoria de models utilitzats en ciència pesquera es basen en les equacions de Volterra, i impliquen una interacció entre poblacions de peixos i poblacions d'hommes. Per descomptat, l'home és un factor important en el control de les poblacions de peixos i, en conseqüència, a l'hora de donar forma a les poblacions de peixos per a la seva ulterior explotació. Les equacions recíproques, que suposen que l'home és regulat per les poblacions de peixos, mai no s'escriuen ni es discuteixen; probablement perquè els biòlegs pesquers creuen que no tindrien sentit. I, no obstant això, en tenen. En qualsevol model d'interacció entre poblacions de peixos i poblacions humanes

és possible considerar una subpoblació d'hommes constituïda pels pescadors, que representa tota la població humana en el model, i incloure un cost de pesca, i una mortalitat de pescadors, constituïda per les persones que es veuen obligades a abandonar la seva feina. A més, és possible desenvolupar un model que descriu el procés de regulació de la subpoblació de pescadors dins de la població humana més gran. Aquest model és particularment interessant perquè mostra una limitació en l'enfocament elemental de Volterra. Es demostra que llavors els pescadors són eliminats, però de fet no desapareixen, sinó que simplement canvien d'ofici; és a dir, els individus canvien d'un sistema d'equacions a un altre, en passar d'una subpoblació a una altra, el mateix pot ocórrer amb una espècie que canvia d'aliment o que es desplaça cap a un altre ambient, però que no resulta morta com a resultat d'un circuit de regulació local. La noció de circuit de regulació (*feedback*) és molt important i es pot entendre immediatament en un sistema constituït per dues espècies, un depredador ( $N_j$ ) i una presa ( $N_i$ ). Es pot escriure:

$$\frac{1}{N_i} \frac{dN_i}{dt} = a - bN_j, \quad \frac{1}{N_j} \frac{dN_j}{dt} = cN_i - d$$

Les dues expressions juntes, i d'una manera molt més real si se suposa un cert retard o demora de temps en les respostes, defineixen un circuit regulador negatiu o estabilitzador: Si  $N_j$  augmenta,  $N_i$  ha de disminuir; i això duu a una disminució de  $N_j$ , i així successivament. Un circuit regulador negatiu funciona com un oscil·lador; i arriba a un determinat tipus d'estabilitat del conjunt, però pot ser que les oscil·lacions no desapareguin per complet. Es pot suposar que qualsevol circuit regulador negatiu té un temps de relaxació associada.

Ara bé, qualsevol sistema, igual que pot ser analitzat en parells d'espècies interactuants, es pot descompondre en diversos circuits reguladors negatius. Es tracta, de fet, d'una xarxa de circuits, de manera que cada espècie pot formar part de més d'un circuit de regulació. Això estableix algunes limitacions: com ja va intuir Volterra, ha d'haver-hi alguna restricció en el nombre total d'elements i de circuits i, en un altre context, existeix un límit superior a la possible diversitat d'elements que interactuen.



.....

## Els ecosistemes

que no canvien molt

en la seva composició

al llarg del temps

estan formats per un

gran nombre

d'espècies

.....



.....

**Les poblacions  
humanes que romanen  
en un estadi paleolític  
(pigmeus, boiximans)  
pertanyen a  
ecosistemes bastant  
complexos i d'una  
baixa densitat de  
població**

.....

El fet que els mateixos elements (espècies o concentracions de substàncies) formin part de diferents circuits reguladors significa més estabilitat per al conjunt del sistema. En un sistema format per molts elements, o per molts compartiments, lligats per una densa xarxa d'interaccions, el nombre d'individus de cada espècie, o el contingut de cada compartiment, no fluctua de manera tan violenta com en un sistema format, per exemple, per només un parell d'espècies. Les proves empíriques a favor d'això són aclaparadores, i molt importants en gestió i conservació. En general, els ecosistemes que no canvien molt en la seva composició al llarg del temps estan formats per un gran nombre d'espècies; però sempre es pot discutir fins a quin punt l'organització d'una comunitat rica en espècies ajuda a estabilitzar el canvi ambiental.

A partir de l'expressió general escrita al principi, en forma d'un polinomi, es pot deduir que suposant que els factors (paràmetres ambientals o densitat d'altres espècies) canvien a l'atzar i de manera independent, l'atenuació de les fluctuacions de les poblacions és molt més important si el nombre de variables independents és elevat. Aquesta és una altra manera de dir que els sistemes molt complexos tenen més possibilitats de romandre més semblats a si mateixos al llarg del temps.

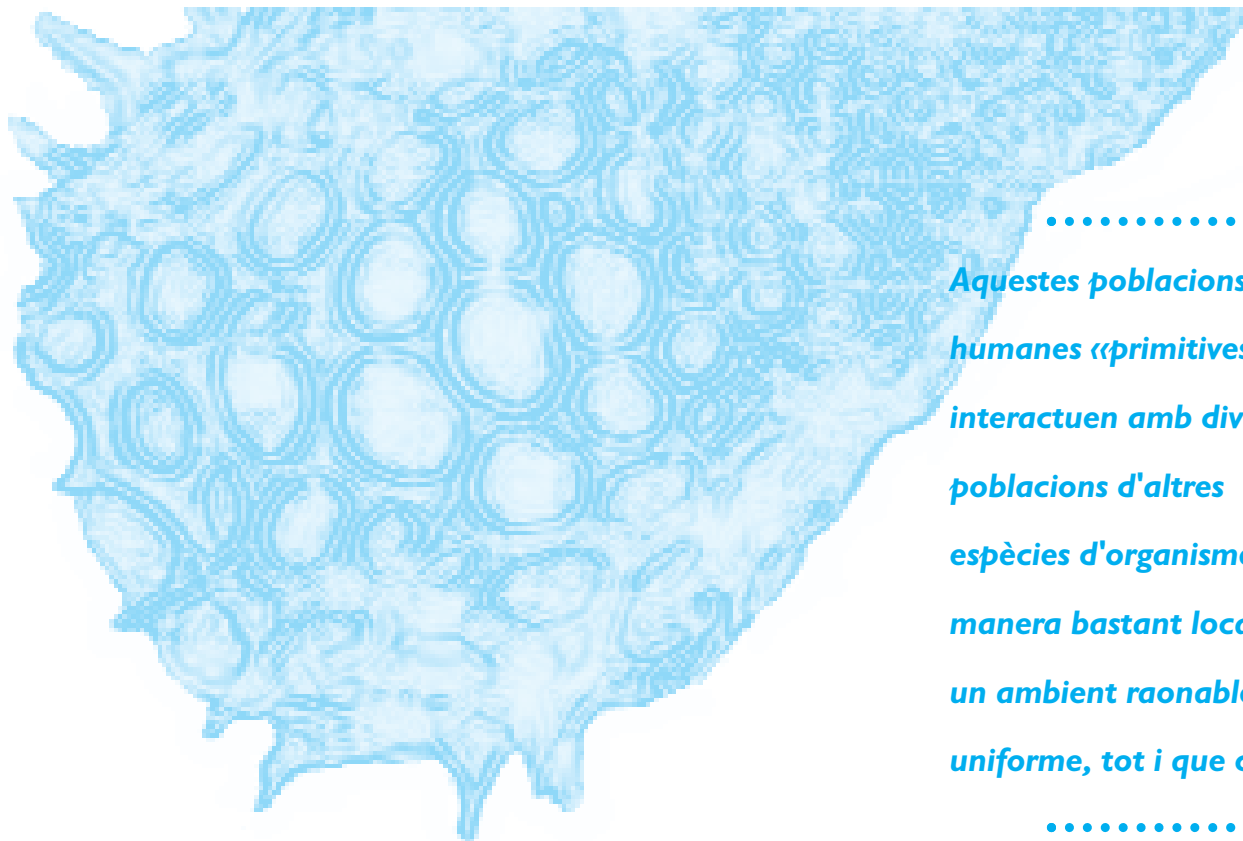
Una espècie arriba al millor nivell d'estabilitat en el nombre d'individus si desenvolupa molts llaços de dependència amb diferents recursos que no fluctuen simultàniament. És el mateix tipus d'optimització que practiquen els consorcis comercials o les indústries que es diversifiquen. Existeixen altres condicions addicionals per a la persistència i l'estabilitat que no poden donar-se en les fórmules descrites, especialment alguna referència a la grandària absoluta del sistema, i a les seves propietats topològiques. El sistema ha de ser prou gran per minimitzar els efectes estocàstics, i l'existència de refugis o de zones «santuari» per a les preses pot ajudar a evitar el col·lapse dels circuits a causa de l'extinció d'algunes espècies.

Un cas especial de composició de circuits reguladors és tenir dos circuits negatius situats un al costat de l'altre, en paral·lel, com quan dos depredadors exploten el mateix recurs, o quan un depredador s'alimenta de dues preses diferents. Els dos circuits reguladors negatius produeixen un circuit regulador positiu entre els dos elements que es troben al mateix nivell. El circuit regulador positiu és disruptiu i amb freqüèn-

cia condueix a l'eliminació d'un dels elements del parell. Aquesta és la manera més general de definir el procés de competència.

El que s'ha esbossat fins aquí és l'enfocament general de l'estudi de la interacció en ecologia. Potser caldria esforçar-se per aconseguir un model molt general, que probablement no es pugui fer que funcioni, però del qual es puguin derivar models simplificats que puguin ser explicatius i predictius en situacions definides. Els diferents grups humans, segons els llocs o les èpoques, poden ser descrits de millor manera per un model o un altre, de complexitat diferent, és a dir, models particulars diferents que siguin meres simplificacions divergents d'una espècie de supermodel. És molt important reconèixer una certa jerarquia en els models, perquè la predicció en els sistemes complexos pot requerir més que la simple extrapolació d'un model que ara funciona. Suposa més aviat el reconeixement que aquest model pertany a una família més àmplia de models, i la predicció s'ha de formular en aquest últim context. El canvi d'un model a un altre ha de seguir certes regles de procediment que hem d'intentar formular. Els models més grans tenen molt sentit biològic però, de la manera com es plantejen freqüentment, solen ser inoperants. Els models utilitzables són en general models *ad hoc*, i és molt difícil extrapolar des d'ells cap als anteriors. En aquest camp es necessita molt més esforç matemàtic.

Aquest punt es pot fer molt més evident utilitzant un model molt simple: el creixement de la població en la humanitat. Gairebé tothom coneix els intents d'ajustar alguna expressió matemàtica a la corba que descriu l'augment temporal del nombre d'individus de la població humana. Existeix el convenciment que si es troba aquesta funció, això permetria extrapolar i predir; però per a un ecòleg és difícil comprendre com s'ha pogut originar aquesta creença. Efectivament, l'experiència demostra que és difícil ajustar una funció matemàtica simple. S'espera que sigui una funció asimptòtica, però sembla que el seu límit varia contínuament. Les corbes logístiques o exponencials són en el millor dels casos simples funcions d'interpolació (no d'extrapolació), i amb molta freqüència meres conjectures. Una millor predicció es podria basar en l'estudi de les condicions en el moment exacte en què s'intenta la predicció. En el cas de la població humana, una predicció a curt termini es podria basar en la morta-



.....

***Aquestes poblacions  
humanes «primitives»  
interactuen amb diverses  
poblacions d'altres  
espècies d'organismes, de  
manera bastant local i en  
un ambient raonablement  
uniforme, tot i que dens***

.....

litat i en la fertilitat actuals, però insisteixo que això no duu fins més enllà que una predicció a curt termini, ja que els paràmetres que s'empren (mortalitat i fertilitat) estan canviant contínuament. Basant-se en això, resulta clar que el supermodel que necessitem ha de ser capaç de predir els canvis en la mortalitat i en la fertilitat a partir de diversos paràmetres importants, com ara la composició de la població, els canvis en els valors i en l'actitud cultural, la disponibilitat dels diferents recursos, etc. Només si es comprèn la naturalesa de les interaccions ecològiques es poden tractar paràmetres concrets, vàlids únicament per a períodes curts de temps, i es comprèn que en el moment present no es pugui quantificar un model molt general.

Partint de les premisses que s'han establert al principi d'aquesta secció, és possible desenvolupar diversos models. El més simple és l'indicat: el canvi de població s'igual a la combinació lineal de les interaccions entre moltes espècies (o factors ambientals) diferents. Aquest model suposa que les interaccions són proporcionals als productes de les densitats dels elements que interactuen i als circuits de regulació negatius, però no s'ocupa de problemes de topologia, espai i transport. No hi ha res

dolent en aquest model pel que fa a l'home, excepte probablement suposar que sigui vàlid per a les societats humanes modernes, encara que pot ser aplicable a les poblacions de primats i afins (fins i tot d'homes). De fet, aquest model es pot aplicar a qualsevol població composta per individus que no es desplacin massa i que mitjançant circuits de regulació negatius es vegi forçada a romandre en equilibri amb l'ambient o amb els recursos. Probablement s'hi hagi d'afegir una altra premissa, a causa del fet que l'home i els seus avantpassats simis s'alimentaven segons una dieta bastant diversificada i equilibrada, de manera que es necessita, o és convenient, un ambient relativament heterogeni o ric en estructura. Segurament un ambient d'aquest tipus també és pertinent per altres raons, ja que proporciona estímuls i senyals adequats per a una espècie amb possibilitats d'evolució cultural i biològica i que requereix un mínim de diversitat ambiental. En qualsevol cas, si aquestes poblacions depenen de recursos variats, la densitat de població és baixa i no sobrecarrega l'ambient. En realitat, el manteniment de la qualitat dels recursos, que pot ser essencial des del punt de vista de la nutrició, depèn molt de la preservació d'un ecosistema relativament complex. L'evolució bioquímica,

manifesta en la pèrdua de capacitat de síntesi de determinats compostos (vitamines) que són subministrats per l'ambient normal, lliga efectivament la supervivència de l'espècie a la preservació de l'ambient complex requerit. Aquesta és una regla evident en la biologia dels ecosistemes.

Les poblacions humanes que romanen en un estadi paleolític (pigmeus, boiximans) pertanyen a ecosistemes bastant complexos i d'una baixa densitat de població (en els pigmeus al voltant de 0,5/km<sup>2</sup>). Aquesta xifra és del mateix ordre que la densitat de població dels antropoides de grandària corporal similar (la màxima densitat en poblacions de goril·la és de fins a 2,6 individus per km<sup>2</sup>). Sempre queda la pregunta de si aquests grups humans han estat foragitats d'un espectre ambiental més ampli per altres pobles; però la diferència existeix malgrat tot, ja que els eventuais invasors han canviat dràsticament el seu ambient. Els grups humans en una cultura paleolítica han desenvolupat una relació equilibrada amb l'ambient, en el sentit que les seves poblacions viuen indefinidament en un estat gairebé estacionari (no hi ha explosió demogràfica) en un ambient no degradat. Estan ben alimentats, depenen d'un espectre de recursos variat i han desenvolupat mètodes per mantenir la població sota control mitjançant



**La teoria ecològica i la predicció en l'estudi de la interacció entre l'home i la resta de la biosfera**  
*Ramon Margalef*

un model molt elaborat de comportament i rituals, exactament igual que procura fer l'home «civilitzat», tot i que encara no s'ha vist forçat a intentar-ho seriosament. Per descomptat que la vida a l'estil paleolític no és certament desitjable, fins i tot per als més entusiastes adeptes a qualsevol moviment de «retorn a la naturalesa».

Aquestes poblacions humanes «primitives» interactuen amb diverses poblacions d'altres espècies d'organismes, de manera bastant local i en un ambient raonablement uniforme, tot i que dens. La major part de l'energia utilitzada per l'home en aquest cas és energia tròfica, en forma de menjar, i l'energia corresponent a un metabolisme extern o cultural, la d'encendre foc o fabricar alguns estris, és una quantitat relativament reduïda. No existeixen complicacions indegudes que evitin l'aplicació a l'home del model esbossat al principi d'aquesta secció. Les interaccions positives i negatives s'anul·len mútuament i la població es troba en un estat estacionari. En aquest cas, l'estat estacionari implica així mateix una distribució d'edats estable. La corba de supervivència ha restat inalterada durant molt temps i, en conseqüència, els vells, que no són molt nombrosos, tenen valor com a font d'experiència i com a agents de cohesió social. D'una manera més quantitativa, la relació durada mitjana de la vida/temps de generació es manté per sota de la unitat.

Des d'un punt de vista més estrictament ecològic han de destacar-se dos fets: la importància menyspreable del metabolisme extern o cultural i la reduïda dimensió en què es tanquen els cicles de matèria en els quals l'home es troba implicat. El retorn a l'ambient de les deixalles i la seva mineralització i reciclatge tenen lloc no lluny de la zona on part de la producció dels ecosistemes entra en el «compartiment» humà. En conseqüència, no hi ha problema de contaminació.

**La prevenció de la regulació local. Interacció estesa per tot l'espai. El significat del metabolisme extern o cultural**

Totes les preocupacions d'avui dia van aparèixer quan l'home va començar a jugar amb massa entusiasme amb els seus estris i va assajar nous sistemes de vida. En la història humana l'acció té lloc quan l'home va passar de la regulació local a la regulació global. Ara ens trobem en els últims estadis d'aquest procés, l'interessant procés d'una espècie que aconsegueix el

control sobre molts ecosistemes combinats, desenvolupant per fer-ho un mecanisme que és més cultural que genètic.

Però el procés no es pot enquadrar en el model simple discutit unes pàgines enrere. Es necessita un model millorat. Aquest nou model ha de resultar adequat a l'hora de visualitzar la interacció entre l'home i la resta de la naturalesa, i fins i tot pot proporcionar certes possibilitats de predicció. Tot i en el cas que la prova no fos satisfactòria, es creu que el nou model podria proporcionar algun discerniment important i que pot ser útil com una millora a l'hora de pensar, fins i tot quan es tracti de poblacions no humanes. Per això resulta clar que no proposo un nou model especialment dissenyat per acomodar a l'home, sinó simplement una millora de la manera usual de formular les interaccions. Sense un model raonable, la simulació i la predicció són impossibles.

Les equacions diferencials utilitzades proporcionen taxes de canvi com a resultat del diferent tipus d'interaccions, la intensitat de les quals està relacionada amb la probabilitat de trobada entre els individus de les espècies que interactuen o entre les molècules dels compostos que interactuen. I se suposa que les probabilitats de trobada depenen d'una manera molt simple de la densitat de les poblacions implicades. A partir de les expressions, tal com s'usen, s'ha de suposar que les densitats i les probabilitats d'interacció es distribueixen de manera uniforme sobre un determinat segment de l'espai. Es tracta d'un volum petit i tancat o bé es pot suposar una regió arbitrària en un espai indefinit? La qüestió és realment seriosa, perquè els elements d'un ecosistema difereixen en grandària, localització i mobilitat o control de l'espai, i és sorprenent que les equacions que intenten descriure la interacció en l'ecosistema hagin ignorat durant tant temps les restriccions topològiques. Pel que fa a l'home (i a moltes altres espècies) la pregunta principal es pot plantejar en unes poques paraules. Algunes espècies interactuen depenent de la seva densitat local i actual, com ara les plantes, però altres espècies no. Suposem una espècie formada per individus que es poden desplaçar molt: la població efectiva d'aquesta espècie que gravita o interactua en un punt determinat amb alguna altra espècie pot ser molt superior a la població real en aquest punt; no es necessita un augment de la densitat real per augmentar la interacció, els individus simplement arriben, interactuen i se'n van, i la velocitat de la reacció pot



.....

***Els individus d'algunes espècies, com per exemple les aus migradores, les tonyines i l'home nòmada, es desplacen i exploten, de manera successiva, recursos concentrats en punts diferents i distants***

.....

augmentar. En altres paraules, l'augment local de la interacció no depèn de la demografia, sinó de la mobilitat. Si hi ha aliment en un lloc, els consumidors es poden reunir allí i la interacció entre la presa i el depredador s'aparta ostensiblement de la suposició de densitats uniformes, o de la situació inicial en un espai reduït. Els individus d'algunes espècies, com per exemple les aus migradores, les tonyines i l'home nòmada, es desplacen i exploten, de manera successiva, recursos concentrats en punts diferents i distants. Aquests organismes escapen al circuit regulador d'estabilització local. Poden explotar un recurs local molt més enllà que si estiguessin permanentment lligats al mateix lloc. Devasten un punt i es desplacen al següent. Tot i que aquesta situació és típica de l'home en els estadis posteriors a l'aculturació neolítica, no és un cas aïllat en ecologia.

Una situació similar es troba en l'evolució del parasitisme. Un paràsit capaç d'explotar patrons diferents, pot matar-los tots o alguns d'ells; és la malaltia. Però si l'especialització condueix a llaços més estrets amb una espècie hostatjadora o bé el paràsit s'ha estès a totes les espècies disponibles, aleshores el circuit regulador negatiu funciona immediatament, ja que el paràsit s'enfronta a l'extinció si no controla a l'hostatjador. Aquest model s'aplica a l'home. L'home va començar a explotar recursos molt locals; quan van aparèixer el nomadisme i el transport l'home va adoptar una estratègia de frontera, i es va expandir com una malaltia; ara que el seu impacte és global, es veu obligat a tornar a l'estratègia del paràsit: entendre's amb el seu hostatjador. L'obtenció de models de la situació de transició, entre una interacció molt local i la interacció amb diversos subsistemes diferents, pot no ser fàcil, però està clar que si no se soluciona són inútils moltes altres exhibicions de refinament en les computadores. El problema s'ha d'afrontar directament. No es tracta tant de compondre diferents subsistemes sota el control d'una espècie, sinó de desenvolupar nous mètodes per comprendre la maquinària de l'ecosistema. En altres paraules, no es tracta de desenvolupar un conjunt de models diferents, sinó de dissenyar un model suficientment general perquè inclogui un ventall complet de submodels, que difereixin només en la importància més gran o més petita del problema de mobilitat i transport. A l'hora d'escriure equacions ja no és possible menysprear l'espai. L'espai existeix, i és important.

En aquesta etapa no es poden donar solucions formals, i només és possible suggerir alguns enfocaments. Potser les expressions es podrien escriure de nou com a derivades parcials del temps i de l'espai, i després, integrant en relació amb l'espai, tornar a alguna equació similar a les usals, excepte pel fet que la interacció no seria proporcional al producte de certes densitats no qualificades, sinó al producte d'integrals combinades de manera diferent segons l'espècie. L'important és que tot això requeriria un espectre complet d'equacions, segons el volum de l'ecosistema en què les equacions s'haguessin de modelar:

Les integrals esmentades representarien la probabilitat total d'interacció en un punt d'una població estesa per un espai més o menys ampli. Es podrien considerar com la suma dels productes de la massa dels individus mitjançant alguna funció de la distància a l'instant o lloc d'interacció. Segurament aquesta última funció decreixeria de manera exponencial, però no s'exclouen altres possibilitats. En les primeres etapes potser es podrien permetre algunes simplificacions, i una que apareix immediatament és utilitzar la densitat local d'una espècie elevada a una potència per expressar el seu impacte en el punt considerat. La potència a la qual caldria elevar la densitat seria més gran si els individus de l'espècie en qüestió fossin mòbils i poguessin arribar des d'una àrea més extensa. Ja s'ha suggerit en diverses ocasions la possibilitat d'elevar a una potència les densitats de les espècies per expressar la interacció, encara que per altres raons, en un context diferent i propiciada per un altre tipus de problemes.

L'expressió matemàtica adoptada és secundària a la idea fonamental, cosa que mostra que poc realistes són les expressions de Volterra i Lotka. En un sistema constituït per una presa i el seu depredador, el depredador pot destruir per complet la presa i sobreviure a partir d'altres recursos, en un altre lloc, i no obstant això pot ser capaç de continuar exercint pressió sobre les eventuals poblacions residuals de la presa en el primer lloc. Aquest mecanisme resulta també efectiu per contrarestar un augment excessiu de la diversitat específica. Pot ser que la diferent mobilitat de les espècies interactuants i l'heterogeneïtat de l'ambient siguin una condició necessària per a la persistència del sistema. Els científics han recorregut a fonts d'aliment suplementàries, refugis i forta heterogeneïtat espacial per muntar experiments de laboratori amb resultats realistes.<sup>2,3</sup>

La capacitat de l'home neolític per sobreviure en gran nombre com a espècie, i de vegades també com una població formada per individus concrets, s'ha associat a la seva capacitat d'allunyar-se després d'una explotació local o destrucció dels recursos massa intensa. Però el mateix comportament es pot trobar en moltes espècies, en graus diversos. Les tonyines i altres grans animals marins es troben més o menys lligats als grans sistemes de corrents, i exploten de manera successiva poblacions d'organismes presa més restringides a girs o remolins locals i temporals situats en posició perifèrica al llarg dels girs principals.

Tornant ara a les formes usals d'expressió que s'han considerat inadequades, podem dir que equacions com aquestes no són excessivament dolentes, però existeix una necessitat de certes regles definides per ajustar-se a l'espai, i això és difícil, perquè les equacions fonamentals, per començar, ignoren l'espai.

Quan tot el conjunt d'equacions que pretenen descriure les interaccions en un ecosistema s'escriu en forma de matriu, qualsevol terme que representi la interacció entre dues espècies apareix per duplicat, una vegada en cadascuna de les equacions diferencials de les espècies implicades, en la forma:

$$\begin{aligned} dN_i/dt &= \dots + mN_i^k N_j^l \\ dN_j/dt &= \dots + nN_j^k N_i^l \end{aligned}$$

En general els dos termes simètrics seran de signe diferent, és a dir, el que és bo per a una espècie (el depredador es menja la presa) és dolent per a l'altra (la presa és menjada pel depredador).

Qualsevol «decisió» que es prengui com a resultat de la trobada (el depredador es menja la presa, per exemple) significa una transferència d'alguna cosa des d'un «compartiment» del model cap a un altre. En el procediment usual les equacions es refereixen al canvi de dimensions de les poblacions  $N_i$ ,  $N_j$ , i després s'ajusten les interaccions mitjançant coeficients (i eventualment per mitjà d'exponents, com s'ha proposat fa unes pàgines), per significar, en el cas de l'espècie  $i$  la pèrdua d'individus deguda a la interacció amb l'espècie  $j$ , i en el cas de l'espècie  $j$  l'augment en el nombre d'individus a causa de la interacció amb l'espècie  $i$ . Evidentment,  $nN_j^k N_i^l < mN_i^k N_j^l$ ; i només  $N_i$  i  $N_j$  són els mateixos a banda i banda. Solament part dels indi-





vidus morts a i són ingerits, solament part de la matèria ingerida és assimilada, i solament part de la matèria assimilada resulta en la producció de nova biomassa de l'espècie  $j$ . La relació  $n N_j^I N_j^K / m N_j^K N_j$ ; mesura una de les diverses eficiències de la transferència que es poden computar, segons la definició que s'hagi triat.

La transferència es pot expressar en forma d'energia, i aquest procediment pot tenir algun avantatge, perquè permet distribuir l'energia total en diverses parts que tenen un significat definit. Però no necessitem anar tan lluny com per tornar a escriure tot el conjunt d'equacions en termes d'energia, perquè això requeriria supòsits addicionals i no és necessari per als propòsits d'aquest treball. És suficient dir, que en termes d'energia l'important és l'intercanvi total i no qualsevol equilibri eventual entre les entrades i les sortides. Fins i tot per a  $dN/dt = 0$  hi haurà un intercanvi d'energia  $dF/dt$ . Podem escriure  $dF/dt = M$ , i  $M$  és el metabolisme (en el sentit més ampli) que permet el manteniment de la població i  $M/N$  o  $M/B$  és el metabolisme per unitat d'organització o de biomassa, respectivament.

L'energia que una població intercanvia és un concepte mal definit. És possible intentar l'enfocament del problema escrivint  $M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = M_{\text{tot}}$ .  $M_1$  serà l'energia invertida en creixement i reproducció, l'equivalent energètic de  $n N_j^I N_j^K$  per a l'espècie  $j$ .  $M_2$  serà l'energia usada en la «respiració», per mantenir l'activitat de la població  $j$ .  $M_3$  es reserva per al «metabolisme extern o cultural», que es comentarà, i  $M_4$  és alguna «pèrdua» inevitable associada amb les particularitats de l'espècie. Naturalment, quan els biòlegs parlen de metabolisme es refereixen a  $M_1 + M_2$  i aquest es pot denominar metabolisme «biològic o intern».

En el decurs de l'evolució, com sembla probable, s'han reconegut algunes tendències en les relacions d'energia i biomassa, i en el metabolisme. Sempre és causa de controvèrsia parlar d'un avanç progressiu, i fins i tot de tendència progressiva, però una actitud crítica no ha de passar per alt totes les regularitats. Sembla que hi ha hagut una tendència cap a un augment de la relació  $M_2/M_1$ ; és a dir, tot i tenir en compte el fet que els organismes majors tenen una taxa de consum d'oxigen més petita, els organismes en els nivells tròfics superiors, o d'organització superior, inverteixen menys energia a créixer i a reproduir-se, i relativament més energia a desplaçar-se.<sup>7</sup> En altres paraules, la taxa de

renovació pot fer-se més lenta, com ocorre amb freqüència, mentre que l'energia utilitzada per mantenir l'animal actiu no disminueix. La mobilitat s'ha de pagar; i el preu està ben justificat quan la mobilitat és el millor actiu per a la supervivència. Una elevada relació  $M_2/M_1$  s'associa amb una eficiència neta baixa, si l'eficiència es computa com a creixement + reproducció/aliment ingerit. És significatiu el fet que aquesta eficiència sigui del 0,1 % en l'home, però és també baixa en les formigues (del 2 al 2,6 %). Aquests valors poden comparar-se amb eficiències del 5 al 12 % en herbívors, i fins i tot del 12 al 35 % en carnívors.

Això prepara el terreny per a la discussió de  $M_3$ , al qual m'he referit com a «metabolisme extern o cultural». L'home nòmada, naturalment, escapa als circuits de regulació local movent-se d'un lloc a un altre. Aquest moviment requereix energia extra. En els estadis següents de l'evolució cultural ja no és la gent, sinó els recursos, el que es desplaça d'un lloc a un altre, el que permet a les poblacions subsistir fora dels límits establerts per les equacions de Volterra si aquestes s'apliquessin a un espai reduït, per exemple a un poble, sense cap productor primari. Des del punt de vista de l'ecologia, de la persistència d'una població, l'energia que s'utilitza perquè «la muntanya vagi a Mahoma» ( $M_1$ ) té el mateix significat que l'energia que s'utilitza perquè «Mahoma vagi a la muntanya» ( $M_2$ ). Per descomptat, una vegada acceptat el concepte de metabolisme extern com una prolongació del metabolisme intern i amb el mateix significat ecològic, resulta clar que el metabolisme extern no es pot restringir únicament al transport, sinó que ha d'incloure així mateix l'energia utilitzada en el condicionament del clima i en qualsevol cosa que pugui augmentar la supervivència i el control ambiental. Tampoc aquest «metabolisme extern» és una peculiaritat de l'home, ja que podem descobrir-lo en les plantes i en els animals. L'evapotranspiració, la regulació tèrmica per mitjà de l'exposició al sol, les construccions que faciliten el transport, la disposició de magatzems d'aliments i el clima artificial en formigues i termes, impliquen el flux i la degradació de l'energia fora del propi cos, però amb determinats resultats definits de valor selectiu. El metabolisme cultural o extern es refereix a energia que flueix per fora del cos i per rutes que no són les biològiques ordinàries. Dirigir part de l'energia disponible en aquest sentit a promoure material, per exemple, propor-

ciona tals avantatges que s'aparten els perills, la mortalitat es redueix i la taxa de renovació es fa més lenta. Invertir en transport sembla que és de vegades un millor negoci que invertir en descendència (les persones també tendeixen a preferir els automòbils als nens) perquè, encara que no hi hagi altres raons, una taxa de renovació més lenta, la possessió de la biomassa, sembla que és (o que és «seleccionada» com) una finalitat en el conservadorisme de la vida. El metabolisme extern significa que s'agafa dels altres elements del sistema molta més energia, però que només s'aconsegueix un augment relativament reduït de biomassa organitzada. La major part de l'energia es pot considerar «perduda»; crec que aquest terme s'ha d'aplicar amb cura. Com que part de l'energia implicada en el metabolisme extern no passa per la ruta biològica, el conjunt d'equacions diferencials que descriuen l'ecosistema s'ha d'ampliar. El transport, la calefacció, depenen d'energia que procedeix dels ecosistemes actuals (fusta) o d'ecosistemes del passat (carbó, petroli). També s'ha de tenir en compte l'energia hidroelèctrica. La fusta es representarà mitjançant un terme  $-m N_j^I N_j^K$  i (l'home és  $j$ ) en l'equació diferencial corresponent a l'espècie  $i$  (un arbre); per a recursos no renovables (petroli, carbó) la taxa de canvi  $dN_i/dt$  serà sempre negativa, i amb un terme amb  $N_j^I$ . La potència  $I$  sempre serà naturalment bastant elevada.

Actualment, en l'home el metabolisme extern o cultural és molt més alt que el metabolisme intern o biològic. Un metabolisme biològic diari de 3.000 kcal equival aproximadament a 180 watts. El consum d'«energia externa» per càpita, segons els països, és d'entre 300 i 6.500 watts; als Estats Units va al voltant dels 10.000 watts (taula 2). En altres paraules, encara que alguns grups humans, i molts individus, s'espavilen amb un metabolisme extern molt reduït, en general la humanitat té ara un metabolisme extern que suposa d'una a 20 vegades el seu metabolisme intern o «veritable».

És molt important traçar un model per a això en qualsevol conjunt d'equacions que intentin representar la interacció en la biosfera. Sovint s'ha assenyalat<sup>16</sup> que el problema de l'augment de la població s'incrementa per l'augment del consum d'energia per càpita, i que el que importa és el consum total d'energia. Resulta evident que el «metabolisme extern» està molt relacionat amb la capacitat de transport i de control. Existeix una bona correlació entre el producte

.....

**El consum d'energia  
per càpita està  
correlacionat  
positivament amb la  
densitat de població**



nacional brut, un mètode per calcular el metabolisme total, i els mitjans de transport: oleoductes, autopistes, vehicles, etc. Per als propòsits de la predicció probablement és vàlid mitjançar el metabolisme extern per a grups humans, encara que presenta una important variació dins d'un mateix grup.

El consum d'energia per càpita està correlacionat positivament amb la densitat de població. Les concentracions humanes (ciutats) usen més energia per càpita que les comunitats humanes menys denses (i menys influents i pròsperes). Hi ha doncs una certa raó per elevar a una potència la densitat local de la gent en les equacions diferencials que expressen les interaccions, com es va proposar abans, com un procediment de tempteig per millorar una mica la manera tradicional d'escriure les equacions. Si es comparen àrees d'extensió similar, és probable que les quantitats relatives d'energia que necessiten siguin proporcionals a una potència de les respectives densitats de població (a  $N_j^{l'}$ , sent  $l' > 1$ ) abans que a  $N_j$  ( $l' = 1$ ). Per descomptat,  $l'$  és diferent d'un lloc a un altre i ha sofert un ràpid increment al llarg del temps.

Cal fer una observació que pot ser d'interès en ecologia general: elevar a una potència els elements que intervenen en una interacció condueix a la distinció entre interaccions febles i interaccions fortes. Una espècie com l'home, el nombre de la qual s'ha d'elevar a una potència per expressar adequadament la seva influència sobre altres espècies, interactua «fortament». Per descomptat, una espècie d'aquestes característiques ha de ser capaç d'explotar molts recursos separats, i de fet l'energia necessària per fer-ho procedeix de la seva interacció forta en llocs separats. Això és molt important des d'un altre punt de vista molt relacionat amb la conservació.

Si un ecosistema es modela mitjançant un conjunt d'equacions diferencials, escrites amb el terme general...  $a_{ij}N_iN_j$ ..., no hi ha res que impedeixi suposar que el nombre d'espècies pot augmentar gairebé indefinidament, i que les seves interaccions arriben a una intensitat molt baixa, a causa del fet que la densitat de cada espècie és necessàriament baixa. Això pot facilitar l'especiació i probablement ocorre al llarg de la successió en ambients molt estables en augmentar moltíssim el nombre total esperat d'espècies, cosa que s'acompanya d'una atenuació de tots els canvis possibles. Massa interaccions i massa febles. Només si se suposen algunes inte-

raccions fortes s'estableix un límit a l'augment de diversitat.

En el conjunt d'equacions diferencials les interaccions fortes s'han d'introduir mitjançant algun artifici matemàtic. Potser el més simple, però sens dubte no el més apropiat, consisteix a elevar a una potència el nombre d'individus de les espècies que interactuen. Això significa un flux d'energia més elevat per a les espècies que interactuen fortament, energia que és utilitzada per desplaçar-se o en transport, com en l'home, amb la possibilitat de lliurar interaccions igualment fortes amb espècies diferents o recursos diferents. Aquest procés ha de frenar qualsevol tendència a l'augment del nombre d'espècies i pot originar l'extinció d'algunes. De fet, la interacció forta de l'home amb la resta de la naturalesa condueix sempre a una reducció de la diversitat biòtica de les comunitats.

**La necessitat d'un retorn, transport,  
pèrdua de fertilitat i contaminació**

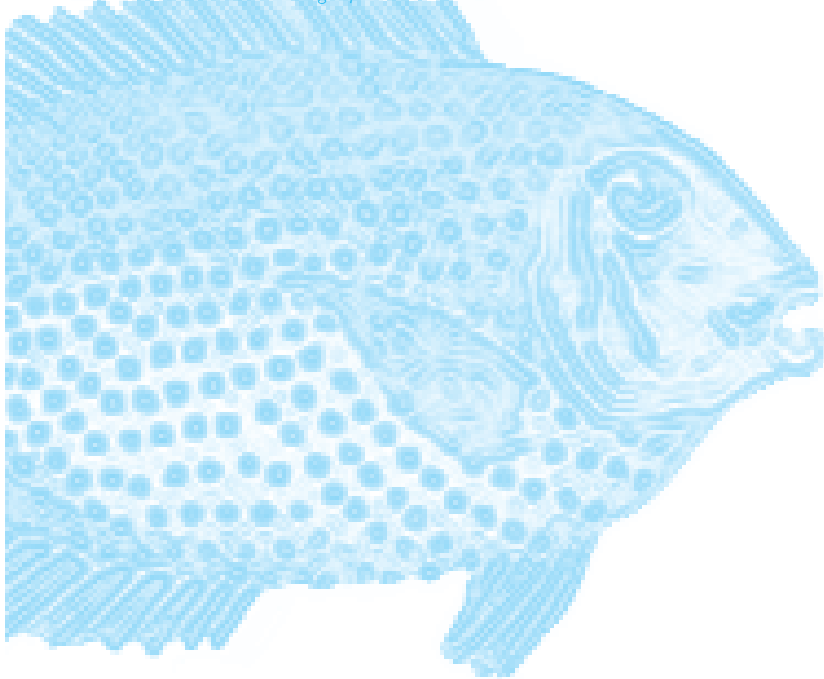
.....

Qualsevol conjunt d'equacions diferencials que es refereixin a les diferents espècies d'un ecosistema es pot complementar mitjançant equacions que expressin la taxa de canvi de nutrients seleccionats, de la matèria orgànica acumulada en l'ambient, i de gairebé qualsevol variable més o menys dependent de les activitats dels organismes. La taxa de canvi en la concentració de fosfat, per exemple, és proporcional a l'absorció per part d'algunes espècies, a la funció de la seva densitat, i també als processos de mineralització o retorn, que és una altra funció de l'activitat de les espècies.

Si s'escriuen tals equacions apareix la mateixa dificultat que sorgiria en el cas de les equacions relatives a les espècies. És necessari tenir una certa idea de l'espai on tenen lloc els esdeveniments. Si les equacions es refereixen a un volum molt petit i tancat, com un flascó de cultiu el contingut del qual s'agita, poden ser vàlides; però si es considera un volum gran s'ha de suposar que el sistema és perfectament uniforme, o bé que la difusió és suficientment ràpida per acceptar, en una primera aproximació, la llei d'acció de masses. En general cap d'aquestes dues hipòtesis és certa. Si, de mitjana, un element retorna a l'ambient al voltant d'un punt situat molt lluny del punt on és assimilat, la velocitat del transport des del primer lloc fins al segon limita la velocitat del cycle complet. Únicament



**La teoria ecològica i la predicció en l'estudi de la interacció entre l'home i la resta de la biosfera**  
Ramon Margalef



**La interacció forta de l'home amb la resta de la naturalesa condueix sempre a una reducció de la diversitat biòtica de les comunitats**



sobre una regió molt restringida el problema desapareix en la pràctica a causa de la difusió física i la turbulència.

Per començar, examinem alguns exemples naturals de l'esmentat efecte de coll d'ampolla. En els llacs temperats hi ha un cicle de nutrients típic. Després de la barreja de l'aigua i de l'homogeneïtzació de la seva composició durant l'estació freda, el plàncton que es desenvolupa en les capes il·luminades condueix una part dels nutrients al cos dels organismes. Directament perquè s'enfonsa, o a través d'una organització vertical de les xarxes tròfiques en forma de relleus, aquest material és dut a aigües profundes, on es descompon. A finals d'estiu l'aigua profunda s'enriqueix en nutrients, en un moment en què les aigües superficials ja són molt pobres. La distància entre el centre de depleció i el centre d'excés és una mesura de la «grandària» del cicle biològic i de la facilitat amb què es pot fer que vagi més a poc a poc, en relació amb els mecanismes disponibles per al transport de retorn. Si el llac està tèrmicament estratificat, aquest transport de retorn serà molt reduït. Naturalment, aquest problema podrà aparèixer o no en els nostres sistemes d'equacions, segons el volum del sistema del qual estem fent el model. Com que tractem únicament amb

el fitoplàncton, es pot considerar que els nutrients procedeixen de «fora» del nostre marc de referència i hi van a parar, potser amb una periodicitat més o menys regular; però això és merament pretendre no veure el problema, i l'estudi dels organismes dispersos per tot el llac necessita una formulació millor. Tal formulació es pot referir a un espai no més gran que el volum del llac, ja que a l'hivern el llac es barreja una altra vegada i es materialitza la dependència de les aigües superficials i profundes. Serà necessari algun tipus d'anàlisi espectral o escalonada: primer capa per capa (si ho volem així), després el llac sencer.

Generalment els mars requeriran un model més complex, basat en una ulterior extensió de l'espai considerat. Alguns mars interiors o marginals, com el Mediterrani, es poden considerar més o menys com un llac; però en altres àrees oceàniques els nutrients que procedeixen d'una gran zona de producció es concentren en aigües profundes i després es desplacen cap amunt en regions molt localitzades. En altres paraules, una zona limitada d'aflorament es troba associada a una àmplia regió d'enfonsament lent. La fertilitat de les aigües costaneres en alguns països afortunats (Perú, Mauritània, etc.) procedeix d'una esterilitat relativa d'àrees oceàniques molt

més extenses (o es paga mitjançant aquesta). En el cas d'un llac, la barreja i el retorn tenen lloc en la mateixa columna vertical; en el cas d'un oceà no ocorre així, i pot haver-hi una gran distància horitzontal entre l'enfonsament dels nutrients i el seu retorn de nou a la llum. Una expressió completa del sistema requereix un espectre complet d'expressions, cadascuna referida a una grandària particular del sistema considerat. Un altre exemple, que es refereix als ecosistemes terrestres, és el transport fluvial dels nutrients, riu avall cap al mar; o des de les muntanyes fins a les valls, que ha de ser compensat d'alguna manera mitjançant l'erosió de les roques i el rentatge dels seus compostos, i que evidentment posa fre a la taxa de renovació de determinats ecosistemes terrestres incapaços d'un fort lligam dels nutrients en el cicle.

El transport en què intervé l'home té una importància especial. L'efecte en l'home sedentari i fins i tot en l'home nòmada és petit, potser comparable als efectes dels termes, etc.; el camí de retorn no és ni molt llarg ni molt lent. El problema és molt més important quan el transport dels recursos substitueix el moviment de la gent. L'home obté recursos d'una zona gran, els concentra, els consumeix o els mig consumeix i llança el material en vies de mine-

ralització en llocs molt reduïts. Això és la contaminació. La contaminació orgànica és en essència el coll d'ampolla creat per un sistema de retorn deficient o simplement fora de proporció. A més, en els sistemes terrestres l'home augmenta l'erosió i agafa amb les collites diversos nutrients especials que només en part es retornen en forma de fertilitzants. El fem solia ser complet; els fertilitzants químics són gairebé sempre incomplets; i la pràctica del guaret retornava només carboni i nitrogen i, a una velocitat molt lenta, elements procedents de l'alteració natural de les roques. Conrear, transportar el producte i consumir-lo en un altre lloc ha conduït a una tremenda pèrdua de fertilitat. Des del Creixent Fèrtil fins a Ibèria, el grau de ruïna de la terra ha estat una funció del temps durant el qual l'home l'ha explotat. Regions molt fèrtils han estat desertitzades després de mil·lennis d'explotació. L'explotació recent pot ser molt més ràpida quant a resultats, com ho testimonia l'Amèrica del Nord i l'Àfrica.

L'agricultura que portaven a terme grangers dispersos, principalment sobre una base de manteniment, que proporcionava un ampli retorn mitjançant l'ús de fem, no ha estat tan perjudicial per a la fertilitat de la terra com el conreu intensiu, amb una fertilització inadequada. De vegades la fertilització tenia lloc de manera natural a costa d'una altra terra, com en el cas d'un riu que aporta fertilitzant rentat d'altres seccions del terreny (Nil).

Quan els agricultors conreen per enviar les seves collites al mercat i perquè aquestes siguin consumides lluny, es produeix una situació irreversible. Aquesta situació es pot generalitzar, perquè qualsevol explotació intensiva que es desplaci d'una zona a una altra produeix un dany similar a la terra, i els propòsits poden ser diversos, com obtenir fusta per a la producció de ferro, o per construir vaixells, o bé utilitzar la terra per a pastura d'herbívors migradors. Aquestes formes d'explotació, a més de l'agricultura, han produït una erosió i desertització extenses en àrees que eren productives en l'antiguitat clàssica. Els privilegis exagerats que es concedien en l'Espanya del segle XV als criadors d'ovelles merines van contribuir a arruïnar la terra, i les cabres van fer la resta. S'ha dit que el beduí és no solament fill del desert, sinó també del seu pare. Totes les formes de transport, des del simple nomadisme fins al comerç refinat de l'actualitat, impliquen els problemes bessons de pèrdua de fertilitat i de contaminació. Bàsica-

ment, es tracta d'un problema de falta de vies de retorn. El problema s'agreuja gradualment a mesura que la distribució de la humanitat esdevé cada vegada més aglomerada en les grans àrees urbanes. Des del punt de vista de l'ecologia general convé recordar que el transport és un factor molt important en l'organització i el desenvolupament dels ecosistemes. Un estat estacionari requereix que a través de qualsevol frontera l'intercanvi de matèria estigui equilibrat. En general, la matèria té més energia associada quan va en una direcció que quan va en la contrària. Prenem com a exemple una frontera ideal traçada entre un plàncton i un bentos. Gran quantitat d'organismes s'instal·len procedents del plàncton i són utilitzats com a aliment pel bentos. En el fons, s'alliberen nutrients o mineralitzen, i tornen a les aigües lliures a través de la barreja. Ja tenim la ruta, però es pot dir que el bentos explota el plàncton i que la frontera entre ambdues comunitats és asimètrica pel que fa a la manera com la matèria viatja en les dues direccions oposades. En el cas d'un escull de coral, la matèria està lligada molt més fortament al bentos, i la via de retorn és molt més difícil. De fet, l'energia del sol arriba al nivell de l'escull i la major part de la matèria es recicla entre els pòlips de coral i les zooxantel·les.

Els assumptes de l'home no s'allunyen massa d'aquest esquema. Els sistemes urbans es poden considerar explotadors davant dels sistemes rurals. No només la matèria duu més energia quan es dirigeix cap a les ciutats que quan es mou en sentit contrari, sinó que amb freqüència el retorn falla, amb els perills subsegüents de contaminació i de retard del cicle i pèrdua de fertilitat. Els problemes que es creen d'aquesta manera se solucionen temporalment important aliments d'un altre lloc i abocant cada vegada més residus. A mesura que augmenta la grandària de les ciutats la solució del problema del retorn es fa cada vegada més difícil. L'única manera d'alliberar-se de la putrefacció o de tornar-se paràsit és millorar l'eficiència del sistema de transport controlat per la ciutat. Però aquesta és una solució temporal, una estratègia de frontera i, a mesura que el sistema creix, consumeix més energia. De fet, com s'ha assenyalat, el consum d'energia per càpita en les poblacions humanes és proporcional a la densitat de població o a una potència d'aquesta. L'excés d'energia usada paga pel transport, i es pot mantenir perquè proporciona el control sobre els sistemes perifèrics, que es poden considerar explotats.



•••••

**El transport és un factor molt important en l'organització i el desenvolupament dels ecosistemes**

•••••



**La teoria ecològica i la predicció en l'estudi de la interacció entre l'home i la resta de la biosfera**  
Ramon Margalef

A hores d'ara espero que el lector estigui convençut que l'expressió usual d'interacció en l'ecosistema mitjançant equacions diferencials i termes lineals no té en consideració diversos factors importants. Per millorar les equacions, les densitats dels organismes que reaccionen s'han d'eleva a una potència 0, millor, s'han de substituir per alguna integral. Això representa sistemes de regulació que no estan tan esmorteïts com de l'altra manera; un resultat important és la reducció de la diversitat i, com sigui que la interacció forta per a una espècie determinada està lligada a la seva elevada capacitat de transport, una condició per al manteniment indefinit del sistema és algun mecanisme de retorn per als elements químics, ja que el flux d'energia només es pot mantenir si el cicle de la matèria és gairebé tancat.

Tot això té una importància fonamental per a les situacions humanes, però es pot aplicar així mateix a molts ecosistemes naturals, sense l'home.

aconseguir una espècie de demostració matemàtica, analitzant pas a pas els canvis en la forma de les corbes de supervivència de la població afectada per l'explotació. Si, més endavant, l'explotació cessa, l'excés de producció no retirat s'inverteix en biomassa, i la relació producció primària/biomassa total disminueix; s'observen canvis en la composició específica, en general en el sentit d'un augment del nombre d'espècies. Aquest és el model més general de la successió secundària. El fet bàsic que cal tenir en compte en totes les especulacions sobre la conservació, els seus límits i la seva conveniència, és l'oposició entre explotació i successió, manifesta en les oposades tendències de canvi induïdes alternativament pels dos processos, i especialment manifesta en la relació producció/biomassa i en la diversitat específica. L'explotació fa retrocedir l'ecosistema (regressió), i la successió només és possible si se suprimeix el llast de l'explotació.

L'expansió de la població humana des del neolític ha estat un exemple de canvi que preserva cert tipus d'equilibri, ja que no ha estat catastròfic. Vegem de quina manera una espècie explotadora pot introduir-se en un sistema i expandir-se. En general es tracta d'un procés lent. Resulta evident que una espècie que explota ous d'aus, per exemple (i n'hi ha moltes), ha d'administrar l'espècie explotada, agafant solament el nombre d'ous que es poden substituir mitjançant els mecanismes integrats en el comportament reproductor de l'au i els recursos alimentaris que aquesta té a la seva disposició, però no més. És clar que l'espècie d'au es pot adaptar a sostenir una explotació d'aquest tipus, i llavors les regles del joc entre les espècies explotades tendeixen a afavorir les més prolífiques. Incidentalment, es pot assenyalar que aquesta idea d'explotació i d'explotabilitat ha influït notablement en el concepte d'eficàcia (*fitness*), perquè els genètics consideren que les *Drosophila* de les seves ampolles són un recurs explotable.

Els poblats neolítics, basats en pràctiques agrícoles, es troben en climes temperats en zones cobertes per vegetació bastant baixa. D'això pot derivar-se una afirmació molt important: l'home va començar a explotar ecosistemes que estaven preadaptats a sostenir l'explotació, que ja eren explotables. En aquest mateix sentit, s'ha d'entendre que l'explotació regular d'ous d'aus només es pot iniciar en aquelles espècies d'aus, els ous de les quals sempre es troben expo-

**Explotació i successió, maneres d'incrementar el flux d'energia**

La relació entre l'home i la resta de la naturalesa és de dependència i d'explotació, un simple circuit de regulació negatiu. En les cultures paleolítiques, l'home gravitava sobre els ecosistemes de manera local amb un *feedback* efectiu. Amb les cultures neolítiques, l'home va desenvolupar algunes de les característiques de les espècies oportunistes i expansives, i va combinar l'explotació de sistemes dispersos sobre una gran zona, utilitzant el que es pot denominar «estratègia de frontera», cosa que ha permès que l'explotació no tingui fre, fins a arribar a nivells impossibles d'assolir en la naturalesa no humanitzada. Això proporciona un exemple de situacions extremes en l'explotació. El final d'aquesta tendència ha de ser l'explotació global, per part d'una humanitat unificada, d'una biosfera que s'haurà uniformitzat més en la seva composició i en la seva resposta en virtut de la pròpia influència de la humanitat. L'explotació té sempre els mateixos resultats. En el subsistema explotat la biomassa es redueix i la producció no es redueix tant, i de vegades fins i tot augmenta. El resultat net és una acceleració de la taxa de renovació. Una altra conseqüència és la reducció de la diversitat, molt més evident si l'explotació està subjecta a fluctuacions irregulars. N'hi ha proves, i fins i tot és fàcil

.....

**La major part d'espècies que ara explota l'home ja estaven preadaptades per suportar l'explotació abans de la seva assimilació cultural**

.....

sats a molts perills naturals, de manera que l'espècie ha adquirit o conservat la capacitat de completar una altra vegada la niuada delmada.

En els cingols de pastures i en la vegetació tipus sabana existeixen impediments ecològics al desenvolupament imposats per perllongades interrupcions de l'activitat vegetativa, degudes al fred o a la sequedat, o a altres riscos com l'acció del foc o dels herbívors. Si l'home agafa el lloc dels herbívors, o conrea el producte (llavors adaptades a un període de vida latent de la vegetació) d'una manera anticipada a les múltiples causes de destrucció, l'home pot ser mantingut, fins i tot en poblacions relativament denses, per un ecosistema que per altra banda no es troba molt modificat. Aquest és un tipus d'utilització dels recursos naturals que encara es practica àmpliament al mar; quan l'home explota les comunitats que produeixen en excés i que no estan adaptades a invertir in situ l'excés de producció, com ara els sistemes d'aflorament.

Sobre aquestes premisses, un augment de l'explotació condueix a un increment de la relació producció/biomassa, i a una simplificació de l'ecosistema, deguda a la bonificació que obtenen en la competència les espècies que són realment prolífiques, sempre en nombre reduït. En altres paraules, es desenvolupa una competència per la prolifícitat entre les diferents espècies que comparteixen el nivell explotat. En aquest sentit, es pot dir que la selecció de les varietats útils es va iniciar de manera inconscient, merament a través de l'explotació. Solament molt més tard la selecció es fa plenament conscient.

El nivell d'equilibri de l'ecosistema pot evolucionar cap a una capacitat de producció superior; però es troba amenaçat en diversos aspectes. Un dels quals és dur l'explotació més enllà del límit del rendiment total màxim: és el tipus de problema que ha portat a la consideració detinguda d'aquella dinàmica de les poblacions explotades que correspon a l'anomenada «teoria de la sobrepesca». La millor explotació és la que es troba en un punt intermedi entre la no-explotació i l'aniquilació completa, probablement al voltant del 50 % d'eficiència. Una explotació mantinguda requereix una certa previsió per al retorn dels nutrients. Des del moment en què l'home comença a moure recursos sobre llargues distàncies això es fa molt important, com s'ha comentat en seccions anteriors.

A l'home li resulta difícil arribar a un acord amb ecosistemes que no estaven preadaptats per suportar una explotació. D'antuvi, aquests sistemes solen mancar d'espècies capaces de fer passar gran quantitat d'energia a través seu, és a dir, espècies de renovació ràpida. Aquests ecosistemes en general immobilitzen els nutrients en l'interior d'estructures vives (bosc tropical, escull de coral) i els fan inassequibles per a les espècies competidores de taxa de renovació més ràpida. Si els nutrients estan fora dels organismes, com al sòl, els canvis en l'estructura del sistema poden netejar-los, amb la consegüent pèrdua de fertilitat. Això pot ocórrer fins i tot en els ecosistemes de climes temperats: els eucaliptus i les coníferes tendeixen efectivament a acidificar els sòls i a reduir la seva capacitat de retenció de nutrients.

Ens podem imaginar de quina manera va augmentar l'explotació en els ecosistemes primitivament explotats i es va estendre després a altres ecosistemes. Això va requerir un coneixement agrícola creixent i l'ocupació de nous tipus de plantes. Llaurar i conrear destrueix l'estructura i evita els organismes no desitjats: és semblant a la barreja en un llac. En el decurs d'aquestes pràctiques s'han seleccionat les formes adaptades als camps llaurats, i no només a les espècies a les quals havia dirigit l'atenció l'home. Aquesta selecció paral·lela ha estat significativa. S'ha reconegut que diverses plantes conreades van tenir el seu origen com a males herbes en els cultius primitius, i aquesta és una prova de la naturalesa inconscient del procés de selecció dels organismes que són valuosos per a l'explotació. La situació final i òptima haurà de ser la restricció del conreu a l'organisme millor ajustat, el monocultiu, com en un quemostat. De fet, l'última espècie que roman quan s'augmenta la producció és la que té la taxa d'augment més elevada.

En el cas dels animals, la selecció ha estat segurament més conscient des del començament, a causa del fet que l'escena era diferent. Només es desitja una espècie, i si els exemplars que creixen més ràpidament fossin apartats, i els que creixen lentament preservats per a la seva reproducció, la selecció aniria en el sentit erroni. No obstant això, és probable que aquesta situació inconvenient es desenvolupés amb les ostres i altres organismes conreats.

Podem suposar sense risc que la major part d'espècies que ara explota l'home ja estaven preadaptades per suportar l'explotació abans de la seva assimilació cultural. Eren comunes en

zones on els hiverns freds, els estius secs, el foc i potser els herbívors (bisons) mantenien l'herba en creixement, i el sòl conservava la seva capacitat d'emmagatzematge. Falten espècies apropiades per constituir ecosistemes explotables en moltes regions de clima molt estable i on les condicions poden ser ecològicament favorables. Els cingols de selves pluvials no estan preadaptats per suportar el mateix tipus d'explotació que les prades herboses, i de fet les poblacions humanes que mantenen es troben en un règim molt diferent. L'ús de la terra en els climes càlids i estables planteja problemes importants. Naturalment, existeixen cultius valuosos, basats en plantes que van tenir el seu origen com a males herbes en àrees pertorbades i en condicions marginals, i potser es podrien trobar noves espècies si es busqués atentament en aquests llocs. És significatiu el fet que els cultius tropicals de certa importància procedeixen d'ambients fluctuants, com ara muntanyes (Amèrica del Sud) o planes temporalment inundades (arròs). No obstant això, ha existit una tendència a conrear espècies seleccionades en altres llocs, amb freqüència fora dels cingols tropicals, i un problema molt greu és mantenir la fertilitat del sòl. Els ecosistemes tropicals van desenvolupar una mena d'organització en què els nutrients es retenen més en el cos dels organismes que fora, en el sòl, i això constitueix una greu dificultat per a l'explotació contínua. El retorn dels nutrients, si es realitza, presenta problemes a causa del fet que han de ser restituïts en una forma que sigui assimilable pel sistema. S'ha dit que caldria dedicar més esforç al desenvolupament d'altres cultius als tròpics, i també considerar la possible explotació de poblacions locals de grans herbívors. S'ha suggerit que diverses espècies d'antílops es podrien explotar per a l'obtenció de carn. El problema principal és augmentar la taxa de renovació d'aquestes poblacions. Les espècies, la consideració de les quals sembla més interessant, són les que evolucionen sota una forta pressió de depredació, és a dir, les que constitueixen les preses favorites dels carnívors. I són poques. Sembla impossible conciliar aquesta explotació de la cam amb el desig més o menys explícit de preservar un gran nombre d'espècies de caça major. Segons Slobodkin,<sup>12</sup> un depredador prudent és aquell que captura la seva presa just en el moment en què aquesta està a punt de caure morta irremediament. L'home, naturalment, no pot ser un depredador prudent. Potser



**La teoria ecològica i la predicció en l'estudi de la interacció entre l'home i la resta de la biosfera**  
Ramon Margalef

perquè en la interacció entre una presa i l'anomenat «depredador prudent» el control passa a l'espècie presa.

En l'expansió de l'explotació de les terres, la intensitat de l'explotació s'ha distribuït de manera igual. L'explotació ha estat més intensa on els ecosistemes ja eren més productius, com en les planes d'inundació; el problema del retorn era més fàcil allí perquè els nutrients els aportaven els rius des d'altres àrees. L'explotació ha estat més suau en les àrees més agrestes, cap a les muntanyes, si n'hi ha. Aquest és un dels principals factors en la determinació del model en forma de mosaic del paisatge tradicional europeu. Per aquesta raó, la conca de recepció és una unitat natural, com recentment han fet palès els ecòlegs.<sup>14,9</sup> En l'actualitat ha augmentat la pressió per a una explotació més intensa, i superfícies que prèviament en part se n'havien lliurat, ara es troben en perill. Cal assenyalar que no es tracta tant de la necessitat de més terra de conreu, sinó de terra per a altres usos, aquest fet és el responsable d'aquesta situació, almenys a Europa. En qualsevol cas, el model diversificat resulta cada vegada menys reconeixedor i la terra es fa més uniforme. L'erosió augmenta. L'home ha anat estenent les àrees explotades i intensificant l'explotació, prenent cada vegada més de la resta de la naturalesa. Res no ens impedeix considerar aquest procés com una successió en què un ecosistema «natural» és pres per l'home, cosa que duu a un altre estadi, format per la naturalesa més l'home, que substitueix el sistema natural primitiu. Aquest canvi hauria de quadrar en qualsevol model coherent de successió. El canvi en la resta de la naturalesa (excepte l'home) induït per l'acció humana, sempre en el sentit contrari al d'una successió normal, és una regressió. Però el canvi en el sistema complet format per la resta de la naturalesa més l'home és una altra cosa, i pot correspondre a algun model generalitzat de successió. La successió es descriu millor en termes d'alguna funció que cal maximitzar o minimitzar. Aquesta funció, si es tria bé, resultarà valuosíssima a l'hora de predir el resultat de la competència, o la probabilitat d'un estat, o la substitució d'un tipus de sistema per un altre. Totes les proves empíriques assenyalen que al llarg de la successió la taxa de renovació decreix molt més que la respiració, si és que aquesta disminueix. Normalment he acceptat que un bon criteri en l'estudi de la successió era suposar una reducció en la quantitat d'energia que s'havia d'intercanviar per mantenir una unitat de biomassa en

l'ocupació de l'espai. Aquest principi pot ser acceptable perquè no és difícil trobar-hi connexions amb les «lleis» de la termodinàmica.

Pensant en un ecosistema humanitzat, resulta evident que aquest principi s'ha d'expressar d'una altra manera. No solament importa l'energia intercanviada en el metabolisme intern o biològic, sinó tota l'energia intercanviada, inclouent-hi l'energia utilitzada en el transport, l'escalfament, etc. A més, en lloc d'una simple biomassa, caldria incloure-hi una avaluació de la importància de l'home i dels seus artefactes, de fet, de tota la seva cultura, tot el sistema de relacions que fan que els esdeveniments siguin predictibles i que assegurin el control. Això no és tan peculiar de l'home com podria semblar: també en els ecosistemes «naturals», sense l'home, els esdeveniments futurs estan molt determinats per alguna cosa que no és veritable biomassa, com certes estructures no vives: troncs, pistes, caus, i tot tipus de comportament impregnat o transmès per la tradició. Això és l'equivalent dels estris, les ciutats, les autopistes, els llibres, etc., en l'home. Proposo utilitzar, com una funció que cal minimitzar, no la simple relació

$$\frac{\text{producció primària}}{\text{biomassa total}}$$

sinó la relació següent:

$$\frac{\text{consum total d'energia}}{\text{biomassa total més portadors d'informació.}}$$

A l'hora d'emprar-la pot ser convenient fer la mitjana d'aquesta relació per a un país i expressar-la per càpita. Aquesta expressió és més completa que la precedent, a la qual inclou com un cas particular quan ni el metabolisme extern, ni l'acumulació d'informació en estructures extracorporals són importants, com ocorre en la majoria d'organismes no humans. Si es demostra que la tendència indicada és consistent, això significa simplement que l'energia utilitzada pot augmentar i fins i tot desapropiar-se en aparença si permet acumular ràpidament artefactes que tenen influència en el modelatge del futur. Potser aquest punt de vista pot ser una mica inquietant. Significa, així mateix, que un exèrcit de robots podria aconseguir el poder si pogués

controlar les coses de manera més barata que l'home. Però el control implica certa capacitat de predicció, de creació científica. D'aquesta guisa deríem ràpidament cap a l'especulació. No es tracta únicament d'una qüestió formal quan cal fer una determinada predicció referent als canvis en els ecosistemes humanitzats o no humanitzats, especialment en la naturalesa del control que exerceixen els herbívors. Quin ecosistema és més madur o «avançat» (més probable en la successió): un constituït per la prada i el bisó (o per certes formes de sabana i les seves poblacions de grans herbívors), o bé un altre sistema amb vegetació més desenvolupada, com un determinat tipus de bosc, però amb menys vida animal? La transició és real en els marges dels ecosistemes regionals, a l'Amèrica del Nord, on la prada, amb el bisó, envaïa el bosc, i a l'Àfrica, on els animals de la sabana interfereixen així mateix amb la boga del bosc. En una dimensió gran i en un context lleugerament diferent, aquesta mateixa qüestió reapareix en discutir per què la relació biomassa dels productors primaris/biomassa dels animals és superior a la terra que al mar:

En resum, l'augment del consum d'energia, com un metabolisme extern o cultural, es pot explicar en termes de selecció natural ja que augmenta el control de l'home sobre els competidors. Aquesta energia extra és el cost de la independència dels circuits de regulació local: es gasta en condicionament climàtic, en transport, subministrament d'aigua, estris, llibres, coneixements pràctics, ciutats i aspectes perifèrics com publicitat, esplai i moltes activitats culturals. Aquest luxe està permès mentre l'home augmenta el control sobre el seu destí; però potser també a causa de la falta de competidors reals. Seguint les regles del joc vàlides fins avui, tot es podria incloure dins del mateix model mentre hi hagués ecosistemes oberts a ulteriors invasions per part de l'home i el subministrament d'energia que es pogués obtenir manqués pràcticament de límits. En assolir l'impacte de l'home una escala global, les regles del joc poden canviar; i la competència es desenvolupa sobre una altra base entre grups humans diferents.

**Conseqüències socials i polítiques de l'ampliació del metabolisme total**

L'augment de la població humana (l'explosió demogràfica) i el sorprenent creixement en el consum d'energia per càpita es combinen en un

greu problema al qual s'enfronta la humanitat i que ha originat les prediccions més ombrívols.

La tendència va començar en el trànsit de la cultura paleolítica a la neolítica, amb la primera explosió demogràfica basada en l'explotació agrícola, i es va reforçar en l'època de la revolució industrial, amb el ràpid increment de l'ús d'energia en el control de l'ambient i la segona explosió demogràfica.

La humanitat es comporta com una espècie, però cada espècie està formada per grups diferents que poden diferir en comportament, en estratègia ecològica, etc. En diversos mamífers la població es divideix en dues parts: posseïdors de territoris i un excés d'individus que duen una mena d'existència marginal<sup>1</sup>. La seva estratègia ecològica pot ser diferent: els primers depenen més de l'estabilitat i el conservadorisme, podem dir que tendeixen a una estratègia de la K<sup>6</sup>; els individus d'existència marginal poden confiar en la proliferació i en les fluctuacions climàtiques per colonitzar nous espais que s'han obert; eventualment tendeixen a una estratègia de la r; si s'utilitza la mateixa nomenclatura. El que sembla clar és que la utilitat d'una determinada estratègia en la competència pot variar segons la qualitat de l'ambient, que estableix les regles del joc a què s'ajusta la competència. En el cas de l'home, els factors o els subjectes de competència són més complexos que en altres animals, a causa de la gran quantitat d'energia usada en el metabolisme cultural o extern. En altres paraules, les estratègies de la K i de la r es poden considerar associades en cada població o grup de manera particular, amb l'estratègia de la r lligada a la pressió demogràfica, i l'estratègia de la K, a l'ús d'energia extra per mantenir i augmentar el control de l'entorn.

Aquest és un tema ecològic general. És potencialment subversiu, i encara més perquè no ha estat explotat com a tal pels radicals de cap grup, i probablement no ho sigui, a causa del fet que ataca durament gairebé totes les ideologies corrents o perquè fa que qualsevol praxi sembli injusta, si no romanem tancats a consideracions ètiques.

Tot i que no és aconsellable aplicar taxes instantànies a períodes de temps extensos per a finalitats de predicció, es poden aplicar per a la descripció de fenòmens i el descobriment de tendències sobre la base d'un temps reduït. La presentació del problema bàsic es pot fer extremadament simple, encara que admet ampliacions ulteriors.

N és la densitat de la població i r és la taxa neta d'augment:

$$dN/dt = rN$$

M és el consum d'energia per càpita i f la taxa d'augment:

$$dM/dt = fM$$

(si F és l'energia tota intercanviada,  $M = dF/dt$ , and  $dM/dt = d^2F/dt^2$ ).

La quantitat total d'energia utilitzada per una població serà NM, i el seu creixement al llarg del temps,

$$d(NM)/dt = (r + f)NM \quad (NM)_t = (NM)_0 e^{(r + f)t}$$

Aquesta expressió no procedeix de la dinàmica de poblacions, sinó que és una expressió que descriu una tendència instantània en l'ús total d'energia per una població canviant (r i f poden ser, per descomptat, positius o negatius; en el cas de l'home ambdós termes són positius). En altres paraules, l'augment en el consum d'energia depèn de l'augment d'una població, però també de l'augment del consum d'energia per càpita, que s'obté en estendre l'explotació a altres recursos. En una representació més completa de l'ecosistema, això conduiria a reforçar la interacció amb altres elements dispersos.

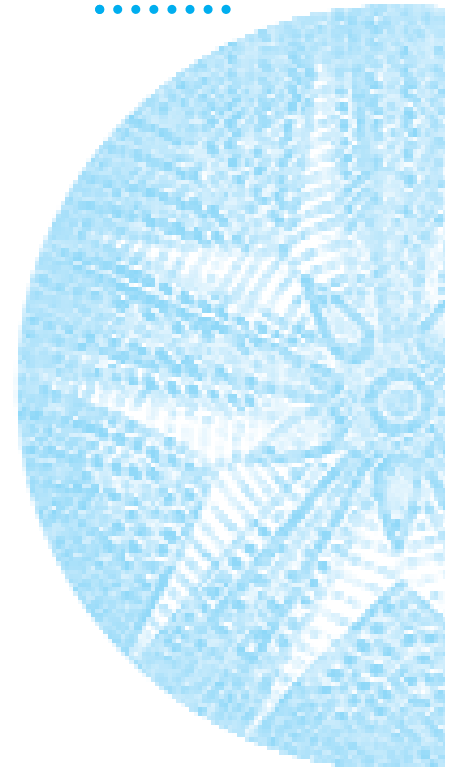
És instructiu considerar els valors de r i de f en diversos grups humans diferents. Els informes de diverses societats internacionals proporcionen molta informació que es pot usar en aquest context, encara que no sempre és molt exacta. En qualsevol cas, aquí solament es necessiten algunes xifres mitjanes i molt àmplies, merament com a exemples a fi de precisar el model. Dividir la humanitat en dos grups és una simplificació excessiva, però té cert sentit des del punt de vista de la discussió de les estratègies de la competència. Tot el món està augmentant el consum total d'energia, però alguns països inverteixen aquest augment en gent (això és estratègia de la r) i altres a obtenir més control sobre el món (i això és estratègia de la k). La primera estratègia és una estratègia de frontera, però en un món tancat l'estratègia de la k pot proporcionar més control.

Aquesta situació divergent està estretament relacionada amb un tema que ja s'ha comentat:

•••••

**Ni la població humana ni el consum d'energia són estacionaris, i és probable que la tendència actual continuï fins a una situació extrema**

•••••







**La teoria ecològica i la predicció en l'estudi de la interacció entre l'home i la resta de la biosfera**  
Ramon Margalef

la distribució de l'ús d'energia per càpita en dues partides, el metabolisme intern o biològic, i el metabolisme extern, de relació o cultural. Aquest tema mereix una consideració ulterior i acurada, i no només els valors mitjans del metabolisme intern o extern, sinó també les variàncies associades. Naturalment, el metabolisme extern o cultural pot tenir i té una variància superior a la del metabolisme intern o biològic. La diferència entre morir-se de fam i estar tip o estar sobrealimentat és un simple 1 a 2 o menys; els valors en el consum d'energia per càpita, per a altres usos, cobreixen una variació d'1 a 30 per a països, d'1 a 1.000 per a grans grups humans, i varia encara més si es consideren individus aïllats. La subsistència i la reproducció necessiten una quantitat d'energia molt petita i no gaire variable, i una població pot subsistir i augmentar utilitzant quantitats petites o quantitats grans d'energia. La gran diferència permissible en el metabolisme extern és un fonament de la desigualtat humana, i és un bon índex de la diferència entre països desenvolupats i països en desenvolupament, entre els que tenen i els que no tenen. L'energia del metabolisme extern augmenta la capacitat de transport, de control de l'ambient i de reunir en un punt els recursos produïts en una extensa regió; de fet, fa innecessari reproduir-se més de pressa, perquè el perill de morir periòdicament de fam és més petit. Això és poder; i el poder dels pobles està més lligat a la seva capacitat de transport, entesa en el sentit més ampli, que a cap altra cosa.

De tot això resulta clar que l'increment en el consum d'energia per càpita afecta el metabolisme extern o cultural, ja que l'intern roman més o menys fixat per les propietats biològiques de l'home. Molts pensadors accepten que l'origen (i el poder) de l'Estat estan lligats a l'existència d'un excés de producció que reforça el poder d'una minoria.

En un context més ecològic podem dir que la variació del metabolisme extern ha augmentat ràpidament per sobre de la variació del metabolisme intern; això va aparèixer com una «mutació» ecològica fa pocs milers d'anys i ha conduït a una jerarquització i una concentració del poder creixents, sigui quina sigui la filosofia que les societats humanes utilitzin amb fins d'ostentació. Aquest procés, potser irreversible, ha dut a la situació actual, que té molts aspectes indesitjables, encara que per descomptat no tots. Utilitzar com a boc expiatori la tradició judeocristiana o la societat de consum no té gaire

sentit i és només el resultat de la consciència creixent del fet que alguns aspectes del procés són èticament inacceptables. Es tracta d'un procés biològic del qual l'espècie humana com a tal, i ningú més, pot tenir alguna responsabilitat: constitueix la part integral d'un experiment únic de la vida.

Hi ha competència entre grups humans; la competència pot passar de l'individu al grup, però la clau del resultat és sempre el flux d'energia, o el flux d'energia mitjà del grup, i la part d'aquest flux subjecta a una variància superior; és a dir, el metabolisme extern. No serveix de res argumentar que no hi ha competència intraespècífica i que l'home es comporta com una espècie unida en interacció amb la resta de la naturalesa, i que la mobilitat i la capacitat de transport contribueixen a aquest comportament com una espècie única. Les proves estan a favor que la variació en el metabolisme extern és alta, i que la humanitat està dividida en grups que intercanvien menys entre ells que en l'interior seu. El metabolisme extern s'utilitza per obtenir prioritat sobre recursos que d'una altra manera estarien disponibles per a altres espècies o per a altres grups humans.

Encara que la taxa d'augment en l'ús total d'energia no és extremadament diversa entre els diferents grups que constitueixen la humanitat, la seva descomposició és bastant diferent (taula I). Els grups que ja són més poderosos augmenten ràpidament el seu ús d'energia (externa), i a això s'afegeix un augment de la població relativament reduït. Altres grups augmenten més ràpidament la població, però el consum d'energia per càpita augmenta lentament. Aquesta és una altra diferència entre els països desenvolupats i en desenvolupament que cal afegir a l'elevat metabolisme extern actual dels desenvolupats.

Representa un interessant experiment de competència i pot demostrar el que és l'eficàcia biològica, almenys en les poblacions humanes. Què és més conseqüent, un augment en el nombre d'individus o un increment de la capacitat de conduir energia i de conservar i estendre fins a un volum global la capacitat de control? En un món buit o en expansió la primera estratègia pot donar avantatge; en un de ple o que es contreu, potser pugui guanyar la segona estratègia.

És incòmode pensar qui ha de decidir la distribució de tota l'energia disponible, o si algú ha de fer-ho. Si el que s'ha de controlar són els naixements o bé l'ús i el malbaratament d'ener-

gia. Com a ecòleg, jo diria que certament ambdues coses i no menys que ambdues. Però un ha de ser més específic en el repartiment dels recursos. De poc serveix limitar l'aspecte demogràfic de l'impacte sobre l'ambient si l'altre aspecte, el que es refereix al metabolisme extern, creix fora de control.

Els ecòlegs insisteixen molt a recomanar una restricció en l'ús d'energia, és a dir, automoderació en els més opulents i al mateix temps destrucció de les barreres que encara separen la humanitat en grups operatius; a això es respon amb divagacions sobre l'augment de la corba demogràfica, i també sarcàsticament. Però s'ha de reconèixer la dificultat de posar en pràctica aquestes accions, i la raó principal és que l'home està assetegat de poder; i que l'ús de grans quantitats d'energia en el metabolisme extern permet no solament escapar dels circuits reguladors locals de l'ambient, sinó també desplaçar-se més, explotar i controlar directament nous ambients i, eventualment, altres grups humans. Amb molta freqüència, i en lloc d'afrontar francament els problemes, la gent busca tota mena de caps de turc, jugant sempre al mateix joc d'augmentar, o d'intentar augmentar el flux d'energia en el seu grup particular. Prediquem moderació als altres, però rarament la practiquem nosaltres mateixos. El fet que alguns grups tinguin més èxit que altres a l'hora d'obtenir el control no és cap consol moral per als menys afortunats, ja que tothom ho intenta amb la mateixa convicció farisaica.

Encara que fora de la línia general d'aquest capítol, cal afegir que els canvis demogràfics tenen més implicacions que el simple augment en el nombre d'individus i en la pressió demogràfica. La població humana no és estable ni estacionària, i les poblacions humanes estan experimentant un canvi progressiu en l'estructura demogràfica. Potser l'únic tret positiu d'aquest procés és que la humanitat s'està fent més uniforme quant a paràmetres demogràfics. Les distribucions per edats són en l'actualitat molt més semblants en l'interior d'un país o en països diferents que un segle enrere. El canvi principal i general ha estat una demora de la taxa de renovació. Ara la vida mitjana està arribant als setanta, però el temps mitjà de generació (d'ou a ou) continua sent el paràmetre més constant en les poblacions humanes (28 a 29 anys).

La relació entre durada mitjana de la vida i temps de generació és una bona expressió ecològica de la «bretxa generacional», i en un parell

de segles ha passat de menys d'un a dos i mig. Això pot ser més significatiu des del punt de vista de l'estabilitat social que des del de la productivitat, ja que avui una alta capacitat de producció requereix menys mà d'obra. Si els individus vells són pocs, poden servir d'elements d'integració social o de posseïdors d'experiència, i aquí es pot trobar l'explicació a la selecció de l'aparició i l'allargament d'un període postreproductiu en els primats superiors. Però avui dia som massa «goril·les de dors argentat» a la humanitat. I la fracció més vella de la població controla una porció relativament més gran del metabolisme extern del grup.

### L'avenir. És realitzable i convenient la predicció: per què necessitem profetes (fins i tot profetes de la fi del món)

La construcció d'un model intel·lectual, que acostuma a poder-se escriure en forma matemàtica, té com a propòsit servir de marc al qual abocar informació, preferentment informació quantificada, i provar de quina manera el model descriu el funcionament de la naturalesa. La prova definitiva és la capacitat de predir. Els ecòlegs tenen una fe substancial en els mecanismes de regulació, entenent la regulació en un sentit molt ampli, que pot incloure la desaparició d'algun component del sistema que s'estudia. Alguns llibres de divulgació antics donaven el temps necessari perquè la Terra es recobris fins a un quilòmetre d'altura de parametis, o de mosques, si els animals poguessin multiplicar-se sense restriccions. El mateix tipus de ximberia duu a computar el temps necessari perquè totes les persones es trobin atapeïdament apinyades sobre la superfície de la Terra (per sort, en una sola capa). Com és natural, les coses es detindran molt abans, i el que es discuteix és el tipus de mecanisme ecològic responsable d'això, sempre desagradable. Aquest mecanisme no pot romandre ignorat o fora de control. Les diferents maneres d'efectuar una predicció s'han comentat abans. En una representació gràfica, es pot ajustar a ull una línia a una sèrie de punts i projectar-se després més enllà del present, confiant en la nostra intuïció matemàtica per reconèixer una funció adequada. Això no té gaire sentit, de totes maneres. O bé, un estudi més acurat de la funció en el present permet una predicció limitada al futur immediat. Això és millor; però potser no és suficient

**Taula 1. Xifres mitjanes de les taxes d'augment del consum d'energia per càpita i del nombre d'habitants per a dos grups de països**

	Països en desenvolupament (= pobres, explotats)	Països desenvolupats (= rics, explotadors)
Percentatge anual d'augment durant els últims anys, del consum total d'energia per càpita.	1,6 %	4 %
Taxa equivalent instantània d'augment del consum d'energia per càpita. [ $f = (1/M) (dM/dt)$ ]	0,015	0,039
Taxa instantània d'augment de la població. [ $r = (1/N) (dN/dt)$ ]	0,035	0,015
Taxa instantània d'augment de l'ús total d'energia durant els últims anys. ( $f + r$ )	0,050	0,054
Temps necessari (en anys) per duplicar el consum total d'energia a la present taxa d'augment. [ $0,69 / (r + f)$ ]	13,8	12,0

**Taula 2. Metabolisme total mitjà per individu en diferents grups humans**

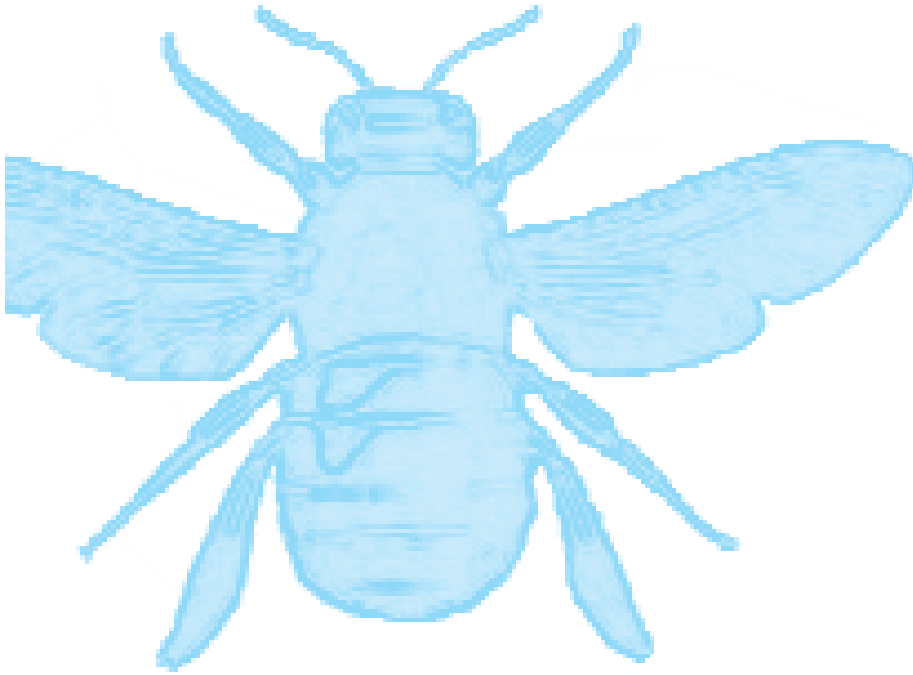
	Països en desenvolupament	Països desenvolupats
Metabolisme intern o biològic, poca variació; relació màxima 1:2 en kcal per dia en watts	2.150 100	3.060 150
Metabolisme extern o cultural, gran variació; relació màxima al voltant d'1:100 en watts	300	6.500 10.000 (Estats Units)

per a determinats fins. Una altra possibilitat és col·locar tota la situació en un model més gran que impliqui certa regularitat biològica, i treballar per aconseguir una predicció que tingui en compte totes les complicacions del model. En el cas dels ecosistemes s'ha de comptar amb determinats canvis en els coeficients d'interacció (almenys els deguts a l'evolució genètica), i l'única esperança és que aquests canvis compleixin així mateix determinades lleis fins a un cert grau. Amb probabilitats, la majoria d'ecòlegs estan d'acord que avui dia la humanitat es troba en el procés de desplaçar-se d'un nivell de *feedback* estabilitzador a un altre. L'home s'ha lliurat del circuit regulador local de la naturalesa. Després s'ha anat estenent, assistit per la seva capacitat de control, i sobre la base d'un elevat flux d'energia. Aquesta estratègia de frontera no pot durar; els seus dies estan comptats, i ens enfrontem a un altre *feedback* en el qual la humanitat com un tot interactua amb la Terra com un tot. No hem arribat a aquesta posició

extrema, però estem en camí de quedar solidàriament atrapats en un circuit regulador global. La revolució industrial ha aïllat el pas en el trasllat d'un nivell de *feedback* a un altre. I en la carrera s'està desenvolupant un procés implacable de competència entre els homes i entre grups humans. Un aspecte important és que a mesura que ens acostem a la interacció global ens escapem del *feedback* local premonitori. L'activació dels mecanismes de regulació global pot arribar com una sorpresa i ser catastròfica per a nosaltres, en el sentit d'un enverinament de l'aigua i de l'aire, d'una erosió i pèrdua globals de la fertilitat de la terra, d'un canvi climàtic, d'una expansió de la població fins al nivell de crear una interacció social catastròfica (fins i tot si hi ha prou aliment), etc. Un bonic catàleg del qual escollir; i és comprensible que fer veure tot això comporti la qualificació de «profeta de la fi de món». Davant d'aquesta situació, la tasca de l'ecòleg com a profeta no és tant «predir», fins i tot si pretén fer-ho, sinó convertir-se en un òrgan



**La teoria ecològica i la predicció en l'estudi de la interacció entre l'home i la resta de la biosfera**  
Ramon Margalef



.....

**La població humana no és estable ni estacionària, i les poblacions humanes estan experimentant un canvi progressiu en l'estructura demogràfica**

.....

de la societat per falsificar les seves pròpies prediccions. Si escrivim equacions que indiquin la interacció entre l'home i la resta de la naturalesa existeix una ubiqüitat de l'acció de l'home, i no hi ha termes que representin un fre, de manera que l'explotació i la interacció entre l'home i la resta de la naturalesa té només un límit final. Aquest límit pot tenir la forma d'un esdeveniment catastròfic únic, o bé de fluctuacions menys catastròfiques, tot i que conservant la mateixa naturalesa desagradable. És desitjable posseir un sistema d'alarma que anticipi l'escac final. En els ecosistemes, el desenvolupament i la preservació dels ritmes tenen valor de supervivència, ja que els ritmes actuen com un mecanisme d'anticipació dels esdeveniments del futur; a causa dels ritmes, els organismes estan «preparats» per a un canvi i es lliuren de la destrucció excessiva. Jo diria que el desenvolupament d'una certa capacitat de predicció, mitjançant la ciència, és un mecanisme d'anticipació equivalent que pot tenir valor de supervivència per a la societat. Els ecòlegs i els «paraecòlegs» (= ecobojos) estan sensibilitzant la gent i augmentant la seva responsabilitat. Si s'escolta els profetes, si la gent se n'adona, les catàstrofes es poden evitar. L'ecologia pot fer aquesta tasca i falsificar, esperançadorament,

les seves pròpies prediccions. És millor que les prediccions resultin falses que tenir la dubtosa satisfacció de dir: «Ja us ho vam advertir». Això val, per descomptat, per a les prediccions més ombrívoles, referents als resultats de l'augment global del consum d'energia, és a dir, de l'augment de la població humana sumat a l'augment de l'ús d'energia per càpita. La predicció pot ser més segura en zones més limitades, en el sentit que la gent no actuï de manera que venci les prediccions. Per desgràcia, l'impacte de l'home sobre la naturalesa augmentarà, anant en el sentit oposat al de la successió, en conseqüència, fraccions cada vegada majors de la biosfera derivaran cap a una maduresa cada vegada més petita. Els criteris de conservació amb un elevat nombre d'habitants no poden ser similars a la situació que existia quan només hi havia una població reduïda. Alguns projectes de conservació es podrien mantenir en països capaços d'importar recursos d'altres zones; no és casualitat que el conservacionisme domèstic fos una actitud important, almenys en alguns casos, en països que obtenien part dels seus recursos de les colònies. Els ecosistemes molt madurs es degraden ràpidament quan són explotats, com ocorre amb els esculls de coral o els boscos tropicals. Aquests

són els sistemes més amenaçats. El simple trepig, o recol·lectar algun organisme (recol·lecció de conques en l'escull de coral) pot produir canvis importants. Altres efectes, a més de l'explotació, inclouen la contaminació, la mera contaminació tal com s'ha descrit (un coll d'ampolla en el retorn de la matèria) més la contaminació química i radioactiva a nivells no directament perillosos. L'efecte general és la reducció de la diversitat dels ecosistemes. La contaminació radioactiva té una certa originalitat en el regne de la vida, però la química, com a fenomen ecològic, no ha estat inventada per l'home. Els organismes de la marea vermella maten altres organismes i suren a l'aigua amb materials dels competidors descompostos. Una altra forma de contaminació és l'acumulació de matèria orgànica no reciclable, en plàstics i altres compostos. Però la naturalesa també acumula una gran quantitat de matèria orgànica no degradable. Segons Szalay,<sup>13</sup> hi ha 8 vegades més carboni orgànic en forma de compostos «húmics» en el sòl i en l'aigua que carboni orgànic en el cos dels éssers vius. Des del punt de vista de l'ecologia global seria més important trobar una manera de reciclar els compostos naturals polifenòlics que metabolitzin els diferents tipus de molècules que l'home està

produint i acumulant en èpoques recents. Un mai no sap què podria ocórrer si s'aconsegüés aquest reciclatge; potser la primera etapa seria una tremenda proliferació de fongs i bacteris. Els sistemes que han estat mantinguts menys madurs per l'explotació natural (plàncton, pasturats) ofereixen bones perspectives per a una explotació intensiva. El final natural de l'increment de l'explotació és el monocultiu, la composició d'una sola espècie en el nivell explotat, herbes, bestiar o productes marins. El desenvolupament d'espècies per a la piscicultura (que començarà probablement amb espècies dels sistemes d'aflorament) o per explotar els sistemes tropicals terrestres, mantindrà ocupades la tecnologia genètica i l'ecològica durant els anys esdevenidors. Probablement els diferents suggeriments que pretenen conciliar la conservació i l'explotació es demostraran en part com a opinions anheloses, excepte en els casos en què la mateixa naturalesa dels ecosistemes estableixi necessàriament algun tipus de relació. És difícil, per exemple, conrear el fitoplàncton, i més difícil fer que la gent se'l mengi, de manera que la collita ha de passar dels productors primaris a algun altre nivell tròfic, i tot el que l'enginyeria ecològica pot fer és augmentar l'activitat dels processos d'aflorament o altres processos fertilitzants a costa dels combustibles fòssils o de l'energia nuclear.

La producció primària total de la Terra en conjunt probablement augmentarà, però la biomassa es reduirà amb igual probabilitat, de manera que la taxa de renovació s'accelerarà. Es reduirà la diversitat, i la simplificació dels ecosistemes farà que moltes espècies se'n vagin per l'embornal. Aquestes són les prediccions més prudentes des del punt de vista de l'ecologia general. La possibilitat d'augmentar el rendiment i la taxa de renovació no va solament lligada a la disponibilitat d'espècies adequades, sinó també al desenvolupament de sistemes de retorn dels elements. Per aquesta raó, probablement tots els grans projectes futurs d'explotació han d'estar lligats a projectes per combatre la contaminació i per aconseguir un fàcil retorn dels nutrients. Els projectes de reg s'han d'associar a projectes de retorn de nutrients o de fertilització adequada, incloent-hi micronutrients. Els ecosistemes situats en regions que són estables des de fa molt temps, com els boscos tropicals, requereixen una bona dosi d'enginyeria ecològica, i potser mai no seran substituïts per ecosistemes que siguin explotables com s'es-

pera i es desitja. El compliment eventual d'aquestes prediccions de segon grau proporcionarà informació per a una formulació més precisa de la interacció més gran: la global. Un altre aspecte de la predicció es refereix a la relació entre grups humans. Si aquests es mantenen més o menys separats, i cadascun d'ells s'incorpora en un circuit separat al *feedback* amb la naturalesa, resulta evident que entre els grups humans continuarà i potser s'agreuja el mateix tipus de regulació paral·lel o disruptiu que existeix ara, és a dir, la competència. Això significa un determinat grau de control o explotació d'alguns grups per part d'altres, i pot tenir molts aspectes, entre els quals es compten l'intercanvi aparentment inofensiu de treballadors per turistes.

Una causa de conflicte més greu es relaciona amb la capacitat d'augmentar el flux total d'energia i amb la manera com aquest es distribuirà entre l'augment de població i l'augment d'ús d'energia per càpita. Com que l'ús d'energia no pot augmentar indefinidament, la gent serà conscient del circuit regulador en el moment en què el flux d'energia per càpita no es pugui augmentar més. Sembla que la gent només sent la necessitat de controlar els naixements quan ha arribat a la prosperitat material, i aquesta necessitat se sentirà molt abans en els grups que tenen la taxa d'augment del metabolisme extern o cultural més elevada.

Aquest comportament, perfectament lògic, pot conduir a conflictes en potència. Els països més desenvolupats, amb una taxa més gran de consum energètic, competeixen efectivament amb els països en desenvolupament, i els controlen. El fet que els recursos són finits s'usa com a argument per induir l'autocontrol de la població en els països en desenvolupament, als quals s'intenta convèncer que no és possible escoltar missa i caminar en la processó, etc. Tot això és molt humà, i potser lògic, però des del punt de vista de l'ecologia general, un regateig entre poblacions que utilitzen (inconscientment) estratègies ecològiques diferents és com un diàleg de sords.

Quant a la relació

consum total d'energia  
-----  
biomassa total més portadors d'informació

si la seva disminució resulta tenir valor predictiu, s'ha de suposar que els grups que es permeten produir brosa o artefactes culturals sense

.....

**La fracció més  
vella de la població  
controla una porció  
relativament més  
gran del metabolisme  
extern del grup**

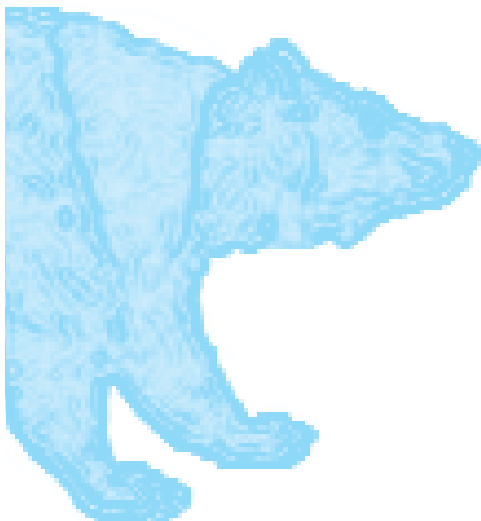
.....



.....

**La tasca de l'ecòleg com a profeta no és tant «predir», fins i tot si pretén fer-ho, sinó convertir-se en un òrgan de la societat per falsificar les seves pròpies prediccions**

.....



importància, solament poden ser aquells que ja tenen mitjans de control importants sobre l'ambient terrestre sencer.

**Altres maneres de comprendre l'organització i les seves implicacions en termes geogràfic**

.....

Sempre he contemplat amb una certa desconfiança aquells intents d'estudiar els sistemes que suposen un gran nombre d'equacions diferencials, cadascuna de les quals té molts termes additius i lineals. Es poden adaptar a situacions concretes perquè es pot establir un nombre molt elevat de constants, i per aquesta raó es poden considerar més com a funcions d'interpolació que com a models reals amb valor predictiu. Algunes millores se suggereixen immediatament per si mateixes; algunes són la distinció entre interaccions fortes i febles, la introducció de demores de temps, la consideració de restriccions topològiques. Potser el pitjor que tenen els enfocaments d'aquest tipus és que el model pot conduir a un estat estacionari, a un sistema oscil·lador, o a la disrupció, però és incapaç de descriure un sistema que pugui evolucionar.

Potser es pot combatre una altra vegada la mateixa posició conceptual si s'utilitzen altres principis. El punt de vista alternatiu el comentaré en un altre lloc i encara no es troba en termes operatius, però considero molt pertinent, per a la discussió de la interacció entre l'home i la resta de la naturalesa, donar aquí alguna idea d'aquest enfocament que s'indica. El punt de vista és molt simple. En qualsevol sistema dissipador estès entre una font d'energia (el Sol, en últim terme) i un embornal d'energia (l'espai), qualsevol divisòria arbitrària és més o menys asimètrica. A una banda de la frontera traçada el sistema és més fluctuant i impredecible, sosté més degradació d'energia en forma irrecuperable; tot això fa que aquest semisistema sigui més irreversible. L'altra banda de la divisòria és més predecible, més estabilitzada quant a nombres, amb una taxa de renovació més lenta, menys degradació d'energia. En tractar amb sistemes ecològics, amb ecosistemes, els paràmetres més significatius a l'hora de caracteritzar els dos subsistemes formats per una frontera sembla que són la diversitat (s'han de preferir els espectres de diversitat a la simple diversitat) i la relació producció primària/biomassa total. La correspondència és tal que el subsistema més predecible (des de dins)

és el més divers i el que presenta una relació producció/biomassa més baixa. A aquest subsistema el qualificarem de més madur, o de menys temperatura talàndica. La relació entre els dos subsistemes a través de la frontera pot ser de dues classes. O bé el sistema menys madur es fa més madur i, en aquest cas, qualsevol frontera definida per un determinat valor preestablert en qualsevol gradient convencional de propietats sintètiques es desplaça cap al subsistema menys madur, o bé la maduresa d'aquest últim subsistema és mantinguda baixa per l'explotació que l'altre realitza a través de la frontera, i en aquest cas la frontera no es mou. El primer cas és la boga d'un bosc, on una vegetació més aviat baixa experimenta una successió que condueix al bosc, és a dir, el bosc s'expandeix; el segon cas es pot exemplificar per una situació inicialment igual a l'anterior, en la qual la vegetació herbàcia o arbustiva és mantinguda baixa i no canvia perquè determinats animals surten del bosc de nit i brostegen en la zona de frontera.

Els límits poden ser reals, com en els exemples esmentats, o conceptuals, com quan es considera l'home i la resta de la naturalesa com els dos subsistemes encarats i la frontera és el lloc on es realitzen els intercanvis entre ambdós subsistemes. L'home, en aquest cas el sistema més madur, explota la resta de la naturalesa i impedeix que aquesta s'organitzi més. El flux net d'energia, de la naturalesa a l'home, es pot considerar proporcional al gradient d'organització entre l'home i la naturalesa: com més agafa l'home de la naturalesa, més desorganitzada o controlada la manté. És evident que només les espècies de creixement ràpid, criades en sistemes simplificats, poden suportar una agricultura i domesticació raonables. Òbviament, es poden considerar diverses fronteres, però és probable que en totes prevalgui el mateix tipus de relacions. Potser l'últim subsistema o compartiment, en el costat de l'organització màxima, pugui tenir una posició especial de control o, millor, manqui de controlador.

Aquest model és extremadament vague i de moment no es pot explicitar de manera matemàtica. Però no obstant això, crec que proporciona un excel·lent punt de partida per a un nou enfocament de l'estudi de sistemes complexos. Podem suposar l'espai real i establir el problema sobre una base estadística àmplia. Suggerixo el següent mètode de procediments: en presència d'un sistema proveu un nombre infinit de

fronteres situades a l'atzar; i per a cadascuna de les divisòries estudieu el gradient d'organització (per exemple en termes de gradients de diversitat i de la relació producció/biomassa) i el tipus d'intercanvi que té lloc a través de la frontera. Es pot triar el límit que tingui la taxa d'intercanvi més elevada o que se situï a cavall dels majors gradients d'organització. Es pot seleccionar aquesta frontera (o fins i tot una altra frontera arbitrària) amb la finalitat de definir dos semiespais. Es pot repetir el mateix procediment en l'interior de cadascun d'aquests semiespais, amb el resultat de dividir-los de nou. I així successivament. D'aquesta manera és possible cartografiar un sistema d'organització que té associats gradients d'organització i rutes seleccionades d'energia i control. L'homeòstasi serà una funció del model sencer:

Si pensem una mica, aquest model no és essencialment diferent del que inclou conjunts d'equacions diferencials, però té dos mèrits: es posa èmfasi en l'espai com a marc d'organització, i l'organització pot créixer sense límits dins de les àrees petites, i empènyer i augmentar el model d'organització inicial.

Probablement el model es pot adoptar com una projecció directa de fenòmens geogràfics. Poblats, ciutats, mitjans de comunicació i les seves respectives influències i relacions d'explotació i control es presten bé a aquest tipus de representació. Les ciutats consumeixen més energia per càpita, i l'energia flueix des del camp. Les concentracions d'éssers humans organitzen l'espai al seu voltant, creen direccions de flux i nous gradients d'organització. Les ciutats estan subjectes a un procés de creixement perifèric i de deterioració central. El creixement d'una àrea urbana està lligat a l'explotació d'una regió gran. Només les ciutats velles i els barris antics de les ciutats són incapaçs de promoure transport i, per tant, es deterioren. Una àrea urbana és una peça més madura del sistema que succiona les àrees rurals i les ciutats menys importants del seu entorn. Naturalment, aquest és només un dels aspectes, ja que també cal considerar l'element viu del sistema, l'home: la diversitat d'oficis, l'estructura social, etc., són importants, i cartografiem tot el conjunt de relacions. Algunes investigacions interessants, pioneres en aquesta direcció, anticipen assoliments més importants. La interacció entre individus segueix probablement determinades regularitats que també poden ser bàsiques per a la comprensió dels models d'organització espacial que l'home ha

desenvolupat. Per descomptat, es pot suposar que l'organització dels assentaments humans reflecteix alguns fenòmens implícits en la naturalesa mamífera de l'home (territorialisme, jerarquia, ritualisme i potser d'altres) però, probablement, també determinades restriccions en la diversitat de la interacció humana. Les relacions interpersonals es poden sotmetre a una mesura de la diversitat: una diversitat baixa significa interacció forta amb poca gent; una diversitat alta, interacció feble amb molta gent, i la diversitat més alta, interacció molt feble amb tanta gent que equival a una interacció significativa amb ningú, l'alineació de la gran ciutat. En general la diversitat s'organitza al voltant d'interaccions fortes amb un nombre molt reduït de persones i d'interaccions febles amb molta més gent. Això pot ser important en l'organització de l'espai, i potser més important que l'aspecte que té l'ambient. El plaer d'una naturalesa no humanitzada de contactes interpersonals es pot trobar profundament arrelat en la nostra espècie. Els models de diversitat estan relacionats amb el tipus de poblats i la quantitat de mobilitat dels éssers humans. La baixa diversitat dels camperols i dels habitants de ciutats petites contrasta amb l'elevada diversitat dels pobladors de les zones més plenes de les grans àrees urbanes. En aquests casos, la situació d'equilibri usual és ignorar la gent que ens envolta.

#### **Algunes modestíssimes propostes destinades a falsificar la predicció**

He intentat situar els grans problemes de l'ecologia que es refereixen a l'home al mateix nivell que la teoria ecològica general. Podem considerar aquests problemes com vulguem, però és evident que d'això hem d'obtenir alguns suggeriments d'actuació. Em sembla que pot resultar decebedor esperar massa. L'augment de la població continuarà certament durant un temps, i només més tard es reduirà, i amb probabilitat la pressió tendent a un consum d'energia en augment continuarà sent alta durant un temps molt més llarg o indefinidament. Aquesta energia, pel que fa a part del metabolisme extern, només en una fracció molt petita prové dels ecosistemes actuals (per exemple, fusta); majoritàriament procedeix d'ecosistemes del passat (combustibles fòssils), i una altra fracció és energia que ha passat a través de l'atmosfera i de la hidrosfera, però no a través de cap sistema viu (per exemple, l'energia hidroelèctrica). S'han de recomanar tots els mètodes

des que tendeixen a incrementar l'obtenció d'energia dels rius i del mar; considerat com una màquina tèrmica. És difícil fer prediccions sobre el futur de l'energia atòmica. No és equivocat suposar que la seva utilització serà regulada pels costos; les consideracions de seguretat, per importants que siguin, probablement només seran secundàries.

Un augment substancial de la collita de matèria orgànica destinada a aliments necessitaria ampliar la part de la biosfera representada per ecosistemes explotables amb una elevada taxa de renovació. Potser no s'hagi d'excloure algun descobriment important en la possible domesticació del mecanisme de la fotosíntesi. Als mars es dedicarà molta enginyeria ecològica, i s'han de contemplar mètodes de combinar el tractament de desaprofitaments i la fertilització.

Davant d'aquestes perspectives, la conservació no pot ser excessivament ambiciosa, però potser siguin realitzables alguns aspectes selectes del problema general de conservació, en el sentit que no hi ha interessos formals en contra seva. Hi ha tres aspectes que semblen importants: 1) La preservació d'una certa heterogeneïtat en la naturalesa i la lluita contra l'erosió. 2) La facilitació del cíclic dels elements, o del retorn, mitigant així els problemes plantejats per la contaminació. 3) Dotar els individus d'un determinat ambient apropiat, segons necessitats que, en part, són culturals i modificables. El consell que doni l'ecologia ha d'anteposar els objectius a llarg termini als objectius a curt termini, i maximitzar el rendiment i l'estabilitat en grans extensions, encara que en fer-ho així l'optimització pugui no ser aparent en petites àrees parcials. No tota la superfície de la Terra es pot explotar en el mateix grau; algunes regions s'han de destinar a reserves, o bé zones separades amb finalitats diferents s'han de combinar en algun tipus de pauta. A Europa l'explotació tradicional de la terra es basava en granges que organitzaven l'espai al seu voltant com un mosaic de camps de conreu, bardisses, pastures i fragments de boscos, seguint una organització del camp, més o menys relacionada amb les conques de recepció. S'ha comprovat que aquest mosaic resulta un instrument de conservació molt eficaç, i així mateix ha mantingut i fins i tot ha augmentat la diversitat de les comunitats vegetals. La fitosociologia s'ha «enriquit» amb moltes comunitats organitzades per l'acció de l'home. El mecanisme bàsic que ha conduït a una estructura d'aquest tipus és el diferent grau d'ex-



**La teoria ecològica i la predicció en l'estudi de la interacció entre l'home i la resta de la biosfera**  
Ramon Margalef

plotació que s'ha esmentat abans, és a dir, l'explotació va ser més intensa on el sistema ja era més productiu, i més suau en les regions més agrestes i els sòls més pobres. Probablement a causa d'una certa impregnació cultural i a causa de la tradició considerem aquest paisatge humanitzat com «natural» i estèticament agradable, i és també «raonable» des de qualsevol punt de vista ecològic. He esmentat les conques en connexió amb aquesta estructura. De fet, el model d'explotació heterogènia es relacionava, també pel que fa a la grandària, amb les característiques topogràfiques. Però ara augmenta la demanda de noves terres, i l'antiga estructura es difumina en esdevenir el camp més uniforme.

Les estructures reticulades són comunes en els sistemes naturals heterogenis. Els subsistemes menys organitzats i més productius solen ser puntiformes i es troben immersos en un reticle de sistemes més organitzats o més madurs. La causa primera és que les perturbacions que suposen regressions a partir d'un estadi final més estable solen tenir lloc en punts discrets. Es poden elaborar explicacions més complicades, especialment efectives a l'hora d'explicar la distribució en taques (*patchiness*) del plàncton, però no són essencials aquí.

En qualsevol cas donen suport al punt de vista que una estructura reticulada, en què sistemes més madurs formen un reticle que envolta taques productives i explotades, és un tipus d'estructura «natural» que es desenvolupa espontàniament, i que pot ser especialment persistent enfront de factors de destrucció heterogenis. L'estructura dels assentaments humans correspon al mateix model. Les ciutats i les vies de comunicació que les interconnecten formen, de fet, un reticle que engloba les regions menys madures i explotades (rurals).

En el paisatge, una xarxa de bardisses i de bosc proporciona refugi a les aus i a altres animals,<sup>10</sup> és un mitjà de dispersió per a moltes espècies i imposa un cert límit a l'erosió i al transport horitzontal de nutrients. Diversos ecòlegs han destacat la conveniència de desenvolupar algun tipus de mosaic adequat constituït per zones dedicades a diferents usos, les més importants de les quals són les que Odum<sup>9</sup> anomena «protectores» i «productores». El meu punt de vista respecte a això és únicament recordar que una estructura en bresca pot tenir alguns avantatges sobre un tipus de mosaic indefinit o no estructurat, i entenc que un important projecte d'investigació pràctic és desenvolupar criteris

per a l'optimització de la grandària de les «malles» de l'estructura. Un objectiu important en gestió ambiental seria conservar el que queda i reconstruir, fins on sigui possible i en les millors condicions, algun tipus de nova estructura complexa. Lligada a la mateixa gestió desitjable es troba la necessitat de reduir el transport en tots els seus aspectes, incloent el transport diari de persones al treball, com un bon mètode de combatre la contaminació massiva. Es necessita un retorn, no només per als cotxes, sinó també per al fum, per als abocaments en l'aigua i per a tots els elements químics en general. L'objectiu seria assentaments urbans menors i menys temps perdut a viatjar d'una banda a l'altra; aquesta seria una perspectiva més aviat agradable. No obstant això, com que el flux d'energia està relacionat amb la densitat de població, les àrees més superpoblades tendeixen a subjugar les regions veïnes, controlant-les o absorbint-les. En termes menys ecològics i més polítics, qualsevol reducció de la densitat de població i de la capacitat de transport no és desitjada, perquè signifiquen pèrdua de poder; i qualsevol descentralització erosiona el poder. Però la tremenda dificultat de desplaçar multituds cap a dins i cap a fora de les ciutats, el creixement i la destrucció inexorables de les àrees urbanes i els problemes de la contaminació, provocaran alguna acció en una direcció més sensible: és evident que qualsevol acció tendent a reorganitzar els assentaments humans o les àrees urbanes es pot combinar en la recerca d'una estructura reticulada en la utilització de la terra, en àmplies extensions. Aquest hauria de constituir potser el primer desiderat en la gestió del paisatge.

Un altre argument en la mateixa línia és psicològic, i es refereix a una diversitat adequada en els contactes interpersonals, més fàcil d'aconseguir en assentaments més petits. Un ambient més heterogeni pot contribuir a desitjar una varietat de requisits en l'ambient. Una curta excursió en un paisatge diversificat és estèticament més satisfactòria que centenars de quilòmetres recorreguts en autopistes desertitzades que no condueixen enlloc.

Probablement qualsevol actitud purament negativa sobre la contaminació és en part absurda. Podem anticipar que l'home ha de viure amb la contaminació en els sistemes simplificats, i si acceptem això com una possibilitat (ja ens trobem en aquesta situació), potser podrem preveure la manera de treure'n el millor partit possible.

M'agrada la proposta de H. T. Odum<sup>11</sup> de preparar una aigua d'abocament mitjana o estàndard i deixar-la en conques que serien inoculades amb tot tipus d'organismes de diferents parts del món, i esperar que el resultat del procés d'autoorganització fos un sistema amb bones propietats per desembarassar-se de la contaminació, i fins i tot podria ser d'aspecte agradable. Per descomptat, aquest suggeriment implica una via de retorn més aviat curta i una barreja eficaç de diferents tipus d'abocaments, de manera que el projecte seria més efectiu si es realitzés en el marc de l'organització del territori ja comentat, d'estructura en bresca amb una grandària apropiada de la malla unitat.

Aquests projectes, aquests desideratums, que es poden defensar perfectament en el camp de l'ecologia, coincideixen de manera notable amb els suggeriments de paisatgistes i arquitectes, però molt menys amb les activitats de polítics i economistes. Els «tecnòcrates» són gent pràctica i, per tant, poden entendre l'ecologia. L'essencial és afegir prioritat als objectius a llarg termini. Aquest és un punt de partida molt modest. El fi últim és adonar i restringir el flux d'energia. Un efecte secundari seria reduir el poder dels estats i propiciar una cooperació més efectiva entre tots els grups humans. I probablement aquí resideix l'impediment més greu a l'efectivitat de posar en pràctica fins i tot els més modestos projectes d'aplicar punts de vista ecològics a problemes pràctics quan aquests afectin el poder o el control. En l'actualitat el nom del joc és la competència, basada en l'expansió, i és difícil imaginar-se que això tingui un final. Fins i tot si es té en compte aquesta possibilitat, el més natural és intentar per tots els mitjans arribar al moment decisiu en les millors condicions de prosperitat i de capacitat de control. ●

.....

**Les ciutats**

**consumeixen més**

**energia per càpita,**

**i l'energia flueix**

**des del camp**

.....

.....

**Bibliografia**

- <sup>1</sup> Christian, J. J., *Science*, 168, 84-90 (1970).
- <sup>2</sup> Gause, G. F., *Vérifications expérimentales de la théorie mathématique de la lutte pour la vie*. 61 pàg. París, 1935.
- <sup>3</sup> Huffaker, C. B., *Hilgardia*, 27, 343-383 (1958).
- <sup>4</sup> Lotka, A. J., *Proc. Nat. Acad. Set, wash.*, 7, 410-415 (1920).
- <sup>5</sup> Lotka, A. J., *Elements of physical biology* (ed. 1956: *Elements of mathematical biology*), 465 pàg. Dover, 1924.
- <sup>6</sup> McArthur, R. H., Wilson, I. O., *The theory of island biogeography*. 203 pàg. Princeton, 1967
- <sup>7</sup> McNeill, 8, Lawton, J. H., *Nature*, 225, 472-474 (1970).
- <sup>8</sup> Margalef, R., *Perspectivas de la teoría ecológica*. 110 pàg. Blume, Barcelona, 1978.
- <sup>9</sup> Odum, I. P.; J. *Soil Water Conserv.*, 23, 4 pàg. (1969).
- <sup>10</sup> Odum, I. P., Davis, S., *Landscape Archit.*, oct. 69, 36 pàg. (1969).
- <sup>11</sup> Odum, H. T., *Biological circuits and the marine systems of Texas. A: Pollution and marine ecology*. Hrsg. Olson, Burgess, 99-157. Nova York, 1967.
- <sup>12</sup> Slobodkin, L. B., *Growth and regulation of animal populations*. 184 pàg. Nova York, 1966.
- <sup>13</sup> Szalay, A., *Cosmochin, Acta*, 28, 1605-1614 (1964).
- <sup>14</sup> Van Dyne, G. M. (ed.), *The ecosystem concept in natural resource management*, 381 pàg. Nova York, 1969.
- <sup>15</sup> Volterra, V., *Mem. Acad. Lincei*, 2, 31-113 (1926).
- <sup>16</sup> Watt, K. I. F., *Ecology and resource management*. 450 pàg. Nova York, 1968.

