

QUÈ ÉS LA VIDA?

Juli Peretó, Jesús Català i Álvaro Moreno

■ EN DUES PARAULES

La més concisa de les definicions és la de la NASA, que la fa servir en la seua recerca de vida extraterrestre: «Un ésser viu és un sistema químic autònom capaç d'evolució darwiniana.» La capacitat d'evolucionar esdevé així la característica essencial dels éssers vius. Un altre punt de vista considera que l'organisme individual constitueix l'expressió fonamental de la vida. Els qui ho defensen tenen com a principi fonamental les xarxes recursives de reaccions dins d'un organisme. Per als autors d'aquest article «és viu tot sistema autònom proveït de capacitats evolutives obertes».

Una situació paradoxal: mentre desenes de milers d'investigadors consagren la seua vida a la biologia, encara no tenim una definició satisfactòria de vida. Avui renaix l'interès en aquesta qüestió, esperonat per la cerca de vida en altres planetes i els intents de crear vida *in vitro*.

La primera concepció moderna de la vida data de final del segle XVIII. El 1790, Emmanuel Kant va proposar que, en essència, la vida és una forma especial d'organització dotada de la seua pròpia finalitat (Kant, 2004). Tanmateix, els intents científics de definir la vida foren marginals durant molt de temps i s'han desenvolupat en els darrers seixanta anys. La majoria dels biòlegs han ignorat en la pràctica una qüestió sovint considerada una còmplice mal dissimulada de l'antic vitalisme. Eclipsada per la biologia molecular, aquesta problemàtica va caure en l'oblit.

Avui dia assistim a una renaixença de la qüestió científica i filosòfica sobre la natura de la vida. El panorama ha canviat gràcies al desenvolupament de la investigació sobre els orígens de la vida a la Terra, la cerca de traces de vida en altres planetes, l'ambició d'aconseguir la síntesi artificial de vida i, sobretot, la visió sistèmica dels éssers vius.

Una definició satisfactòria de vida afronta d'entrada dues dificultats principals. La primera es relaciona amb la fabulosa diversitat de formes d'organització del món vivent, a la qual caldria afegir la ubiqüitat de

«MENTRE DESENES DE MILERS D'INVESTIGADORS CONSAGREN LA SEUA VIDA A LA BIOLOGIA, ENCARA NO TENIM UNA DEFINICIÓ SATISFACTÒRIA DE VIDA»

formes «en la frontera», com són ara els virus. La segona es deriva del fet que, fins i tot si trobem raonable que pot haver-hi altres formes de vida en altres planetes, ara per ara només ens podem recolzar en el coneixement d'un únic exemple de vida: la terrestre.

Tanmateix, com que acceptem que la vida s'ha originat en un passat llunyà a partir de matèria inanimada, podem suposar legítimament que estem en condicions de deduir certs principis generals aplicables a qualsevol forma de vida. També estem convençuts que, malgrat les dificultats, definir la vida és un esforç intel·lectual que val la pena acomplir i que pot esdevenir un programa de recerca experimental: revelar la natura essencial de la vida a través de la seua producció al laboratori.

Els intents moderns de definició de vida segueixen dues tendències (Luisi, 1998). Una primera aproximació és la consideració dels organismes individuals com l'expressió fonamental de la vida. En conseqüència, els seus partidaris es concentren en els principis essencials de l'organització dels organismes. Hi ha un tret comú als seus treballs: la noció de xarxa de reaccions recursives. La teoria de l'autopoesi (del grec: *auto*, «ell mateix», i *poesi*, «producció», «creació») formulada el 1973 pels científics xilens Humberto Maturana i Francisco Varela, il·lustra aquest concepte. Segons ells, l'estructura mínima de l'ésser viu és un sistema autopoètic, és a dir, una xarxa de processos de producció de components que regeneren constantment la xarxa que els ha produït i que constitueixen el sistema en tant que una unitat distinta dotada d'un límit físic.

■ L'INDIVIDUAL I EL COL·LECTIU

La segona aproximació posa l'èmfasi en la historicitat de la vida, és a dir, en la connexió temporal entre les poblacions successives i en evolució permanent, formades per aquests individus. Per aquells que des d'aquest punt de vista consideren la vida com un fenomen col·lectiu, els organismes individuals no són més

FABRICAR UNA CÈL·LULA

«En què és menys admissible intentar fer una cèl·lula que cercar la síntesi d'una molècula?» es preguntava fa quasi un segle el biofísic francès Stéphane Leduc. Avui es té la impressió que la recerca de la síntesi de vida al laboratori és una qüestió científica totalment nova. Tanmateix, des de final del segle XIX, diversos autors compromesos en la lluita contra el vitalisme estaven convençuts que la comprensió total de la vida prové de la seua síntesi artificial. Com Leduc, el biòleg mexicà Alfonso L. Herrera va intentar saltar l'abisme entre la matèria viva i la no viva amb la *plasmogènesi*. La transformació de substàncies inanimades en matèria viva era aleshores, segons el fisiòleg de la Universitat de Chicago Jacques Loeb, «l'objectiu ideal de la biologia».

Les aproximacions ingènues de Leduc i Herrera, fonamentades en un coneixement biològic encara nebulós, foren seguides de decennis d'exploració aprofundida de les intimitats cel·lulars. Ara assistim a un renaixement

de l'interès per la biologia sintètica amb dues línies d'atac principals. La primera, més tecnològica, que va de dalt a baix, consisteix en el disseny i la síntesi d'un genoma artificial per implantar-lo en un context cel·lular. Per exemple, aquest és el projecte proposat per Hamilton Smith i Craig Venter, de l'Institut d'Alternatives Energètiques Biològiques (Rockville, Maryland). En aquest context, els intents de definir un genoma mínim, és a dir, el conjunt mínim de gens necessari i suficient per a la supervivència cel·lular, són una aportació essencial.

D'altra banda, una aproximació de baix a dalt intenta realitzar la síntesi d'una cèl·lula mínima aplicant nocions teòriques, com ara l'autoreplicació i l'autopoesi. La integració de molècules de RNA catalítiques (ribozims) autoreplicatives a l'interior de vesícules lipídiques autoreproductives representa una de les vies possibles cap a la síntesi artificial de vida. És l'objectiu que tracten d'assolir en el laboratori Pier Luigi Luisi, de la Universitat de Roma III, o Jack Szostak, del Massachusetts General Hospital, a Boston.

J. P. / J. C. / A. M.

que una part del procés col·lectiu i històric que contribueixen a perpetuar i del qual són alhora el resultat. Així, la capacitat d'evolucionar esdevé la característica essencial dels éssers vius. Des de la concepció de l'evolucionista britànic Richard Dawkins, que considera la vida com la mera selecció natural dels gens, o en termes més generals, de replicadors, fins a la definició de què fa ús la NASA («la vida és un sistema químic autònom capaç d'experimentar evolució darwiniana»), existeix un factor comú, que resumeix la definició genètica de vida: un sistema capaç d'evolucionar per selecció natural (Sagan, 1974).

Però, realment hem de veure la vida com una simple matèria autoorganitzada? No, es tracta de molt més que això. En efecte, l'autoorganització (o autoconservació) és una propietat compartida per nombrosos sistemes no vius (un tornado o la flama d'un ciri, per exemple). Però els éssers vius, a banda de mantenir una organització interna emprant energia i matèria de l'ambient, apliquen aquesta organització durant les accions adaptatives. En aquest sentit, es diu que són sistemes autònoms. Més concretament, un sistema

«LA CAPACITAT D'EVOLUCIONAR ESDEVÉ LA CARACTERÍSTICA ESSENCIAL DELS ÉSSERS VIUS»

esdevé autònom quan assoleix l'estat d'una unitat funcionalment integrada, que reposa sobre una combinació de processos termodinàmicament favorables i desfavorables.

Aquests mecanismes consumidors d'energia permeten assegurar l'autoconservació del sistema davant del desordre. Si agafem la perspectiva bioquímica, constatem que aquesta propietat emergeix de l'activitat metabòlica i de l'existència de compartiments. I tot això, mercè als mecanismes d'acoblament que permeten els intercanvis entre les diverses formes d'energia.

■ TRES PILARS FONAMENTALS

Així, els processos termodinàmics espontanis (per exemple, l'oxidació dels sucres) s'associen a esdeveniments molt improbables (com la construcció d'una proteïna complexa a partir de molècules simples). No hi ha cap misteri: un sistema pot augmentar la seua complexitat consumint energia, a condició que dispo-





A l'esquerra, la llacuna anaeròbica del campus universitari d'Orsay (França) ofereix unes oportunitats fantàstiques per estudiar la diversitat de la vida en un ambient molt peculiar. A poca profunditat, la concentració d'oxigen lliure en aquestes aigües és molt baixa i la vida estarà restringida a aquelles formes adaptades a l'absència d'aquest gas. A primera vista podria semblar que l'únic que podríem trobar serien bacteris anaeròbics, però davant dels nostres ulls es revela una notable diversitat d'eucariotes unicel·lulars, com algues diatomees o cil·liats.



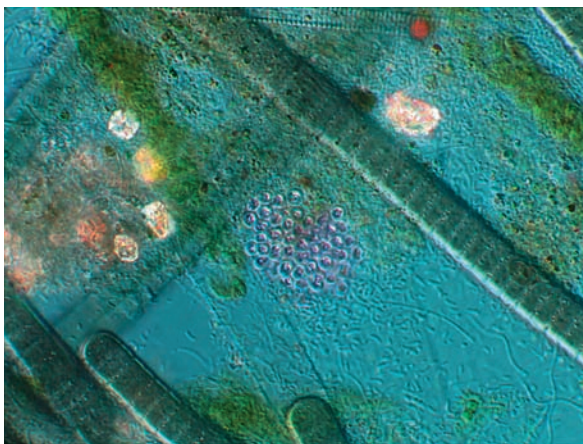
se dels mecanismes apropiats per gestionar-la i transformar-la. Gràcies a l'especificitat dels catalitzadors biològics, els enzims, en cada cèl·lula es produeix una enorme quantitat de reaccions simultànies. Les proteïnes són els principals actors del flux d'energia i de matèria a través de les xarxes metabòliques. I les membranes lipídiques, que alberguen complexos enzimàtics, tenen de fet un protagonisme central en els acoblaments bioenergètics.

Estructures moleculars particularment complexes i una incessant activitat metabòlica alimentada per l'energia i la matèria exteriors: aquests són dos dels tres pilars fonamentals de la vida enunciats pel biòleg



«LA VIDA, MÉS QUE UNA SUBSTÀNCIA, ÉS UN PROCÉS AUTÒNOM I COMPLEX»

i epistemòleg francès Michael Morange en el seu llibre *La vie expliquée?* (Morange, 2003). El tercer és la còpia inexacta de molècules informatives. Per descomptat que, a més de ser autònoma, la vida té una dimensió informativa. Un programa es transmet de pares a fills, en forma d'un polímer no monòton: el DNA. Aquest es replica, una condició indispensable per a la transmissió de la vida. Però la maquinària replicativa no és fiable al cent per cent, tot i el concurs dels sistemes enzimàtics de control i de reparació del DNA que milloren la fidelitat de la replicació. D'altra banda, la biosíntesi dels monòmers i de totes les macromolècules necessàries per a la replicació, així com per a l'expressió dels gens i els processos de reparació, són els principals lligams metabòlics de la reproducció. En conseqüència, la síntesi dels components i el seu reemplaçament impliquen sempre l'acció d'unes i altres macromolècules interdependents, les quals, al seu torn, depenen de l'acció d'un altre conjunt de macromolècules i així successivament. Tot depèn de tot, cosa que constitueix un misteri fascinant. Aquesta circularitat, o recursivitat, assenyalada



Fotos d'aquesta pàgina cortesia de Purificación López i David Moreira, CNRS-Université Paris Sud

Algunes soques del bacteri *Buchnera aphidicola*, que viuen en simbiosi a l'interior dels pugons, tenen genomes molt petits amb informació per a fabricar a penes unes 400 proteïnes, un nombre que pot ser proper al mínim de funcions necessàries per a la vida. Una de les línies de recerca del grup de genètica evolutiva de l'Institut Cavanilles de Biodiversitat i Biologia Evolutiva de la Universitat de València, derivada dels estudis de genòmica de bacteris endosimbionts, és la determinació del conjunt de gens i funcions metabòliques per fer viable una cèl·lula mínima. A la micrografia electrònica (cortesia de L. Gómez-Valero) es poden veure un grup de bacteris endosimbionts a l'interior de sengles cèl·lules de pugó, els anomenats bacteriòcits. Els cossos més foscos i grossos de la dreta són cèl·lules de *B. aphidicola*. L'esquema circular representa el genoma de *B. aphidicola* endosimbiont del pugó *Baizongia pistacea*. Els diferents gens s'han acolorit d'acord amb la seua funció: emmagatzematge i processament de la informació genètica (blau), processament, plegament i secreció de proteïnes (groc), processos cel·lulars (taronja), metabolisme (roig), embolcall cel·lular (verd), gens de RNA (negre), pseudogens (gris), gens desconeguts (marró) (cortesia de F. J. Silva).

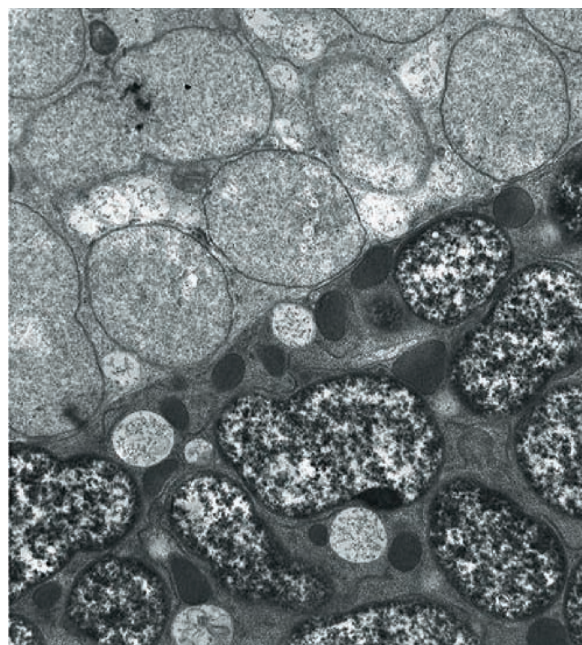


pel biòleg teòric Robert Rosen, desaparegut el 1998, és la diferència fonamental entre una màquina i un organisme: en aquest darrer, cada element està causat per un altre element i el sistema és causalment tancat (Cornish-Bowden *et al.*, 2004).

En fi, l'activitat biològica té conseqüències globals. Tots els organismes vius són sistemes oberts pel fet de l'intercanvi de matèria i energia amb l'ambient. La circulació dels components químics que entren, romanen i surten de les cèl·lules té efectes concrets sobre el sòl, l'aire i l'aigua on hi viuen els organismes (vegeu «Una aberració química planetària»).

■ EL LLEGAT DEL TEMPS

De tot el que s'ha exposat podem concloure que la vida, més que una substància, és un procés autònom i complex. Un procés on l'estructura de cada organisme està causalment lligada a les nombroses estructures que l'han precedit. Així, cal cercar l'especificitat de la matèria viva en la seua historicitat, una dimensió present en l'estudi de la vida des de Charles Darwin. Els éssers vius són com són per raons històriques. La comparació entre tots els éssers vius, grans i petits, aeròbics i anaeròbics, terrestres o aquàtics, mostra que les similituds bioquímiques sobresurten més que les dissemblances, cosa que és un testimoni del llegat del temps. La dinàmica i les contingències evolutives esculpeixen la biodiversitat al llarg dels temps geològics. En resum, direm que la vida terrestre pren la forma d'una xarxa planetària d'entitats lligades en l'espai per les seues activitats metabòliques i a través del temps per la seua descendència (Margulis i Sagan,



UNA ABERRACIÓ QUÍMICA PLANETÀRIA

La vida és present a tot arreu del nostre planeta. Allà on hi ha aigua líquida i una font d'energia primària –siga la llum visible, siguen els compostos químics adequats, orgànics o inorgànics– trobarem almenys microorganismes en abundància, tot i la cruesa de les condicions ambientals de temperatura, pressió, salinitat o acidesa. Aquests microorganismes són presents dins les porositats de les roques de l'escorça terrestre, als deserts ardents o glaçats, a les fonts hidrotermals dels mars més profunds... És molt difícil trobar un indret a la Terra on la vida no hi siga present.

Els microorganismes són, gràcies als cicles bioquímics, el principal factor del moviment de la matèria en la superfície terrestre. Els bioelements, com el carboni, el nitrogen, l'oxigen, el sofre o fins i tot l'arsènic, són incorporats o reciclats pels microorganismes, cosa que té efectes planetaris. Per exemple, el nostre planeta estava dotat al començament d'una atmosfera sense oxigen. Tanmateix l'aparició de la fotosíntesi en els avantpassats dels actuals cianobacteris va engegar l'acumulació a l'atmosfera d'aquest gas tan reactiu i es va produir una barreja molt desequilibrada amb altres gasos d'origen biològic, com el metà. La geologia i la biologia són dos aspectes estretament relacionats de la mateixa realitat.

1997). La matèria viva és, doncs, radicalment diferent de la matèria inert, el que fa de la biologia una ciència essencialment distinta a d'altres, com la física (Mayr, 1998).

És possible conciliar els dos punts de vista: l'individual i l'historicocol·lectiu? L'existència individual es fonamenta en les propietats autopoètiques de les cèl·lules i les seues conseqüències sobre l'ambient. En aquest sentit, la definició de vida individual equival a la definició de la seua organització metabòlica i, per tant, no cal referir-se a la reproducció, ni a l'evolució. La unitat mínima de vida és la cèl·lula. Si poguérem fabricar una cèl·lula mínima, establiríem així una definició universal de vida (vegeu «Fabricar una cèl·lula»).

En tot cas, la comprensió de l'estructura i la funció d'un ésser viu aïllat és força limitada, ja que només descriu *com* funciona, sense respondre mai de manera satisfactòria a la qüestió del *per què*, «si no és –com va dir el genetista Theodosius Dobzhansky– a la llum de l'evolució». Si volem copsar els aspectes col·lectius i històrics de la vida, cal necessàriament incloure la noció d'evolució en la definició de vida. I si l'evolució es troba tan íntimament lligada a la vida és perquè només l'evolució fa possible la complexitat biològica: fins i tot la cèl·lula més simple és d'una complexitat tal que ha d'integrar una sèrie de constriccions heretades (la informació genètica) que s'han elaborat en el decurs del procés evolutiu. En resum, la vida és matèria dotada d'una història a la vegada individual (el desenvolupament ontogenètic) i col·lectiva (filogenètica).

Per tot això hem proposat la conciliació d'aquestes dues visions en una sola fórmula dient que és viu tot sistema autònom proveït de capacitats evolutives obertes (Ruiz-Mirazo *et al.*, 2004). La idea d'autonomia comprèn les activitats individuals, mentre que la d'evolució remet a la capacitat il·limitada d'elaborar estructures i organitzacions complexes.

Aquesta definició té conseqüències pràctiques, en primer lloc en el domini de les investigacions sobre l'origen de la vida. En sentit estricte, l'origen de la vida tal com la coneixem seria el moment del desacoblament entre genotip i fenotip, és a dir, el moment quan les instruccions genètiques i la seua execució se separen en diferents famílies químiques –àcids nucleics i proteïnes–. Si s'accepta la hipòtesi d'un

món primitiu de RNA, en el qual tant les reaccions catalítiques com l'emmagatzemament d'informació eren efectuats per molècules de RNA, el desacoblament es produïria després de la invenció del codi genètic i de la síntesi de proteïnes. Això hauria permès el començament d'una fase evolutiva oberta que portaria vers l'aparició de la forma ancestral comuna a tots els organismes actuals (Peretó, 2005).

En relació amb la recerca de vida en altres planetes, la nostra definició proposa un marc conceptual, necessari per al desenvolupament de marcadors biològics adients. Així, un sistema viu ha de disposar, a escala individual, d'una frontera activa i semipermeable, d'un sistema energètic i d'almenys dos tipus de components macromoleculars interdependents (com ho són els àcids nucleics i les proteïnes). A escala més global, no podem parlar de vida en un altre planeta si no és per la presència d'un fenomen històric i col·lectiu a llarg termini. Un fenomen així deixaria unes traces en el medi (per exemple, una atmosfera d'una composició allunyada de l'equilibri termodinàmic) que ens podrien permetre esbrinar si hi ha o no vida. ☺

**«LA VIDA ÉS MATÈRIA
DOTADA D'UNA HISTÒRIA
A LA VEGADA INDIVIDUAL
(EL DESENVOLUPAMENT
ONTOGENÈTIC)
I COL·LECTIVA
(FILOGENÈTICA)»**

BIBLIOGRAFIA

- ANDRAIDE, J. i F. G. ABARZUA, 2004, «Understanding the parts in terms of the whole», *Biol. Cell*, núm. 96, pp. 713-717.
- CORNISH-BOWDEN, A.; M. L. CARDENAS; J. C. LETELIER i J. SOTO-ANDRADE, 2004, «Understanding the parts in terms of the whole», *Biology of the Cell*, núm. 96, pp. 713-717
- MARGULIS, L. i D. SAGAN, 1997, *Què és la vida?*, Barcelona, Proa.
- KANT, E., 2004, *Crítica de la facultat de jutjar*, Barcelona, Edicions 62.
- LUISI, P. L., 1998, «About various definitions of life», *Origins Life Evol. Biosph.*, núm. 28, pp. 613-622.
- MAYR, E., 1998, *Así es la biología*, Madrid, Debate.
- MORANGE, M., 2003, *La vie expliquée? 50 ans après la double hélice*, París, Odile Jacob.
- PERETÓ, J., 2005, «Controversies on the origin of life», *Int. Microbiol.* núm. 8, pp 23-31.
- RUIZ-MIRAZO, K.; J. PERETÓ i A. MORENO, 2004, «A universal definition of life: autonomy and open-ended evolution», *Origins Life Evol. Biosph.*, núm. 34, pp. 323-346.
- SAGAN, C., 1974, «Life», *The New Encyclopaedia Britannica* (15a ed.), vol. 10.

Juli Peretó. Institut Cavanilles de Biodiversitat i Biologia evolutiva, Universitat de València.

Jesús Català. Institut d'Humanitats Ángel Ayala-CEU, Universitat Cardenal Herrera-CEU, València.

Álvaro Moreno. Dep. de Lògica i Filosofia de la Ciència a la Universitat del País Basc.

Aquest text aparegué publicat en la revista *La Recherche* (núm. 390, octubre de 2005, p. 36-40), dins del dossier *Les plus belles énigmes de la science* que celebrava el 35è aniversari d'aquesta revista francesa de divulgació científica.