

Aiguabarreig de microbis

© Olibrik: Mercè Berlanga

Escrit per

Mercè Berlanga¹ i Ricard Guerrero²

¹ Departament de Microbiologia i Parasitologia Sanitàries de la Universitat de Barcelona

² Departament de Microbiologia de la Universitat de Barcelona

Els avenços en el coneixement del món natural van precedits normalment d'alguna innovació tecnològica que permet mesurar o observar alguna cosa nova, o bé realitzar nous plantejaments experimentals, prèviament impensables. Les tècniques moleculars són mitjans molt valuosos per estudiar l'estructura i funcionament de les cèl·lules actuals, però també són instruments per esbrinar la filogènia dels éssers vius. I en el cas dels microorganismes procariotes, que han deixat pocs fòssils, són l'eina imprescindible que ens permet endinsar-nos en el seu passat i treure conclusions vàlides per establir una taxonomia correcta, basada en la història evolutiva de cada organisme.

En els organismes eucariotes, és ben conegut que dos grups estan tant més separats com més diferents són les seves seqüències genòmiques. Però en els procarïotes (bacteris i arqueus) no sempre és així. La seqüenciació ha revelat una enorme plasticitat genètica en les denominades «espècies» bacterianes. En els procarïotes és molt freqüent la transferència de gens entre «espècies», gèneres i grups taxonòmics superiors. És el que denominem *transferència lateral*, o *horitzontal*, per distingir-la de la *transferència vertical*, que és el pas de gens d'una generació a la següent («de pares a fills»). La transferència horitzontal de gens és una forma ràpida d'adquirir informació (DNA) per a la innovació bioquímica i per a l'adaptació i tolerància a ambients canvians. En tenim un exemple clar en el cas del bacteri més estudiat: *Escherichia coli*, que és un habitant normal del nostre intestí, però que també es troba en el sòl i en l'aigua. Les soques habituals (la K-12 és la més coneguda) no són patògenes, ans al contrari, són components essencials de la microbiota normal humana, i de molts altres animals. Però hi ha soques patògenes, fins i tot n'hi ha que poden produir diarrees mortals. És el cas de la soca O157:H7 (*O* i *H* indiquen dos antígens de la superfície del bacteri: *O* correspon al lipopolisacàrid de la membrana externa; *H* correspon als flagels; els nombres corresponen a diferents tipus del mateix antígen). La soca O157:H7 ha provocat

brotos de contaminació en carn utilitzada per fer hamburgueses i ha produït morts a causa d'una cocció insuficient de l'aliment. L'observació microscòpica i les proves bioquímiques habituals no detecten cap diferència entre les dues soques, per la qual cosa es considera que K-12 i O157:H7 pertanyen a la mateixa espècie, *E. coli*. La soca K-12 va ser un dels primers bacteris que es va seqüenciar (el 1997). Cal suposar que quan després (el 2000), es va proposar seqüenciar l'altra, moltes persones pensarien que era una feina inútil, o redundant, perquè els resultats, tractant-se de la mateixa espècie, haviem de ser pràcticament els mateixos. Els mateixos? Res més lluny de la realitat. La comparació de les dues soques va donar un resultat sorprenent: la soca K-12 tenia un cromosoma de 4,6 Mb (milions de bases), però el de la patògena tenia 5,5 Mb; és a dir, que O157:H7 presenta aproximadament 1.387 gens nous (!) en relació amb K-12, tot i considerar-se la mateixa espècie. Aquests gens nous vénen d'altres bacteris del mateix grup (la família *Enterobacteraceae*) i O157:H7 els ha incorporat per transferència horitzontal (**Taula 1**).

Sembla que gairebé tots els gens podrien ser transferits entre diferents grups de procarïotes (independentment de les distàncies filogenètiques), però que no tots ho podrien fer amb la mateixa probabilitat. Per tant, es planteja el dubte sobre quins gens són més útils per a la

Bacteri	Mida (kb)
<i>Myxococcus xanthus</i>	9.543
<i>Streptomyces ambofaciens</i>	8.208
<i>Burkholderia vietnamiensis</i> (3 crom.)	7.430
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5.900
<i>Bacillus cereus</i>	5.700
<i>Escherichia coli</i> O157:H7	5.528
<i>Escherichia coli</i> K-12	4.639
<i>Leptospira interrogans</i> (2 crom.)	4.300 + 350
<i>Legionella pneumophila</i>	3.900
<i>Treponema denticola</i>	2.843
<i>Staphylococcus aureus</i>	2.822
<i>Streptococcus mutans</i>	2.819
<i>Deinococcus radiodurans</i> (2 crom.)	2.648 + 412
<i>Haemophilus influenzae</i>	1.907
<i>Campylobacter jejuni</i>	1.700
<i>Chlamydia trachomatis</i>	1.450
<i>Rickettsia prowazekii</i>	1.120
<i>Treponema pallidum</i>	1.050
<i>Borrelia burgdorferi</i> (crom. lin.)*	910
<i>Mycoplasma genitalium</i>	573
<i>Buchnera aphidicola</i>	400 (variable)

Taula 1. Mida del material genètic de diferents bacteris.

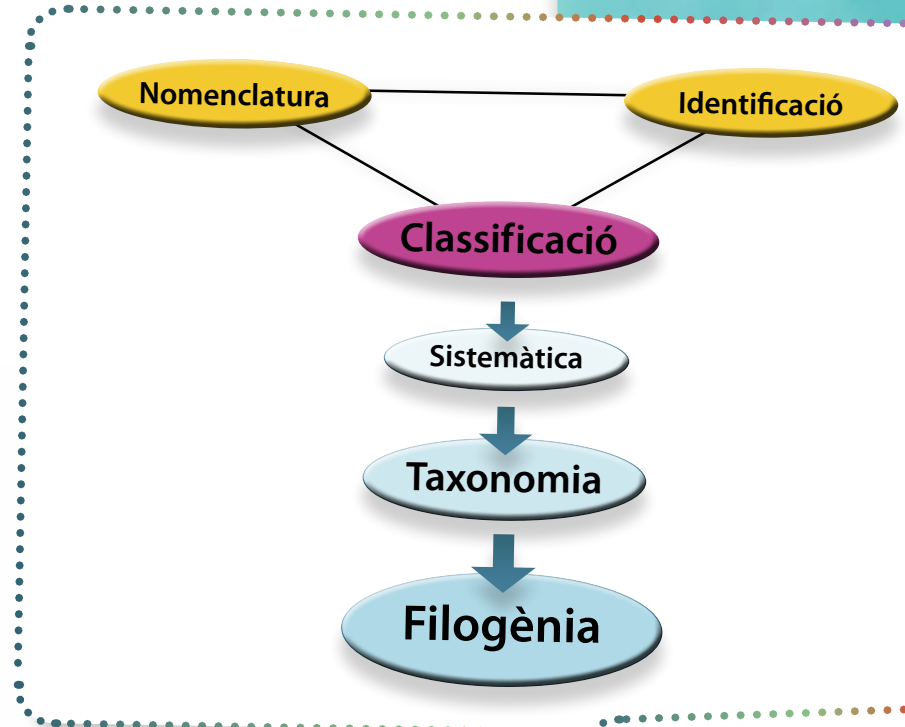
* Més 12 plasmidis lineals i 9 plasmidis circulars (en total, 610 kb)

classificació filogenètica dels bacteris i quins ho són menys. En els cromosomes procariòtics podem distingir dos tipus de gens: els gens *informativals*, que són els responsables dels mecanismes genètics bàsics (replicació, transcripció, traducció, etc.), i els gens *operacionals*, que són els encarregats de les funcions metabòliques habituals (en anglès també se'ls anomena *housekeeping*, que «cuiden la casa»). Sembla que els gens informativals són menys propensos a ser transferits, ja que no presenten cap benefici per a una cèl·lula que ja s'està reproduint raonablement bé. En canvi, els gens operacionals podrien ser més «fàcilment» transferibles, ja que signifiquen un clar avantatge en cas que les condicions ambientals siguin diferents, cosa que passa amb freqüència.

Classificació i taxonomia en procarotes

Classificació, nomenclatura, identificació, filogènia, sistemàtica, taxonomia, són paraules ben diferents i utilitzades sovint pels biòlegs, però moltes vegades de manera poc precisa. Samuel Cowan, el gran taxònom (o sistemàtic?, o classificador?) de la família suava esmentada d'*Enterobacteraceae*, va voler posar, el 1965, una mica d'ordre en aquest conjunt de conceptes relacionats. D'una banda, hi ha la «trilogia» de Cowan: classificació, nomenclatura i identificació. La *classificació* és un terme molt extens, aplicable més enllà de les ciències biològiques, que es refereix al fet d'ordenar objectes (organismes, en el cas de la biologia) segons uns criteris específics. Aquests criteris poden ser arbitraris, però busquen resultar útils per als objectius de la classificació. La *nomenclatura*, en el cas de les ciències biològiques, consisteix a donar un nom en llatí als organismes, tot seguint la tradició binomial (gènere i espècie) linneana. La *identificació* consisteix a buscar a quin grup classificat i anomenat prèviament correspon un organisme desconegut. D'altra banda, hi ha la gradació entre classificació, sistemàtica, taxonomia i filogènia. Com hem vist, la classificació pot seguir criteris arbitraris. En biologia, cal que la classificació es faci seguint uns criteris naturals que busquin la relació evolutiva que hi ha entre els organismes. Una classificació acurada s'anomena *sistemàtica*. La sistemàtica que segueix la història evolutiva d'un grup aspira a anomenar-se *taxonomia* (*taxon*, en grec, significa 'arbre'; els organismes estan relacionats per avantpassats comuns que es van separant successivament com les branques d'un arbre). La *filogènia* (*filon*, en grec,

significa 'tribu' o 'raça') és la determinació de la història evolutiva dels organismes. La taxonomia és un esforç científic per ordenar la gran diversitat dels éssers vius. La filogènia, quan es pot establir amb claredat, descriu l'evolució dels organismes i n'explica els canvis genètics experimentats al llarg de les generacions (fig. 1).



L'aiguabarreig de les espècies procarotes

L'*espècie* és la unitat fonamental de la classificació biològica. L'*espècie* s'identifica amb el conjunt d'organismes que són els «mateixos», que «poden creuar-se entre si i donar descendents fèrtils». Els humans actuals són la mateixa espècie, els cavalls i els ases són espècies diferents: els seus fills creuats, els muls i les mules, són estèrils. Però si aquest concepte no és fàcil d'aplicar en molts casos d'animals i plantes i, en general, d'organismes eucariotes, en el cas dels procarotes és molt més difícil. Què és una *espècie* en els procarotes, és una pregunta de difícil resposta. Existeixen tres raons fonamentals per no poder aplicar el concepte actual d'*espècie* als bacteris i arqueus: primer, la inexistència de reproducció sexual lligada a la meiosi; segon, l'existència de diferents mecanismes (transformació, transducció, conjugació, fusió genòmica, etc.) que permeten la transferència horitzontal de gens, no solament entre els individus de la mateixa «espècie» procariota, sinó també entre procarotes molt distants evolutivament, fins i tot, entre procarotes i eucariotes, i tercer, la gran freqüència de recombinació heteròloga,

Figura 1. La «trilogia» de Samuel Cowan (1905-1976), i la concatenació entre *classificació, sistemàtica, taxonomia i filogènia*.

que permet l'adquisició de material genètic que no era present en l'espècie original.

L'especiació comença pròpiament quan es desenvolupen la meiosi i la sexualitat, és a dir, en la cèl·lula eucariota. La meiosi permet l'aïllament genètic de diferents organismes. En els procariotes no existeix la meiosi, i la sexualitat, encara que es dona d'una manera primitiva o senzilla, no és condició obligatòria. Per tant, el concepte d'*espècie* en biologia correspon a l'estructura biològica dels eucariotes, incloent-hi els microorganismes eucariotes (algues, fongs filamentosos i protists). Tot i la dificultat de definir què és una espècie en els procariotes, encara s'utilitza aquest concepte per facilitar-ne l'ordenació i la descripció. Segons el Comitè per a la Revaluació de la Definició d'Espècie en Bacteriologia, els criteris a seguir per dir que dos organismes procariotes pertanyen a la mateixa espècie són: que hi hagi hibridació DNA-DNA de més del 70 %, i que la diferència del «punt de fusió» (ΔT_m , que està relacionat amb el percentatge de GC del DNA) sigui inferior a 5 °C. En la descripció de les espècies també s'han d'incloure altres característiques morfològiques i fisiològiques comunes al grup taxonòmic. El gen 16S rRNA ha estat útil per identificar casos de classificació errònia en espècies prèviament descrites, però és convenient, i en alguns casos obligat, la utilització d'altres gens (p. ex., el gen de la girasa) per acabar d'establir o classificar una espècie.

Posant ordre en el caos i batejant els bacteris

Species totae sunt sicut Deus creavit. Així ho va escriure Linné (Carl von Linné, 1707-1778), que pensava que totes les espècies havien estat creades separatament i que no podien canviar. Poc podia sospitar que el sistema que va inventar per classificar les plantes i els animals (i, no ho oblidem, la nomenclatura que va proposar, que és una cosa diferent) continuaria servint 250 anys després, encara que es basava en un concepte erroni: que les espècies no variaven al llarg del temps, que no hi havia evolució. Linné va establir la primera classificació científica moderna de les plantes i els animals. Però no es va oblidar totalment dels microorganismes. En la 12a edició del *Systema Naturae*, tots els *animalculs* (els organismes microscòpics descrits per Leeuwenhoek, Joblot, etc.) (fig. 2) estan agrupats en tres gèneres pobrament definits: *Volvox*, *Furia* i *Chaos*; i tots els *infusoria* en *Chaos infusorium*, amb sis espècies: $\alphaFebrium exanthematicarum contagium (riquetsia?, estafilococ?); β) *Febrium exacer-*$

Figura 2. Antonie van Leeuwenhoek (1632-1723) va ser un aficionat holandès que va descobrir l'immens món dels microbis. Aquí podem veure algunes de les representacions gràfiques que en va fer i un dels microscopis que va utilitzar per veure'ls. En el microscopi, l'objecte que s'observava s'havia de posar a la punta del caragol i mirar per la lent diminuta del mig. © Imatge Leeuwenhoek: Foto de R. Guerrero dels llibres originals de la Col·lecció Salvador de l'Institut Botànic de Barcelona. Fotografia microscopi i làmina dels microbis: [Commons.wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org).

batium causa (estreptococ?); γ) Siphilitidis virus humidum (*Treponema*); δ) Spermatici vermiculi Leeuwenhoek (l'esperma de cucs no és evidentment un microbi); ϵ) Aetherus nimbus mense florescentiae (floridures, fongs filamentosos); ζ) Fermenti putredinisque septicum (*Clostridium?*).

Ferdinand Cohn (1828-1898) va fer algunes de les primeres classificacions dels bacteris. Els va separar en tribus i gèneres: tribu I, Spahaerobacteria, que inclou el gènere 1, *Micrococcus*; tribu II, Microbacteria, que inclou el gènere 2, *Bacterium*; tribu III, Desmobacteria, que inclou el gènere 3, *Bacillus*, i el gènere 4, *Vibrio*; tribu IV, Spirobacteria, que inclou el gènere 5, *Spirillum*, i el gènere 6, *Spirochaete*. Podem veure que molts dels noms corresponen encara a gèneres que avui reconeixem (durant molt de temps, la nostra coneguda *Escherichia coli*, es va anomenar *Bacterium coli*).

A diferència dels bacteris i altres organismes cel·lulars, els virus no tenen noms binomials llatins. Els virus bacterians (bacteriòfags, o fags) es denominen amb lletres (de diferents alfabetos, per ara, solament el llatí i el grec) i/o números (bacteriòfags), segons el desig de l'investigador que el menciona per primera vegada. Els virus d'animals o plantes utilitzen una breu descripció de les seves principals característiques, de vegades abreujada (virus polio, o poliovirus, és el nom del «virus que causa la poliomièlitis humana»). El 1962, Lwoff, Horne i Tournier van proposar estendre la nomenclatura binomial llatina també als virus. Si aquesta proposta hagués estat acceptada, avui podríem haver gaudit de noms com *Androphagovirus bacterii* (el fag M13?), *Rabiesvirus canis* (virus de la ràbia) o *Coliphagus tescundus* (fag T2). Afortunadament per als microbiòlegs, aquesta proposta no va reeixir. |

Per saber-ne més

- BUCKLEY, M.; ROBERTS, R. J. (2006). «Reconciling microbial systematics and genomics». *Report on American Academy of Microbiology*, Washington, DC.
- GUERRERO, R. (2001). «Bergey's Manuals and the classification of prokaryotes». *Int. Microbiol.*, vol. 4, p. 103-109.
- STALEY, J. T. (2009). «The phylogenomic specie concept». *Microbiology Today* (maig), p. 80-83.
- WELLNER, A.; LURIE, M. N.; GOPHNA, U. (2007). «Complexity, connectivity, and duplicability as barriers to lateral gene transfer». *Genome Biol.*, vol. 8, R156.1-R156.6

Figura 3. Ferdinand Cohn (1828-1898), l'investigador alemany que va fer les primeres classificacions dels bacteris i va descriure amb precisió l'estructura i funció de l'endòspora bacteriana.

Classificació dels bacteris de Cohn (en «Tribus»), 1876

- Tribu I. *Spahaerobacteria*
 Gènere 1. *Micrococcus*
- Tribu II. *Microbacteria*
 Gènere 2. *Bacterium*
- Tribu III. *Desmobacteria*
 Gènere 3. *Bacillus*
 Gènere 4. *Vibrio*
- Tribu IV. *Spirobacteria*
 Gènere 5. *Spirillum*
 Gènere 6. *Spirochaete*

© Wikimedia.org

Segona làmina de Cohn amb
 il·lustracions de bacteris (1875)