

Karen G. Lloyd raccoglie campioni di acqua in una laguna su un altopiano nel nord dell'Argentina, 2025



JACOPO PASOTTI

L'eterno riposo degli eonofili

Karen G. Lloyd, Aeon, Australia

Alcuni microrganismi sembrano capaci di sopravvivere per migliaia di anni nelle profondità del suolo, sfidando le leggi della biologia

Se doveste dire quali sono gli organismi più lenti e longevi della Terra, cosa vi verrebbe in mente? Tra i vertebrati, qualcuno potrebbe pensare alle tartarughe, alle balene o forse a creature più insolite come lo squalo della Groenlandia, che può vivere per secoli. Altri direbbero le colonie coralline,

oppure un albero antico: in Europa esistono querce che hanno più di mille anni, mentre in California alcuni pini dai coni setolosi sono in vita dagli albori dell'antica civiltà egizia.

E i batteri? A prima vista, i microbi sembrerebbero candidati poco plausibili al titolo di organismi più longevi, perché siamo abituati a vederli crescere e morire molto velocemente. Se ci svegliamo con un pizzicore alla gola, ci preoccupiamo perché sappiamo che entro sera avremo una faringite: le cellule batteriche si stanno diffondendo come un incendio nel nostro corpo. Alcuni batteri, come l'*Escherichia coli*, possono raddoppiare ogni venti minuti. E possono essere eliminati altret-

tanto in fretta, quando si trovano di fronte a un antibiotico o a un disinfettante. Ma l'*E. coli* e altri microbi a crescita rapidissima non vivono negli ambienti sotterranei, dove le condizioni favoriscono ritmi più rilassati. Le ricerche degli ultimi anni indicano che il mondo microbico delle profondità del sottosuolo è molto più lento di quanto immaginavamo e può restare metabolicamente attivo per milioni di anni. Questi organismi estremamente longevi, che io chiamo *aeonophiles* (eonofili), stanno riscrivendo le regole della biologia.

Cosa fanno là sotto? Con ogni probabilità, aspettano il momento di tornare in superficie. Ma, a differenza delle cicale o degli orsi in letargo, attendono eventi che

potrebbero non verificarsi per secoli, millenni o addirittura intere ere geologiche.

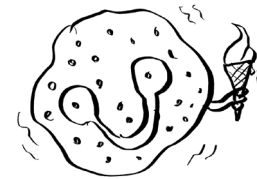
I primi passi verso la scoperta di queste strane forme di vita risalgono ai progressi nella tecnologia del dna negli anni ottanta. Per la prima volta, i biologi riuscirono a sequenziare il dna dei microbi direttamente, senza doverli prima coltivare in laboratorio. Nel 1998 Philip Hugenholtz, Norman Pace e i loro colleghi dell'università di Berkeley sfruttarono questa nuova tecnologia per individuare dodici nuovi tipi di batteri in una sorgente termale del parco nazionale di Yellowstone. L'anno successivo Costantino Vetriani, Anna-Louise Reysenbach e altri ricercatori della Rutgers University, nel New Jersey, scoprirono altri gruppi nei sedimenti dei fondali oceanici. Nessuno di questi organismi aveva equivalenti nel mondo della microbiologia conosciuta: erano completamente nuovi per la scienza. La tecnologia di sequenziamento del dna si diffuse rapidamente, e gli scienziati di tutto il mondo cominciarono a scoprire nuove forme di vita ovunque.

Risparmio energetico

Ciò che abbiamo scoperto da allora ha cambiato la nostra idea della vita sulla Terra. Prima non sapevamo nemmeno se potesse esistere all'interno della crosta terrestre. Oggi sappiamo che sotto i nostri piedi c'è vita in abbondanza. Questi organismi unicellulari sono chiamati collettivamente "intraterrestri", per i parallelismi con il mistero e la novità che associamo agli extraterrestri. Ma, a differenza degli alieni dello spazio, sappiamo con certezza che gli intraterrestri esistono.

Gli intraterrestri fanno parte di un vasto ecosistema ancora poco conosciuto all'interno della crosta terrestre, che ospita un numero di cellule microbiche viventi pari (se non superiore) a quello presente in superficie. Finora sono stati individuati fino a circa cinque chilometri di profondità. Questi organismi non vedono mai la luce e ricevono solo una minima quantità di nutrienti dalla superficie. Il loro mondo è fatto soprattutto di minuscoli spazi tra i granuli dei sedimenti o di microfratture nelle rocce, che a noi sembrano solide, ma per forme di vita minuscole sono porose, piene di nicchie in cui stabilirsi. Dalle poche culture che siamo riusciti a far crescere in laboratorio sappiamo che molti di questi organismi sono estremamente piccoli, e alcuni presentano lunghe appendici, come gli archei Asgard e gli *Altiaarchaeales*, che potrebbero aiutarli ad attaccarsi

Se l'immortalità fosse la norma, saremmo circondati da organismi nati all'alba della vita sulla Terra, ma evidentemente non è così



alle rocce o ai sedimenti in cui vivono.

Anche se in alcune zone del sottosuolo esistono fonti di nutrimento in grado di sostenere la vita, come gas o fluidi idrotermali, a volte passano migliaia di anni senza nessun apporto di cibo. La scarsità estrema ha conseguenze straordinarie per la vita. In gran parte di questa immensa biosfera non c'è abbastanza energia per permettere alle cellule microbiche di dividersi a un ritmo normale. Prima di scoprire questi organismi, avevamo una visione molto più ristretta della quantità di energia necessaria alla vita e di quanto a lungo un singolo organismo fosse in grado di sopravvivere.

Gli intraterrestri ci stanno dimostrando che ci sbagliavamo: la vita può sostenersi con livelli di energia molto più bassi e conservare le sue cellule vitali per tempi enormemente più lunghi di quanto ritenevamo possibile. Significa che molti di questi organismi si scontrano con i limiti energetici della vita, e sembrano aver trovato la chiave di una quasi immortalità. Dato che sono adatti a vivere per periodi lunghi come eoni, il termine eonofili mi sembra adatto per descriverli.

Molti di questi intraterrestri sopravvivono con un apporto energetico migliaia di volte inferiore a quello necessario per mantenere in vita una normale coltura batterica. Sebbene il sottosuolo marino profondo sia uno dei più grandi ecosistemi della Terra, quasi nessuno dei microbi che lo abitano sta crescendo. Questi organismi hanno a disposizione lo 0,00001 per cento dell'energia che sostiene tutti gli altri tipi noti di crescita cellulare sul pianeta, quindi anche una singola divi-

sione cellulare è impossibile. Gli eonofili usano tutta la poca energia a disposizione per riparare le loro parti danneggiate, quindi l'unica strategia possibile è rimanere dormienti ma metabolicamente attivi. Ma quanto può vivere una cellula in condizioni simili? In teoria, non c'è limite, finché riesce a sostituire gradualmente i componenti che si rompono. Questo però conduce a un paradosso. Da un lato, se l'immortalità fosse la norma, saremmo circondati da organismi nati all'alba della vita sulla Terra, ma evidentemente non è così. Dall'altro gli eonofili sembrano davvero in grado di vivere per sempre.

Per fortuna, tra un tempo di duplicazione di venti minuti e l'immortalità c'è una vastissima gamma di scale temporali. E se gli eonofili vivessero mezzo milione o un milione di anni? I sedimenti più antichi che non si sono ancora trasformati in roccia hanno circa cento milioni di anni, quindi questo è il limite massimo di età di una singola cellula nei sedimenti marini. Rocce più antiche potrebbero ospitare cellule ancora più vecchie, a meno che non siano state sepolte a temperature tali da renderle sterili durante il loro lungo viaggio attraverso il nostro pianeta.

A noi sembrano immobili, come se non facessero nulla. Per fare un paragone, su una scala temporale geologica la costa della California è un continuo ribollire di rocce, mentre per i parametri umani è abbastanza solida da costruirci sopra delle case e lasciarle in eredità ai nostri nipoti. Queste case devono essere abbastanza robuste da resistere ai terremoti occasionali, ma non potrebbero mai sopravvivere ai grandi sconvolgimenti tettonici, che nel giro di milioni di anni le faranno sprofondare e riemergere. Per pensare come un eonofilo, dobbiamo confrontarci con scale temporali che sfuggono alla nostra comprensione.

Ripensare l'evoluzione

Come hanno fatto questi organismi a evolversi in modo da poter smettere di crescere per migliaia di anni? Per rispondere, dobbiamo prima considerare a quali condizioni andrebbero incontro durante la loro vita. La lunghezza delle giornate non li preoccupa: sono sepolti talmente in profondità da non poter percepire il Sole. Probabilmente non si accorgerebbero nemmeno delle stagioni. Potrebbero però essere sensibili ad altri ritmi, molto più lunghi, di natura geologica: l'apertura e la chiusura dei bacini oceanici, la formazione e lo sprofondamento delle catene di

isole, oppure nuovi flussi di fluidi generati dalla lenta apertura di fratture nella crosta terrestre. La biologia tradizionale considera questi eventi come fattori evolutivi per una specie, non per un singolo individuo. Per esempio, i fringuelli studiati da Charles Darwin hanno sviluppato un nuovo tipo di becco perché sono rimasti isolati su un arcipelago.

Sappiamo che gli animali si adattano ai ritmi quotidiani o annuali del loro ambiente, ma sembra ridicolo sostenere che una creatura possa anticipare i cicli tettonici. Forse, però, per gli eonofili non è così assurdo. Un individuo che vive un milione di anni potrebbe essere evolutivamente predisposto a scommettere su fenomeni lenti come il progressivo sprofondamento di un'isola, proprio come noi siamo evolutivamente predisposti ad aspettarci che il Sole tornerà a sorgere domani. Per comprendere davvero gli eonofili, forse dobbiamo ripensare cosa intendiamo per segnale evolutivo.

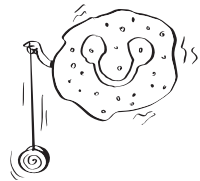
Potremmo anche chiederci come funziona l'evoluzione per un organismo che apparentemente non produce mai discendenti. Secondo la teoria della selezione naturale di Darwin, le cellule devono crescere e riprodursi per potersi evolvere. Ma come? Non credo che Darwin avesse in mente la non crescita quando parlava della "sopravvivenza del più adatto". La risposta sta proprio in quell'"apparentemente". Gli eonofili non si riproducono nei posti in cui di solito li cerchiamo, ma deve pur esserci un momento o un ambiente in cui creano la loro progenie.

L'inverno sconosciuto

Per orientarci possiamo partire da un modello che conosciamo bene: la dormienza stagionale di breve durata, una sorta di letargo in cui alcuni organismi di superficie entrano per alcuni mesi prima di riemergere e riprodursi. La dormienza invernale offre un vantaggio evolutivo: evitando condizioni rigide e fredde, in primavera gli organismi possono sviluppare popolazioni più numerose rispetto a quelli che non lo fanno. Questo gli permette di trasmettere i geni della dormienza a una progenie più ampia. Un caso da manuale di selezione naturale darwiniana.

Per immaginare una dormienza di migliaia di anni dobbiamo pensare a quale evento possa giustificare una simile attesa. Se troviamo un microbo in dormienza nel suolo in inverno, di solito diamo per scontato che stia semplicemente aspettando l'estate. Ma qual è l'equivalente per

Forse gli eonofili stanno aspettando segnali di risveglio che noi non riconosciamo perché le nostre vite sono troppo brevi per coglierli?



un organismo sepolto in profondità nei sedimenti marini?

Proviamo a fare un esperimento mentale per superare i nostri preconcetti sulla durata della vita. Immaginiamo che la vita umana duri solo 24 ore. Nasciamo a mezzanotte, a colazione ci ribelliamo ai nostri genitori, poco prima di pranzo ci sistemiamo e facciamo dei figli, e verso l'ora di cena andiamo in pensione per dedicarci alla pesca. A mezzanotte, i nostri cari (nati poche ore prima) si stringono intorno a noi, tenendoci la mano mentre ci spegniamo serenamente alla veneranda età di un giorno. Se tutti vivessero così, centinaia di generazioni umane si succederebbero nel corso di un solo inverno. In quel lasso di tempo, che rappresenterebbe una fetta significativa della storia umana, gli alberi decidui resterebbero spogli e apparentemente morti. La loro "morte permanente" sarebbe considerata un fatto indiscutibile, e gli scienziati cercherebbero di capire se gli alberi sono davvero vivi, dato che non crescono e non si riproducono. Certo, andando molto indietro nelle generazioni, questi ipotetici esseri umani avrebbero assistito all'autunno o perfino all'estate, ma sarebbe un evento talmente remoto che forse se ne sarebbe persa la memoria. Noi umani che viviamo decenni sappiamo che gli alberi stanno aspettando l'estate. Ma gli umani che vivono solo un giorno resterebbero del tutto spiazzati.

Quando pensiamo alla vita nel sottosuolo, siamo come gli esseri umani di 24 ore che osservano un albero? Forse gli eonofili stanno aspettando segnali di risveglio che noi non riconosciamo perché le

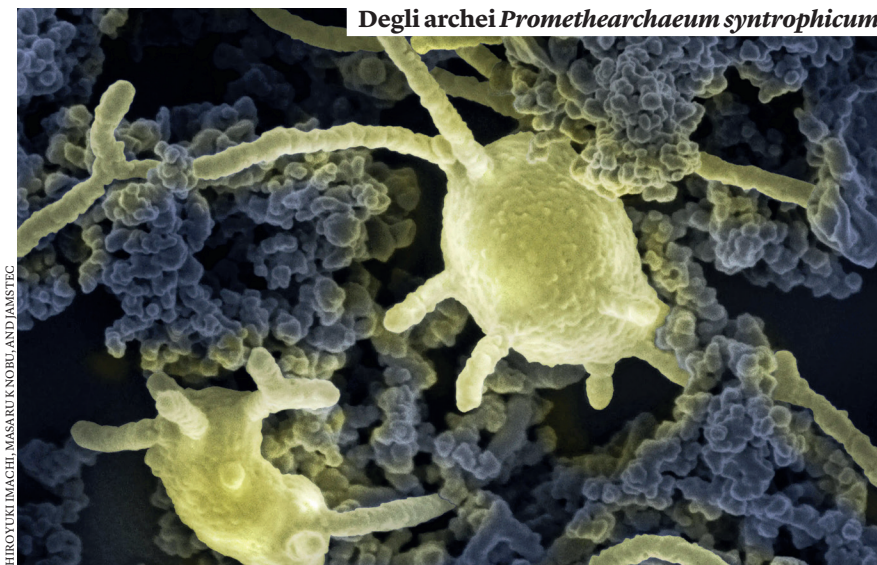
nostre vite sono troppo brevi per coglierli? Ma che senso ha vivere per centinaia di migliaia di anni? Ci dev'essere un motivo se gli eonofili durano tanto a lungo.

Per loro i cicli stagionali sono troppo rapidi. Gli unici processi abbastanza lenti sono quelli geologici. Per esempio, la subsidenza delle isole, le inondazioni o la siccità spesso seguono cicli di centinaia o migliaia di anni. Le frane sottomarine, i terremoti, gli tsunami e le eruzioni vulcaniche possono rimescolare la materia su scale temporali ancora più lunghe, esponendo gli eonofili a nuove fonti di nutrimento che li spingono a uscire dalla dormienza. Può sembrare strano dire che un microbo si è "adattato" ad aspettare un evento raro come un'eruzione vulcanica, ma se si ha molto tempo a disposizione si può essere sicuri che succederà.

Se lasciamo correre l'immaginazione, i singoli microbi potrebbero essersi adattati a periodi ancora più lunghi, come i cicli interglaciali, che cambiano ogni trentamila anni circa, o al movimento delle placche tettoniche. Man mano che un nuovo fondale oceanico emerge lungo le dorsali medio-oceaniche, il fondale esistente si allontana gradualmente dal centro dell'oceano finché non va a sbattere contro un continente, nella collisione più lenta che si possa immaginare. Alcuni sedimenti marini, e gli eonofili che vivono al loro interno, sono trascinati verso il mantello dalla placca in subduzione e distrutti. Una parte dei sedimenti del fondale oceanico, però, sopravvive a queste collisioni: invece di andare in subduzione, viene spinta contro una placca continentale. Potrebbe essere questo l'evento che gli eonofili stanno aspettando? È questa la loro versione dell'estate?

Ragionando secondo scale temporali umane, è difficile dare una risposta definitiva. Ma una cosa è certa: gli eonofili dimostrano che alcuni organismi sono in grado di vivere per molte migliaia di anni. È una scoperta fondamentale sulla natura stessa della vita sulla Terra, paragonabile a quella degli ipertermofili, i microbi che prosperano a temperature superiori al punto di ebollizione dell'acqua, che negli anni sessanta ha cambiato radicalmente la nostra idea di dove la vita potesse esistere nell'universo.

L'esistenza degli eonofili amplia moltissimo la finestra temporale entro cui possiamo cercare tracce di vita nel cosmo. Anzi, apre una possibilità inquietante: se la vita su altri pianeti procedesse con una lentezza estrema, potrebbe risultare quasi



invisibile ai nostri strumenti. Quando osserviamo altri corpi celesti, cerchiamo cambiamenti che indichino attività biologica; ma se quella vita si muove su scale temporali immensamente più lunghe delle nostre, potremmo non accorgerci di nulla, semplicemente perché non cambia abbastanza mentre la guardiamo. Non è affatto escluso che sotto la superficie di Marte o di Europa esistano forme di vita attive, ma con un ciclo di vita troppo lento rispetto a quello a cui siamo abituati.

Professionisti dell'entropia

Con il loro ritmo di vita lentissimo, gli eonofili ci costringono a ripensare il confine tra ciò che è vivo e ciò che non lo è. Come possiamo distinguerli in modo scientifico? Per trovare una risposta, dobbiamo pensare alla vita come a un fenomeno

energetico, guardando attraverso la lente della termodinamica.

Nel saggio *Into the cool* (2006), lo scienziato Eric Schneider e lo scrittore Dorion Sagan sostengono che vita e non-vita esistono lungo un unico continuum. A un estremo ci sono i sistemi non viventi in equilibrio energetico; all'altro, i sistemi viventi, che generano continuamente nuovo potenziale energetico per tenersi lontani dall'equilibrio. Una possibile definizione di vita, quindi, è la capacità di creare opportunità energetiche capaci di allontanare i sistemi dall'equilibrio.

La seconda legge della termodinamica afferma che, in un sistema chiuso, l'entropia – in sostanza, il numero di configurazioni possibili di un sistema – tende ad aumentare. E man mano che l'entropia

cresce, una quota sempre minore dell'energia disponibile può essere usata per compiere un lavoro. Sappiamo da tempo che la vita è molto abile a produrre entropia: basti pensare al calore che emana dai nostri corpi o dalle città. Ma anche la materia non vivente può produrre entropia. Quindi, come facciamo a distinguere tra le due?

Secondo la termodinamica ciò che distingue la vita dalla non-vita è la sua capacità di allontanare continuamente i sistemi dall'equilibrio. Una volta che un sistema è spinto fuori dall'equilibrio, produce entropia nel tentativo di ritornarvi. Il punto cruciale è che la vita sembra molto più abile della non-vita nel farlo. Un mulinello in un torrente non è vivo, ma per un breve istante le molecole d'acqua si organizzano in un vortice che massimizza la produzione di entropia dissipando energia.

La vita fa qualcosa di simile, ma in modo molto più sofisticato ed efficace. La materia non vivente crea mulinelli; la vita costruisce una diga sul fiume per poterci fare rafting. L'asfalto, quando è colpito dal sole, si scalda e produce un po' di entropia. Una foresta pluviale dispone le foglie a diverse altezze per catturare ogni singolo fotone e trasformarlo in biomassa, che a sua volta alimenta un intero ecosistema di animali e funghi capaci di produrre molta più entropia per raggio di luce di quanto l'asfalto potrà mai fare.

Gli eonofili ci mostrano che i sistemi viventi producono entropia in modo più ingegnoso di quanto pensavamo possibile. Se lo scopo della vita è generare più entropia distribuendone la produzione su scale sempre più ampie di spazio e di tempo, allora questo compito sembra fatto apposta per gli eonofili. La loro longevità estrema può estendere la produzione di entropia su tempi geologici.

Per quanto ci sembrano straordinari, questi organismi potrebbero essere tutt'altro che rari sulla Terra. Oltre a mostrarci che l'attività biologica è molto più varia di quanto immaginavamo, potrebbero essere la chiave per capire perché esiste la vita. Più impareremo sugli intraterrestri, più saremo costretti a mettere in discussione altre idee preconcepite su come dovrebbe funzionare la vita. ♦ *fas*

Karen G. Lloyd insegna biologia e scienze della Terra all'università della California meridionale. Ha pubblicato il libro *Intraterrestrials* (Princeton university press 2025).