

Speciale N° 32: atti dal simposio  
"Nuovi orizzonti di una scienza in divenire"

## REGOLE SEMPLICI CHE NASCONO DA SISTEMI COMPLESSI

### La rete di interazione tra fiori e impollinatori

di Samir Suweis \*

*Modelli matematici di natura statistica costruiti su dati sperimentali e guidati da un «principio di ottimizzazione» ispirato a dinamiche evolutive/adattive in cui è fondamentale la cooperazione tra le diverse specie, consentono di rendere ragione dell'aumento della popolazione totale dell'ecosistema, con un incremento del grado di annidamento della rete di interazione tra le specie in esso presenti. E questo indipendentemente «dai dettagli della comunità ecologica, o da fattori climatici o ambientali».*

\* Dipartimento di Fisica e  
Astronomia, Università di  
Padova

La fisica, dal greco φύσις (fysis), natura, fin dai suoi albori ha riguardato lo studio della natura e il perché succedono le cose che osserviamo, con le loro cause e i loro effetti.

Diversamente però da altre discipline che sono interessate a cogliere le particolarità e le specificità del sistema in esame (pensiamo alla Biologia), la Fisica cerca di comprendere le leggi universali, indipendenti dai dettagli di uno specifico sistema. Uno splendido esempio sono le leggi di Newton.

Qualsiasi corpo materiale obbedisce alle tre leggi formulate dal genio inglese, indipendentemente se si tratti di una mela o del pianeta Giove. In particolare, sappiamo che se applichiamo una forza a un corpo di massa  $m$ , questo subirà un'accelerazione direttamente proporzionale alla forza e inversamente proporzionale alla sua massa, che in formule si scrive  $F=ma$ .

Ora, se invece che un'unica particella, immaginiamo un gas costituito da un numero  $N$  arbitrario di particelle, a priori non abbiamo nessun problema a scrivere esattamente le equazioni di Newton che regolano il movimento di queste particelle. In pratica però, se  $N$  è molto grande (nella cucina di casa vostra si sono circa  $N \approx 10^{27}$  molecole d'aria, cioè 1 seguito da 27 zeri!), anche il più potente dei calcolatori non riuscirebbe a risolvere un così elevato numero di equazioni e quindi a predire il moto delle particelle anche per intervalli di tempo brevissimi.

La questione importante è se, per quello che ci interessa conoscere del comportamento del gas, serve effettivamente conoscere così tanti dettagli. Qui entra in gioco la meccanica statistica. Sviluppata da Ludvig Boltzmann verso la fine dell'Ottocento, essa lega le proprietà microscopiche fondamentali degli elementi del sistema (per esempio la posizione e la velocità di ciascuna particella), con le sue proprietà



macroscopiche (anche dette termodinamiche) emergenti, quali la pressione e la temperatura, come nell'esempio del nostro gas.

Nel caso più semplice in cui si riescono a fare tutti i calcoli esattamente, cioè il caso in cui le particelle non interagiscono fra loro, si ricava la famosa equazione di stato dei gas ideali. Con questo metodo, partendo dalle 6 variabili microscopiche relative a ognuna delle particelle ( $x^i, y^i, z^i; v_x^i, v_y^i, v_z^i$  per  $i=1, \dots, N$ ), si arriva a una equazione che lega tra loro le tre variabili macroscopiche di interesse: la temperatura del gas, il volume in cui è confinato e la sua pressione. In molti casi, questa legge descrive accuratamente il comportamento del gas in esame [1].

Facendo i calcoli si può osservare come molti dettagli del sistema microscopico non sono rilevanti al fine di descrivere il suo comportamento termodinamico: per esempio non è importante conoscere la massa delle particelle. Questo semplice esempio illustra una delle caratteristiche dell'approccio del Fisico Statistico: identificare quali sono gli ingredienti microscopici fondamentali che determinano certi comportamenti emergenti, termodinamici. Con le parole di Einstein: «Fare le cose in modo più semplice possibile, ma non più semplici di così» [2].

Che cosa ha a che fare tutto questo con l'ecologia e con i fiori e le api? Già nella seconda metà del 900, si era osservato che alcuni ecosistemi, come per esempio le foreste tropicali, presentano una sorta di auto-organizzazione. Alcune proprietà emergenti comuni sono state misurate non solo in diverse foreste, ma anche in altre comunità ecologiche con molta biodiversità [3-5]. In particolare, immaginiamo di censire gli individui all'interno di una certa regione dell'ecosistema e vedere a quale specie appartiene ciascuno di essi.

Se si rappresenta in un istogramma il numero di specie che hanno un certo numero di individui (per esempio quante specie hanno solo uno o due individui, quante ne hanno tra due e quattro, quante tra quattro e otto, e così via), quello che si osserva è che questa curva, chiamata abbondanza relativa delle specie (RSA in inglese [6]), ha una forma che è la stessa per le diverse foreste tropicali del pianeta e per le barriere coralline [7].

Si tratta perciò di una proprietà emergente condivisa da comunità ecologiche molto diverse tra loro, e quindi non dipendente dagli ingredienti "microscopici" o dalla specifica fisiologia degli individui della comunità, che sono completamente diversi, bensì devono dipendere da processi ecologici fondamentali, condivisi da tutte le specie.

Questo fatto attirò l'attenzione di molti fisici che iniziarono a lavorare su tale problema, finché, all'inizio degli anni 2000, si comprese che con modelli matematici semplici, basati unicamente su processi di nascita, morte, e migrazione, si riuscivano a descrivere con precisione le curve di abbondanza relativa delle specie per molti ecosistemi [8,9]; così, da regole relativamente semplici si possono ottenere proprietà e motivi emergenti complessi come quelli osservati.

**Interazione tra Impollinatori e piante con fiori**

Un motivo emergente recentemente scoperto [10,11] riguarda il modo in cui gli impollinatori (per esempio le api) e le piante con fiori interagiscono tra loro.

In questo caso, l'analisi dei dati ricavata da molti studi di campo, effettuati da ecologi negli ultimi 50 anni (dove vengono monitorate localmente le interazioni tra le specie di impollinatori e le specie di piante), ha mostrato l'esistenza di una organizzazione emergente nel modo in cui queste specie interagiscono, la quale non può essere spiegata dal puro caso.

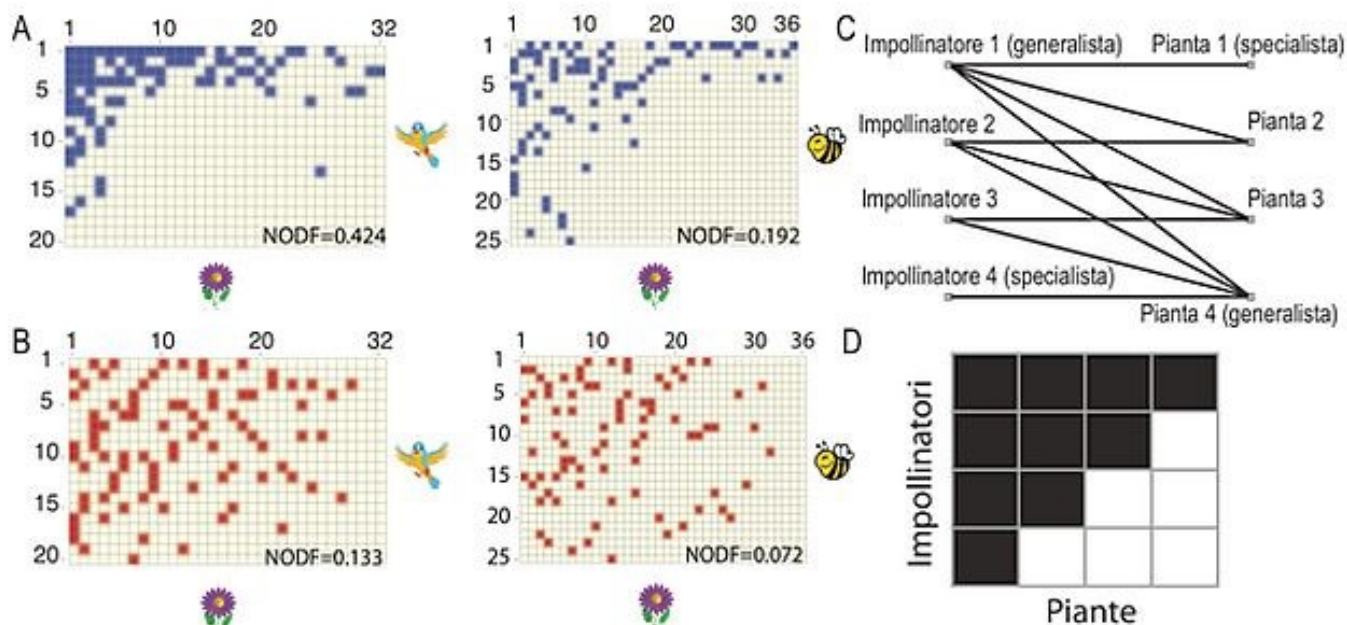


Figura 1

- A. Organizzazione annidata delle interazioni in due ecosistemi reali. Sugli assi dei grafici sono rappresentate, con numeri progressivi le specie di piante (ascissa) e di impollinatori come uccelli e api (ordinata). Un quadratino colorato in corrispondenza di un'intersezione fra una data specie di impollinatore e di pianta indica che esiste una relazione fra le due, ovvero che il dato impollinatore visita quella pianta.
- B. Rappresentazione delle stesse interazioni nel caso in cui le specie interagissero casualmente.
- C. Esempio di grafo bipartito annidato.
- D. Rappresentazione del grafo attraverso una tabella (o matrice). I quadrati neri indicano che le corrispondenti specie di riga e colonna interagiscono.

In particolare, in ecosistemi caratterizzati da interazioni mutualistiche (e quindi caratterizzati dalla cooperazione fra specie, che si scambiano reciproci servizi) si è osservata – in diversi tipi di comunità ecologiche, situate a diverse latitudini/longitudini del pianeta (e quindi con diverso clima, ambiente, eccetera) – la presenza di una organizzazione emergente, che chiameremo «annidata» [12].

L'architettura di annidamento è costituita dalla presenza di una gerarchia ordinata tra le specie nel loro modo di interagire (vedi Figura 1C,D). In strutture perfettamente annidate, è presente una specie impollinatrice «generalista», cioè che interagisce con tutte le altre piante, un'altra un po' meno generalista, che interagisce con un sottoinsieme delle piante, un'altra ancora meno generalista, e via così fino ad arrivare a una specie specialista, che interagisce con solo una specie di pianta, la quale però è una pianta «generalista» (vedi Figura 1C).

La stessa situazione avviene in maniera simmetrica per le piante. La rete d'interazione può essere descritta in termini matematici da un grafo bipartito (cioè composto da due classi di nodi – gli impollinatori e le piante), il quale a sua volta è rappresentato da una tabella (o matrice) A di zeri e numeri uno:  $A_{ij} = 1$  (l'entrata della riga  $i$ , colonna  $j$  della tabella A) se la specie  $i$  tra gli impollinatori interagisce con la specie  $j$  tra le piante,  $A_{ij} = 0$  altrimenti.

Questa tabella può essere visualizzata in termini grafici, dove gli uno (le interazioni) sono denotate in nero, mentre gli zeri in bianco (vedi *Figure 1D*). Da un punto di vista matematico è possibile ricavare una misura del grado di annidamento (la NODF [12]), che può andare da zero, per reti non annidate, a uno, per le reti perfettamente annidate.

Ovviamente in Natura non troviamo reti con NODF uguale a 1, ma se paragoniamo sistematicamente i dati a disposizione con dei cosiddetti modelli nulli (reti casuali che conservano certe proprietà dei dati originali) si trova che le reti osservate in natura hanno un annidamento sistematicamente più alto di quelle casuali (vedi per esempio *Figura 1A-B*). È naturale quindi chiedersi: qual è il modo in cui queste comunità mutualistiche si auto-organizzano? Analogamente a quanto visto per le foreste tropicali, poiché quest'architettura è presente al di là dei dettagli biologici dell'ecosistema in esame, è importante trovare una ragione fondamentale di questo fenomeno emergente.

### **Un principio di ottimizzazione**

L'interazione tra api e fiori (ma più in generale tra piante e impollinatori) è uno degli esempi più importanti di cooperazione in natura. Tali interazioni vengono dette mutualistiche perché portano un beneficio per entrambe le specie – contrariamente ad altri tipi di interazione quali per esempio preda-predatore, o parassita-ospite.

Le api si nutrono del nettare dei fiori, che a loro volta usano l'insetto per disperdere il polline anche a grandi distanze favorendo la riproduzione e quindi la sopravvivenza della specie. In effetti, quale sia il ruolo della cooperazione nella sostenibilità e conservazione della biodiversità è sicuramente una delle domande aperte più importanti nell'ecologia.

Modelli matematici basati unicamente su una visione neo-Darwinista della sopravvivenza del più forte (*survival of the fittest*), hanno mostrato che non è possibile avere ecosistemi con altissima biodiversità, perché può coesistere solo un numero di specie limitato al numero di «nicchie» ecologiche o risorse disponibili [13,14]. In natura però si osservano ecosistemi molto biodiversi, per cui è naturale chiedersi quali siano i meccanismi che permettono la coesistenza di così tante specie, e in particolare quale sia il ruolo della cooperazione in tutto questo. La presenza di un'architettura emergente nei sistemi cooperativi suggerisce l'esistenza di qualche principio adattativo e/ o evolutivo che ha favorito l'emergenza di tale struttura.

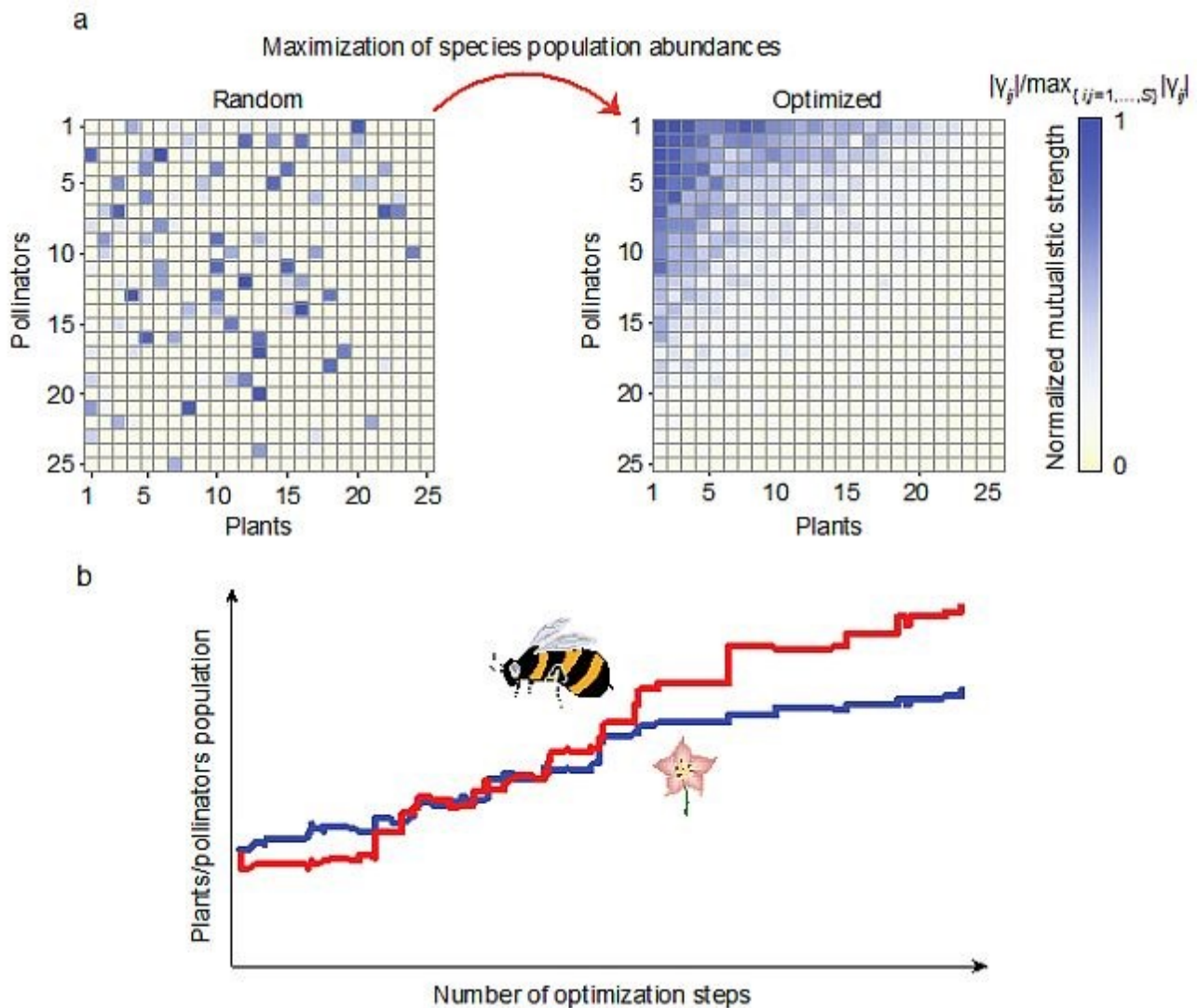
La nostra proposta di spiegazione di tale fenomeno [15] è quindi un processo di auto-organizzazione all'interno dell'ecosistema basato sull'idea che ciascuno individuo cerca il partner in modo da essere più soddisfatto possibile dell'interazione (per le api il nutrirsi meglio possibile, per le piante l'avere una buona dispersione del seme). In entrambi i casi ipotizziamo quindi che il risultato dell'interazione favorisca il più possibile la crescita della popolazione di ciascuna delle specie coinvolte.

Il nostro modello sarà quindi basato su tre semplici regole:

- 1) Partendo da un sistema completamente casuale, dove api e fiori interagiscono a caso, selezioniamo a caso una coppia impollinatore-pianta.
- 2) Simuliamo un cambio di «partner» mutualistico da parte dell'ape (o della pianta, con eguale probabilità), che smette di interagire con il partner selezionato, e ne sceglie un altro (sempre a caso). Questo cambio di partner porta alla modifica (*rewiring*) di un *link* del grafo che descrive le interazioni tra le specie.
- 3) A questo punto, attraverso un modello matematico che descrive l'abbondanza di ciascuna specie in funzione della rete di interazione, verifichiamo se questo nuovo collegamento porta o meno a un aumento della popolazione della specie coinvolta. Se sì, allora la specie decide che il nuovo partner è migliore del precedente, altrimenti torna ad interagire con la specie mutualistica che aveva lasciato.

Semplicemente ripetendo molte volte queste tre mosse, pian piano diamo la possibilità a ciascuna specie di «cercare» i suoi partner mutualistici più efficaci in termini di effetti positivi sulla loro crescita.

Come è chiaro dalle regole sopra-citate, non stiamo inserendo alcuna nozione di annidamento a priori, ma semplicemente abbiamo introdotto un «principio di ottimizzazione» per massimizzare la popolazione di ciascuna specie. Osserviamo che, a priori, questo principio non è detto che porti ad uno stato di «salute» (misurato dalla popolazione totale) maggiore per la comunità ecologica ottimizzata. Infatti, il massimizzare la popolazione di una certa specie potrebbe avere effetti negativi su alcune altre e quindi la popolazione totale potrebbe decrescere.



**Figura 2.** L'ottimizzazione dell'abbondanza di ciascuna specie porta le reti di interazioni tra le specie verso architetture annidate. Contemporaneamente si osserva un incremento della popolazione totale della comunità ecologica, e quindi della relativa salute dell'ecosistema (estratta da [15]).

Come mostrato in *Figura 2*, le simulazioni numeriche guidate da questo principio di ottimizzazione portano a due risultati sorprendenti. Il primo è che le piante e i fiori si auto-organizzano, formando una struttura annidata! Il secondo risultato è che la popolazione totale della comunità ecologica, e quindi lo stato di salute dell'ecosistema, è cresciuto rispetto alla sua condizione iniziale in cui le specie interagivano casualmente.

Grazie a una trattazione matematica analitica di questo principio di ottimizzazione, abbiamo compreso che in effetti la «capacità portante» dell'ecosistema, ovvero il numero di individui che possono coesistere nella comunità, è proporzionale al grado di annidamento della rete di interazione delle specie. Più la rete è annidata, più è elevato il numero di individui che possono coesistere nella comunità ecologica. Inoltre, grazie alla cooperazione, il «bene» che ciascuna specie cerca di incrementare per sé, porta anche un beneficio all'intero ecosistema.

Abbiamo, infatti, dimostrato che la massimizzazione della popolazione di ogni singola specie porta anche a un incremento netto della popolazione totale. Ecco quindi come il nostro principio di ottimizzazione può dare una spiegazione dell'organizzazione che nasce dalla cooperazione: ogni specie cerca i partner mutualistici, interagendo con i quali la crescita è ottimizzata.

Questo porta a un aumento della popolazione totale dell'ecosistema, che si traduce in un aumento del grado di annidamento della rete di interazione tra le specie. E tutto questo senza alcuna «mano» esterna, ma attraverso un'autorganizzazione tra le specie, che non dipende dai dettagli della comunità ecologica, o da fattori climatici o ambientali, ma è guidato da un principio di ottimizzazione, ispirato a dinamiche evolutive/adattive condivise da tutte le specie. In cui la cooperazione è fondamentale e necessaria.

Samir Suweis

(Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Padova)

[Vai allo Speciale dedicato al Simposio](#)

[Vai alle presentazioni dei relatori del Simposio](#)

### Indicazioni bibliografiche

- 1) Dragia Trifonov Ivanov 2007 Phys. Educ. 42 193.
- 2) Make Everything as Simple as Possible, But Not Simpler. *Albert Einstein Brainy Quotes*, 11.
- 3) Fisher, R. A., Corbet, A. S., & Williams, C. B. (1943). The relation between the number of species and the number of individuals in a random sample of an animal population. *The Journal of Animal Ecology*, 42-58.
- 4) Preston, F. W. (1948). The commonness, and rarity, of species. *Ecology*, 29(3), 254-283.
- 5) Hubbell, S. P. (2001). *The unified neutral theory of biodiversity and biogeography* The University of Chicago Press Princeton. New Jersey.
- 6) MacArthur, R. (1960). On the relative abundance of species. *The American Naturalist*, 94(874), 25-36Hubbell, S. P. (1997).
- 7) A unified theory of biogeography and relative species abundance and its application to tropical rain forests and coral reefs. *Coral reefs*, 16(5), S9-S21.
- 8) Volkov, I., Banavar, J. R., Hubbell, S. P., & Maritan, A. (2003). Neutral theory and relative species abundance in ecology. *Nature*, 424(6952), 1035-1037.
- 9) Volkov, I., Banavar, J. R., Hubbell, S. P., & Maritan, A. (2007). Patterns of relative species abundance in rainforests and coral reefs. *Nature*, 450(7166), 45-49.
- 10) Bascompte, J., Jordano, P., Melián, C. J., & Olesen, J. M. (2003). The nested assembly of plant-animal mutualistic networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(16), 9383-9387.
- 11) Bascompte, J., & Jordano, P., *Mutualistic Networks*. Princeton University Press (2013).
- 12) Ulrich, W., Almeida-Neto, M., & Gotelli, N. J. (2009). A consumer's guide to nestedness analysis. *Oikos*, 118(1), 3-17.
- 13) Hardin, G. (1960). The competitive exclusion principle. *Science*, 131(3409), 1292-1297.
- 14) Hutchinson, G. E. (1961). The paradox of the plankton. *The American Naturalist*, 95 (882), 137-145.
- 15) Suweis, S., Simini, F., Banavar, J. R., & Maritan, A. (2013). Emergence of structural and dynamical properties of ecological mutualistic networks. *Nature*, 500(7463), 449-452.

