

Complessità

Speaker:

- **Mauro Ceruti**, Professore Ordinario di Logica e Filosofia della Scienza, Direttore della PhD School for Communication Studies, Delegato del Rettore al "Laboratorio delle Idee"
- **Ugo Bardi**, Professore associato di Chimica Fisica, Membro del Club di Roma

Executive summary

- La parola "complessità" deriva dal verbo latino *plectere*, che significa "intrecciare", "avvolgere" e dalla preposizione *cum*, ovvero "con" e quindi **complessità significa "intrecciato insieme"**. Nell'etimologia troviamo il riferimento all'idea di emergenza, di unità e a quella di complessità.
- **Un sistema complesso è un sistema reticolare fatto di parti, di nodi, di linee e di interazioni che li connettono.** In genere, in un sistema complesso non tutti i nodi sono connessi agli altri in forma indiscriminata, ma esistono alcuni nodi più strategici di altri. Le interazioni tra le componenti dei **sistemi complessi** spesso sono non lineari. **Pertanto, la complessità è che ciò che è complesso non è semplificabile.** Una delle caratteristiche di questi sistemi è che **non sono interamente prevedibili.**
- **la scienza dei sistemi complessi è una scienza giovane che si sta sviluppando nell'uso di metodologie per il momento ancora semi-quantitative.** La complessità è stata, nel tempo e nei secoli della nostra modernità, percepita, soprattutto in ambito scientifico, come apparenza superficiale di un reale non ancora compreso nelle sue leggi profonde e semplici ('700, '800, primi '900). Tuttavia, di colpo, lo sviluppo delle conoscenze scientifiche dagli inizi del '900 evidenzia che non tutti i sistemi/le parti della natura e dell'Universo sono semplici, lineari, prevedibili e descrivibili sulla base di leggi universali.
- Viviamo un paradosso: **più aumenta la complessità del nostro mondo, più si rafforza la tentazione della semplificazione.** Questo ostacolo alla comprensione, alla conoscenza, alla consapevolezza non si annida solo nella nostra ignoranza, ma nel **modo in cui la nostra conoscenza è prodotta, organizzata e trasmessa.** Serve dunque **l'educazione all'intelligenza della complessità e un suo ancoraggio filosofico.**
- Per pensare ad un **esempio di sistema complesso** possiamo immaginare una struttura pneumatica, che ha la caratteristica di non essere lineare. All'interno di un tale sistema, che tende all'**omeostasi**, ovvero a quel fenomeno che manca agli esseri umani quando parlano di resilienza, **la scienza moderna non ha ancora compreso come essa si formi e si mantenga, nemmeno con il solo utilizzo di metodi semi-quantitativi.**
- In un modello climatico aggregato, ad ogni perturbazione corrisponde una risposta resiliente del sistema. Ad esempio, all'aumento della concentrazione di gas climalteranti nell'atmosfera sta conseguendo un rinverdimento planetario perché le foreste stanno assorbendo il carbonio nell'atmosfera espandendosi. **Il sistema ha una sua omeostasi che corrisponde alla capacità dell'ecosistema terrestre di gestire le perturbazioni.**
- Per quanto riguarda il controllo dei sistemi complessi, il modello di **Lotka-Volterra**, uno dei più semplici, dimostra che ogni sistema di controllo è basato sulla memoria precedente e quindi si controlla indipendentemente. Tale descrizione è un elemento chiave nel contesto della Teoria del controllo (cd. **Teoria della governance**), fondata sulla ricerca di metodologie fini a stabilire dei limiti.
- **La governance o il controllo sono importanti perché se non capiamo i sistemi complessi non riusciremo a gestirli.**

Un ancoraggio filosofico della complessità

Complessità è la parola rivelatrice della nostra epoca e, allo stesso tempo, è una parola contro-tempo perché più il mondo diventa complesso, più sembra che diventiamo refrattari alla complessità.

La parola “complessità” deriva dal verbo latino *plectere*, che significa “intrecciare”, “avvolgere” e dalla preposizione *cum*, ovvero “con” e quindi complessità significa “intrecciato insieme”. Nell’etimologia troviamo il riferimento a due idee molto presenti nelle scienze contemporanee:

1. emergenza - la caratteristica dell’emergenza si riferisce agli stati di un sistema, ai modelli di comportamento nuovi che si producono sulla base della quantità e delle qualità delle relazioni o interrelazioni tra le parti di un tutto;
2. molteplicità - le componenti sono numerose e diversificate e, affinché emergano nuovi modelli di comportamento, la densità delle relazioni tra i componenti deve superare una certa soglia critica. A seguire si deve prendere in considerazione la topologia e la forma di queste relazioni;
3. unità.

Un sistema complesso è un sistema reticolare fatto di parti, di nodi, di linee e di interazioni che connettono queste parti e questi nodi. In genere, in un sistema complesso non tutti i nodi sono connessi agli altri in forma indiscriminata, ma esistono alcuni nodi più strategici e più connessi di altri.

Esiste inoltre una distinzione tra “complesso” e “complicato”: le proprietà di un **sistema complicato** sono riconducibili alla somma delle proprietà delle singole parti. Per esprimere il concetto in un esempio concreto di questo sistema, si può pensare a un gomito ingarbugliato dal gatto di casa. Invece, le interazioni tra le componenti dei **sistemi complessi** spesso sono non lineari. Connessa a questa proprietà c’è la frequente presenza di discontinuità nell’evoluzione dei sistemi complessi: questi possono cambiare nel corso del tempo in modo improvviso e imprevedibile e quindi tutti i sistemi complessi hanno una storia in senso proprio.

Si scopre pertanto che la complessità e che ciò che è complesso non è semplificabile.

La complessità è stata, nel tempo e nei secoli della nostra modernità, percepita, soprattutto in ambito scientifico, come apparenza superficiale di un reale non ancora compreso nelle sue leggi profonde e semplici. L’Universo è stato visto come un assemblaggio di oggetti, identificabili, elementari che interagiscono attraverso leggi deterministiche intelleggibili al calcolo e un demone ideale. Questo ideale di onniscienza ha orientato la scienza, che oggi chiamiamo “classica” (‘700, ‘800, primi ‘900), e il sistema dei valori prevalente nella nostra modernità, favorendo l’idea dell’uomo come padrone e possessore della natura (come, *maîtres et possesseurs de la nature*, Renato Cartesio), esterno alla natura. Così la semplificazione è stata la via regia per realizzare questo ideale di conoscenza nella prospettiva di rendere il mondo sempre più dominabile, prevedibile e controllabile.

Tuttavia, di colpo, lo sviluppo delle conoscenze scientifiche (come, ad esempio, nella fisica delle particelle) dagli inizi del ‘900 evidenzia che non tutti i sistemi/le parti della natura e dell’Universo sono semplici, lineari, prevedibili e descrivibili sulla base di leggi universali. Inoltre, lo sviluppo dell’“epistemologia costruttivista”

nelle scienze sociali ha evidenziato l'idea di **“coevoluzione” dei sistemi sociali e dei sistemi ecologici¹, tra natura e cultura.**

La sfida: è possibile ricondurre l'idea di razionalità scientifica ai modelli di realtà delineati dalla scienza nel XVIII e XIX secolo?

Per farlo, diventa necessario riconoscere un pluralismo epistemologico e ontologico, ovvero un pluralismo circa i principi, i metodi della conoscenza e circa la natura dei differenti tasselli del grande mosaico della natura. È quindi necessario un paradigma alternativo a quello proprio delle scienze ottocentesche e che si radica sul tema della **non linearità dello sviluppo dei sistemi.**

La questione cruciale è la difficoltà di pensare insieme la crisi sociale e ambientale e quanto e come oggi si debba porre l'urgenza del cambiamento degli stili di vita, dei modelli di consumo e di sfruttamento delle risorse da parte dei Paesi Sviluppati. Anche **la questione della biodiversità trova un analogo in quella della diversità culturale.** Parte del problema è la distribuzione della ricchezza: in un modello fortemente aggregato come era quello dei limiti sullo sviluppo, applicabile ancora oggi, in cui tutti sono uguali all'interno dello *stock* della popolazione, in realtà spesso le risorse sono ripartite secondo una distribuzione termo-dinamica di *kick box* e quindi, anche se non viene imposto da nessuno, il sistema tende a distribuirsi statisticamente secondo le leggi della termo-dinamica e, in assenza di ingegneria sociale, ci saranno ricchi e poveri.

Si ritiene, dai modelli disponibili, che il sistema tende ad evolversi in vari modi, ma quando è sotto stress alle volte può passare attraverso delle transizioni di fasi che lo irrigidiscono; questo irrigidimento comporta una frammentazione del sistema in sottosistemi e il modo per tenere insieme il tutto è la **comunicazione**, ovvero un linguaggio che implica un livello di omogeneità sia culturale che linguistica. Questa è una nuova rivoluzione che rende possibile una “networkizzazione”, ovvero una creazione di un network globale, mai esistito e difficile da realizzare.

Inoltre, il problema non è solo la distribuzione della ricchezza, ma è la produzione della ricchezza e la sua essenza: probabilmente, per lo sviluppo del futuro, anche la categoria del benessere esigerà reinterpretazioni.

In una visione sistemica e complessa si deve saper riconoscere sempre due cose collegare tra loro:

- la prima è che **molteplici catene causali si intrecciano tra loro.** Questo ci è stato dimostrato anche dalla crisi da pandemia che, sebbene sia una crisi sanitaria, è diventata anche una crisi biologica, ecologica, economica, sociale, culturale, spirituale. È proprio l'intreccio di tutte queste catene causali a provocare l'emergenza imprevista e imprevedibile di effetti differenti interdipendenti;
- la seconda è legata agli effetti che retroagiscono anche sulle cause perché **la causalità è circolare.**

Nonostante la secolarità di queste due idee, esse stentano a farsi linguaggio quotidiano e sensori di un modo di osservare e guardare sia il mondo che il nostro essere nel mondo.

Oggi sta emergendo anche una nuova condizione umana generata da un inedito aumento di due fattori della storia: l'incremento di potenza tecnologica e di interdipendenza planetaria. Questo ha motivato **l'ipotesi dell'Antropocene**, formulata dai geologi e non dagli antropologi o dai sociologi, che si basa su alcune idee, tra cui:

1. la Terra è un unico sistema dinamico, complesso e autoregolato con componenti fisiche, chimiche, biologiche e anche umane;

¹ Questo insieme di idee, ispirato dal lavoro del grande epistemologo e psicologo Jean Piaget (alla cui scuola ginevrina Ceruti ha lavorato nei suoi anni giovanili, oltre alla collaborazione con Edgar Morin) trae linfa anche la visione di due biologi, sociologi e filosofi cileni, Humberto Maturana e Francisco Varela, che elaborarono un approccio teorico denominato “autopoiesi”.

2. il cambiamento causato dall'uomo è un processo complesso, cioè multidimensionale, che richiede una comprensione multi-causale, che intrecci i cambiamenti umani, sociali, politici, economici con le loro diverse conseguenze fisiche, chimiche, geologiche su scala locale e globale.

Viviamo un paradosso: **più aumenta la complessità del nostro mondo**, cioè l'intreccio di tutte le dimensioni con tutto, **più si rafforza la tentazione della semplificazione**. Questo ostacolo alla comprensione, alla conoscenza, alla consapevolezza non si annida solo nella nostra ignoranza, ma nel **modo in cui la nostra conoscenza è prodotta, organizzata e trasmessa**.

Nei secoli a venire, auspicabilmente, nei manuali delle scuole, sia il '900 che questo nuovo inizio del millennio verranno trasmessi come il secolo delle rivoluzioni scientifiche, della grande proliferazione delle conoscenze. Si delinea questo secolo come quell'arco temporale in cui la proliferazione è avvenuta attraverso una forma inedita di conoscenza: lo specialismo e l'iper-specializzazione. Tuttavia, non si deve dimenticare che si tratta di conoscenze frammentate, spesso incapaci di cogliere i problemi rilevanti complessi, cioè costituiti da una molteplicità di dimensioni interconnesse, non separabili. Il pensiero complesso è sempre un pensiero laterale, un metapensiero. Senza un pensiero riflessivo, i soli modelli della complessità svolgono lo stesso ruolo che i modelli lineari hanno sempre svolto, cioè una funzione di conservazione del problema, un atteggiamento riduzionistico.

Serve dunque **l'educazione all'intelligenza della complessità e un suo ancoraggio filosofico**.

L'appeal della semplificazione ha radici storiche e culturali profonde; ha rappresentato il paradigma di pensiero dominante della modernità e perciò siamo di fronte a una **grande sfida educativa**. È sul terreno cruciale dell'educazione che si giudicherà la partita per realizzare il cambiamento di paradigma che esige il nuovo tempo per agire e pensare progetti sostenibili. Per questa ragione **oggi più che mai abbiamo bisogno di elaborare educativamente una coscienza e una consapevolezza del posto dell'uomo nell'umanità e nella natura** e quindi **la coscienza e l'elaborazione di una coscienza è indispensabile per evitare che anche i pensieri più corretti possano essere banalizzati**.

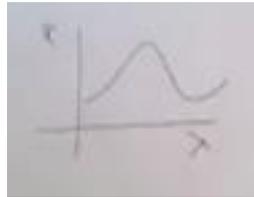
Le dinamiche dei sistemi complessi

‘[Complexity: a guide tour](#)’ di Melanie Mitchell, cerca di spiegare la complessità sostenendo che quando si deve definire un qualcosa che non si conosce, la si definisce come qualcosa di ignoto e di cui non si ha il controllo centralizzato. ‘[Principles of system science](#)’ di George E. Mobus e Michael C. Kalton, invece usa la seguente definizione: **i sistemi complessi sono dei sistemi non lineari**. La molla è lineare, ha una sua definizione $f=k\Delta l$; i sistemi complessi no. C’è **un’altra definizione** che dice **“complex systems always kick back”**, “i sistemi complessi prendono sempre a calci”, infatti quelli complessi sono **sistemi che ti prendono di sorpresa**.

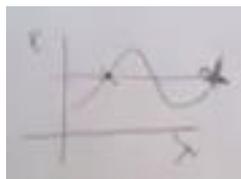
Per pensare ad un **esempio di sistema complesso** possiamo immaginare una struttura pneumatica, che ha la caratteristica di non essere lineare. Infatti, se gonfiassimo un palloncino e inserissimo il becco di un palloncino nel becco di un altro palloncino si noterebbe che questi due palloncini sono a pressioni diverse e posso passare la pressione da uno all’altro. Si può spostare la bassa pressione all’alta pressione e viceversa perché questo è un **sistema bistabile**, il quale ha il vantaggio che, a bassa pressione, è indistruttibile.

I sistemi bistabili funzionano in questo modo:

- Se disegnassimo un diagramma cartesiano, la tensione si indica come λ (lambda greca). La pressione all’interno del palloncino è la seguente:



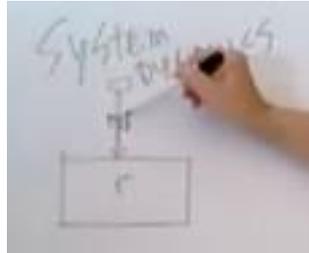
- Le strutture pneumatiche resilienti consistono nello stare nella zona in cui non esiste il problema della frattura o in cui esiste, ma è il rischio è molto basso (nel grafico, la X).



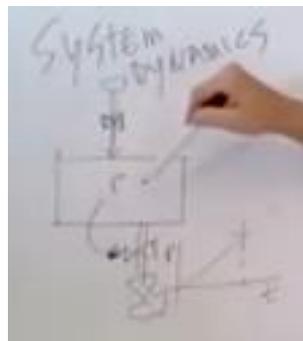
- La **frattura** è un fenomeno critico che gli ingegneri cercano di capire, ma che non hanno ancora compreso a fondo. Infatti, **la scienza dei sistemi complessi è una scienza giovane che si sta sviluppando nell’uso di metodologie per il momento ancora semi-quantitative**.

Una metodologia di calcolo per affrontare i sistemi complessi, intesi come dei sistemi non lineari, prende il nome di **system dynamics**. Si tratta della metodologia alla base dei [“Limiti dello sviluppo”](#) (1972) e che si fonda sulla rappresentazione grafica/matematica.

- Un rettangolo rappresenta uno *stock*/una grandezza, tipicamente l'energia; se questo *stock* rappresenta a sua volta la pressione nel palloncino (che è energia perché per gonfiare il palloncino occorre utilizzare dell'energia), si rappresenta lo *stock* di energia all'interno del palloncino con una doppia freccia che manda l'area all'interno del pallone a una velocità costante.



- Quello che succede non è solo una rappresentazione grafica, ma dinamica, perché ci sono delle applicazioni che permettono di rendere il sistema animato. Realizzando quanto appena detto si nota che, in funzione del tempo, la pressione del palloncino aumenta all'infinito. Nella pratica e nella realtà dei fatti non è così perché, raggiunto un certo limite, ci sarà un'uscita dello *stock* del palloncino che dipende dalla pressione interna allo stesso, dove, nella descrizione matematica di questo palloncino, si può anche inserire un fenomeno critico che comporta l'aumento di pressione e, di conseguenza, lo scoppio del palloncino. Questo passaggio introduce il concetto di *feedback* (dato dalla freccia non retta nella seguente foto):

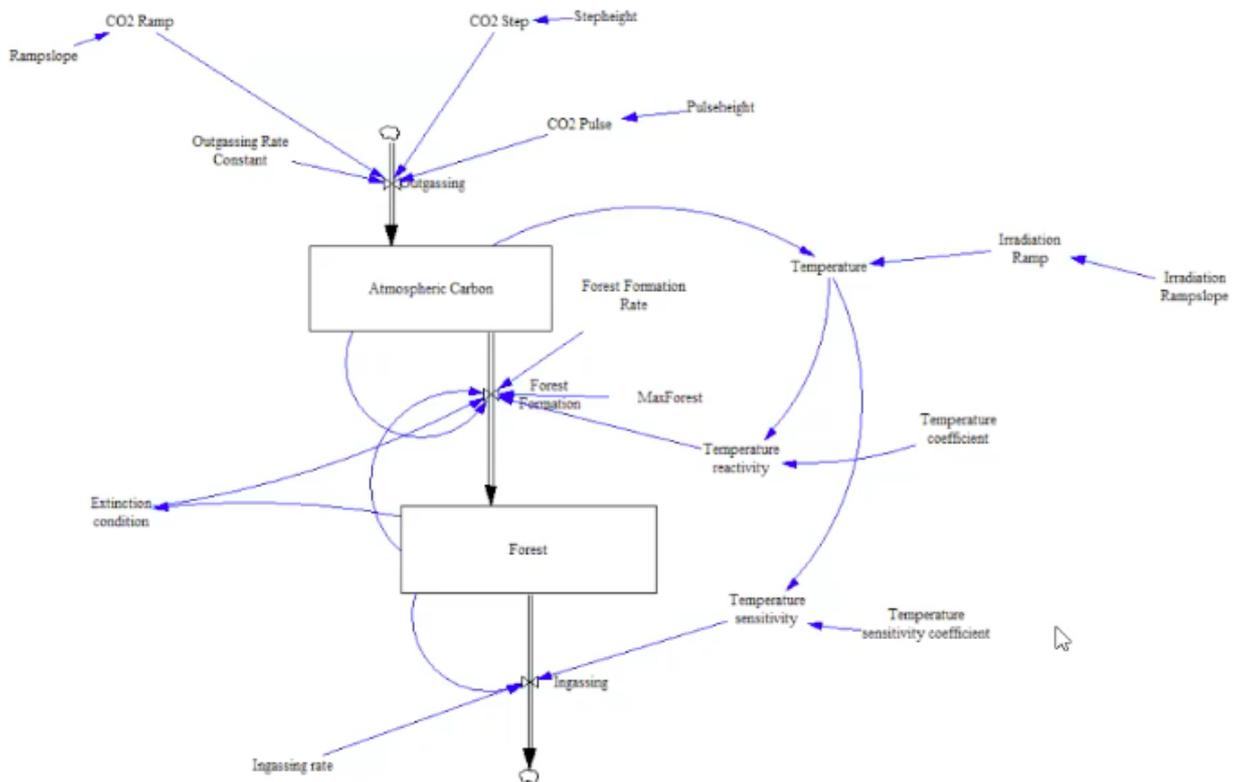


- Un *feedback* si ha quando un flusso è proporzionale a uno stock e questo comporta la non linearità perché lo *stock* è proporzionale al flusso, il flusso è proporzionale allo *stock* e allora i due sistemi vanno insieme. Tale processo dà loro la non linearità.

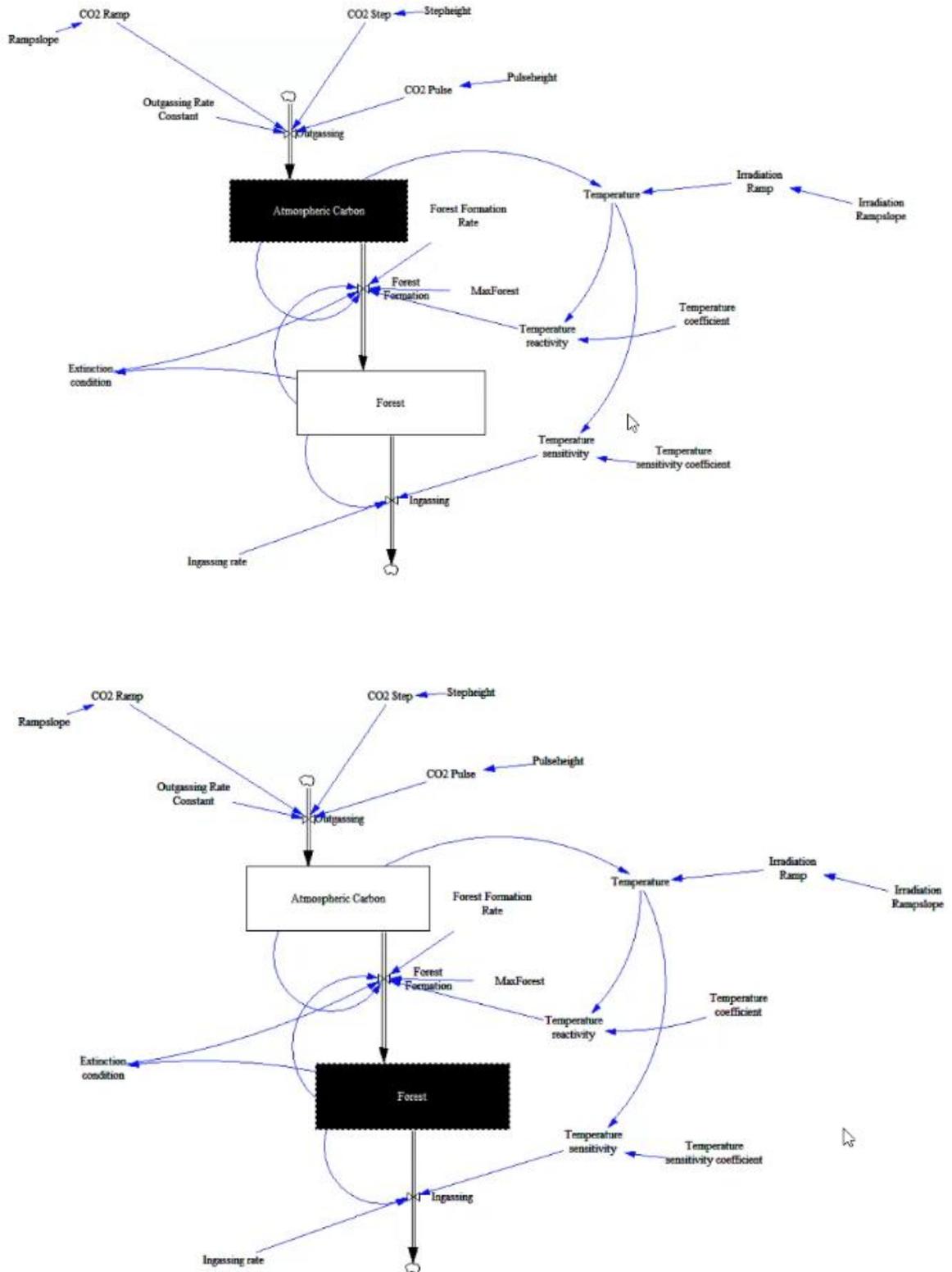
Questo tipo di matematica si presta a essere utilizzata per sistemi che si evolvono non linearmente. In presenza di altri sistemi in cui e è una certa energia (per esempio metabolica), si avrà una **catena trofica**, ovvero quella catena nota in biologia in cui l'energia parte dal sole, arriva nelle piante, negli erbivori, nei carnivori e nei parassiti. Costruendo una catena trofica, ci si rende conto che il sistema tende all'**omeostasi**, ovvero al quel fenomeno che manca agli esseri umani quando parlano di resilienza; anche in presenza di metodi, seppur semi quantitativi, **non si è ancora compreso come si forma la resilienza**.

Il modello di **Lotka-Volterra** (detto anche "modello dei conigli e delle volpi"), uno dei più semplici sistemi di controllo non pianificato da nessuno ma che nasce da sé, dimostra che ogni sistema di controllo è basato

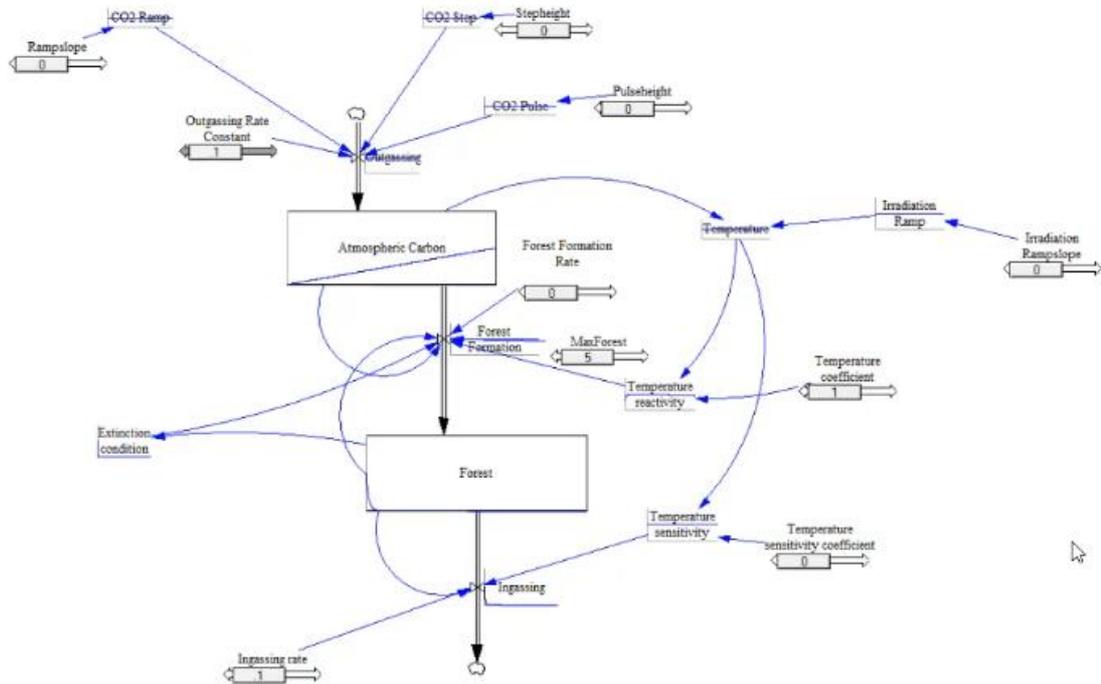
sulla memoria precedente e quindi si controlla da sé. Tale descrizione è un elemento chiave nel contesto della Teoria del controllo (cd. **Teoria della governance**), fondata sulla ricerca di metodologie fini a stabilire dei limiti; parallelamente, il limite di una catena trofica sono gli stati con cui è connessa.



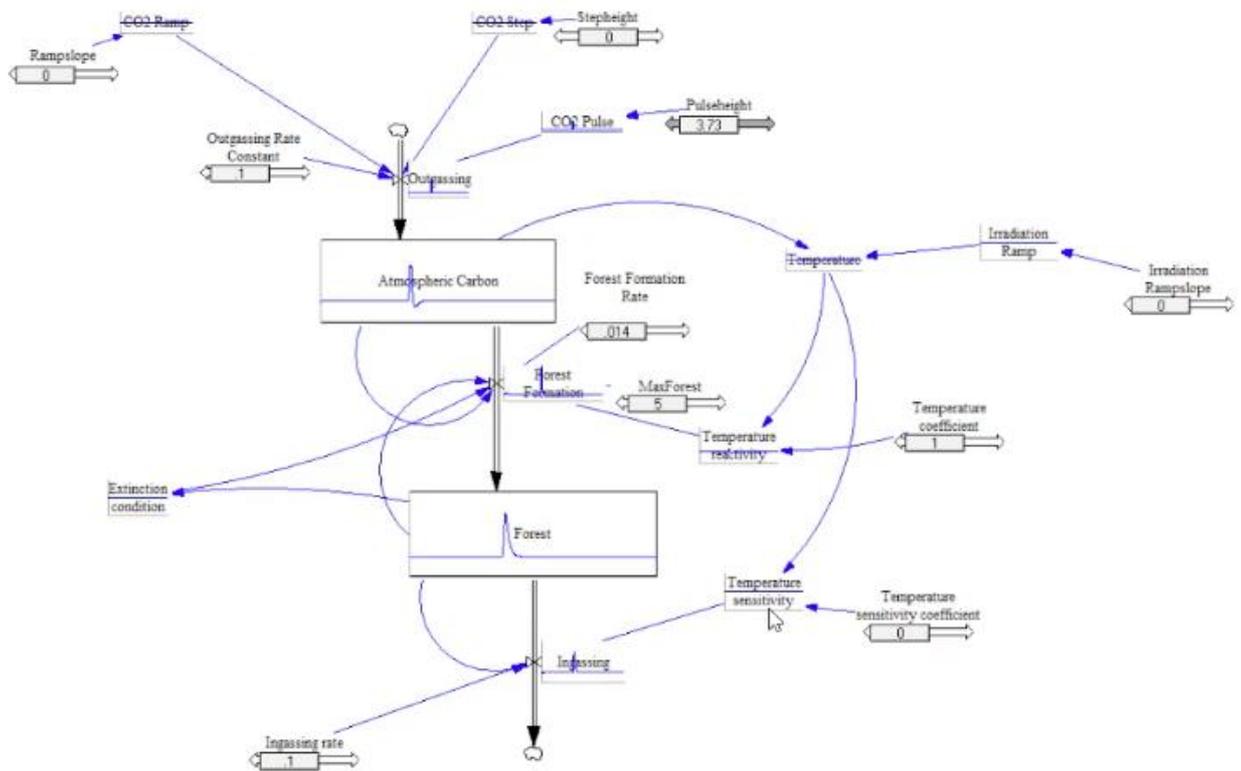
Nello schema ci sono **due stock**: il carbonio atmosferico (CO₂ principalmente) e una foresta (biosfera).



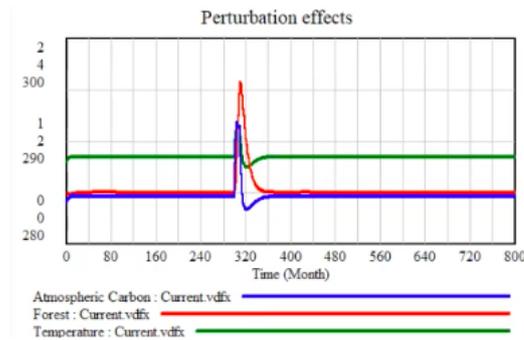
Si tratta di un modello molto **aggregato, ma dinamico.**



Il carbonio atmosferico viene dall'*outgassing* dei vulcani. Nella condizione in cui tutti i coefficienti sono 0, l'atmosfera accumula carbonio all'infinito perché non ci sono elementi che lo assorbono (come se si potesse pensare di gonfiare un palloncino all'infinito). Questo nella realtà non avviene, perché l'atmosfera non contiene più di 400 parti per milione di carbonio: infatti, aumentando la formazione delle foreste, il carbonio viene stabilizzato perché trasformato in carbonio calcitrante (che non ha effetti sul clima), creando così l'omeostasi. Bruciando i combustibili fossili, questi fanno arrivare all'atmosfera un impulso che fa aumentare la foresta, la quale lo ristabilizza – è quello che sta succedendo: stiamo vivendo un **rinverdimento planetario** perché le foreste stanno assorbendo il carbonio nell'atmosfera espandendosi e riuscendo dunque a controllarlo.

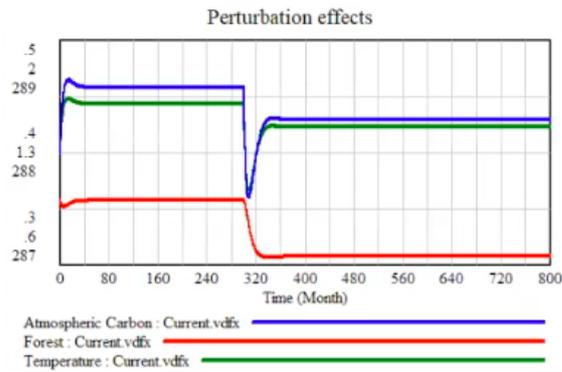


Gli **effetti della perturbazione** sono i seguenti:



Il blu è il carbonio atmosferico che ha avuto l'impulso verso l'alto, rappresentando l'emissione negli anni (non nei mesi). L'impulso sale, la foresta aumenta corrispondentemente, la temperatura aumenta e poi ridiminuisce e tutto torna come prima perché il sistema è in omeostasi e si auto-regola grazie a una sua logica, a un suo sistema ciclico che si oppone alle perturbazioni. È evidente come il sistema ha una sua omeostasi che corrisponde alla capacità dell'ecosistema terrestre di gestire le perturbazioni.

Cosa succede se riduciamo la concentrazione di CO₂ nell'atmosfera?



La foresta si contrae per compensare la mancanza di CO₂ nell'atmosfera. Questo rappresenta più o meno quelli che sono gli effetti delle recenti Ere glaciali: siamo in una condizione in cui probabilmente l'*outgassing* geologico è un po' più basso che in epoche passate, per cui vediamo questo effetto di inaridimento di ampie aree del Pianeta.

In conclusione, **la governance o il controllo sono importanti perché se non capiamo i sistemi complessi non riusciremo a gestirli bene, come non li stiamo gestendo bene oggi.**

Bibliografia

- BARDI U. (2019), *Before the Collapse. A Guide to the Other Side of Growth*, Springer Nature, Switzerland
- BARDI U. (2017), *The Seneca Effect, Why Growth is Slow but Collapse is Rapid. A Report to the Club of Rome*, Springer Nature, Switzerland
- BARDI U. (2011), *The Limits to Growth Revisited*, Springer New York Dordrecht Heidelberg, London
- CERUTI M. (2020), *Abitare la complessità. La sfida di un destino comune*, Mimesis, Sesto San Giovanni
- CERUTI M. (2020), *Cento Morin. 100 firme italiane per i 100 anni dell'umanista planetario*, a cura di, Mimesis, Milano
- CERUTI M. (2020), *Racconti dallo spazio. Per una pedagogia dei luoghi*, a cura di, con Emiliana Mannese, Pensa MultiMedia, Lecce
- CERUTI M. (2020), *Sulla stessa barca*, prefazione di Edgar Morin, Edizioni Qiqajon, Magnano
- CERUTI M. (2020), *(S)confinamenti. Esperienze e rappresentazioni della globalizzazione*, a cura di, con Guido Formigoni, Il Mulino, Bologna
- CERUTI M. (2018), *Il tempo della complessità*, prefazione di Edgar Morin, Raffaello Cortina, Milano
- CERUTI M. (2015), *La fine dell'onniscienza*, prefazione di Giulio Giorello, Studium, Roma
- CERUTI M. (2008), *Evolution without Foundations*, Hampton Press, Crosskill – New York
- CERUTI M. (2004), *Educazione e globalizzazione*, con Gianluca Bocchi, prefazione di Edgar Morin, Raffaello Cortina, Milano
- CERUTI M. (2003), *Formare alla complessità*, con Matilde Callari Galli e Franco Cambi, Carocci, Roma
- CERUTI M. (1998), *Pensare la diversità. Per un'educazione alla complessità umana*, con Matilde Callari Galli e Telmo Pievani, Meltemi, Roma
- CERUTI M. (1990), *Che cos'è la conoscenza*, a cura di, con Lorena Preta, Laterza, Roma – Bari
- CERUTI M. (1988), *Semplicità e complessità / Simplicité et complexité*, a cura di, con Edgar Morin, Mondadori, Milano

- CERUTI M. (1986), *Il vincolo e la possibilità*, prefazione di Heinz von Foerster, Feltrinelli, Milano; nuova edizione (2009), Raffaello Cortina, Milano
- CERUTI M. (1985), *La sfida della complessità*, Feltrinelli, Milano; nuova edizione (2007), a cura di, con Gianluca Bocchi, Bruno Mondadori, Milano
- CERUTI M. (1984), *Modi di pensare postdarwiniani. Saggio sul pluralismo evolutivo*, con Gianluca Bocchi, Dedalo, Bari
- CERUTI M. (1983), *L'altro Piaget. Strategie delle genesi*, a cura di, con Gianluca Bocchi, Donata Fabbri Montesano e Alberto Munari, Emme Edizioni, Milano
- CERUTI M. (1981), *Disordine e Costruzione. Un'interpretazione epistemologica dell'opera di Jean Piaget*, con Gianluca Bocchi, Feltrinelli, Milano
- FORRESTER J., MEADOWS D., RANDERS A., ANDERSON A., ANDERSON J., BEHRENS III W., NAILL R. (1972), *I limiti dello sviluppo*, prefazione a cura di Aurelio Peccei, Mondadori, Milano
- MITCHELL M. (2011), *Complexity. A guide Tour*, Melanie Mitchell, OUP USA, New York
- MOBUS G., KALTON M. (2014), *Principles of System Science*, Springer Nature, New York

Sitografia

- BARDI U., *The Seneca Effect*, Ugo Bardi. In rete: [blog](#)
- <https://futuranetwork.eu/interventi-e-interviste/638-2648/la-lezione-dimenticata-ritorno-al-futuro-con-la-rivista-oikos>