

Matematica e Senso. Per non divenir macchine

Presentazione del libro e introduzione al corso

Giuseppe Longo¹

Il primo argomento che voglio affrontare riguarda il riconoscimento di una caricatura, da cui comincia anche il mio libro. Consideriamo quel tratto di Plantu che evoca il presidente Chirac con una sola linea, lo fa tracciando quelle che René Thom chiamava le pregnanze.



Thom attraverso la sua geometria, come analisi della morfogenesi, in particolare con l'uso delle “singolarità geometriche” da lui classificate (nota come Teoria delle Catastrofi), ha descritto le salienze, cioè le forme rilevanti di una dinamica o di un'immagine, e distinto queste dalle pregnanze, elementi significativi di una memoria costruita attorno a quello che “ha senso”, ovvero ciò che riconosciamo: nell'incontrare un vecchio amico, ad esempio, riconosciamo dopo anni il sorriso, il piegarsi degli occhi – delle pregnanze, ricche di ricordi e senso per noi, in un viso le cui salienze possono essere molto o del tutto cambiate. Pongo una questione: può una macchina riconoscere le pregnanze? In realtà le macchine, quelle che funzionano cioè i software di *deep learning*, riconoscono solo salienze. Queste forme che vengono distillate nell'interazione, sono spesso in qualche modo guidate, in particolare dall'etichettatura di migliaia di immagini precedenti tramite gli strumenti informatici. Le tecniche di deep learning, attraverso matematiche non banali (filtraggio, convoluzione, metodi non-lineari,...) riescono a costituire degli invarianti². Il riconoscimento di una caricatura evidentemente è un caso diverso: l'artista ci racconta solo le pregnanze, quel che dà senso al personaggio, il suo modo di “porsi” di fronte agli altri (*le coup de menton* di Chirac, dicevano i francesi). Al di là dell'esempio specifico, possiamo dire che noi animali in generale riconosciamo quasi solo caricature. Quando incontriamo un altro animale, quello che ci interessa è l'atteggiamento, l'attitudine, la postura. L'aggressività, il sorriso,

¹ Giuseppe Longo (CNRS, ENS Paris) è un matematico, specializzato in logica e calcolabilità, ed epistemologo. Da una quindicina d'anni i suoi lavori si concentrano sulle relazioni tra matematica e scienze naturali, con particolare interesse alla biologia evuzionista e dell'organismo.

² Un invariante è una grandezza numerica calcolabile e in grado di caratterizzare una classe di oggetti. Il valore calcolato sarà cioè invariante su tutti gli oggetti con una certa proprietà comune.

l'apertura. Per me quindi la costruzione di senso deriva da un intreccio di attitudini e relazioni, da gesti “protensivi” – come si “va verso...”. Pensiamo ad un bambino: questi non riconosce un gatto per averne visti migliaia tramite immagini etichettate, come le macchine del deep learning, ma basta che una volta si avvicini impaurito e guidato da un genitore a un gatto, osi carezzarlo, e ricorderà per sempre cos'è un gatto. E capisce anche in quel momento perché la mamma lo chiama “gattino mio”. E' questo intreccio di significati che ci permette di dar senso al nostro essere umani con un corpo, nello spazio, in una storia condivisa.

Questo lo dico riconoscendo che c'è stata una vera e grande svolta nell'intelligenza artificiale. Il filone delle reti neurali, il connessionismo, cioè l'approccio oggi più di successo, già negli anni '90 ha cominciato a lavorare in maniera lontana dall'approccio classico e dai vecchi filoni dominanti dell'intelligenza artificiale. I metodi classici partivano da un approccio assiomatico all'intelligenza ed al mondo e dalla deduzione formale, e avevano risultati concreti abbastanza poveri. Per molti anni l'approccio connessionista è stato osteggiato, Rosenblatt che aveva fatto le prime proposte negli anni '50 era stato emarginato. Negli anni '90 LeCun ed altri cominciano a lavorare produttivamente alle reti matematiche di neuroni, ispirati dal fatto che il cervello stia in un spazio tridimensionale, hanno provato a posizionare su più strati le reti bidimensionali di Rosenblatt, inventando i nuovi metodi oggi di successo – di *Deep Learning*, perché in tre dimensioni. C'è quindi una grande differenza dalla tradizione logico-deduttiva precedente³.

Nonostante questo, si tratta ancora di macchine, e il cervello non è una macchina. Il cervello funziona solo nel suo ecosistema preferito (il cranio di un animale con un corpo ed all'interno di un ecosistema) ed è sempre attivo, non si spegne. Come gli arti e le altre parti del corpo. Si tratta già di due grandi differenze rispetto alle macchine informatiche. I vincoli e la frizione con l'esperienza reale dell'organismo nel mondo, canalizzano l'attività del corpo e del cervello. Addirittura il darwinismo neuronale ci ha mostrato che nell'ultima fase dell'embriogenesi e nelle prime settimane dalla nascita, c'è un'esplosione delle connessioni neurali che successivamente vengono selezionate e in gran parte eliminate, Edelman (1987). L'opposto di una macchina informatica, dove le connessioni sono fissate una volta per tutte prima dell'incontro con il mondo. Il corpo umano è una macchina che in una condizione di deprivazione

³ La traduzione logico-deduttiva del cosiddetto approccio assiomatico presupponeva di poter dedurre le scelte di una macchina a partire da pochi assiomi o regole fondamentali, e calcolando l'albero di tutte le possibili sequenze di mosse dedurre la più efficace in ogni situazione. Nell'approccio connessionista, invece, il calcolatore ripete molte volte sequenze di mosse che rispettano le regole iniziali senza curarsi di prevedere gli esiti. Successivamente “etichetta” i risultati (ad esempio gli esiti delle partite di scacchi) dando quindi un diverso valore alle sequenze di mosse utilizzate (se costruisce da sé, iterando le esperienze, le etichette, si parla di *Deep Learning* senza supervisione). Questo è reso possibile in particolare dalle *reti neurali*, architetture matematiche che prendono spunto dall'osservazione della struttura “reticolare” dei circuiti neurali, almeno nelle due dimensioni, ma non ne modellizzano la struttura, tanto meno l'effettivo funzionamento: il cervello non è fatto a strati di reti bidimensionali identici che alternano filtraggio e convoluzione. Lo spunto “realistico” (di modellizzazione) di Rosenblatt si perde nelle tre dimensioni.

sensoriale, impazzisce a causa di una super-attività cerebrale, non più canalizzata dalle contingenze concrete incontrate dal e grazie al corpo⁴.

Su questi temi esistono dei miti ricorrenti. Uno è per esempio quello della macchina a guida automatica: noi umani non guidiamo riconoscendo tutte le configurazioni possibili come fa ad esempio una Tesla, noi guidiamo come si va a caccia, cioè anticipando tutto quello che si muove, ovvero, anche grazie alle saccadi oculari che precedono le traiettorie, tracciamo la traiettoria di inseguimento e ci troviamo dove la preda deve arrivare od evitiamo il predatore. Quindi le macchine a “guida automatica” non stanno guidando nel senso in cui lo facciamo noi, ma lo chiamiamo comunque “guidare” – per ora funzionano malissimo ovvero non sono affatto “autonome”. Questo appunto per me è una costruzione di miti sull’intelligenza artificiale, un’iterazione di promesse e di analogie che restano confuse.

Passiamo alla questione del lavoro umano.

«La macchina può sregolarsi e presentare quindi le caratteristiche di funzionamento analoghe alla condotta folle di un essere vivente. Ma non può ribellarsi. La ribellione, infatti, implica una profonda trasformazione dei fini del comportamento, e non uno sregolamento della condotta.» Simondon (2007)

Questa citazione di Simondon ci dà il senso di un mondo costruito intorno a questi miti, un mondo che tende a canalizzarsi su comportamenti protocollari. L’iterazione del gesto come lo fa la macchina vuole essere proposta come forma di vita. Pensate al ruolo che viene dato ai giochi, al *battage* pubblicitario fatto quando Deep Blue batte Gasparov a scacchi: si trattò di una grossa impresa, c’era tutta la storia degli scacchi resa accessibile alla macchina, Gasparov si è trovato a giocare contro una gestione intelligentissima delle strategie usate in 100 anni di scacchi. Con Alpha Go è stato un po’ diverso, i sistemi di deep learning erano più maturi e la macchina imparava ad intraprendere una dinamica di configurazioni originale, e la vittoria in quel caso è stata schiacciante. La macchina ha costruito percorsi di ottimo in spazi di fasi (parametri ed osservabili) immensi, provando e riprovando, imparando per così dire dalle costruzioni di strategie fatte, comparandole anche giocando contro se stessa.

Che commenti sono scaturiti da queste vicende? Il messaggio principale è stato di dire a giovani che passano molto tempo di fronte a uno schermo che la macchina batte i migliori campioni nei più difficili dei giochi: voi siete delle nullità rispetto a tutto ciò, dovete accettare ogni condizione di lavoro altrimenti vi rimpiazziamo con delle macchine.

⁴ Si veda il dibattito con Alain Supiot, Stephane Mallat, Bernard Stiegler ... al Collège de France, in cui abbiamo discusso di queste questioni: <https://www.college-de-france.fr/agenda/colloque/le-travail-au-xxie-siecle-droit-techniques-ecoumene/table-ronde-la-revolution-numerique>

Allora ovviamente questo rimpiazzamento degli umani da parte delle macchine può avvenire in alcuni mestieri, ma l'idea dopo Deep Blue sul finire degli anni '90 era quella di vendere questi sistemi per utilizzarli in altri campi, diversi dagli scacchi. Ma questi usi diversi in effetti non ci sono stati. Lo stesso per Alpha Go: nel 2016 il Houston Cancer Center ha comprato un cugino di Alpha Go, Watson, per l'aiuto nella diagnosi e nella prognosi del cancro. Nella primavera del 2021 dopo aver speso 50 mln di dollari, hanno buttato il programma, non ci hanno fatto niente. Una totale non-trasferibilità della tecnica⁵.

La difficoltà di muovere una macchina da un ambito a un altro corrisponde in realtà a qualcosa di teoricamente molto profondo. Partiamo dalla considerazione che questi sistemi funzionano sempre tramite metodi di ottimizzazione, almeno tutte le volte che usano metodi matematici nel continuo (*wavelets*, normalizzazione...), ovvero in spazi di fasi molto grandi e complessi si cerca di ottimizzare una funzione, generare una traiettoria ottimale ("estremale"). L'operazione svolta dalla macchina corrisponderà allora al valore minimo (o massimo) che tale funzione può assumere, localmente o globalmente. Un risultato non banale, Ben-David et alii (2019), dimostra che l'esistenza dell'ottimo è equivalente all'ipotesi del continuo in teoria degli insiemi, si tratta quindi di una prova di "indimostrabilità" di detta esistenza. In breve, questo risultato vieta l'esistenza di metodi uniformi ed effettivi per costruire gli ottimi: nel quadro matematico adeguato a questi metodi, la teoria degli insiemi, per ogni nuovo problema ci vuole una tecnica *ad hoc*, ovvero, appena si cambia ambito in un modo significativo, abbiamo bisogno di un matematico che costruisca una nuova tecnica di ottimizzazione. Oltre quindi l'evidenza, c'è quindi un limite matematico intrinseco, per cui una volta costruito Alpha Go, un programma complesso e difficile, esso è capace di giocare solamente a Go o ben poco altro.

Esiste da parte di molti comunque uno stupore per la creatività e la complessità di questi programmi. Facciamo un'analogia prendendo un argomento che all'apparenza è molto distante, consideriamo le nuvole: le superfici delle nuvole prendono forme in spazi molto complicati, determinati da umidità, correnti, temperature, ecc., rispettando sempre dei principi di ottimo – sono delle superfici geodetiche, matematicamente parlando. Se qualcuno rintraccia nelle nuvole il profilo di un parente, il naso dello zio, sempre forme imprevedibili, nuove, questo non significa che la nuvola sia "creativa". Avviene lo stesso quando parliamo di "creatività delle macchine", che come le nuvole, seguono percorsi di ottimo, con un aggiunta di aleatorio quando necessario (esplorazioni con metodi di detti Montecarlo, la prima esperienza didattica, come matematico, dell'autore di questa nota). L'impredittibilità di traiettorie in dinamiche complicatissime, non lineari, in spazi di parametri

⁵ Contro le promesse che ci assicuravano che con Deep Blue e Alpha Go si sarebbero risolti mille problemi, fatte mille cose, nel libro racconto i fallimenti di varianti, come quello di Watson, venduto a caro prezzo come ausilio nella cura del cancro. Più di recente, si è osservato che Alpha Go non sa giocare, come sa fare ogni buon giocatore, sulle vecchie "scacchiere" a 17 caselle, invece delle 19 moderne... bravissimi colleghi, esseri umani esperti, riusciranno di certo e presto a parametrare la macchina su ogni dimensione della scacchiera.

immensi, nuvole o macchine che siano, non ha nulla a che vedere con l'invenzione di nuovo senso, la "creatività" che è l'invenzione di nuovi possibili, l'immaginare nuove configurazioni di senso. La questione sta nel tipo di sguardo che indirizziamo verso le macchine e i loro processi, come quando guardiamo le nuvole: loro non inventano nulla, noi vi leggiamo con sorpresa il profilo della zia. Le nuvole di molta pittura tardo rinascimentale italiana, che, se tormentate, esprimono la sofferenza del mondo al cospetto della morte di Cristo in croce, quelle sono creazione dell'artista, ricca di senso.

Un altro mito che voglio prendere in considerazione è quello dei *big data*: la credenza cioè nelle enormi possibilità permesse dall'esistenza di immense basi dati come sostitutive della comprensione, vedi della teorizzazione; è indubbio che si tratti di una grande ricchezza, ma non è possibile rimpiazzare la costruzione teorica, con cui noi cerchiamo di dar senso a questo o quel processo, con l'individuazione di correlazioni ad opera delle macchine. Esiste un risultato classico in teoria combinatoria dei numeri⁶: consideriamo una regolarità, ad esempio una sequenza lineare⁷, allora esiste un numero N tale che ogni insieme di dati di cardinalità almeno N contiene la regolarità selezionata. E questo è vero anche per dati ottenuti in maniera aleatoria, ad esempio lanciando dadi. Ovvero, scelta comunque una regolarità, se si prendono insiemi di numero abbastanza grandi, questi la contengono di certo, Calude, Longo (2017). Quindi, utilizzando la matematica, vediamo che è vero l'opposto della mitologia qui sopra: più dati abbiamo, più esistono regolarità spurie, cioè insensate. Oltre il nostro risultato in nota, su internet è possibile trovare una lista di queste correlazioni spurie, raccolte in chiave ironica, sul sito *Spurious Correlations*.⁸

Questi sono solo esempi, ma voglio sottolineare che la costruzione di senso umano è una priorità anche nella proposta di una conoscenza scientifica, e dietro alcuni discorsi ricorrenti ci sono fallimenti nella comprensione di cos'è la costruzione scientifica e la costruzione di senso.

Voglio adesso riprendere il filo di una storia, quella dei fondamenti della matematica, che in queste vicende credo abbiano avuto un ruolo enorme. La discussione sui fondamenti è stata un prodromo al discorso del nuovo meccanicismo che ha caratterizzato la seconda metà del ventesimo secolo, anzi forse è stata il primo motore di queste nuove visioni.

Perché verso la fine dell'800 inizia una discussione sui fondamenti della matematica? In quel periodo ha luogo una crisi catastrofica nel rapporto allo spazio. Fino all'arrivo delle geometrie non euclidee e a Riemann, non esisteva dibattito sui

⁶ La combinatoria è quella branca della matematica che si occupa dei metodi di conteggio e del calcolo di probabilità o ricerca di regolarità su insiemi finiti o numerabili.

⁷ Una sequenza lineare è una successione numerica tale che la differenza tra due termini successivi è sempre la stessa.

⁸ <https://www.tylervigen.com/spurious-correlations>

“fondamenti”: la matematica era fondata sulla geometria di Euclide in spazi cartesiani. Il rapporto al mondo era chiaro, come dice Galileo: l’universo è scritto in un linguaggio matematico basato sulle forme euclidee – cerchi, quadrati...; anche la costruzione newtoniana si basa sugli stessi principi, non c’è dubbio sul fatto che lo spazio sia quello di Euclide e Cartesio.

Gauss, Lobacevskij, Bolyai, cominciano a pensare spazi curvi. Possono farlo perché, venuta meno la solidità del quinto postulato di Euclide, si sa dare modelli che lo negano, crolla la certezza nella costruzione dello spazio. Frege propone che in questa situazione di “delirio” ci si rivolga all’aritmetica, e si fondi la matematica sull’induzione aritmetica e la logica. Hilbert riprende questo discorso, propone di codificare le geometrie nell’aritmetica e di ricercare una dimostrazione di coerenza dell’aritmetica. Questa dimostrazione di coerenza formale (non contraddittorietà) andrebbe a sostituire la ricerca di senso geometrico. Si tratta insomma di una proposta che trasferisce nell’aritmetica il rapporto tra geometria e spazio, tramite codifiche delle proprietà spaziali in numeri. Quindi l’aritmetica si assume la responsabilità della validità delle teorie geometriche, tramite la sua coerenza, cioè la non-contraddittorietà.

Il salto di paradigma quindi ha due aspetti centrali:

1. si perde il rapporto tra geometria e spazio, visto che alla geometria è richiesta solo una prova di coerenza logica;
2. si riporta il problema dei fondamenti all’aritmetica, quindi in un certo senso si torna a Pitagora, dando a questa il ruolo di fondamento ultimo del mondo.

Questo programma va presto incontro a una *débaçle*, perché Godel dimostra con metodi finitistici (cioè con gli strumenti stessi dell’aritmetica) che l’aritmetica non è dimostrabilmente coerente né completa. Dimostra cioè che esistono asserti di cui non può essere provata la validità, ma dei quali è impossibile provare anche la negazione, e fra questi c’è l’asserto di coerenza.⁹

La proposta di Hilbert era molto ambiziosa: non potendo più trovare una coerenza (ed un senso) alla geometria nel rapporto allo spazio, ci si rivolge all’aritmetica. È una proposta potente anche perché risolve il problema dell’ontologia in matematica: alla domanda “esistono gli oggetti matematici?” “Le rette, i cerchi... , sono nella mente di Dio?” Hilbert risponde che è sufficiente la coerenza della teoria che ne tratta. Quindi se dimostro l’esistenza di un oggetto in una teoria coerente, questa è la sua esistenza senza bisogno di altre ontologie. Si tratta di una svolta, perché da Platone a Sant’Agostino fino a Galileo c’era sempre stata un’ontologia: i triangoli sono nella mente di Dio o comunque pre-esistono al mondo, così come pensano anche oggi molti colleghi matematici. Questo atteggiamento è comprensibile perché il matematico “vede” gli oggetti matematici, e quindi è portato a pensare ad una loro

⁹ Il primo teorema di incompletezza afferma che per ogni teoria T sufficientemente espressiva da contenere l’aritmetica di Peano, se T è coerente esiste una formula f tale che né f né la sua negazione “non f”, possono essere dimostrate. Il secondo teorema di incompletezza afferma che se T è coerente, non è possibile dimostrare la coerenza di T con i metodi di T, ovvero con procedure “finite” o codificabili in aritmetica.

solidità ontologica. La ricchezza e originalità filosofica della svolta linguistica hilbertiana sta nella possibilità di fare a meno di questa ontologia: la scrittura degli assiomi e il calcolo deduttivo sono fondanti di per sé, come calcolo dei segni, e proprio perché “senza senso” danno certezza, a differenza delle ambiguità dello spazio geometrico, del “delirio” delle geometrie non-euclidee.

Con Hilbert sono i segni, la manipolazione formale, numerica, di stringhe, a diventare il fondamento della matematica. Un processo “potenzialmente meccanizzabile”, come dice lo stesso Hilbert nonostante non abbia ancora nessuna macchina aritmetica. Sta pensando alla macchina alfabetica, od alfa-numerica astratta. Questa possibilità di riproduzione meccanica di un processo è per Hilbert la “soluzione definitiva”, finale, al problema dei fondamenti, una cosa un po’ lugubre da dire in Germania negli anni ‘20. Per fortuna nelle scienze non esiste una soluzione finale.

Quindi questo filone ha una proposta epistemologica, solida e potente ma con qualcosa di terrificante: distaccare l’attività della matematica dal senso, fondarla proprio in quanto priva di senso. Si apre in questo modo la via alla macchina numerica, all’informatica.

Negli anni ‘30 i fondatori della teoria della calcolabilità, come Church e Turing, diranno cos’è questa macchina hilbertiana. Nel ‘35 Turing, con grande fantasia, “si fa” macchina (si veda la “lettera a Turing”, in appendice al mio libro, Longo (2022)), concepisce l’idea che con un foglio quadrettato ed una serie di operazioni semplici (scrivere 0,1, spostare a destra o sinistra il luogo di scrittura), si possano fare tutti i calcoli e deduzioni effettivi cui pensava Hilbert, e ci indovina – la sua macchina risulterà massimamente espressiva per il calcolo effettivo, non si può far di più. Poi, riesce a scrivere una funzione aritmetica che non si può calcolare. Un risultato negativo che dà l’impulso alla teoria della calcolabilità, Rogers (1967): al fine di dimostrare che non tutte le funzioni sono calcolabili, è necessario definire cosa sia precisamente una funzione calcolabile. Anche Church e Gödel definiscono in modi diversi (meno semplici) classi di funzioni non calcolabili, che poi si riveleranno equivalenti alla classe definita da Turing.

Quindi è stato individuato un grande invariante, quello di funzione calcolabile, che dà un senso matematico al fatto di essere potenzialmente meccanizzabile: significa essere esprimibile tramite una funzione calcolabile. Questo è stato possibile a partire da un risultato negativo, perché il fatto che esistano funzioni non calcolabili rende necessario definire con precisione la calcolabilità, come dicevo. Procedure algoritmiche sono sempre esistite, ma quando si riesce a esprimere con precisione un risultato negativo nell’ambito della calcolabilità, nasce l’idea di macchina.

Questa nuova idea di macchina è molto potente, Turing stesso se ne rende conto. Nel suo primo articolo parla di una macchina ingenua e semplice, che proprio per questo è molto potente. L’articolo del ‘50 “il gioco dell’imitazione”, un articolo molto bello, è purtroppo letto e divulgato oggi quasi soltanto da teorici dell’intelligenza artificiale: è un elemento cruciale della discussione nel mio libro Longo (2022), e ne parlo a lungo

nella “lettera a Turing” che conclude il testo. Nell’articolo c’è un osservatore che tramite uno strumento di comunicazione deve capire se sta interagendo con una macchina o con una donna. Si può sentire il dramma di Turing, omosessuale, che sa che nell’Inghilterra di quegli anni, la polizia può chiedergli in ogni momento : sei un uomo o una donna? Le domande sono del tipo “hai i capelli lunghi o corti?” “sai scrivere una poesia?” - banalità, riconosciamolo. Poi gli chiede di sommare grossi numeri. E la macchina, nella Cambridge misogina degli anni ‘50, per imitare una donna deve sbagliare quel calcolo. Nello sviluppo di questo gioco introduce osservazioni che poi saranno fondamentali nell’articolo sulla morfogenesi. Ad esempio osserva che la macchina ha un comportamento stabile, è “laplaciana”, dice, ovvero predittibile, mentre nei fenomeni non macchinici lo spostamento di una particella di un millesimo di millimetro può causare la morte di un uomo per una valanga l’anno successivo, dice con grande insight per l’epoca – quello che Lorentz chiamerà negli anni ‘70 l’effetto farfalla. Invece, quasi tutti i fenomeni fisici sono sensibili alle condizioni iniziali ed al contorno – la sua macchina non lo è, scrive. Ed in effetti ne realizziamo di straordinariamente stabili: iterano sempre in modo identico.

L’articolo sulla morfogenesi a mio avviso è un vero capolavoro. Di nuovo, con un estremo gusto della semplicità, Turing concepisce sistemi di equazioni non lineari nel continuo che diventeranno un pilastro nello studio della generazione delle forme. Si tratta di processi di tipo fisico che si presentano nel vivente. Si applicano benissimo ad esempio alla formazione dei colori, nelle diffusioni di tipo chimico, alla costruzione di conchiglie. Cioè ai fenomeni legati alla materia inerte prodotta dal vivente. L’articolo sulla morfogenesi verrà ignorato per vent’anni. Evelyn Fox Keller sostiene che fino ai suoi lavori del ‘71-’72 nessuno praticamente aveva citato l’articolo del ‘52 di Turing. Dalla fine degli anni ‘90 in poi invece è diventato un grande riferimento per i lavori di morfogenesi “di tipo classico”. Qui è importante fare una precisazione. Come già dicevo esiste una impostazione classica dell’intelligenza artificiale che consiste nel fornire una teoria assiomatica del mondo al robot, che dovrebbe dedurre tutto ciò che gli è necessario a partire da questa teoria assiomatica. Queste tecniche poco funzionanti sono state spazzate via da altre tecniche come il deep learning, delle reti di neuroni a molti strati, che (anche se hanno limiti di cui proviamo a parlare) sono state una vera svolta. La loro dinamica di forme è più vicina alla morfogenesi del ‘52.

In biologia ci troviamo però ancora al livello dell’intelligenza artificiale classica. Il libro del 2017, Doudna, Sternberg (2017),¹⁰ con Doudna poi vincitrice del Nobel per la chimica nel 2020, parte enunciando il dogma centrale della biologia molecolare: il DNA è una stringa nella quale è programmata l’ontogenesi; si tratta quindi di un’impostazione assiomatica della biologia. L’informazione fluirebbe dal DNA al corpo, che ne dedurrebbe l’ontogenesi come da un *software*. Il libro di Doudna ci

¹⁰ A proposito del libro si veda Longo (2021).

dice che possiamo riprogrammare l'evoluzione, e Isaacson (2021), suo seguace scrive un altro libro apologetico. E le questioni vengono poste nei termini di promesse grandiose: cambiamento climatico? Possiamo riprogrammare il genoma umano per sopportarlo – dice Isaacson.

Questi filoni ancora dominanti si muovono all'interno di un paradigma formalista che presuppone la coerenza del sistema assiomatico che sarebbe contenuto nel DNA, e la sua completezza. La coerenza perché appunto il codice contenuto nelle molecole di DNA sarebbe in grado di trasferire un'informazione non contraddittoria. Per completezza invece si intende che ogni struttura macromolecolare sintetizzabile dall'organismo, è codificata in modo univoco dal codice genetico. La completezza suppone la stereospecificità esatta delle interazioni macromolecolari che avvengono nell'organismo: per stereospecificità si intende la proprietà di una reazione di determinare univocamente la configurazione chimico-geometrica delle molecole prodotte a partire dalla configurazione chimico-geometrica delle molecole reagenti. Monod lo dice esplicitamente in un libro del '71: è *necessario* che le interazioni macromolecolari siano stereospecifiche in modo esatto per trasmettere informazioni. Invece, queste interazioni di enormi molecole con enormi oscillazioni entalpiche possono essere trattate solo in maniera statistica e non c'è modo di conoscere sempre la geometria dei prodotti a partire da quella dei reagenti, cioè di supporre una stereospecificità esatta.

Esiste una vera e propria ideologia della scrittura alfabetica completa. Si tratta in fondo della stessa visione di Hilbert, che all'epoca portava una innovazione e si muoveva dentro processi di prova rigorosi; oggi in biologia mi sembra invece che le ipotesi dietro ai filoni dominanti della biologia molecolare siano carenti e nemmeno chiaramente esplicitate. E molte tecniche, difficili, complesse, vengono sviluppate a partire da questi filoni. Facendo un'analogia storica, pensiamo all'astronomia araba che era avanzatissima: Ibn Yunus (circa 100 DC, Egitto) era in grado di misurare la posizione delle stelle fisse con un livello straordinario di approssimazione, aveva una dettagliata conoscenza della trigonometria sferica, ma in un quadro teorico tutto sbagliato, perché tolemaico. Allo stesso modo penso che il quadro teorico degli studiosi come la Doudna sia completamente sbagliato, pur accompagnato da grande tecnicità, e penso che ne paghiamo un alto prezzo, perché di continuo ci ripetono il mito del pilotaggio dell'organismo e di terapie genetiche a venire, nonché di nuovi OGM da piantare. Trovo che una caratteristica di questa impostazione sia quella di fare principalmente promesse: il libro della Doudna è fatto per circa la metà di promesse. Per fare un confronto storico, i libri di Monod e Jacob, che al livello teorico non condivido, raccontavano i risultati scientifici, senza alcuna promessa, invece lo stile dei libri più recenti è molto diverso – si promuovono “start up”. Possiamo collegare questo fenomeno a un cambiamento anche nell'organizzazione del finanziamento della ricerca: la diffusione dei finanziamenti a progetto è collegata alla nuova abitudine di molti scienziati di fare promesse, di presentare le loro ricerche a partire da queste promesse che devono presentarsi come scommesse riuscite, tutto questo con lo scopo di poter poi essere finanziati. Fino a chi fa ricerca

solo per lanciare *start-up*, da ri-vendere quando valgono abbastanza in borsa, grazie a mille promesse, prima di qualsiasi realizzazione pratica.

Quindi siamo partiti da un discorso sui fondamenti della matematica per capire alcuni grossi filoni di dibattito tecnico-scientifico contemporanei: intelligenza artificiale e biologia molecolare. Esiste oggi un cumulo di tecniche, per questo vale la pena di parlare di tecno-scienze. Alcune di queste tecniche sono difficili e importanti, come CRISPR¹¹, straordinaria tecnica di modificazione del DNA introdotta da Doudna e Charpentier. Si tratta di un meccanismo usato dai virus, trasformato in una tecnica di laboratorio di intervento sul DNA, con un quadro teorico però molto carente. Per esempio viene spesso presentata come una tecnica di *editing esatto*, quando l'esistenza di effetti *off target* è conosciuta da tempo, dovuta al continuo movimento delle strutture molecolari. In più, l'azione di questa tecnica viene sviluppata su centinaia o migliaia di cellule contemporaneamente, e poi tramite *cherry picking* vengono scelte quelle su cui il processo ha funzionato. Ma si è costruito un tale pregiudizio dell'esattezza meccanica, che queste persone arrivano infine onestamente a mentire, cioè a non raccontare correttamente il processo tecnico, ampiamente aleatorio e con mille *side-effects*.

Voglio precisare che la storia delle tecniche di biologia molecolare di cui ho parlato è anche una storia di successi pratici e teorici. Quella che io metto a critica è l'egemonia teorica del genocentrismo, con il conseguente ostracismo di tanti che davano un ruolo alla cellula, al tessuto, l'organismo, l'ecosistema... come McClintock o Waddington. Penso che l'egemonia genocentrica abbia ritardato di decenni l'arrivo dell'epigenetica, e che esista un doppio linguaggio: in privato, quasi tutti quei biologi molecolari che scrivono libri di testo del tutto geneocentrici, riconosco che i loro "dogmi" sono errati, od approssimativi. Esistono fasi in cui "si va a tentoni", è successo nella storia della scienza che prima arrivasse una tecnica e solo successivamente una proposta scientifica solida; la condizione specifica in cui viviamo è diversa: vengono scritti e raccontati principi teorici sbagliati, anche rispetto alla costruzione effettiva delle tecniche, ed addirittura riconosciuti sbagliati da molti che continuano a farci riferimento. C'è un vuoto teorico che non si riconosce. La questione dell'onestà in scienza è difficile da isolare, la mia ipotesi è che ciò che permette di affrontare al meglio questo aspetto e ti dà delle rotaie anche etiche è l'esistenza di un quadro teorico, rigoroso, potente – è questo quel che manca in biologia dell'organismo.

Un altro concetto approfondito nel mio libro "matematica e senso" è quello della "ragionevole efficacia della matematica". Esistono alcuni gesti fondatori del nostro

¹¹ Il metodo, più propriamente denominato CRISPR/Cas9, si riferisce all'utilizzo della proteina Cas9 per "tagliare" specifici segmenti di DNA individuati tramite il sequenziamento genomico. Si tratta di una tecnica più efficiente delle precedenti, che consiste appunto nell'azione di proteine "guidate", e nella selezione a posteriori (*cherry picking*) dei filamenti genetici dove il taglio è avvenuto correttamente, eliminando quindi i casi dove si vedono effetti off-target, in area attese – ma a posteriori se ne possono trovare di totalmente imprevisi, in zone sempre nuove.

rapporto allo spazio: Poincaré diceva che valutare la distanza di un oggetto significa immaginare il movimento per raggiungerlo. Credo che la costruzione di invarianti nel movimento, e, molto dopo, nella scrittura, sia la radice del senso. E mi spingo fino a dire che anche nell’embriogenesi noi ritroviamo questa differenziazione progressiva affiancata da costruzioni di senso. L’organismo embrionale in ogni tappa del suo sviluppo è un organismo, ha una sua unità organica, nel mentre diventa un nuovo organismo, e i nuovi stimoli, i nuovi colpi (un colpo fisico, il battito cardiaco della madre o la sua voce,...) acquisiscono ogni volta un senso. Si costruisce per differenziazione a partire da una cellula, nulla a che vedere all’assemblaggio di una macchina. L’ontogenesi è la prima demarcazione nella differenza del rapporto al mondo, nel dargli senso: un pupo non si costruisce avvitando le dita su una mano, mettendo un occhio in un buco, come si fa con ogni macchina – e questo è cruciale. Questa distinzione ed altre sono al cuore del mio “Matematica e senso” – ovvero la costituzione storica del senso.

Torniamo sul tema della necessità e della contingenza. Nel ragionamento sulle specificità del vivente, ha molta importanza la nozione di finalità contingente, che intendo come un modo per cogliere la contingenza della vita, e dell’azione del vivente. C’è bisogno però di caratterizzare meglio la specificità del vivente. La più caotica delle dinamiche e il più imprevedibile dei fenomeni fisici, sono processi *necessari*: un uragano per il nostro apparato di modelli scientifici è un fenomeno che in certe condizioni si produce *necessariamente* – anche se può esser dato in probabilità. In biologia quasi nessun fenotipo¹² è necessario. C’è una contingenza del formarsi del fenotipo che è anche storicità del contesto, correlata quindi a un tipo di finalismo che è proprio al vivente: riproduzione con variazione (primo principio di Darwin). Quindi si attribuisce la riproduzione come finalità per *parlare* del vivente, così come per le funzioni degli organi, quando si dice che il polmone serve per respirare non dobbiamo attribuire a questa affermazione un valore ontologico. Un organo poteva sempre non esistere. La nascita dell’organo dà luogo poi a una nicchia ecologica, perché l’organo crea uno spazio d’azione nuovo grazie alla nuova struttura e funzione. E’ una novità contingente non necessaria, quindi un nuovo spazio di possibili. Prima dei gnateostomi non c’era l’udito, né la nuova nicchia di azione e di vita che questo ha permesso.

Tutto questo fa parte di una storia naturale, mentre la scelta della politica di prendere certe tecniche e farne miti, mi sembra situarsi su un altro piano. Tra questi forse il principale mito è quello del *technofix*: una soluzione tecnica senza scienza. Questo è il caso della biologia molecolare per esempio e le risposte che propone sulla linea degli OGM, e di alcuni campi della biologia che mancano di un quadro di esplicitazione dei principi. E questo quadro è da sempre, dai greci, ciò che noi consideriamo come il fondamento di una costruzione scientifica. La conseguenza è che in questi campi si usa un doppio linguaggio. E contemporaneamente le tecniche

¹² Il fenotipo è l’insieme delle caratteristiche manifestate da un organismo: include aspetti morfologici, funzionali, biochimici e fisiologici. Contrapposto al genotipo, cioè al bagaglio genetico dell’organismo stesso.

subiscono un enorme sviluppo e una enorme diffusione (i kit per CRISPR si comprano su internet). Ciò permette di moltiplicare le pubblicazioni e quindi di ricevere finanziamenti. Ma ovviamente può avere anche risvolti pericolosi se si sottovalutano gli effetti indesiderati di una certa tecnica – ricordo che nel 2014 l'amministrazione Obama sospese i finanziamenti di esperimenti di “gene-editing” (in particolare quella che si chiama di “gain of function”, che modifica od arricchisce le capacità di interazione/azione dei virus) e le tecniche dell'epoca erano meno potenti di oggi. La sospensione fu annullata da Trump, nel 2017.

Il libro Morand, Figuié (2016), documenta la crescita letteralmente esponenziale delle epidemie, dovute a zoonosi al 70% alla rottura di nicchie ecologiche (ad esempio, deforestazioni ed installazione di allevamenti intensivi). Invece di prepararsi fermando quei processi e attrezzando i sistemi sanitari, il mito del technofix si riproduce. Il presidente della Bayer ha dichiarato che d'ora in poi non c'è più problema, per ogni nuovo virus programmeremo un apposito vaccino a mRNA. C'è un effetto ulteriore, cioè che mentre questa mitologia è in espansione, non si parla per niente delle cause delle continue zoonosi, ma solo delle soluzioni contingenti. Si tratta quindi a mio parere di una copertura pseudo-tecnica di scelte politiche. Penso che nel caso del Covid, dal punto di vista epistemologico, non c'è una differenza sostanziale tra l'origine artificiale o naturale del virus che lo provoca: è da attribuire ad una stessa cultura della meccanicità del corpo e dell'ambiente che vengono aggrediti a piacimento. In un caso producendo un virus che può sfuggire al controllo, nell'altro con la deforestazione incontrollata e l'allevamento intensivo che causano zoonosi.

Uno dei motivi che spiegano il successo di certi miti che reputo dannosi, come quelli di una universale calcolabilità informatica (si può calcolare tutto), oppure degli abusi di metodi di ottimo, sta nell'egemonia economica di alcuni modelli finanziari. Penso che il passaggio da un capitalismo della accumulazione e l'investimento ad un capitalismo finanziario sia stato davvero cruciale. Secondo la tradizione neo-liberale la *governance* dell'economia è fatta tramite gradienti locali, questo ha un significato non solo al livello di modelli economici, ma ci dice anche che la cultura soggiacente è quella dell'ottimizzazione locale: la promessa di una soluzione immediata è vincente. Il tecnofix che omette persino di discutere le cause ne è un caso tipico: soluzione rapida e locale, senza prospettiva né progetto. Va sottolineato che comunque questo sistema di promesse fallisce continuamente, ad esempio è dalla *War on cancer* di Nixon del 1971 che vengono promesse terapie genetiche contro il cancro, e queste terapie ancora oggi non esistono. Le cause del raddoppio in 40 dell'incidenza del cancro vengono omesse (inquinamento, perturbatori endocrini, come pesticidi, plastiche nell'ambiente etc.), Thomas Zoeller et alii (2012). Esiste comunque un'egemonia tale per cui questi “insuccessi” lunghi 50 anni riescono ad essere taciuti. Io trovo che esista proprio una cultura del gradiente locale¹³, che funziona bene in

¹³ Il gradiente è il vettore definito tramite calcolo matematico che indica la direzione in cui una data grandezza si riduce. Il gradiente è nullo in un “punto stazionario” (un minimo o massimo locale, o un

fisica, ma che domina anche la cultura economica e sociale. Quindi l'ottimizzazione locale pervade pratiche che sottraggono valore all'aspetto di conoscenza e non porta a previsioni ed azioni che a breve termine. La teoria dell'evoluzione ad esempio è una teoria di conoscenza che non fa previsioni. Invece la biologia molecolare è costruita per "fare delle cose", rapidamente, e si sviluppa dentro una struttura intrecciata con interessi economici.

Andando sul concreto, nel 2019 è stato consegnato un rapporto dal centro Ramazzini per il cancro di Bologna sulla situazione di Taranto, che stima che in un'area grande come Bologna intorno all'acciaieria ci sia una mortalità da cancro del 65% invece che il 35% nazionale. Le acciaierie non sono state modernizzate per 20-30 anni perché il costo dell'ammodernamento sarebbe stato eccessivo, e avrebbe reso poco competitiva l'acciaieria. Quindi l'ottimizzazione locale della produzione dell'acciaio è stata scaricata sul lungo periodo sulla società e su qualcosa di difficilmente monetizzabile come la salute di tutta una popolazione e dei tanti morti – ma se lo si vuole monetizzare, letto il rapporto, molto informalmente, lo stimo ad un paio di miliardi, considerando il costo delle terapie – quante acciaierie si sarebbero potute rinnovare?

Per me una possibile risposta a tutto questo è la costruzione di una scienza intorno alla relazione con la natura. Penso che esista un principio di precauzione: quando il quadro teorico è sbagliato, lo strumento non andrebbe utilizzato. Dicendo questo sto esprimendo un giudizio scientifico, espellendo qualcosa dal campo delle scienze, la pratica degli OGM basata sul "dogma centrale" delle biologia molecolare. Questa è la risposta che possiamo dare all'interno dei nostri mestieri. Poi esiste una risposta di tipo politico, che necessita di mediazioni ed in questo il ruolo del giornalismo è un grosso problema. Dobbiamo però insistere sulla ricerca scientifica e sull'appropriatezza della riflessione epistemologica e filosofica, come criterio guida anche per fare queste distinzioni come "breve" e "lungo" periodo che dicevamo sopra, nel rapporto fra cumuli di tecniche e conoscenza scientifica.

Pensiamo ad esempio alla questione degli OGM: sul breve periodo funzionano, riescono a aumentare la produzione agricola, ma sul lungo periodo vediamo già oggi i loro effetti. La fascia nord del Messico aveva in passato 50 varietà di mais, ora si sono ridotte a 5, questo porta una grande fragilità in caso di condizioni climatiche avverse, come la siccità, perché riduce la resilienza agricola. Questo accade perché l'intervento di diserbanti e pesticidi non è (stereo-)specifico, non vengono uccisi solo i fattori avversi, il singolo parassito nocivo, ma anche molti altri elementi che arricchiscono il suolo, quindi sul lungo periodo si ha un suolo più povero ma nel breve periodo con i fertilizzanti della Bayer si riesce a compensare. Come ENSSER¹⁴, sappiamo da colleghi messicani, ma è difficile provarlo, che nel 2018 almeno 8 tra biologi o giornalisti scientifici che studiavano questi temi sono stati uccisi, così come molti

punto di sella). Studiando il gradiente locale è quindi possibile ottenere ottimizzazioni locali di una funzione, cioè individuare i punti dove la funzione raggiunge valore minimo in un certo intorno di prossimità.

¹⁴ European Network of Scientists for Social and Environmental Responsibility <https://ensser.org/>

campesinos od indios – ma questi chi li conta?

Dopo le tecniche in biologia molecolare, torniamo a quelle della Intelligenza Artificiale, l'altra conseguenza del mito del "tutto calcolabile", sia pure oggi con strumenti ben più fini della poverissima (e vaga) nozione di "programma" cui fanno ancora riferimento troppi genetisti (e facevano riferimento gli intelligenti artificiali classici). Sicuramente i sistemi di riconoscimento basati su tecniche di Deep Learning sono molto interessanti e sono un contributo importante alla matematica per i metodi che ne prendono e sviluppano. Lo snodo su cui porre attenzione è la nostra teoria dell'umano e della macchina. Se abbiamo delle "buone" teorie, allora i nuovi strumenti di intelligenza artificiale possono esser capiti come delle forme di exosomatizzazione interessante (per riprendere un'idea di Bernard Stiegler): come quando l'uomo inventa dei nuovi strumenti meccanici, dalla clava alla macchina utensile. Evidentemente nuovi strumenti più complessi significano un accumulo di exosomatizzazioni e modificano profondamente i rapporti umani al mondo. I limiti sono quelli di cui abbiamo già parlato. In caso contrario, il contenuto delle promesse tecnologiche rischia di essere vuoto o comunque molto diverso dalle attese. Poi vediamo come certe retoriche della promessa spesso si spengano da sole. Pensiamo all'*hype* della macchina a guida automatica, nel 2000 e nel 2015, che si è spento a causa di una serie di utilizzi di quella tecnologia con conseguenze mortali – le cito nel libro. Ma i sistemi a guida automatica non sono affatto delle banalità, già il traffico aereo è regolato da strumenti informatici molto potenti che permettono di coordinare decine di velivoli che volano nella stessa zona contemporaneamente, di controllare finemente ogni funzione del singolo velivolo. Il ruolo fondamentale in questo caso è da attribuire all'interfaccia tra uomo e macchina: è la bella invenzione dei sistemi attualmente in uso. Inoltre non siamo sicuri che un software non commetta errori (la correttezza dei programmi, matematicamente non è "decidibile", lo si può provare come conseguenza del teorema di Gödel), però coordinando diversi metodi di analisi del software, i loro sviluppatori riescono a dare buone (non assolute) garanzie sulla correttezza dei programmi di gestione del traffico aereo – ecco una tecnica che si sviluppa in un quadro scientifico. Spesso il semplice tecnico o ricercatore di Tesla che lavora alla macchina a guida automatica non sa nemmeno che c'è un problema di correttezza degli algoritmi, una grande sfida scientifica in informatica. Questa ignoranza di una parte della comunità tecnico-scientifica è quello che intendo quando parlo di mancanza di una buona teoria dell'umano e della macchina. Faccio un altro esempio: il presidente francese Macron poco tempo fa ha detto che con il 5G sarà possibile implementare le macchine a guida automatica. In particolare, ha suggerito di poter tracciare la posizione di tutti i pedoni del paese: come per gli aeroplani il cui software segue decine di voli all'intorno e le posizioni relative degli aeroporti, cosa ottima e fattibile, così si dovrebbe localizzare con il GPS, grazie alla 5G, tutto ciò che si muove per strada – perché non i cani? Da belle tecnologie si passa a fantasmi pericolosi, che aprono poi alla estensione di una delle massime applicazioni oggi del Deep Learning: la classificazione di miliardi di miliardi di oggetti e di... centinaia di milioni di cinesi, tutti individuabili, sempre, ovunque. Vi

lascio con questa riflessione, invitandovi sempre a distinguere, come cerco di fare nel libro, fra scienza e tecnoscienze, cumuli di tecniche, spesso potenti e difficili, ma prive di un quadro di conoscenza, ed in cui gli interessi finanziari nascondono le sfide scientifiche e sociali.

Riferimenti bibliografici

- S. Ben-David, P. Hrubec, S. Moran, A. Shpilka, A. Yehudayoff, *Learnability can be undecidable*, in «Nature, Machine Intelligence», January, vol 1, 2019.
- C. Calude, G. Longo, *The deluge of Spurious Correlations in Big Data* in «Foundations of Science» 22, 2017.
- J. Doudna, S. Sternberg, *A crack in Creation, the new power to control Evolution*, London, Bodley Head, 2017.
- G.M. Edelman, *Neural Darwinism: The theory of neuronal group selection*, Basic books, 1987.
- W. Isaacson, *The code breaker: Jennifer Doudna, gene editing, and the future of the human race*, Simon and Schuster, 2021.
- G. Longo, *Programming Evolution: A Crack in Science* in «Organisms. Journal of Biological Sciences», 2021.
- G. Longo, *Matematica e senso: per non divenire macchine*, Mimesis, 2022.
- S. Morand, M. Figuié, *Emergence de maladies infectieuses: Risques et enjeux de société*, Éditions Quae, 2016.
- H. Rogers, *Theory of recursive functions and effective computability*, McGraw-Hill, 1967.
- G. Simondon, *L'individuation psychique et collective*, Paris, Aubier (trad. it. di Carrozzini G., Mimesis, Milano) 2007.
- R. Thomas Zoeller, T. R. Brown, L. L. Doan, A. C. Gore, N. E. Skakkebaek, A. M. Soto, T. J. Woodruff, F. S. Vom Saal, *Endocrine-disrupting chemicals and public health protection: a statement of principles from The Endocrine Society* in «Endocrinology» 153.9, 2012.