



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI UDINE**

hic sunt futura

Master di I Livello in
Filosofia del Digitale e Intelligenza Artificiale

ELABORATO FINALE

Principi, Struttura e Fondamenti Filosofici delle Reti Locali di Astrazione (RLA)

Stratificazione Informativa, Collassi ed Emergenza
in una Visione Multi-Livello Realtà

Candidato
Gianluca Conte

ANNO ACCADEMICO 2024 – 2025

Abstract

Questo lavoro introduce e formalizza il modello delle Reti Locali di Astrazione (RLA), un framework epistemico-matematico pensato per descrivere sistemi complessi attraverso una struttura multi-livello ordinata. Le RLA non pretendono di rappresentare la realtà in senso ontologico, ma offrono uno strumento di mappatura epistemica: ciascun livello riflette una descrizione disciplinare parziale (biologia molecolare, fisiologia, cognizione, ecc.), collegata ad altri da funzioni di trasmissione, spesso non iniettive, che filtrano e riducono l'informazione.

Il modello si fonda su tre assiomi: (A1) ogni livello Turing-like ospita almeno un problema indecidibile; (A2) l'indecidibilità si trasmette ai livelli superiori se le funzioni inter-livello sono (quasi) iniettive; (A3) la non iniettività può generare proprietà emergenti non deducibili dai livelli inferiori. Da questi principi derivano due teoremi centrali sulla propagazione dell'indecidibilità e sull'emergenza da collasso informativo.

Le RLA permettono di modellare sistemi biologici, cognitivi e sociali mantenendo indipendenza ontologica, chiusura epistemica e computabilità esplicita, aprendo la strada alla definizione di Topologie RLA Compatte: reticoli chiusi, simulabili e autosufficienti. Il modello è falsificabile, interdisciplinare e computazionalmente implementabile, e fornisce un linguaggio condiviso per esplorare l'emergenza, i limiti computazionali e, in estensione, la possibilità di forme di coscienza artificiale non neurone-centriche.

Contents

1	Introduzione	4
2	Mappa Epistemica e Livelli di Astrazione	6
2.1	Struttura Reticolare (o Gerarchica) e Teorie-Ponte	6
2.2	Livello di Astrazione	7
2.3	Funzioni Trasmissione (Contiguità) e Rilevanza di Stati	7
2.4	Turing-likeness e Ruolo dell'Indecidibilità	8
3	Definizioni, Assiomi e Teoremi di RLA (Cenni)	10
4	Falsificabilità e Verifiche Empiriche	11
4.1	Criteri di Falsificazione per A1–A3	11
4.2	Protocolli Sperimentali	12
5	Emergenza, Indecidibilità e Semi-Riduzionismo	13
5.1	Collasso Informativo ed Emergenza	13
5.2	Indecidibilità e Trasmissione	13
5.3	Semi-Riduzionismo	14
5.4	Interpretazione Filosofica	14
6	Pluralità Ontologica e Livelli SuperTuring	15
6.1	Limiti del riduzionismo “globale”	15
6.2	Pluralità Ontologica: dalle forme biologiche a quelle sintetiche	15
6.3	Livelli SuperTuring: tra ipotesi speculative e limiti epistemici	16
6.4	Conseguenze per la Filosofia della Scienza	16
7	Principi e Postulati di RLA	18
7.1	Premessa e Struttura Logica	18
7.2	Conclusioni e Visione d'Insieme	22
8	Rappresentazione Lineare di Reticoli di Astrazione	24
8.1	Condizioni e Metodo di Linearizzazione	24
8.2	Esempio Operativo: Linearizzare 15 Livelli Contigui	25
8.3	Conclusioni	29
9	Applicazioni e Studi di Caso	30
9.1	Biologia e Chimica Computazionale	30
9.2	Automi Cellulari e Fisica dei Sistemi Complessi	30

9.3	Reti Neurali Ricorrenti e Scienze Cognitive	31
9.4	Scienze Sociali e Agent-Based Model	31
9.5	Conclusioni sulle Applicazioni	32
10	Topologie RLA Compatte (Ontologicamente Indipendenti, Epis-	
	temicamente Chiuse e Turing-Computabili)	33
11	Discussione Critica e Obiezioni	36
11.1	Obiezioni dal Riduzionismo Forte	36
11.2	Critiche da Fisici Teorici: Turing-likeness Generale	36
11.3	Perplexità delle Neuroscienze e Biologia	37
11.4	Scienze Sociali: Sovra-semplificazione Computazionale?	37
11.5	Falsificabilità e Validazione Empirica	38
11.6	Senso Critico e Prospettive di Sviluppo	38
12	Prospettive Future e Conclusioni	39
12.1	Reticoli con Loop e Category Theory	39
12.2	Metriche di Collasso e Quantificazioni Emergenza	39
12.3	Applicazioni nella Biologia Sintetica e IA Avanzata	39
12.4	Dibattito su Coscienza e Vita Artificiale	40
12.5	Conclusioni e Ruolo nella Filosofia della Scienza	40

1 Introduzione

Le *Reti Locali di Astrazione* (RLA) costituiscono un quadro teorico e filosofico per modellare sistemi complessi organizzati su più livelli, in cui coesistono proprietà emergenti e limiti computazionali. Al centro di questo modello si trova l'idea che le discipline scientifiche, lungi dal formare una catena riduzionistica unificata, operano come livelli locali con regole, linguaggi e risorse parzialmente autonome. Le interazioni tra livelli disciplinari possono trasmettere informazione, ma anche collassarla, generando fenomeni nuovi non deducibili dalle sole condizioni micro.

In particolare, RLA si propone come uno *schema meta-disciplinare* volto a descrivere:

1. la **pluralità epistemica** delle scienze come reticolo di livelli contigui ma non completamente traducibili l'uno nell'altro;
2. la possibilità che alcune funzioni di trasmissione tra livelli siano *iniettive* (e quindi veicolino limiti logici, come l'indecidibilità), o *non iniettive* (e dunque producano emergenza);
3. la necessità di riconoscere, ove presente, la **Turing-likeness** come fonte intrinseca di problemi insolubili (Halting, Rice), anche nei sistemi biologici, cognitivi o sociali;
4. la possibilità di definire, progettare e simulare *Topologie RLA Compatte*: sistemi reticolari localmente chiusi, autosufficienti, computabili e formalmente verificabili.

Dal punto di vista epistemologico, RLA non ambisce a rappresentare “la realtà in sé”, ma si concentra su come essa venga descritta, interpretata e strutturata dalle pratiche scientifiche. Non è dunque una teoria ontologica, ma una cornice *epistemica, falsificabile e modulare*, che consente di analizzare i limiti della riduzione, i meccanismi dell'emergenza e la trasmissione dei vincoli computazionali tra livelli.

Una delle chiavi di volta del modello RLA è il collegamento tra **indecidibilità** e **emergenza**, raramente esplorato congiuntamente. Molti sistemi, pur essendo Turing-completi in potenza (ad es. automi cellulari, DNA computing, reti neurali), manifestano fenomeni emergenti proprio quando i livelli superiori *collassano informativamente* configurazioni rilevanti del livello inferiore. Se la trasmissione preserva le differenze Turing-centrali, i limiti logici si propagano; se invece collassa tali distinzioni, le indecidibilità vengono “bloccate” ma sorgono *proprietà nuove e irriducibili*.

In questo documento, introduciamo e dedichiamo attenzione ai **principi epistemologici**, alle **implicazioni filosofiche** e alle **condizioni strutturali** che rendono RLA un modello coerente. Il testo introduce inoltre la definizione di *Topologia RLA Compatta*, vale a dire un sistema multilivello che rispetta simultaneamente:

- l'**Indipendenza Ontologica** (nessun ricorso a entità esterne non filtrate),
- la **Chiusura Epistemica** (autosufficienza nel produrre, spiegare e interpretare stati interni),
- la **Turing-Computabilità** (ogni dinamica è rappresentabile mediante algoritmi eseguibili).

Nel documento anticiperemo come una Topologia RLA Compatta (tra gli allegati il caso-studio della briofita) costituisca una prova di concetto che unifica principi filosofici di autonomia ontologica con requisiti pratici di simulabilità, rappresentando un "micro-mondo" i cui esiti simulativi (osservazioni sintetiche) sono – in potenza – epistemologicamente equivalenti ad osservazioni empiriche e, pertanto, potenzialmente indistinguibili da parte di un osservatore esterno specializzato

Infine, discutiamo le implicazioni del modello in relazione al riduzionismo scientifico, alla pluralità ontologica e alla possibilità teorica di coscienze e vite non biologiche, nonché al dibattito su macchine superTuring e limiti computazionali forti.

Struttura del Corpus Documentale RLA:

- *Principi, Struttura e Fondamenti Filosofici delle Reti Locali di Astrazione (RLA)* (**questo documento**) — incentrato sugli aspetti epistemologici, assiomatici e interpretativi.
- *ALLEGATO 1 – DOCUMENTO TECNICO* — contiene formalismi estesi, dimostrazioni, tabelle disciplinari, operatori di trasmissione e proposta di classificazione.
- *ALLEGATO 2 – CASO STUDIO* — presenta una *Topologia RLA Compatta* basata su una *Briofita Generalista*, gettando le basi per dimostrare la computabilità, indipendenza e chiusura del sistema con possibilità di simulazione in Python.

2 Mappa Epistemica e Livelli di Astrazione

Nel quadro di RLA, le *discipline* scientifiche vengono trattate quali *livelli* che si concentrano su specifiche scale descrittive e metodologiche. Questo approccio, coerente con molta letteratura in Filosofia della Scienza (Kuhn 1962; Cartwright 1983), mira a mostrare come i modelli (teorie, leggi, procedure sperimentali) non costituiscano una descrizione esaustiva della realtà, ma piuttosto strumenti localmente validi in determinati ambiti.

Definire un *reticolo* di livelli e discipline, con funzioni di traduzioni che le connettono, equivale a *stabilire* la *mappa epistemica* della scienza, ossia *quali* domini esistono (riconosciuti dalla comunità scientifica) e *come* essi siano *collegati*. RLA *non* sostiene che *tutte* le scienze vadano unificate in un solo reticolo lineare; anzi, ammette la possibilità di *percorsi* paralleli o *disconnessi*. La linearizzazione micro→macro è solo un *caso frequente* o una *convenzione semplificatrice*, non una regola inderogabile.

Il *framework* RLA si fonda sull’idea che *livelli contigui* — caratterizzati da funzioni di traduzioni (*non*) *iniettive* — possano *trasmettere* indecidibilità (se mantengono distinzioni Turing-centrali) oppure *generare emergenza* (se *collassano* quegli stati). Il modello risulta *falsificabile*: bastano controesempi sperimentali per contraddire gli assiomi.

2.1 Struttura Reticolare (o Gerarchica) e Teorie-Ponte

Ogni disciplina D_i elabora *concetti*, *leggi* e *misure* che rendono conto di un insieme di fenomeni. In alcuni casi, per passare dal dominio D_i a un dominio contiguo D_{i+1} , la scienza dispone di *teorie-ponte*, ossia di *risultati* o *modelli* che stabiliscono una corrispondenza empirica. Qualora tali *collegamenti* siano *riconosciuti* come empiricamente fondati e *coerenti*, RLA li interpreta come *funzioni di trasmissione* $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$, potenzialmente iniettive, quasi-iniettive o non iniettive. Un *livello* D_i è definito come una comunità di pratiche teoriche ed empiriche che condivide:

1. un **vocabolario operativo** (grand.ze osservabili, unità di misura, protocolli);
2. un insieme di **modelli** o leggi validi entro un dominio di applicazione;
3. criteri condivisi di **validità sperimentale** e di falsificazione (Popper 1959).

Esempi canonici sono la fisica molecolare, la biochimica, le neuroscienze computazionali, l’economia agent-based. Coerentemente con la tradizione “a paradigmi” (Kuhn 1962), ogni livello mantiene coerenza interna a costo di una certa *opacità* rispetto agli altri.

2.2 Livello di Astrazione

Un **livello di astrazione** corrisponde a un *dominio disciplinare* (es. “biologia molecolare,” “bio-chimica,” “neuroscienze computazionali”), dotato di *insieme di stati* e *regole* condivisi dalla comunità. RLA spiega che le transizioni da un Dominio ad un’altro (es. micro→macro), descritte sperimentalmente dalla comunità scientifica, non sempre conservano *tutte* le differenze micro: la *non iniettività* può “*unire*” molteplici stati in un output unico.

2.3 Funzioni Trasmissione (Contiguità) e Rilevanza di Stati

Due livelli L_i e L_{i+1} sono contigui se esiste una mappa $\tau_{(i \rightarrow i+1)} : D(L_i) \rightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1}))$, empiricamente giustificata (genetica, meccanica statistica, ecc.).

Le *funzioni di trasmissione* tra due discipline D_i e D_{i+1} descrivono, in RLA, *come* gli stati considerati “essenziali” in D_i siano *proiettati* (o *fusi*) in stati del dominio D_{i+1} . A seconda che la trasmissione *preservi* o *non preservi* le differenze rilevanti, otteniamo:

- **Iniettività:** distinzioni micro *non* vengono fuse, consentendo una corrispondenza “uno-a-uno” fra stati di D_i e stati di D_{i+1} (almeno sui sottoinsiemi critici). In tal caso, *l’informazione* sulla configurazione originaria è conservata, permettendo di risalire *univocamente* dal macro al micro.
- **Quasi-iniettività:** la mappa risulta iniettiva *soltanto* su alcune componenti (*p. es.* quelle che implementano potenza di calcolo Turing). Potrebbero verificarsi *collassi* su parametri meno cruciali, creando *emergenza parziale*.
- **Non iniettività “collassante”:** più stati distinti (disciplinarmente rilevanti) di D_i si *fondono* nello stesso stato (o sottoinsieme) in D_{i+1} . Ne consegue una *perdita informativa* e, spesso, *proprietà irriducibili* (emergenti) su scala macro.

Non tutte le differenze micro sono, quindi, *rilevanti* ai fini del dominio macro. RLA riconosce che *solo* i *collassi* che fondono stati micro “significativi” (ovvero *Turing-centrali* o *disciplinarmente cruciali*) originano vera *emergenza*.

In chiave Filosofia della Scienza, ciò *contestualizza* le “*teorie-ponte*”: esse *non* sono necessariamente bigenetiche o perfettamente conservative, ma *spesso* introducono semplificazioni, approssimazioni e *fusione* di micro-dettagli (pensiamo, per esempio, a meccanica statistica → parametri macro di termodinamica). RLA, dunque, interpreta *questi* passaggi come *non* iniettivi e *produttori* di novità emergenti.

2.4 Turing-likeness e Ruolo dell’Indecidibilità

Quando un livello L è *Turing-like*, esso *inevitabilmente* contiene problemi indecidibili. Se la mappa verso un livello L_{i+1} conserva *quasi-iniettivamente* gli stati Turing-centrali, quell’indecidibilità “*risale*”. Qualora però i passaggi collassino anche questi stati critici, i *limiti* restano bloccati al livello inferiore.

Esempi di Sistemi Turing-like

- **Automi Cellulari Universali.** In primis, il caso di *Rule 110* o il “Game of Life” (Wolfram 2002), dove, con sufficiente spazio e tempo, si codificano macchine di Turing. RLA vede in ciò un “dominio disciplinare” reticolare che implementa calcoli arbitrari.
- **DNA computing** (Winfree 1998; Benenson et al. 2001): l’assemblaggio di filamenti di DNA e le reazioni enzimatiche possono simulare istruzioni di una macchina di Turing. Se le risorse (filamenti, reagenti) non sono rigidamente finite, il sistema risulta *Turing-like*.
- **Reti neurali ricorrenti** (Siegelmann & Sontag 1991): alcune architetture (in teoria, con memoria illimitata) ospitano universalità di calcolo, e dunque indecidibilità interna.

In senso filosofico, *non* si afferma che *tutte* le discipline fisico-biologiche siano Turing-like: *basta* rilevare *qualche* sistema (o sottodominio) con potenza universale per generare vincoli d’indecidibilità (che potranno *trasmettersi*, se non collassano).

Domini Non (Ancora) Turing-like

Molti settori scientifici (p.es. PDE lineari classiche, catene di Markov finite, procedure contabili rigorose, modelli di equilibrio chiusi, ecc.) non presentano *risorse illimitate* né meccanismi di computazione universale. In questi ambiti, RLA non rileva problemi insolubili del tipo Halting Problem; la disciplina resta *finitamente* descrivibile, e la non iniettività può comunque generare *emergenza* parziale, ma *non* indecidibilità. La terminologia “non *ancora* Turing-like” indica che alcuni modelli, se evoluti in direzione di agent-based system o di procedure iterative senza limiti, *potrebbero* divenire Turing-likeness. Ma finché ciò non avviene, *non* ci si aspetta problemi logici insolubili.

Implicazioni Filosofiche: Differenziazione e Pluralità

In un'ottica di filosofia della scienza, la distinzione fra *Turing-like* e *non Turing-like* evita di generalizzare *tutti* i campi come se fossero “universalmente completi.” Al contempo, *apre* all'idea che *alcuni* domini (o sottodomini) possano ospitare questioni indecidibili, mentre *altri* no. Ciò *suggerisce* che la scienza umana non sia monolitica, ma *compartimentata*: *talvolta* con fenomeni ricchi di ricorsione (universali), *talvolta* con operazioni limitate e chiuse. RLA fornisce la struttura logica per inserire queste differenze in un reticolo disciplinare, mantenendo l'opzione che *nuove scoperte* o *nuove formulazioni* possano ampliare (o ridurre) la potenza di calcolo di un dato settore.

3 Definizioni, Assiomi e Teoremi di RLA (Cenni)

Definizione 1 (Livello di Astrazione) *Un livello di astrazione $L = \langle D(L), \Sigma(L) \rangle$ è definito da un insieme di stati o configurazioni $D(L)$ e un insieme di regole/leggi $\Sigma(L)$. Esempi: “stati neurali” e “regole di aggiornamento sinaptico,” oppure “filamenti DNA” e “reazioni enzimatiche.”*

Definizione 2 (Contiguità e (Non) Iniettività) *Una funzione di trasmissione $\tau_{(i \rightarrow i+1)} : D(L_i) \rightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1}))$ stabilisce come L_i “influenzi” o “produca” stati in L_{i+1} . Tale mappa può essere (quasi) iniettiva o non iniettiva. Nel secondo caso, si parla di collasso informativo.*

Definizione 3 (Turing-likeness) *Un livello L è Turing-like se può simulare (almeno in principio) una Macchina di Turing universale: cioè esistono stati $C \subseteq D(L)$ e regole Σ_{comp} che realizzano computazioni generali potenzialmente infinite. (Turing 1936; Siegelmann & Sontag 1991).*

Assioma 1 (A1: Indecidibilità in Livelli Turing-like) *Se L è Turing-like, ospita almeno un problema indecidibile. Non esiste un “decisore universale” interno capace di risolvere tutte le proprietà non banali.*

Assioma 2 (A2: Trasmissione dell’Indecidibilità) *Se la quasi-iniettività preserva gli stati Turing-centrali da L_i a L_{i+1} , allora i vincoli d’indecidibilità di L_i “risalgono” a L_{i+1} . Un decisore in L_{i+1} implicherebbe un decisore in L_i , contraddicendo A1.*

Assioma 3 (A3: Non Iniettività e Emergenza) *Se una funzione di trasmissione fonde (non iniettivamente) almeno una coppia di stati rilevanti di L_i , emerge almeno una proprietà macro non deducibile dal micro. Cioè si genera emergenza, in accordo con (Anderson 1972) e analogamente a teoremi tipo Rice (Rice 1953).*

Lemma 1 (L1: Composizione di Iniettive) *Siano $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ e $\tau_{(i+1 \rightarrow i+2)}$ (quasi) iniettive sugli stati Turing-centrali. Allora la composizione*

$$\tau_{(i \rightarrow i+2)} = \tau_{(i+1 \rightarrow i+2)} \circ \tau_{(i \rightarrow i+1)}$$

mantiene (quasi) iniettività su tali stati, garantendo che la propagazione di eventuali problemi indecidibili si estenda ulteriormente.

Lemma 2 (L2: Ri-emersione dell’Indecidibilità) Anche se il passaggio $L_i \rightarrow L_{i+1}$ presenta un collasso informativo (bloccando l’indecidibilità di L_i), se L_{i+1} (o un successivo L_{i+2}) di per sé è nuovamente Turing-like, può emergere un *nuovo* problema indecidibile a quel livello.

Teorema 1 (Propagazione Multi-livello dell’Indecidibilità) In una catena contigua $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow \dots \rightarrow L_n$, se L_1 è Turing-like e ogni $\tau_{(\ell \rightarrow \ell+1)}$ è quasi-iniettiva sugli stati Turing-centrali, tutti i livelli L_2, \dots, L_n ereditano i limiti indecidibili di L_1 .

Teorema 2 (Emergenza da Collasso Informativo) Se $L_i \rightarrow L_{i+1}$ collassa stati disciplinarmente significativi, esiste almeno una proprietà Q di L_{i+1} non “riducibile” a un singolo predicato su L_i . Il macro-level non è ricostruibile interamente dal micro (emergenza forte).

Si veda il documento **ALLEGATO TECNICO-ANALITICO** per approfondimenti sull’impianto formale e le dimostrazioni estese.

4 Falsificabilità e Verifiche Empiriche

Le *Reti Locali di Astrazione* (RLA) si propongono come modello *falsificabile* in senso popperiano: i suoi *Assiomi* (A1–A3) possono essere smentiti se emergono *controesempi* teorici o sperimentali. Riassumiamo di seguito i criteri di falsificazione e proponiamo un *carotaggio* su 4 livelli contigui per mostrare come essi potrebbero essere investigati empiricamente. Infine, forniamo alcuni esempi di domini Turing-like (SI) e non Turing-like (NO).

4.1 Criteri di Falsificazione per A1–A3

- **A1 (Indecidibilità nei Livelli Turing-like).**

Viene *smentito* se si dimostra (teoricamente o empiricamente) che un livello definito *Turing-like non* presenta alcun problema indecidibile, oppure se si esibisce un “decisore universale” interno che risolva problemi noti come indecidibili (ad es. Halting Problem, Teorema di Rice). In tal caso, l’intera costruzione basata su Church–Turing verrebbe contraddetta all’interno del livello in questione.

- **A2 (Trasmissione dell’Indecidibilità via Quasi-iniettività).**

Risulta *falsificato* se, *malgrado* la funzione di trasmissione $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ *preservi*

iniettivamente (o quasi-iniettivamente) gli *stati Turing-centrali* di L_i , si osserva che il livello superiore L_{i+1} *risolve* un problema indecidibile di L_i senza violare A1 “in loco”. In sostanza, pur mantenendo i dettagli micro cruciali, L_{i+1} fornirebbe un meccanismo di decisione assente in L_i , contraddicendo il principio che l’indcidibilità dovrebbe “risalire” la catena.

- **A3 (Non Iniettività e Emergenza).**

Viene contraddetto se si verifica un *collasso informativo* (fusione di stati *relevanti* a livello L_i) *senza* che compaiano *proprietà macro non deducibili* in L_{i+1} . In altre parole, anche fondendo differenze significative, non emergerebbe alcuna novità reale. Ciò implicherebbe l’esistenza di un collasso “rilevante” privo di qualsiasi *emergenza*, smentendo l’asse portante di A3.

4.2 Protocolli Sperimentali

Biologia sintetica (DNA computing). Test su filamenti programmabili (Benenson et al. 2001; Winfree 1998) e analisi di espressioni fenotipiche unificate. Se i circuiti Turing-centrali collassano, *emergono* proprietà non deducibili; se rimangono distinti, l’indcidibilità risale.

Fisica computazionale (automi cellulari). Simulazione di un automa cellulare *universale* (Wolfram 2002) e *coarse graining* verso parametri termodinamici. Verificare se la *non iniettività* blocca i limiti Turing a livello micro e crea proprietà di fase nuove.

IA neurale (Reti ricorrenti). Reti Turing-complete (Siegelmann & Sontag 1991) e strati cognitivi di pooling. Valutare *se e quando* la fusione di pattern “critici” generi concetti emergenti, *bloccando* la trasmissione dell’indcidibilità.

5 Emergenza, Indecidibilità e Semi-Riduzionismo

Una delle domande centrali in Filosofia della Scienza riguarda come si possano conciliare *emergenza* (ovvero la comparsa di fenomeni nuovi a livelli superiori) e *riduzione* (la pretesa di ricondurre i fenomeni a descrizioni micro). In *Reti Locali di Astrazione (RLA)*, tali dinamiche si intrecciano con il tema dell'*indecidibilità*, poiché le scienze che presentano *Turing-likeness* inevitabilmente generano *limiti computazionali* (Halting Problem, Teorema di Rice) che possono *risalire* i livelli (*Trasmissione dell'Indecidibilità*), a meno che *collassi informativi* non ne interrompano la propagazione.

5.1 Collasso Informativo ed Emergenza

Collasso informativo indica la *non* iniettività di una funzione di trasmissione tra livelli, il che implica che stati discernibili nel dominio di partenza (livello inferiore) vengano fusi in un'unica configurazione (o un'unica *classe* di stati) nel dominio d'arrivo (livello superiore). Se tali stati erano *disciplinarmente cruciali* (ad esempio, differenze sperimentalmente testabili, geni con funzioni diverse, pattern neurali con output divergenti), il loro *collasso* genera *novità* irriducibili (Anderson 1972; Morin 2008): il macro-livello non *equivale* a una somma o a un *reimpianto* di distinzioni micro, bensì acquista *proprietà emergenti*.

5.2 Indecidibilità e Trasmissione

Quando un livello è *Turing-like*, porta con sé *inevitabili* questioni insolubili (*Halting Problem*, *Teorema di Rice*, ecc.). Queste *non* si estinguono se i livelli successivi *conservano* (magari *quasi* iniettivamente) gli stati computazionali centrali. La *Trasmissione dell'Indecidibilità* rimane dunque *bloccata* soltanto laddove la funzione di trasmissione *collassi* tali stati cruciali, *unendoli* in una configurazione comune. In tal caso, si annullano le distinzioni su cui si fonda l'inevitabilità di un problema come l'Halting. Parimenti, *se* in un passaggio la Turing-likeness viene *azzerata* dal collasso, *non* implica che a un livello successivo non possa *comparire* nuovamente un dominio Turing-like, generando “ex novo” un'altra indecidibilità. In sintesi, *l'indecidibile* si conserva lungo i livelli solo in assenza di collassi *mirati* a quelle parti computazionalmente centrali.

5.3 Semi-Riduzionismo

RLA introduce una prospettiva di “semi-riduzione” piuttosto che di *riduzionismo totale*:

- *Quando* le funzioni di trasmissione mantengono tutte le distinzioni cruciali (inietività o *quasi*), allora *non* si produce emergenza su quei parametri, ma *ereditano* eventuali limiti logici. Questo scenario può *funzionare* come “riduzione locale,” spiegando *alcuni* aspetti del livello superiore in termini di micro.
- *Se*, invece, la scienza decide di ignorare o aggregare distinzioni micro fondamentali (non inietività sui parametri chiave), *emergono* fenomeni macroscopici *irriducibili*. Tuttavia, ciò si traduce in una descrizione globale “*semplificata*” del micro, con un conseguente guadagno di *novità* e *perdita* di informazione.

Il *semi-riduzionismo* di RLA si basa su queste *scelte* e *collassi* che avvengono *di volta in volta* fra i livelli, rilanciando una visione in cui la scienza *prende* ciò che è utile o gestibile dai dettagli micro, ma *non* necessariamente *tutti* i micro-elementi, mantenendo sempre un margine di irriducibilità. In Filosofia della Scienza, *ciò* contrasta l’idea di *ridurre* pienamente i livelli superiori a quello inferiore, al prezzo di *accettare* una incompletezza inevitabile nei modelli.

5.4 Interpretazione Filosofica

La coesistenza di *emergenza* e *indecidibilità* in RLA non è una mera *coincidenza*, ma un *effetto* della formalizzazione delle funzioni di trasmissione. Da una parte, *se* i dettagli di un livello Turing-like *restano* distinti, i *limiti logici* risalgono (non decidibilità di certe proprietà, Halting, ecc.). Dall’altra, *se* i dettagli micro *vengono* fusi, emergono proprietà *non deducibili*. A livello epistemico, *non* risulta possibile *annullare* questi due fenomeni in un *unico* grande quadro riduzionista. Piuttosto, ci troviamo di fronte a situazioni *ibride* in cui *localmente* si può ridurre, *localmente* si generano fenomeni emergenti, *localmente* compaiono limiti indecidibili. Ecco perché RLA predilige la nozione di “semi-riduzionismo”: un compromesso tra la spiegazione micro e l’inevitabile *perdita d’informazione* (o *eredità* di limiti) che accompagna i passaggi disciplinari.

6 Pluralità Ontologica e Livelli SuperTuring

Nel percorso argomentativo di Reti Locali di Astrazione (RLA), la nozione di *riduzionismo* — intesa come completa spiegazione di un fenomeno a partire dal solo livello micro — subisce un ridimensionamento sostanziale. Con l'introduzione delle funzioni di trasmissione fra domini, si evidenzia che *non sempre* le informazioni micro possono essere *integralmente* preservate o utili alla descrizione macro. Allo stesso tempo, RLA apre a scenari “oltre la Turing-likeness” (*livelli superTuring*) e a una potenziale *pluralità ontologica* che non circoscrive vita o coscienza a un solo substrato.

6.1 Limiti del riduzionismo “globale”

Dai paragrafi precedenti, emerge che in RLA:

- Le *funzioni di trasmissione* possono collassare stati fondamentali, generando emergenza e *irriducibilità*.
- Nei contesti Turing-like, *permangono* problemi indecidibili che *non* si risolvono risalendo i livelli.

Ne discende una visione di *semi-riduzionismo locale*, dove spesso la scienza ricorre a riduzioni *contestuali* (ad esempio fisica molecolare \rightarrow chimica computazionale) con esiti *verificati sperimentalmente*, ma non procede verso una Teoria del Tutto riduzionista e onnicomprensiva. Il *collasso* in taluni passaggi e la *Turing-likeness* di alcuni sottosistemi “bloccano” la praticabilità di un riduzionismo globale.

6.2 Pluralità Ontologica: dalle forme biologiche a quelle sintetiche

Una conseguenza ulteriore di RLA è l'apertura alla *pluralità ontologica*:

- **Processi emergenti** (es. coscienza, autorganizzazione), se dipendenti da collassi e interazioni Turing-like sufficientemente complesse, non risultano *necessariamente* legati a un singolo livello disciplinare o a un'unica base materiale (*carbon-based*, biologica).
- RLA *non* esclude che *configurazioni* d'informazione e reazioni (p.es. in IA neurale o DNA computing su vasta scala) possano replicare — o addirittura superare — le soglie di complessità tipicamente ritenute alla base della vita o della coscienza.

In tal modo, *non* si definisce un riduzionismo biologico (il “*solo* la cellula, *solo* il carbonio”), bensì si riconosce un *reticolo di possibilità* ove *diversi* substrati (biologici, sintetici, ibridi) possano, in linea di principio, sviluppare processi auto-organizzanti a carattere emergente o coscienziale.

6.3 Livelli SuperTuring: tra ipotesi speculative e limiti epistemici

Accanto alla Turing-likeness, alcuni autori (cfr. Wolfram 2002; Lloyd 2006) ipotizzano che la natura — o parti di essa — possano esprimere potenze di calcolo *oltre* Turing (cosiddette “superTuring,” “hypercomputation,” ecc.). Sebbene questa ipotesi rimanga speculativa, RLA la inquadra come segue:

- Se un sottosistema superTuring esistesse fisicamente, ciò non comporterebbe *automaticamente* la *riduzione* di fenomeni come coscienza o vita, poiché la “traduzione” della configurazione iniziale in *quel* nuovo sistema richiederebbe *collassi* e *ricodifiche* ontologiche potenzialmente alteranti l’entità stessa.
- La scienza non *possiede* (a tutt’oggi) protocolli sperimentali condivisi per confermare o smentire l’esistenza di reali *superTuring* naturali. Qualora emergessero, RLA prevedrebbe un *piano reticolare* ancora più complesso, in cui *livelli* superTuring e Turing-like coesisterebbero, con ulteriori implicazioni sul tema dell’indecidibilità e della riduzione.

6.4 Conseguenze per la Filosofia della Scienza

In ultima analisi, la posizione di RLA in merito a riduzionismo, pluralità ontologica e superTuring riflette una concezione:

1. **Non essenzialmente monista:** i *livelli* non convergono in un unico *microlivello* onniesplicativo, poiché i collassi informativi e i loop di emergenza preservano zone di irriducibilità e complicano la risalita integrale.
2. **Aperta a forme di emergenza in svariati substrati:** non si vincola la *vita* o la *coscienza* al solo *organico*, se sussistono condizioni di auto-organizzazione e computazione illimitata (p. es. IA neurale di dimensioni enormi).
3. **Anti-dogmatica** sui superTuring: riconosce l’interesse teorico della questione, ma la colloca su un piano *speculativo*, in cui i *fatti* sperimentali restano scarsi. Ciò, tuttavia, non esclude scenari futuri in cui forme di calcolo oltre la Turing-likeness abbiano riscontri tangibili.

In breve, *RLA* fornisce un *meta-quadro* che, senza abbracciare un riduzionismo totalizzante, *non* ricade neanche in un *pluralismo* incoerente: i passaggi disciplinari obbediscono a regole di *(non) iniettività*, la Turing-likeness definisce *dove* nascono i limiti logici e la pluralità ontologica lascia spazio alla coesistenza di entità biologiche e non biologiche, accomunate dalle stesse dinamiche di emergenza e indecidibilità.

7 Principi e Postulati di RLA

Dopo aver illustrato la mappa epistemica (§2), la distinzione tra domini Turing-like e non e l'intreccio tra emergenza e indecidibilità (§5), introduciamo ora *dieci principi* e *due postulati* che costituiscono il *nucleo formale-filosofico* delle Reti Locali di Astrazione (RLA).

Tali enunciati, presentati in ordine logico, forniscono un *quadro* in cui (i) si spieghino le ragioni dell'emergenza (*collassi informativi*) e (ii) si chiarisce come possano sussistere *limiti logici* (derivati da Turing-likeness).

7.1 Premessa e Struttura Logica

RLA assume che *ogni* disciplina scientifica (D_i) abbia una coerenza interna, mentre i passaggi *disciplina* \rightarrow *disciplina* restano *locali*, mediati da *funzioni di trasmissione*.

I principi enunciano le *condizioni epistemiche*, le dinamiche di (*non*) *iniettività* e *falsificabilità*, mentre i postulati mettono a fuoco *indecidibilità* e *pluralità ontologica*.

Nel documento **ALLEGATO TECNICO-ANALITICO** si trovano definizioni set-based e dimostrazioni estese; qui, la presentazione è pensata in ottica *Filosofia della Scienza*.

Principio I — Complementarità Epistemica

Enunciato:

In un sistema scientifico organizzato in più livelli, il tentativo di massimizzare la coerenza interna di ciascun dominio genera un *trade-off* conoscitivo verso i livelli contigui, riducendone la completa leggibilità. Ogni formalizzazione disciplinare, ottimizzando il proprio metodo e linguaggio, perde *trasparenza* inter-livello.

Stabilisce la *natura “locale”* dell'impresa scientifica, in cui l'elevata *precisione* e *coerenza* di una disciplina costano una relativa “*opacità*” rispetto ad altre. Questo principio, fondamentale in RLA, fonda la necessità di *mappe epistemiche* dove le discipline risultano “contigue” con teorie-ponte non perfettamente trasparenti.

Principio II — Collasso Emergente

Enunciato:

Una funzione di trasmissione fra due domini, non iniettiva *su stati rilevanti*, produce un *collasso informativo* che genera proprietà emergenti al livello superiore. In altri termini, la fusione di differenze micro cruciali crea fenomeni macro *irriducibili* all'analisi di partenza.

Formalizza *come* e *perché* la *non iniettività* generi “*novità*” irriducibili, chiarendo l'idea di emergenza forte: *non* basta fondere stati *marginali*, occorre collassare *configurazioni disciplinarmente centrali* perché si produca autentica *emergenza*.

Principio III — Limitazione della Riducibilità

Enunciato:

Nell'impostazione multi-livello di RLA, *nessun* calcolo Turing-like (anche se potenzialmente potente) assicura la riduzione *esaustiva* di fenomeni altamente complessi. L'eventuale ricorso a livelli superTuring non ne annulla il limite: la “ricostruzione” integrale di un sistema conduce a un mutamento ontologico, rendendo il fenomeno *altro* rispetto all'originale.

Stabilisce che i *riduzionismi* totali sono *metafisici* più che *empirici*. Anche ammettendo risorse di calcolo “sovraordinate,” si finisce per alterare l'identità del fenomeno originario. RLA *predilige* la nozione di *semi-riduzionismo locale*, dove *alcuni* aspetti emergono irriducibilmente e *altri* possono essere ridotti in modo efficace.

Principio IV — Incompletezza Operativa

Enunciato:

Nei contesti fisici e biologici, l'eventuale Turing-likeness risulta inevitabilmente *limitata* su scala operativa: le risorse finite (energia, tempo, memoria) e le approssimazioni sperimentali non consentono di *impiegare* la piena universalità del calcolo. Ne emerge un *divario* tra la Turing-completezza formale e le capacità *effettive* del sistema.

Sottolinea la distinzione tra *astrazione matematica* (Macchina di Turing, risorse infinite) e *realizzazione fisica/biologica* con risorse *finite*. Benché l'indecidibilità *permanga* come vincolo formale, la scienza la incontra *solo* in contesti di sufficienti risorse e precisione.

Principio V — Falsificabilità Multi-livello

Enunciato:

Le ipotesi su come la (non) iniettività agisca, e su quali domini siano Turing-like, restano confutabili da controesempi teorici o empirici. Se emergono evidenze che contraddicono la previsione di indecidibilità, o la nascita di proprietà emergenti, RLA deve essere *adattata o rivalutata* per quello specifico passaggio disciplinare.

Consente di *testare* RLA sperimentalmente: la scienza *non* può accettare dogmaticamente i collassi informativi o le Turing-likeness postulati. Ogni passaggio di scala dev'essere supportato da evidenze e *discriminabili* in caso di inattesi “decisori” o mancata emergenza.

Principio VI — Retroazione Reticolare

Enunciato:

In presenza di *loop* o cicli di feedback tra livelli, le proprietà emergenti macro possono modificare gli stati micro, creando un *processo ricorsivo* di co-determinazione. In tali strutture reticolari, l'emergenza e i limiti computazionali si ricombinano iterativamente, generando schemi auto-organizzanti.

Accoglie la *non-linearità* tipica dei sistemi complessi, evitando la riduzione di RLA a una catena lineare micro→macro. Ciò risulta particolarmente importante in ambiti come la biologia dei sistemi, le neuroscienze e le scienze sociali, dove i *fenomeni emergenti* influiscono a ritroso sugli stati elementari.

Principio VII — Selettività Multi-livello

Enunciato:

Le funzioni di trasmissione possono *colpire* solo alcune componenti di un dominio (collassi parziali), pur mantenendo inalterate le distinzioni su altre componenti (iniettività o quasi-iniettività). Ne segue un *quadro ibrido*, in cui parte dei vincoli logici sopravvive, mentre *altre* differenze sfociano in emergenza irriducibile.

Supera la dicotomia “totalmente iniettivo o non iniettivo,” chiarendo *perché* in un singolo passaggio disciplinare possano coesistere aspetti riducibili e aspetti emergenti. Ciò rispecchia le pratiche scientifiche reali, dove si conservano *alcuni* parametri micro e *se ne aggregano* altri.

Principio VIII — Computabilità Intrinseca del Substrato

Enunciato:

La materia fisica può essere *interpretata* come un tessuto di regole locali discrete (computabilità intrinseca), coerentemente con la visione dell’“universo computazionale.” Tuttavia, le discipline, operando in maniera *reticolare* e *fragmentata*, catturano solo porzioni di tali processi, e le *funzioni di trasmissione* (anche se iniettive su alcuni stati) non garantiscono un *controllo* o una *visione* globale unificante.

Riconduce RLA alle ipotesi di (Wolfram 2002), (Lloyd 2006) secondo cui la realtà fisica *potrebbe* essere integralmente ricondotta a regole computazionali discrete. RLA, però, *non* deduce da ciò un riduzionismo assoluto: la presenza di collassi e la *complementarità epistemica* (Principio I) ostacolano una descrizione omnicomprensiva e “unica” della computazione sottostante.

Postulato I — Trasmissione dell’Indecidibilità

Enunciato:

Se un *dominio Turing-like* preserva i propri stati computazionali centrali (senza collassarli) lungo le funzioni di trasmissione, i relativi problemi indecidibili si *propagano* ai livelli superiori, impedendo ogni “risoluzione” di quelle proprietà non banali. Soltanto una *non iniettività* mirata su tali stati blocca tale eredità.

Formalizza come i *limiti logici* (Halting Problem, Rice) *rimangono* se nulla collassa le configurazioni centrali del calcolo. Questo postulato radica la presenza di *indecidibilità* in un quadro multi-livello, allineandosi ai teoremi classici di (Turing 1936) e (Rice 1953), ma con un *filtro* epistemico (le funzioni di trasmissione tra discipline).

Postulato II — Pluralità Ontologica e Assenza di Controllo Periferico

Enunciato:

Proprietà tradizionalmente ritenute “biologiche” o “umane” (per es. coscienza, vita, autorganizzazione) possono, in linea di principio, sorgere anche in sistemi *non biologici*, purché essi esprimano dinamiche Turing-like e un livello di complessità auto-organizzante *non* suscettibile di controllo periferico su ogni singolo elemento. L’emergenza di tali proprietà risulta collegata alla combinazione di *collassi informativi* e processi *computazionali* su scala multi-livello.

Qui RLA *apre* all’idea che la materia (o i sistemi sintetici) possano ospitare coscienza o vita, se la *struttura di calcolo* (Turing-like) e l’*assenza di controllo globale* ne favoriscano l’emergenza. In tal modo, non si ancora l’ontologia del vivente a un substrato univoco, delineando una *pluralità* potenziale di forme emergenti.

7.2 Conclusioni e Visione d’Insieme

I **principi** e i **due postulati** sopra enunciati tracciano l’*impalcatura* che consente a RLA di integrare *emergenza* e *indecidibilità* in un unico modello multi-livello. Eccoli in breve:

- *Complementarità Epistemica* (I) e *Collasso Emergente* (II) spiegano *perché* le discipline non siano perfettamente trasparenti l’una all’altra e come la *non* iniettività generi *proprietà macro* irriducibili.
- *Limitazione della Riducibilità* (III) e *Incompletezza Operativa* (IV) indicano *come* i modelli Turing-like (o superTuring) non realizzino mai una riduzione totale, a causa di mutamenti ontologici e vincoli pratici di risorse.
- *Falsificabilità Multi-livello* (V) sancisce la *natura scientifica* di RLA, basata su ipotesi confutabili riguardo a *quali* stati siano conservati o collassati nelle funzioni di trasmissione.
- *Retroazione Reticolare* (VI) e *Selettività Multi-livello* (VII) danno forma alla *dinamica non lineare* e modulare di RLA, mostrando perché un passaggio disciplinare possa essere *parzialmente* iniettivo o non iniettivo e come i livelli macro *reagiscano* al micro.
- *Computabilità Intrinseca del Substrato* (VIII) inquadra la materia come *potenzialmente* computazionale, ma sottolinea la *parzialità* delle nostre lenti disciplinari nel cogliere una *visione* globale.

- Infine, i postulati *Trasmissione dell'Indecidibilità* (I) e *Pluralità Ontologica* (II) traducono, rispettivamente, la persistenza dei *limiti computazionali* e la possibilità di fenomeni come coscienza o vita anche in contesti non biologici, se sufficientemente *autorganizzanti* e Turing-like.

Insieme, tali enunciati disegnano un sistema flessibile e *meta-disciplinare* che, lungi dall'essere un dogma onnicomprensivo, è aperto alle *verifiche* e *revisioni* (cfr. Principio V). Essi gettano le basi per comprendere, nel contesto della Filosofia della Scienza, *come* e *perché* l'*emergenza* e i *vincoli d'indecidibilità* coesistano, dando luogo a scenari di *semi-riduzionismo* e *pluralità ontologica* nei quali le scienze collaborano, si contaminano, e tuttavia mantengono *ruoli* disciplinari specifici nella costruzione di modelli di realtà.

8 Rappresentazione Lineare di Reticoli di Astrazione

8.1 Condizioni e Metodo di Linearizzazione

Condizioni Necessarie per la Linearizzazione Convenzionale

1. **Esistenza di leggi scientifiche** che descrivano come L_i influenzi L_{i+1} . Se un “livello inferiore” e uno “superiore” non possiedono una teoria di passaggio micro–macro (o viceversa), *non* ha senso forzarne la linearizzazione in una catena.
2. **Supporto empirico o epistemico** per quelle leggi. L’esistenza di connessioni formalizzate (genetica formale, meccanica statistica, regole di scaling biologico, ecc.) rende *plausibile* un rapporto contiguo fra i due livelli. Senza evidenze sperimentali o letteratura condivisa, la scelta risulta *arbitraria e non verificabile*.
3. **Accettazione del compromesso “linea vs. reticolo.”** Decidere una catena L_1 – L_2 –...– L_9 implica *perdere dettagli* tipici di un reticolo (loop di retroazione, domini multipli paralleli). È una *convenzione* epistemica: utile per mostrare *a colpo d’occhio* come l’indecidibilità (o l’emergenza) possano *risalire* (o bloccarsi) in passaggi successivi.

Metodo di Linearizzazione

1. **Selezione dei livelli** secondo la *centralità disciplinare*: per es. “fisica discreta” (L_1), “microstati molecolari” (L_2), “chimica computazionale” (L_3), etc.
2. **Verifica della trasmissione** tra ciascuna coppia di livelli $L_i \rightarrow L_{i+1}$: occorre citare *evidenze e leggi* (es. meccanica statistica, passaggi genici, fenotipici) che giustifichino la contiguità.
3. **Attribuzione del tipo di funzione** (iniettiva, quasi, non iniettiva) sulla base degli studi disciplinari (ad es. genetica formale \rightarrow iniettiva minima, tessuti macroscopici \rightarrow non iniettiva massiccia).
4. **Consapevolezza della convenzionalità**: la linearizzazione è “comoda” ma non esaurisce la complessità reticolare; *nuove scienze* o *nuove scoperte* possono rivelare ulteriori canali di trasmissione, richiedendo di *aggiornare* o *espandere* la catena.

Così, il *metodo* si fonda su un compromesso **arbitrario-epistemico-scientifico**: “arbitrario” perché la realtà è reticolare e il *taglio lineare* è una *scelta* (abbastanza)

soggettiva; “epistemico-scientifico” perché poggia su *condizioni* di esistenza di leggi e su *valutazioni empiriche* che ne garantiscano la validità.

8.2 Esempio Operativo: Linearizzare 15 Livelli Contigui

Nel documento **ALLEGATO TECNICO-ANALITICO** viene illustrata una catena di 15 livelli contigui, dalle *strutture fisiche elementari* alla *società complessa*:

(1) Fisica reticolare \rightarrow (2) Spin-lattice molecolare \rightarrow (3) Chimica computazionale \rightarrow (4) Biologia molecolare (DNA) \rightarrow (5) Cellula computazionale \rightarrow (6) Tessuti/organi virtuali \rightarrow (7) Rete neurale biologica \rightarrow (8) Cognizione \rightarrow (9) Comportamento/decisione \rightarrow (10) Architetture algoritmiche (software) \rightarrow (11) Reti neurali artificiali \rightarrow (12) Linguistica computazionale (type-0) \rightarrow (13) Comunicazione interpersonale (pragmatica) \rightarrow (14) Cultura e simboli, \rightarrow (15) Società complesse/organizzazioni.

La descrizione di tale catena rappresenta solo un esercizio concettuale, di carattere speculativo, ma serve per introdurre un metodo di "linearizzazione" dei livelli e di loro analisi oltre che a fornire elementi che saranno utili per comprendere le Topologia RLA Compatte, intese come Reticoli Locali di Astrazione, ontologicamente indipendenti, epistemologicamente chiusi e computabili ai sensi di Turing, descritte nel prosieguo (§10).

In ciascun passaggio $\tau_{(\ell \rightarrow \ell+1)}$, se le *distinzioni critiche* (Turing-centrali) sono *preservate*, l'indecidibilità si trasmette in (A2). Se invece vengono *collassate* (A3), sorgono proprietà emergenti non deducibili a livello inferiore. Così si rende conto sia della continuità micro-macro, sia dell'apparente “novità macroscopica”.

Di seguito un **carotaggio** di 4 livelli contigui (ad es. L_3, L_4, L_5, L_6) per esporne l'analisi in termini di *falsificabilità* e *verifiche*.

1. **Livello 3: “Chimica Computazionale”** (letteratura: Magnasco 1997):
Dominio e regole. Reazioni chimiche interpretate come processi di calcolo Turing-like (ad es. configurazioni di specie chimiche e step di reazione).
Poteniale Turing-likeness. In via teorica, alcune reazioni sono dimostrate capaci di universalità; per A1 si prevedono problemi indecidibili (Halting-like). *Verifica falsificante.* Se un esperimento riuscisse a produrre un “decisore universale” interno al sistema chimico, A1 sarebbe smentito.
2. **Livello 4: “DNA computing”** (letteratura: Benenson et al. 2001; Winfree 1998):

Trasmissione. $\tau_{(3 \rightarrow 4)}$ collega stati chimici a filamenti e protocolli di DNA computing. Se *quasi-iniettiva* sugli stati “computazionali” del Livello 3, l’indecidibilità risale (A2). Un collasso informativo su filamenti diversi ma rilevanti bloccherebbe la trasmissione. *Falsificabilità.* Se la mappa appare iniettiva, ma a L_4 si trova un meccanismo risolutore, si contraddice A2. Se si osservano fusioni di filamenti cruciali *senza* emergenza fenotipica, crolla A3.

3. Livello 5: “Cellula Computazionale” (lett. Noble 2008 per reti metaboliche, Cardelli 2005 per modelli formali):

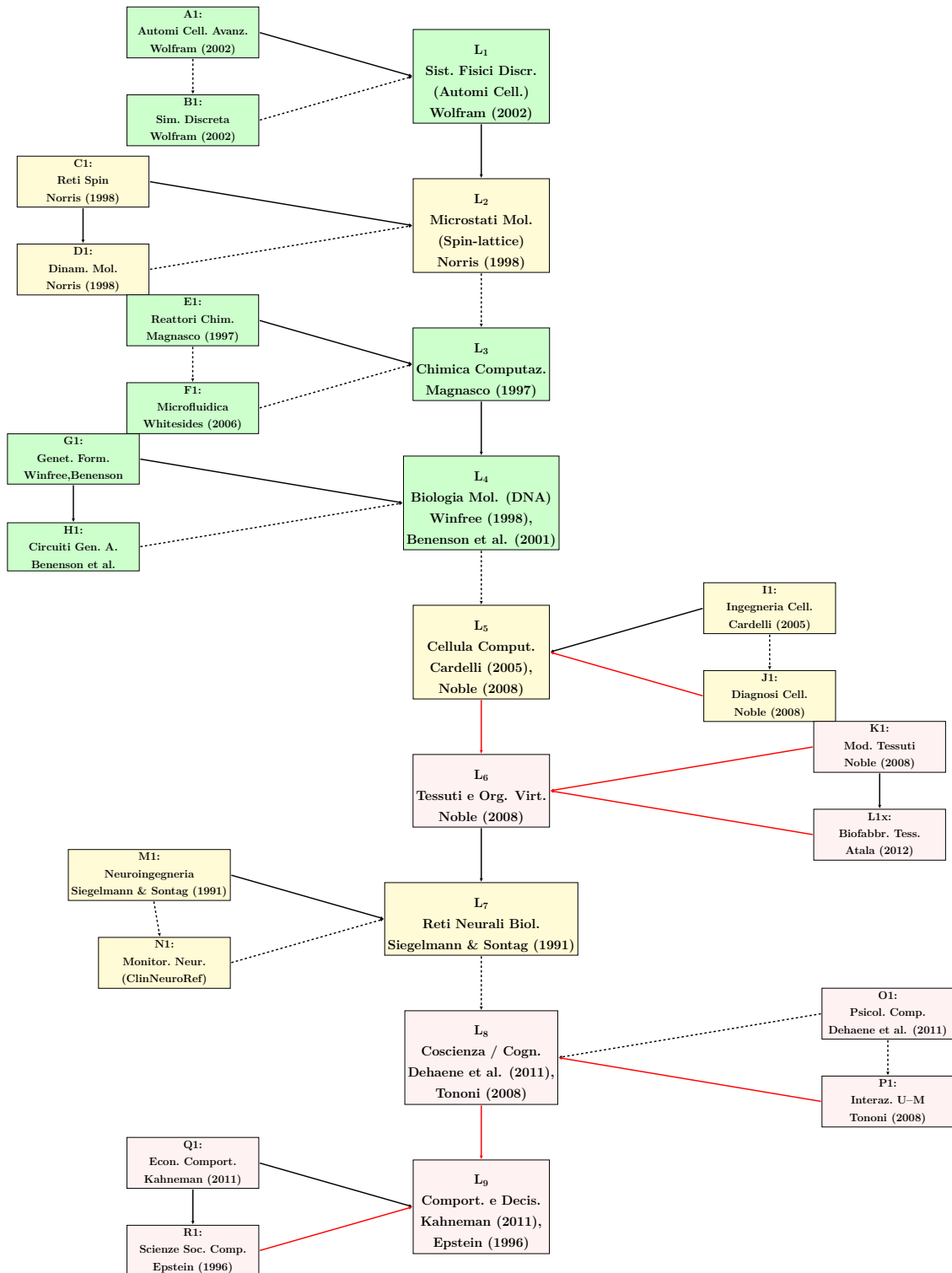
Contenuto. Stati di rete genica, pathway integrati. Potenziale universalità su piccola scala. *Trasmissione.* $\tau_{(4 \rightarrow 5)}$ dal DNA computing ad assetti fenotipici (proteine, espressioni). Spesso *non iniettivo*, fondendo più varianti molecolari in un *unico* fenotipo macroscopico. *Test empirico.* Se le differenze geniche (rilevanti) collassano in un fenotipo unificato, avremmo un classico caso di emergenza (A3). Se però si trovasse un collasso *rilevante* privo di emergenza, A3 sarebbe falsificato.

4. Livello 6: “Tessuti e Organi Virtuali” (lett. Noble 2008):

Dominio. Simulazioni multi-cellulari, modelli integrati (cuore, polmone, cervello) per prevedere comportamenti d’organo. *Trasmissione.* $\tau_{(5 \rightarrow 6)}$ fonde stati cellulari (spesso Turing-likeness *non* si preserva). Se alcuni pathway cruciali restano distinti, potrebbe *risalire* indecidibilità. *Falsificabilità.* Realizzare un “decisore” per la configurazione cellulare, contraddicendo A2 se la mappa era dichiarata iniettiva; osservare collassi massicci senza nuove proprietà emergenti confuterebbe A3.

In sintesi, *ognuno* di questi 4 livelli e le rispettive mappe di contiguità forniscono potenziali test di falsificazione per A1–A3. La *catena estesa di 15* livelli (descritta nel documento **ALLEGATO TECNICO-ANALITICO**) amplifica tali possibilità, mostrando come i collassi informativi o la quasi-iniettività possano alternarsi nella risalita micro–macro.

Nel quadro delle *Reti Locali di Astrazione* (RLA), i domini scientifici possono, tuttavia, essere connessi in maniera *reticolare*: la realtà è ricca di intersezioni, retroazioni e specializzazioni disciplinari. Tuttavia, si sceglie una *linearizzazione* — una “catena” ($L1$ – $L2$ –...) di livelli *adiacenti* — per rendere *più leggibile* la sequenza delle funzioni di trasmissione (iniettiva, quasi-iniettiva, non iniettiva) e per *localizzare* la comparsa di fenomeni di emergenza o indecidibilità.



Colori livelli

Verde	Turing-like (SI) o ingegneristici
Giallo	Turing-likeness parziale (QUASI)
Rosa	Non Turing-like (NO), livelli emergenti

Linee (funzioni di trasmissione)

Linea nera continua	Iniettiva: trasmette indecidibilità
Linea nera tratteggiata	Quasi-iniettiva: trasmissione parziale
Linea rossa continua	Non iniettiva: collasso informativo ed emergenza

In sintesi, il *diagramma* fornisce un *colpo d'occhio* sulle relazioni tra livelli, mentre le **tabelle** approfondiscono (i) la natura di ciascun *livello* (con Turing-likeness) e (ii) le *trasmissioni* effettive (“chi si collega a chi” e “con quale funzione”). Questa combinazione (diagramma + tabelle) rende il *progetto RLA* fruibile in modo *completo* e *multidimensionale*, pur ricordando che la linearizzazione è, *de facto*, una convenzione epistemica che semplifica un *reticolo* potenzialmente più complesso.

Livelli

Livello	Dominio	Turing-lik.?	Razionale	Leggi Interne	Trasmissione	Bibliografia
L_1	Sist. Fis. Discr.	SI	Automi (Rule110) universali	Update parallelo	Iniettiva	Wolfram (2002)
L_2	Microstati Mol.	QUASI	Spin-lattice pot. T-lik.	Eq. statist.	Quasi-Iniettiva	Norris (1998)
L_3	Chim. Comput.	SI	Magnasco <i>universalità</i>	Reazioni T-lik.	Iniettiva / quasi	Magnasco (1997)
L_4	Biol. Mol. (DNA)	SI	DNA computing (Winfree)	Ibrid. filam.	Quasi-Iniettiva	Winfree (1998)
L_5	Cell. Comput.	QUASI	Reti geniche ing. parz.	Fenotipo fuse	Quasi / Non-Iniett.	Cardelli (2005), Noble (2008)
L_6	Tess. Org. Virt.	NO	Aggreg. cellulare	Coarse gr. anat.	Iniettiva / Non	Noble (2008)
L_7	Reti Neur. Biol.	QUASI	Ricorrenza, risorse finite	Plasticità sinapt.	Quasi-Iniett.	Siegelmann & Sontag (1991)
L_8	Cosc. / Cogn.	NO	Emergenza forte	Coll. stati neur.	Non-Iniettiva	Dehaene et al. (2011)
L_9	Comport. / Decis.	NO	Decisioni finite	Euristiche	Non-Iniettiva	Kahneman (2011)
A1	Aut. Avanz.	SI	HPC su automi	Regole Wolfram	Iniettiva	Wolfram (2002)
B1	Sim. Discr.	SI	Pot. T-lik. HPC	Approcci HPC	Quasi-Iniettiva	Wolfram (2002)
C1	Reti Spin	QUASI	Alc. top. T-lik.	Inter. ret.	Iniettiva	Norris (1998)
D1	Dinam. Mol.	QUASI	PDE, riduz.	Eq. dinam.	Quasi-Iniettiva	Norris (1998)
E1	Reatt. Chim.	SI	Cinetiche pilotate	Reaz. chim.	Iniettiva	Magnasco (1997)
F1	Microfluidica	SI	Config. ad hoc	Flussi controll.	Quasi-Iniettiva	Whitesides (2006)
G1	Gen. Form.	SI	Rewriting su DNA	Codif. univ.	Iniettiva	Winfree (1998); Benenson et al. (2001)
H1	Circuiti Gen. A.	SI	Progett. enzim.	Circuiti genici	Quasi-Iniettiva	Benenson et al. (2001)
I1	Ingeg. Cell.	QUASI	Linee fenot. T-lik. parz.	Sist. ing.	Iniettiva	Cardelli (2005)
J1	Diagn. Cell.	QUASI	AI su fenotipi	Out. diag.	Non-Iniettiva	Noble (2008)
K1	Mod. Tessuti	NO	Macro agg.	Fusione anat.	Non-Iniett.	Noble (2008)
L1x	Biofab. T.	NO	Rigenerative	Creaz. tess.	Iniett./Non	Atala (2012)
M1	Neuroing.	QUASI	Reti ing. parz.	Sinapsi contr.	Iniettiva	Siegelmann & Sontag (1991)
N1	Monitor. Neur.	QUASI	Raccolta dati limit.	Sist. clinici	Quasi-Iniett.	(ClinNeuroRef)
O1	Psicol. Comp.	NO	No universalità	Riduz. pattern	Quasi-Iniett.	Dehaene et al. (2011)
P1	Interaz. U–M	NO	Fusione ibrida	Input AI	Non-Iniettiva	Tononi (2008)
Q1	Econ. Comp.	NO	Scelte eurist.	Param. cognit.	Iniettiva	Kahneman (2011)
R1	Sc. Soc. Comp.	NO	Emergenza soci.	Collasso	Non-Iniettiva	Epstein & Axtell (1996)

Connessioni

Conn.	Fonte	Target	Trasmissione	Effetto in RLA (interpretaz. scientifica)
C1	L_1	L_2	Iniettiva	Automi \rightarrow Spin-lattice, integrale T-lik. (Wolfram, Norris)
C2	L_2	L_3	Quasi-Iniettiva	Spin-latt. \rightarrow chimica, compress. minima (Magnasco)
C3	L_3	L_4	Iniettiva	Chimica \rightarrow DNA, universalità completa
C4	L_4	L_5	Quasi-Iniettiva	DNA \rightarrow cell. comput., ridott. fusione
C5	L_5	L_6	Non-Iniettiva	Collasso cellulare \rightarrow tessuti, emergenza anatom.
C6	L_6	L_7	Iniettiva	Org. virt. \rightarrow neurale, pot. T-lik. parz.
C7	L_7	L_8	Quasi-Iniettiva	Reti neur. \rightarrow cosc. con pooling ridotto
C8	L_8	L_9	Non-Iniettiva	Cosc. \rightarrow decis. globali, emergenza.
(A1,B1)	A1, B1		Iniettiva / Quasi	HPC su automi vs. sim. discreta.
(C1,D1)	C1, D1		Iniettiva / Quasi	Reti spin vs. Dinam. mol.
(I1,J1)	I1, J1		Iniettiva / Non	Ing. cell. vs. diagn. fenotip.
(K1,L1x)	K1, L1x		Non / Iniettiva	Modell. tess. vs. biofabbr. tess.
(M1,N1)	M1, N1		Iniettiva / Quasi	Neuroing. vs. monitor. neurale
(O1,P1)	O1, P1		Quasi / Non	Psicol. comp. vs. Interaz. U-M
(Q1,R1)	Q1, R1		Iniettiva / Non	Econ. comport. vs. sc. sociali

8.3 Conclusioni

Come anticipato, l'esempio operativo di linearizzazione di 15 livelli contigui è un esercizio dimostrativo, di natura speculativa, ma utile a comprendere un approccio metodologico che – se attuato sotto determinate condizioni – può portare non solo ad una "mappa" (più o meno utile scientificamente) ma ad una rappresentazione (come verrà discusso in §10) reticolare che stand-alone risulti ontologicamente autonoma, epistemologicamente chiusa e (natura del livello permettendo) computabile ai sensi di Turing.

9 Applicazioni e Studi di Caso

Dopo aver delineato la *struttura multi-livello* di Reti Locali di Astrazione (RLA) e i *principi-postulati* fondamentali, proponiamo alcuni esempi di **applicazioni** e **studi di caso** in diverse discipline. Tali esempi illustrano *come* i concetti di collasso, (quasi) iniettività, Turing-likeness e trasmissione dell'indecidibilità possano fornire *una* chiave di lettura a fenomeni biologici, fisici, cognitivi o sociali.

9.1 Biologia e Chimica Computazionale

DNA Computing e Sistema Cellulare. Come evidenziato da (Winfrey 1998) e (Benenson et al. 2001), protocolli di *DNA computing* dimostrano la potenza Turing-like di alcuni processi molecolari. Tuttavia, al passaggio micro→macro (in cui i filamenti di DNA vengono effettivamente espressi in una *risposta fenotipica*), spesso subentrano *collassi informativi*:

- Più filamenti diversi (con potenza computazionale distinta) producono la *medesima* uscita fenotipica (es. la stessa proteina reporter).
- Di conseguenza, la *trasmissione* non preserva la distinzione Turing-centrale: *emergenza* fenotipica (proprietà nuove, irriducibili al micro-dettaglio) e *blocco* dell'indecidibilità del calcolo molecolare.

Interpretazione RLA: a livello molecolare, esiste un sottosistema Turing-like (circuiti di DNA), ma la cellula *fusa* più distinzioni, limitando la risalita dei problemi insolubili.

Chimica Computazionale e Reazioni Enzimatiche. Laddove i modelli chimici abbiano *universalità* (Magnasco 1997), RLA mostra come la *cinetica chimica* possa ospitare *indecidibilità*. Tuttavia, *se* nella trasmissione a un *livello biologico* o *fisico macroscopico* si incorporano *coarse graining* e leggi di equilibrio, *collassando* configurazioni distinte, si genera emergenza (proprietà globali) e *perde* la Turing-likeness di partenza.

9.2 Automi Cellulari e Fisica dei Sistemi Complessi

Automi Cellulari Turing-completi. Tra gli esempi classici di “*fisica computazionale*,” (Wolfram 2002) evidenzia che alcuni automi cellulari (AC) possiedono potenza Turing. Se *nessun* “coarse graining” collassa gli stati Turing-centrali, *allora* l'indecidibilità del problema di Halting *persiste* anche su scale di osservazione più ampie. In *RLA*,

questo equivale alla funzione di trasmissione *iniettiva* (o quasi) fra le configurazioni AC e un successivo livello descrittivo.

Coarse Graining in Fisica Macroscopica. In molti approcci di *fisica statistica*, ampie porzioni di micro-configurazioni (*spin reticolari*, *stati di automa cellulare*) vengono *aggregate* in parametri macro (temperatura, pressione, magnetizzazione, ecc.). Tale *aggregazione* (non *iniettività*) *cancella* la possibilità di distinguere stati computazionalmente rilevanti e *blocca* l'indecidibilità, generando *proprietà emergenti* (transizioni di fase, rotture di simmetria, comportamenti collettivi) irriducibili al singolo dettaglio micro.

9.3 Reti Neurali Ricorrenti e Scienze Cognitive

Neuroscienze e Computazione Universale. Le *reti neurali ricorrenti* (RNN) possono, in teoria, emulare qualunque *calcolo* (Siegelmann & Sontag 1991), ma *nella pratica*, i livelli successivi (per es. “cognizione” o “comportamento”) *collassano* molti pattern neurali attraverso pooling o funzioni di *embedding*. Con RLA, ciò significa funzioni di trasmissione *non* *iniettive* sugli stati Turing-centrali, originando *concetti emergenti* (interpretazioni mentali) e *bloccando* la trasmissione di indecidibilità locale.

Esempio: Halting Problem Interno. Se la rete neurale, a livello micro, *codifica* il problema dell'arresto, ma la *cognizione cosciente* riceve un *pooling* sintetico, *non* riesce a recuperare appieno le distinzioni computazionali e *non* si appropria dell'indecidibilità. Al contempo, emergono proprietà psicologiche (concetti, emozioni) *non* deducibili line-by-line dal pattern neurale elementare.

9.4 Scienze Sociali e Agent-Based Model

Micro-agenti potenzialmente Turing-like. Nelle scienze sociali computazionali, i modelli agent-based *possono*, in linea di principio, implementare calcoli Turing (se dotati di memorie crescenti e regole iterative). Questo apre la *possibilità* che insorgano *limiti logici* in analisi sociali (es. previsione completa di comportamenti o evoluzioni di “società artificiali”).

Macro-livello sociale: collasso e fenomeni collettivi. Tipicamente, le funzioni aggreganti (es. *coarse graining* su masse di agenti, output statistici) *collassano* una vasta gamma di stati agent-based in parametri “macro” (densità demografica, preferenze elettorali sintetiche, ecc.). Si ottengono *fenomeni collettivi*

emergenti — non deducibili da una formula “*uno-a-uno*” sui microstati — e *perdita* dell’ind decidibilità che quei micro-agenti Turing-like avrebbero suggerito. In RLA, ciò corrisponde alla *non* iniettività su stati centrali.

9.5 Conclusioni sulle Applicazioni

In ciascuna di queste *storie di passaggio*, riscontriamo dinamiche coerenti col *cuore* di RLA:

1. **Collasso = Emergenza**: la fusione di distinzioni cruciali micro genera proprietà macro irriducibili (biologia molecolare → fenotipo, automa cellulare → parametri fisici, neuroni → concetti cognitivi, agenti → comportamento sociale).
2. **Preservazione Turing-centrale = Trasmissione Indecidibile**: se gli stati fondamentali del calcolo (DNA computing, configurazioni di AC, pattern RNN) *permangono distinti*, allora i *problemi insolubili* risalgono. Spesso, le scienze *non* implementano quell’iniettività estrema, preferendo *aggregare* e ridurre la complessità.

Il prossimo *paragrafo* si occuperà di *critiche* e *obiezioni* (riduzionismo forte, scetticismo fisico, interpretazioni sociali) e di come RLA risponda a ciascuna posizione, preservando la propria *struttura falsificabile* e arricchendosi delle possibili istanze correttive.

10 Topologie RLA Compatte (Ontologicamente Indipendenti, Epistemicamente Chiuse e Turing-Computabili)

Le **Reti Locali di Astrazione** (RLA) costituiscono un framework generale per rappresentare fenomeni organizzati su più livelli, in cui si manifestano congiuntamente *proprietà emergenti* (dovute alla non iniettività informativa tra livelli) e *limiti computazionali* (tipici dei sistemi Turing-like).

In questa sezione introduciamo una classe particolare di tali reti: le *Topologie RLA Compatte*, definite come reticoli multi-livello che soddisfano tre condizioni congiunte:

1. **Indipendenza Ontologica,**
2. **Chiusura Epistemica,**
3. **Turing-Computabilità.**

Motivazione filosofico-matematica

Nel lessico della filosofia della scienza, dire che un sistema è *ontologicamente indipendente* significa che non necessita di entità esistenti al di fuori del proprio dominio per giustificare l'esistenza o l'evoluzione dei propri stati. A livello formale, una topologia RLA $\mathcal{R} = \langle \mathcal{L}, \{\mathcal{E}_i\}, \{\mathcal{R}_i\}, \{f_{ij}\} \rangle$ è detta ontologicamente indipendente se:

- ogni entità \mathcal{E}_i e ogni regola \mathcal{R}_i è contenuta nei livelli \mathcal{L} di \mathcal{R} ;
- ogni ingresso dall'esterno passa per una funzione di trasmissione $f_{ext \rightarrow i}$ non iniettiva, cioè filtrata (collasso informativo), impedendo l'importazione diretta di complessità o indecidibilità esogene.

Analogamente, il concetto di *chiusura epistemica* implica che ogni conoscenza rilevante sul sistema sia inferibile o modellabile in base agli elementi e alle leggi interne. Filosoficamente, si tratta di una condizione di *autosufficienza esplicativa*: nessuna “scienza esterna” o “osservatore privilegiato” è richiesto per rendere conto del comportamento del sistema. Formalmente:

\mathcal{R} è epistemicamente chiuso se ogni dinamica, proprietà o fenomeno osservabile all'interno dei livelli \mathcal{L} è spiegabile o simulabile mediante le regole $\{\mathcal{R}_i\}$ e le funzioni f_{ij} del reticolo.

Infine, la *Turing-computabilità* garantisce che l'intero reticolo \mathcal{R} sia eseguibile su una macchina di Turing: ogni evoluzione temporale del sistema può essere descritta da una successione finita di operazioni deterministiche (o stocastiche computabili). Questo implica:

- assenza di “oracoli logici” o funzioni matematicamente non calcolabili;
- implementabilità algoritmica del sistema, fondamentale per la sua verificabilità empirica e simulabilità computazionale.

Definizione

Topologia RLA Compatta. Una topologia RLA \mathcal{R} è detta *compatta* se soddisfa simultaneamente:

1. **Indipendenza Ontologica:** ogni elemento, processo o parametro utilizzato nella descrizione di \mathcal{R} è contenuto in almeno un livello interno, e ogni interazione esterna è mediata da una funzione di trasmissione non iniettiva (collasso informativo);
2. **Chiusura Epistemica:** ogni proprietà rilevante del comportamento del sistema è spiegabile o modellabile in termini di dinamiche e interazioni interne;
3. **Turing-Computabilità:** tutte le funzioni \mathcal{R}_i e f_{ij} sono computabili in senso Turing, ovvero traducibili in una procedura algoritmica eseguibile da una macchina di Turing (totale o parziale).

Interpretazione

In sintesi, una Topologia RLA Compatta rappresenta un *microcosmo locale* logicamente e ontologicamente chiuso, in cui:

- l'emergenza è resa possibile dai collassi informativi tra livelli;
- i limiti computazionali emergono localmente da sottosistemi Turing-like;
- la coerenza interna garantisce la modellabilità, la simulabilità e la validazione empirica.

Contesto applicativo

Questo concetto consente di definire “mondi simulati” — biologici, cognitivi, artificiali — autosufficienti, testabili ed epistemicamente trasparenti. Le topologie RLA compatte diventano dunque strumenti teorici e pratici per:

1. formalizzare sistemi complessi reali con livelli di organizzazione gerarchici (organismi, reti cognitive, ecologie);
2. isolare sottosistemi osservabili dal resto dell’universo modellistico;
3. progettare simulatori autosufficienti (es. in Python) capaci di incorporare feedback locali, fenomeni emergenti e blocchi indecidibili interni.

Conclusioni

Nei documenti "**ALLEGATO TECNICO-ANALITICO**" e "**ALLEGATO CASO-STUDIO**" vengono, rispettivamente, sviluppate le formalizzazioni sopra esposte e presentato un esempio completo di *Topologia RLA Compatta* in ambito biologico, che descrive una *Briofita Generalista* soddisfacendo i requisiti di indipendenza ontologica, chiusura epistemica e computabilità, con microfondazione empirica e *PoC* realizzazione in Python simulabile.

11 Discussione Critica e Obiezioni

Dopo aver illustrato i fondamenti teorici di Reti Locali di Astrazione (RLA) e alcuni esempi applicativi, è opportuno considerare le *critiche* e *obiezioni* più comuni che filosofi della scienza, fisici teorici, biologi e studiosi di altre discipline potrebbero sollevare. L'ottica *multi-livello* di RLA, infatti, non si presenta come un modello monolitico, bensì come uno *schema* aperto alla verifica, alla revisione e al confronto con posizioni già consolidate o alternative.

11.1 Obiezioni dal Riduzionismo Forte

Posizione Critica. Alcuni sostenitori del riduzionismo radicale potrebbero ritenere che, se la materia possiede un *substrato computazionale* (cfr. Principio X), niente vieta, almeno in teoria, di “risalire” dal micro a qualunque macro-proprietà, annullando l'esigenza di postulare emergenza o irriducibilità.

Risposta di RLA.

- Le *funzioni di trasmissione* non sempre sono iniettive, bensì spesso operano *collassi* (Principio II), e ciò *impedisce* di recuperare integralmente il micro. Inoltre, i vincoli di risorse e gli assetti sperimentali (*incompletezza operativa*, Principio IV) rendono poco plausibile l'idea di un controllo analitico su “*tutti*” gli elementi micro.
- Il *mutamento ontologico* (Principio III) insiste sul fatto che anche un ricorso a ipotetiche “risorse illimitate” non conserverebbe pienamente l'identità del fenomeno originario, producendo *una nuova* entità ridotta, dunque non la stessa.

11.2 Critiche da Fisici Teorici: Turing-likeness Generale

Posizione Critica. La fisica, in molti contesti, utilizza modelli *non* Turing-like (ad esempio PDE lineari, sistemi integrabili), e potrebbe considerare l'idea di Turing-likeness onnipresente come fuorviante o eccessivamente ampia.

Risposta di RLA.

- RLA non *impone* la presenza di Turing-likeness in ogni dominio: semplicemente *ammette* che *laddove* si verifichino condizioni di universalità del calcolo, *allora* compaiono i problemi indecidibili.

- L'assenza di Turing-likeness in un dominio, secondo RLA, non esclude la possibilità di emergenza: i collassi informativi (non iniettività) possono verificarsi anche in modelli di calcolo finito o procedure limitate, generando fenomeni emergenti “locali” senza implicare limiti computazionali forti.

11.3 Perplexità delle Neuroscienze e Biologia

Posizione Critica. Biologi e neuroscienziati potrebbero contestare che *non* tutto nel vivente debba essere spiegato via “calcolo Turing-like,” e che ridurre i processi vitali (o coscienti) a una struttura di funzioni di trasmissione rischia di trascurare aspetti cruciali (omeostasi, dinamiche di sviluppo, evoluzione).

Risposta di RLA.

- RLA *non* afferma che *ogni* fenomeno in biologia o neuroscienze *debba* ricadere in un calcolo Turing: può darsi che alcuni livelli siano effettivamente “finiti” o “privi di universalità.”
- Il *framework* delle funzioni di trasmissione e collassi è *compatibile* con i modelli di fisiologia, sviluppo embrionale, evoluzione: *se* la scienza mostra che alcune differenze cellulari (geni, epigenetica) vengono *fuse* su scala tissutale, *allora* si ottiene emergenza fenotipica. Il *dettaglio* di come ciò avvenga potrebbe restare dominio di un ulteriore livello specializzato (p. es. la genetica molecolare).

11.4 Scienze Sociali: Sovra-semplificazione Computazionale?

Posizione Critica. Alcuni sociologi o antropologi potrebbero ritenere inappropriata l'idea che *modelli computazionali* (p. es. agent-based) esauriscano la complessità socio-culturale. Di conseguenza, parlare di Turing-likeness o collassi informativi *non* coinciderebbe con la reale ricchezza dei fatti sociali.

Risposta di RLA.

- RLA *non* pretende di *esaurire* la complessità socio-culturale, ma offre una *cornice formale* in cui un passaggio micro→macro (p. es. dagli agenti ai parametri aggregati) è visto come una funzione di trasmissione, *potenzialmente* generatrice di fenomeni emergenti.
- Il reticolo multi-livello può contemplare elementi non computazionali (rituali, simboli) la cui analisi rientra in modelli *non* Turing-like, restando all'interno

del medesimo framework RLA: *collassi* significativi potranno portare a emergenze sociologiche, anche in assenza di vincoli indecidibili.

11.5 Falsificabilità e Validazione Empirica

In prospettiva popperiana, qualcuno potrebbe chiedersi *come, operativamente*, testare le ipotesi di RLA:

- Identificare gli *stati rilevanti* micro e *verificare* se la scienza li *distingue* o li *fonde* nel passaggio disciplinare.
- Provare, mediante protocolli sperimentali, l'*effettiva* Turing-likeness di un dominio (o la sua mancanza), e *controllare* se i problemi insolubili previsti emergono *di fatto*.
- Individuare scenari in cui si *preveda* l'emergenza di proprietà macro a causa di collassi su variabili cruciali, e confrontare con l'evidenza sperimentale (risultati biologici, fisici o sociali).

La *letteratura* su *DNA computing*, *automi cellulari*, *IA neurale* e *agent-based modeling* fornisce esempi concreti di *come* tali verifiche possano essere svolte. Se esperimenti rilevassero, contrariamente a RLA, un “decisore” che risolvesse problemi indecidibili in un dominio Turing-like (senza collassi) oppure un'assenza totale di novità macro in presenza di collassi mirati, *allora* la struttura RLA su quel passaggio disciplinare andrebbe rivista o confutata.

11.6 Senso Critico e Prospettive di Sviluppo

Le obiezioni delineate mostrano che RLA non è un *edificio monolitico*, bensì un *meta-modello* (i) aperto all'incontro con altre impostazioni emergentiste o riduzioniste, (ii) soggetto a *validazione* e *falsificazione* empirica, e (iii) in dialogo con discipline che non abbracciano un costrutto computazionale. Di conseguenza, la *forza* di RLA risiede nell'avere un *linguaggio* logico-epistemico robusto e adattabile, che chiarisce *come* e *dove* accada l'emergenza (collassi) e *quando* permanga l'indecidibilità (Turing-likeness *non* collassata), senza pretendere di *risolvere* integralmente ogni fenomeno in un unico quadro riduzionista.

12 Prospettive Future e Conclusioni

Dopo avere esaminato i fondamenti, i principi–postulati e alcune critiche a Reti Locali di Astrazione (RLA), desideriamo tracciare alcune *prospettive future* e considerazioni conclusive. L’obiettivo è evidenziare come RLA si collochi in un *dialogo* continuo con le scienze esistenti, evitando la fissità di una teoria dogmatica e aprendosi a sviluppi sia teorici che sperimentali.

12.1 Reticoli con Loop e Category Theory

Il quadro *lineare* micro→macro spesso utilizzato (p.es. biologia molecolare → cellula → organismo) costituisce una *semplificazione*. In molti scenari (cervello–comportamento–società, *ecosistemi* con feedback multipli, complesse reti di discipline) *esistono* cicli e retroazioni a ogni scala. RLA include la possibilità di costruire *reticoli*, ma una prospettiva più avanzata potrebbe ricorrere a *Category Theory*: i livelli disciplinari come *oggetti*, le funzioni di trasmissione come *morfismi*, e i collassi informativi come *epi*-morfismi (non iniettivi). Questo permetterebbe di studiare le *composizioni* e i *loop* in modo formale, analizzando il *comportamento* di (*non*) *iniettività* su percorsi ciclici in un *grafo di livelli*.

12.2 Metriche di Collasso e Quantificazioni Emergenza

Uno dei punti ancora poco sviluppati è la definizione di *metriche* che misurino la “quantità” di collasso informativo avvenuto, oppure l’“intensità” di proprietà emergenti. Alcuni autori hanno suggerito entropie, divergenze di Kullback–Leibler, o coefficienti di *overlap* tra pre-immagini e immagini. Tali misure, se standardizzate, potrebbero permettere di confrontare *diversi* passaggi disciplinari e valutare *quanto* riduttiva (o generativa) sia la funzione di trasmissione in un caso concreto.

12.3 Applicazioni nella Biologia Sintetica e IA Avanzata

Dall’analisi del §9, risulta che ambiti come il *DNA computing* o le *reti neurali ricorrenti* forniscono terreni di prova in cui è possibile studiare *protocolli sperimentali* per dimostrare (o confutare) la Turing-likeness, e *verificare* se il passaggio a un livello macro generi *emergenza* o *eredità* dei limiti logici. Nel futuro, sperimentazioni su larga scala (p.es. organismi ingegnerizzati, reti neurali giganti, agent-based model con milioni di agenti) potrebbero confermare e raffinare i postulati di RLA, offrendo evidenze statistiche su collassi e quasi-iniettività.

12.4 Dibattito su Coscienza e Vita Artificiale

Da un lato, *Pluralità Ontologica* (Postulato II) indica la possibilità che le “proprietà del vivente” possano *riemergere* in substrati non organici, qualora si realizzino *processi Turing-like* e *collassi informativi* di portata analoga. Dall’altro, *Limitazione della Riducibilità* (Principio III) frena un ottimismo eccessivo circa la riduzione *completa* dei fenomeni coscienti, sostenendo la necessità di riconoscere mutamenti ontologici se si tenta di trasferire o codificare la coscienza in un altro dominio (p. es. “uploading” in macchine superTuring). In tal senso, RLA è compatibile con una visione *non strettamente monista* né dualista, ma *multi-livello* “*semi-riduzionista*,” con ampie zone di emergenza irriducibile.

12.5 Conclusioni e Ruolo nella Filosofia della Scienza

In conclusione, **RLA** si presenta come un *framework* meta-disciplinare, *falsificabile* (Principio V) e *strutturato* su principi e postulati che esplicitano *come* e *perché* sorgano fenomeni emergenti (collassi di stati centrali) o limiti computazionali (eredità Turing-like). *Senza* cadere nel relativismo assoluto, riconosce la pluralità epistemica (Principio I), il valore *strumentale* e *locale* delle discipline e l’impossibilità di un *riduzionismo totale* (Principio III). Questo *insieme di idee* pone le basi per analizzare *come* le scienze costruiscano mappe disciplinari, *quali* fenomeni vengano collassati o preservati e *in che modo* emergenza e indecidibilità possano coesistere in un universo — o reticolo di universi — potenzialmente computazionale.

Resta da esplorare *maggiormente* il trattamento di *loop* complessi, la formalizzazione con *morfismi* in Category Theory, e lo sviluppo di *metriche* quantitative sui collassi e sull’emergenza. Tali direzioni di ricerca promettono di arricchire il *dialogo* fra fisica, biologia, IA e scienze sociali, innervando la Filosofia della Scienza con un *linguaggio set-based* ma flessibile, in grado di ospitare sia fenomeni emergenti che limiti di calcolo di radice turinghiana.

References

- Anderson, P. W. (1972). More is different. *Science*, 177(4047), 393–396.
- Benenson, Y., Paz-Elizur, T., Adar, R., Keinan, E., Livneh, Z., & Shapiro, E. (2001). Programmable and autonomous computing machine made of biomolecules. *Nature*, 414(6862), 430–434.
- Cardelli, L. (2005). *Brane Calculi: Interactions of Biological Membranes*. In A. Gordon (Ed.), *Computational Methods in Systems Biology* (pp. 257–280). Springer.
- Cartwright, N. (1983). *How the Laws of Physics Lie*. Oxford University Press.
- Kuhn, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press.
- Lloyd, S. (2006). *Programming the Universe: A Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos*. Knopf.
- Magnasco, M. O. (1997). Chemical kinetics is Turing universal. *Physical Review Letters*, 78(6), 1190–1193.
- Morin, E. (2008). *On Complexity*. Hampton Press.
- Noble, D. (2008). *The Music of Life: Biology Beyond Genes*. Oxford University Press.
- Norris, J. R. (1998). *Markov Chains*. Cambridge University Press.
- Paun, G. (2000). Computing with membranes. *Journal of Computer and System Sciences*, 61(1), 108–143.
- Popper, K. R. (1959). *The Logic of Scientific Discovery*. Hutchinson.
- Rice, H. G. (1953). Classes of recursively enumerable sets and their decision problems. *Transactions of the American Mathematical Society*, 74(2), 358–366.
- Siegelmann, H. T., & Sontag, E. D. (1991). Turing computability with neural nets. *Applied Mathematics Letters*, 4(6), 77–80.
- Turing, A. M. (1936). On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2(42), 230–265.
- Winfrey, E. (1998). *Simulations of Computing by Self-Assembly*. In *DNA Based Computers 2*, DIMACS Series (pp. 213–242). American Mathematical Society.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media.



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI UDINE**

hic sunt futura

Master di I Livello in
Filosofia del Digitale e Intelligenza Artificiale

ELABORATO FINALE

ALLEGATO 1 – DOC. TECNICO

Principi, Struttura e Fondamenti Filosofici delle Reti Locali di Astrazione (RLA)

Stratificazione Informativa, Collassi ed Emergenza
in una Visione Multi-Livello Realtà

Candidato
Gianluca Conte

ANNO ACCADEMICO 2024 – 2025

Abstract

La letteratura sui sistemi complessi esplora l'*emergenza* di proprietà macro non immediatamente riconducibili alle configurazioni micro, mentre l'informatica teorica e la fisica computazionale studiano l'*indecidibilità* in contesti Turing-like, evidenziando limiti non aggirabili nella capacità di calcolo. Questi due temi, cruciali e apparentemente separati, trovano una cornice unificante nelle *Reti Locali di Astrazione* (RLA), proposte in questo lavoro, che definiscono: (i) *livelli di astrazione* (insiemi di stati e regole) organizzati in catene o reticoli multi-livello, (ii) *funzioni di trasmissione* fra livelli adiacenti (iniettive o non iniettive), (iii) *assiomi, lemmi e teoremi* che stabiliscono se e come *problemi indecidibili* si trasmettano a livelli superiori o vengano “bloccati” da *collassi informativi*. RLA non descrive la “*realtà fenomenica*” bensì *come essa viene rappresentata*, in modo parcellizzato e specialistico, dalle varie discipline scientifiche, che appaiono tra loro contigue o disgiunte a seconda delle funzioni di trasmissione tra i livelli. Non si tratta, dunque, di un modello ontologico, ma di uno *schema epistemico-matematico* delle condizioni in cui si verificano *trasferimenti di indecidibilità* e/o *emergenza irriducibile*. Dal punto di vista della *Filosofia della Scienza*, RLA non si pone come una teoria *alternativa* ai modelli disciplinari consolidati, ma come una *struttura di raccordo* che integra: la *pluralità dei livelli*, la possibilità di un *riduzionismo parziale* nei casi di iniettività, e la necessaria *presenza di limiti computazionali* nei livelli Turing-like. L'elemento innovativo è mostrare *quando* l'indecidibilità (*inevitabile* in un livello Turing-like) “risale” la scala disciplinare e *quando* la non iniettività porta a *proprietà emergenti* irriducibili. Sottolineiamo tuttavia che *non ogni* collasso informativo genera novità: soltanto la fusione di *stati rilevanti* (differenze sperimentali/teoriche significative) origina un “collasso con emergenza”; al contrario, la fusione di stati marginali costituisce un “collasso senza emergenza” e non implica fenomeni emergenti. L'impianto RLA, radicato nei teoremi di Turing e Rice, è supportato da esempi provenienti dalla biologia molecolare (DNA computing), dalla fisica (automi cellulari e termodinamica), dall'IA (reti neurali) e dalle scienze sociali. Presentiamo inoltre una *catena complessa* come esempio operativa multi-scala e forniamo una *tabella* di discipline, distinguendone la *Turing-likeness*. Proseguiamo discutendo le prospettive di falsificabilità popperiana, le possibili *metriche di collasso*, l'estensione a *reticoli con loop* e il potenziale dialogo con la *Category Theory*. Nella trattazione viene, inoltre, introdotta la nozione di *Topologia RLA Compatta*, definita come Reticolo Locale di Astrazione Ontologicamente Indipendente, Epistemologicamente Chiuso e Computabile ai sensi di Turing, rilevando quindi come struttura per costruire reticoli multi-livello computazionalmente “autosufficienti”.

Contents

1	Introduzione	5
1.1	Motivazioni	5
1.2	Obiettivi	5
1.3	Organizzazione del Paper	6
2	Revisione Letteratura e Fondamenti Disciplinari	7
2.1	Emergenza e Sistemi Complessi	7
2.2	Indecidibilità e Turing-likeness	8
2.3	Livelli di Astrazione e Sistemi Multi-Livello	8
2.4	Necessità di un Quadro Unificante	8
3	Quadro Epistemico-Filosofico di RLA	9
3.1	Convenzionalità dei Domini e Realismo Parziale	9
3.2	Definizione di Contiguità: Criteri Empirico-Teorici	10
3.3	Riduzionismo, Collassi Informativi e Reticoli	10
3.4	Raccordo Epistemico-Matematico	10
4	Assunzioni Fattuali	12
4.1	Che Cosa si Intende per Turing-likeness	12
4.2	Contiguità e Validazione Empirica	13
4.3	Definizione Operativa di Stati Turing-centrali	13
4.4	Rilevanza del Collasso e Soglie Sperimentali	14
5	Formalizzazione Matematica di RLA	15
5.1	Definizioni Fondamentali	15
5.2	Assiomi del Modello RLA	16
5.3	Lemmi e Teoremi Principali	17
5.4	Commenti e Collegamenti con la Logica Computazionale	18
6	Falsificabilità e Possibili Esperimenti	20
6.1	Principi di Falsificabilità	20
6.2	Casi di Test e Protocollo Sperimentale	20
6.3	Esempio di Setup: Dal Protocollo all'Interpretazione	21
6.4	Framework Aperto a Verifiche Incrociate	22
7	Fondamenti Minimi Disciplinari	23
7.1	Matematica e Teoria della Computazione	23
7.2	Filosofia della Scienza	23

7.3	Biologia Computazionale	24
7.4	Fisica Computazionale	24
7.5	IA e Scienze Cognitive	25
8	Esempi Concreti e Funzioni di Trasmissione	26
8.1	Es.1: Biologia Molecolare → Cellula Computazionale	26
8.2	Es.2: Automa Cellulare Universale → Parametri Termodinamici . . .	26
8.3	Es.3: IA Neurale (RNN) → Livello Cognitivo	28
8.4	Es.4: Un Caso di Calcolo Indecidibile “Trasmesso”	28
9	Esempio Operativo (Catena Livelli Contigui)	30
9.1	Filosofia della Sequenza: Linearità come Semplificazione	30
9.2	Descrizione Dettagliata dei 15 Livelli	30
9.3	Quando Avviene la Trasmissione di Indecidibilità?	36
9.4	Accumulo di Collassi ed Emergenza	36
9.5	Blocco e Ri-emersione della Turing-likeness	36
9.6	Rilievi Metodologici: Linearità e Reticoli con Loop	37
10	Esempi di altri Domini Scientifici	38
10.1	Ragioni della Classificazione SI/NO	39
10.2	Discipline-Ponte e Futuri Sviluppi	40
10.3	Implicazioni per RLA	40
11	<i>Topologie RLA Compatte: Reticoli Indipendenti Ontologicamente, Chiusi Epistemicamente e Computabili</i>	42
11.1	Indipendenza Ontologica	43
11.2	Chiusura Epistematica	44
11.3	Turing-Computabilità	44
12	Costruzione di una Topologia RLA Compatta	46
12.1	Fase 1: Identificare il Dominio e le Fonti di Microfondazione	46
12.2	Fase 2: Selezione e Descrizione dei Livelli	46
12.3	Fase 3: Definire le Funzioni di Trasmissione (f_{ij}) con Riferimenti Empirici	47
12.4	Fase 4: Verificare Indipendenza Ontologica e Chiusura Epistematica . .	47
12.5	Fase 5: Assicurare la Turing-Computabilità	48
12.6	Conclusioni	48

13 Discussione Interdisciplinare	50
13.1 Raccordo con la Matematica e la Filosofia della Scienza	50
13.2 Coesistenza di Emergenza e Indecidibilità	50
13.3 Funzioni di Trasmissione come Chiave di Volta	51
13.4 Topologia RLA Compatta	51
13.5 Reticoli Multi-livello con Loop: Prospettive Future	51
13.6 Sintesi Interdisciplinare	52
14 Riflessioni Ontologiche, Epistemologiche e Questione Coscienza	54
14.1 Linee di Pensiero: dalla Storia Antica a Quella Moderna	54
14.2 Epistemologia: Pluralità Livelli e Limiti Conoscenza	55
14.3 Ontologia: Riduzionismo, Emergenza e Sguardo Teologico	56
14.4 Confronto con l'Antispecismo Post-Umanista	57
14.5 La Coscienza: Mente-Corpo e Indecidibilità	57
14.6 RLA come Modello di Sintesi	58
15 Conclusioni e Prospettive Future	59
15.1 Riassunto dei Contributi Chiave	59
15.2 Limiti Correnti e Criticità Aperte	60
15.3 Direzioni di Ricerca e Sviluppi Futuri	61
15.4 Conclusioni Finali	63
Glossario dei Termini-Chiave in RLA	64
Appendica A: Dimostrazioni Formali Estese	66
Appendica B: Approfondimenti Tecnici per i Protocolli Sperimentali	70
Appendica C: Bozza di Metrica di Collasso e Indice di Emergenza	74
Bibliografia	77

1 Introduzione

1.1 Motivazioni

La scienza contemporanea affronta, in modo capillare, la *complessità* del reale, riscontrando da un lato *fenomeni emergenti* non immediatamente riconducibili ai microstati (come in fisica statistica o biologia dei sistemi), e dall'altro i *vincoli di calcolo* scaturiti dalla teoria della computazione (teoremi di Turing, Church, Rice). Tuttavia, tali temi — *emergenza* e *indecidibilità* — sono spesso trattati in letterature separate e con approcci epistemici poco interconnessi.

Le *Reti Locali di Astrazione* (RLA) nascono come tentativo di colmare il *vuoto* tra questi due paradigmi: esse offrono una cornice formale che integri *multi-livello* (tipico degli studi sull'emergenza) e *limiti computazionali* (radicati nei risultati classici della teoria di Turing). *In ultima istanza*, mira a rispondere alla domanda: *come possono fenomeni emergenti e indecidibilità coesistere o escludersi in un sistema descritto su più livelli disciplinari?*

Dal punto di vista epistemologico, RLA *non pretende di rappresentare la realtà "in sé"*, bensì si concentra su **come** essa venga *descritta* da differenti discipline scientifiche. In tal senso, RLA analizza *le condizioni formali* con cui avvengono trasferimenti informativi, collassi o trasmissioni tra livelli disciplinari adiacenti. Si tratta, dunque, non di un modello ontologico, ma di uno *schema di meta-riflessione* sulla struttura epistemica delle scienze.

In particolare, RLA non si propone come una *teoria sostitutiva*, bensì come una *struttura integrativa* che raccorda: (1) la *pluralità disciplinare* (con livelli specialistici diversi ma interconnessi), (2) la possibilità di *riduzioni parziali* nei casi di trasmissione iniettiva, (3) la *presenza inevitabile di limiti computazionali* in alcuni domini dotati di Turing-likeness.

1.2 Obiettivi

Il presente lavoro intende:

1. **Formalizzare** un *quadro teorico unificante* in cui:
 - (a) I *livelli di astrazione* (pratiche disciplinari e scale descrittive) siano definiti matematicamente come insieme di *stati* e *regole*.
 - (b) Le *funzioni di trasmissione* tra livelli (spesso non iniettive) possano spiegare *quando* i problemi indecidibili (Halting Problem, Teorema di Rice)

“risalgano” la scala e *quando* emergano proprietà *non deducibili* dal mero micro.

2. **Dimostrare** la validità del modello con *esempi* trasversali: DNA computing, fisica degli automi cellulari, reti neurali ricorrenti, scienze cognitive e sociali.
3. **Mostrare** come RLA sia *falsificabile*: ognuno dei tre assiomi centrali (A1–A3) presenta condizioni empiriche o concettuali che consentono test e potenziali confutazioni in senso popperiano.
4. **Introdurre** la nozione di *Topologia RLA Compatta*, ossia un reticolo di livelli Ontologicamente indipendente, Epistemologicamente chiuso e computabile in senso Turing, in cui la dinamica multi-livello possa darsi in modo localmente autosufficiente, aprendo la strada a implementazioni sperimentali e simulazioni di sistemi che si comportino come “microcosmi” di studio.
5. **Proporre** spunti di estensione futura: reticoli con loop e retroazioni, definizione quantitativa di “coefficiente di collasso,” collegamenti con la Category Theory, e protocolli sperimentali in biologia sintetica e IA.

1.3 Organizzazione del Paper

Il lavoro si articola in dodici sezioni principali (più appendici). Dopo questa **Introduzione**, la **Sez. 2** rivede lo stato dell’arte su emergenza e indecidibilità, chiarendo la necessità di un *framework* integrato. La **Sez. 3** pone le basi epistemico-filosofiche e discute la *contiguità* disciplinare.

Nella **Sez. 4** vengono esplicitate le *Assunzioni Fattuali* (che cosa si intende per Turing-likeness reale o teorica, come si validano empiricamente le funzioni di trasmissione e come si isolano gli stati computazionali centrali). La **Sez. 5** presenta la *formalizzazione matematica* di RLA: definizioni (livello di astrazione, (non) iniettività), assiomi (A1–A3) e teoremi fondamentali (propagazione dell’indecidibilità, emergenza da collasso).

La **Sez. 6** si sofferma sulla *falsificabilità* del modello, fornendo esempi di *come* A1–A3 possano essere smentiti e con quali sperimentazioni. La **Sez. 7** chiarisce i “fondamenti minimi” di matematica, filosofia, biologia, fisica e IA necessari a comprendere e applicare RLA. La **Sez. 8** espone *esempi concreti* di funzioni di trasmissione fra livelli (DNA→Cellula, AutomaCell.→Termodinamica, RNN→Cognizione, ecc.), integrando un esempio dettagliato di “calcolo indecidibile trasmesso.”

La **Sez. 9** illustra un esempio di *catena di 15 livelli contigui* come dimostrazione operativa multi-scala, mentre la **Sez. 10** presenta una *tabella estesa di altre disci-*

pline, distinte in Turing-like (15) e non Turing-like (15), con brevi commenti motivazionali. Nella **Sez. 11**, si introduce la definizione di "Topologia RLA Compatta", cioè un Reticolo Locale di Astrazione che risulti Indipendente dal punto di vista Ontologico, Chiuso dal punto di vista Epistemico e Computabile ai sensi di Turing. Nella **Sez. 12**, si definisce un metodo step-by-step per la costruzione di una Topologia RLA Compatta, microfondata in base alla letteratura inerente all'oggetto modellato (es. Briofita Generalista come da caso Studio Allegato).

Nella **Sez. 13** si discutono i risultati in prospettiva interdisciplinare, evidenziando la *chiusura del cerchio* tra emergenza e limiti computazionali e introducendo la questione dei *reticoli con loop*.

La **Sez. 14** si presenta un approfondimento di RLA in chiave filosofica e, in particolare, Ontologica ed Epistemica.

Infine, la **Sez. 15** offre una visione di insieme sulle *prospettive future*: metriche di collasso, protocolli sperimentali e potenziali sviluppi teorici (Category Theory, reticoli dinamici). Le Appendici riportano dimostrazioni matematiche complete e approfondimenti tecnici per i lettori specializzati.

2 Revisione Letteratura e Fondamenti Disciplinari

2.1 Emergenza e Sistemi Complessi

Nell'ambito dei sistemi complessi, (Anderson 1972) segnala come “*More is Different*”: la comparsa di *proprietà macro* (rottture di simmetria, transizioni di fase, comportamenti collettivi) non immediatamente deducibili dalla somma delle microparti. In *biologia dei sistemi*, (Morin 2008) sottolinea l'idea di *emergenza* come effetto di interazioni non lineari e multi-agente, dove la *descrizione microscopica* non basta per spiegare *completamente* le dinamiche emergenti.

Gran parte di questa letteratura, tuttavia, inquadra l'emergenza in termini di *complessità computazionale* o *difficoltà pratica* di riduzione, più che in termini di *limiti logico-computazionali* intrinseci. L'assenza di un *riferimento esplicito* alle *indecidibilità* — e ai loro principi formali — lascia aperta la questione di *se* e *come* i fenomeni emergenti possano risultare, in linea di principio, “irriducibili” per motivi non soltanto pratici, ma *logici*. In molti studi sulla complessità computazionale, si tende infatti a focalizzarsi sulle difficoltà *pratiche* (p.es. NP-hardness), senza tuttavia collegarle a *indecidibilità forte* (Halting Problem, Rice). Questa distinzione tra “complessità elevata” e “limite logico assoluto” è raramente esplicitata nella letteratura emergentista, e costituisce invece un asse cardine del presente lavoro.

2.2 Indecidibilità e Turing-likeness

Fin dalla formulazione di (Turing 1936) e (Church 1936), la teoria della computazione classica ha mostrato che *ogni* sistema Turing-like — in grado cioè di simulare una Macchina di Turing universale — ospita problemi indecidibili (quali l’Halting Problem o il Teorema di Rice (Rice 1953)). Nel corso del tempo, è emerso che *vari* sistemi fisici o biologici *possono* implementare computazioni universali: dagli *automi cellulari* (Wolfram 2002) alle *reti neurali ricorrenti* (Siegelmann & Sontag 1991), passando per il *DNA computing* (Winfrey 1998; Benenson et al. 2001).

Tuttavia, gran parte di questi risultati vive *all’interno* della comunità di “informatica teorica” e “fisica computazionale,” rimanendo *parzialmente* slegata dalla letteratura su *emergenza* nei sistemi multi-scala. Ciò lascia irrisolta la questione di *come*, in un sistema *Turing-completo*, le *transizioni micro-macro* possano *trasmettere* o *bloccare* l’indecidibilità.

2.3 Livelli di Astrazione e Sistemi Multi-Livello

Uno dei punti cardine per studiare i *fenomeni emergenti* è l’uso di “livelli di astrazione” (in fisica, biologia, scienze cognitive, ecc.): si passa, ad esempio, da un *livello molecolare* a un *livello cellulare*, poi a un *livello d’organo*, e infine a un *livello d’organismo*. Simili progressioni si ritrovano in *fisica statistica* (microstati → parametri termodinamici) e in *scienze sociali* (individuo → gruppo → società). Nel contesto di *Teoria Generale dei Sistemi*, (Bertalanffy 1968) e (Koestler 1967) già postulavano gerarchie nested (holarchie), ma non approfondivano la connessione con i *limiti computazionali*.

Allo stato attuale, mancano *cornici* che *formalizzino*, in termini di *(non) iniettività* e *Turing-likeness*, *quali* informazioni micro siano *preservate* nella trasmissione a un livello macro e *quali* differenze vadano “fuse” o “collassate,” originando fenomeni *non riducibili*. Inoltre, la maggior parte dei modelli multi-livello non abbraccia sistematicamente la teoria dell’indecidibilità.

2.4 Necessità di un Quadro Unificante

La *storia* della scienza multi-disciplinare (biologia, fisica, IA, scienze cognitive) e della *teoria della computazione* suggerisce che esista un *potenziale* di integrazione tra la prospettiva emergentista e i teoremi sul *limite* del calcolo. Da un lato, in un contesto micro Turing-like, emergono *problemi insolubili* (Halting Problem, Rice); dall’altro, la fisica e la biologia mostrano *collassi informativi* che generano novità macro. Il *collegamento* tra queste due dinamiche è stato poco esplorato.

Le **Reti Locali di Astrazione (RLA)** nascono per *colmare* tale *gap*, fornendo:

- Una *formalizzazione* in chiave set-based e logico-computazionale, che includa la *(non) iniettività* come meccanismo di riduzione dell'informazione.
- Un *metodo* per stabilire se i *limiti d'indecidibilità* si conservano lungo una catena di livelli (Teorema 1) o se subentrano fenomeni emergenti irriducibili (Teorema 2).
- Un *criterio* di *contiguità* basato sulle evidenze empiriche e la coerenza disciplinare, col fine di ancorare la teoria a basi sperimentali (cap. 3).

Nelle sezioni successive, *ripercorriamo* la cornice epistemica (Sez. 3) e poi entriamo nella *formalizzazione* vera e propria (Sez. 4 e 5), cercando di offrire al lettore un quadro completo di come *emergenza* e *indecidibilità* possano, in effetti, *coesistere* o *ostruirsi* a seconda delle *funzioni di trasmissione* fra livelli adiacenti.

3 Quadro Epistemico-Filosofico di RLA

3.1 Convenzionalità dei Domini e Realismo Parziale

Secondo le posizioni di (Berger & Luckmann 1966), i domini scientifici (ad esempio, “fisica molecolare,” “biologia cellulare,” “IA neurale,” ecc.) nascono da un processo *storico* e *socialmente condiviso*, volto a *ritagliare* porzioni di realtà osservabile in insiemi di *fenomeni* e *concetti* coerenti. Tale “*convenzione*” non nega la dimensione realistica: i livelli disciplinari non sono arbitrarie finzioni, bensì entità ancorate a *dati empirici*, sperimentazioni e parametri riconosciuti.

Adottiamo qui un *realismo parziale*, in cui i livelli di astrazione sono *ricostruzioni concettuali* legate alla capacità di un dominio di *spiegare*, *prevedere* e *controllare* fenomeni concreti. Ad esempio, un “livello molecolare” in biologia possiede strumenti (microscopia, reazioni chimiche, modelli di interazione) che *dimostrano* la validità del proprio “*ritaglio*” disciplinare; analogamente, un “livello cognitivo” in psicologia/IA è fondato su misure comportamentali e modelli cognitivi condivisi dalla relativa comunità scientifica.

3.2 Definizione di Contiguità: Criteri Empirico-Teorici

Postuliamo che due livelli di astrazione L_i e L_{i+1} siano *contigui* se e solo se esiste una *funzione di trasmissione*

$$\tau_{(i \rightarrow i+1)} : D(L_i) \longrightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1}))$$

che rifletta il *rapporto empirico-teorico* riconosciuto dalla disciplina. In altre parole, occorre:

1. **Un corpus di conoscenze** che leghi i due domini, come la genetica formale (genotipo \rightarrow fenotipo), la meccanica statistica (spin reticolari \rightarrow parametri termodinamici), o i modelli cognitivi (stati neurali \rightarrow concetti mentali).
2. **Coerenza empirica**: la mappa $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ deve corrispondere a processi osservabili o teorie verificate (sebbene non necessariamente *complete*).

La contiguità non implica *per forza* un rapporto “micro determina macro” in senso puramente riduzionista. Essa *ammette* che possano esserci *collassi informativi* (non iniettività), e anzi ne fa un elemento costitutivo della transizione fra livelli.

3.3 Riduzionismo, Collassi Informativi e Reticoli

L’idea di “livello inferiore” che *determina* il “livello superiore” è stata al centro del *riduzionismo classico*. Qui, tuttavia, riconosciamo che le *funzioni di trasmissione* fra livelli contigui **possono** essere:

- **Iniettive** (o quasi iniettive), in grado di preservare distinzioni micro anche su scala macro.
- **Non iniettive**, fondendo distinti stati micro in un’unica configurazione macro (cosiddetto *collasso informativo*).

La non iniettività crea fenomeni *irriducibili*, “nuove proprietà” emergenti che non si possono *dedurre* come un’ovvia proiezione biunivoca dal micro. In quest’ottica, *RLA* non sceglie un *unico* percorso riduzionista o emergentista, bensì offre un *reticolo discorsivo* di livelli, potenzialmente con scambi di informazione in entrambe le direzioni (micro \leftrightarrow macro).

3.4 Raccordo Epistemico-Matematico

Il passaggio dai *costrutti epistemici* (livelli come “convenzioni disciplinari”) alla *formalizzazione matematica* (insiemi di stati, mappe iniettive/non iniettive) costituisce

la caratteristica centrale di RLA. Da un lato, si *rispetta* la natura storica e sperimentale dei livelli, senza imporre un rigido dogma “micro spiega macro.” Dall’altro, si *applica* la teoria degli insiemi e la logica delle riduzioni computazionali: questa base permette di definire *quando* un livello è Turing-like e *quando* la non iniettività produca *proprietà emergenti* irriducibili.

Nella prossima sezione (§4), introdurremo le *assunzioni fattuali* che chiariscono *come* riconoscere, nella pratica scientifica, i *livelli Turing-like*, *quali* criteri empirici definiscano la contiguità, e *come* isolare gli *stati computazionali* effettivamente coinvolti. Con tali basi, passeremo poi alla *formalizzazione* rigorosa in Sez. 5.

4 Assunzioni Fattuali

In questa sezione formalizziamo le *condizioni* necessarie per applicare correttamente le *Reti Locali di Astrazione* (RLA) in contesti disciplinari *realistici*. Sezioni precedenti hanno introdotto l'idea di “livelli di astrazione” come *domini* disciplinari e la “contiguità” come *funzioni di trasmissione*. Qui esplicitiamo (i) i criteri per definire un livello come *Turing-like* o meno, (ii) le basi empiriche che giustificano i passaggi micro→macro, e (iii) l'identificazione degli *stati computazionali centrali* in ogni dominio. Infine, affrontiamo (iv) la questione di *quando* un collasso informativo (non iniettività) sia “rilevante” ai fini dell'emergenza.

4.1 Che Cosa si Intende per Turing-likeness

Turing-likeness “piena”. La definizione classica di Turing-likeness (Turing 1936; Church 1936) richiede che il sistema sia in grado di simulare, in linea di principio, *ogni* computazione eseguibile da una Macchina di Turing universale. In termini di *livello di astrazione*, ciò si traduce nell'esistenza di:

- Un *insieme di stati* $C \subseteq D(L)$ e un *insieme di regole* $\Sigma_{\text{comp}} \subseteq \Sigma(L)$ tali da garantire la possibilità di eseguire, con risorse potenzialmente illimitate o estensibili, *qualunque* programma Turing.
- Possibilità di codificare input e memorizzare configurazioni intermedie senza vincoli insormontabili in termini di *memoria* o *tempo*.

Esempi noti includono *DNA computing* (con protocolli adeguati), alcune *reti neurali ricorrenti* (Siegelmann & Sontag 1991) e *automi cellulari* universali (Wolfram 2002).

Turing-likeness “limitata”. Nella pratica, moltissimi sistemi naturali o artificiali *supportano* computazioni di potenza prossima a Turing, ma devono fronteggiare vincoli energetici, spaziali o di precisione numerica. In tali casi, si può parlare di “Turing-likeness limitata,” ritenendo che l'infinitezza delle risorse sia un modello *idealizzato*. Un esempio è quello di *reti neurali reali* in un cervello biologico, potenzialmente universali ma con risorse finite.

Turing-likeness “teorica” (per costruzione). Alcune piattaforme, specie *biologiche sintetiche* e *fisico-simulazionali*, possono essere *ingegnerizzate* ad hoc per ospitare calcoli universali, sebbene in condizioni sperimentali molto specializzate. Esse rientrano nel novero “teorico” in quanto la realizzabilità della Turing-likeness è dimostrata su *piccole scale*, ma è plausibile in linea di principio su grandi scale.

4.2 Contiguità e Validazione Empirica

Come discusso in §3.2, due livelli contigui L_i e L_{i+1} prevedono una funzione di trasmissione $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$. Perché ciò non resti *un mero esercizio formale*, occorre che esistano:

1. **Modelli o teorie empiriche** che descrivano *come* L_i influenzi L_{i+1} . Ad esempio, in *genetica formale*, i geni (livello molecolare) determinano proteine e fenotipi *in modo sperimentabilmente verificato*.
2. **Misure o evidenze sperimentali** che supportino la mappa τ . Ciò garantisce che la contiguità *non* sia un'ipotesi arbitraria, ma rifletta uno *scenario* consolidato nella disciplina (o *falsificabile*, se emergono dati contrari).

Il *grado di dettaglio* con cui $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ è definita può variare da modelli deterministici espliciti a funzioni di *coarse graining* (nel caso di transizioni micro \rightarrow macro in fisica).

4.3 Definizione Operativa di Stati Turing-centrali

Se un livello L è *Turing-like*, è spesso necessario identificare il sottoinsieme $C \subseteq D(L)$ di *stati computazionali centrali*, la cui *dinamica* rende possibile la potenza di calcolo illimitata. Esempi:

- *DNA computing*: i filamenti codificano input e “memoria,” e reazioni di ibridazione/fissione corrispondono alle “istruzioni” Turing.
- *Reti neurali ricorrenti*: vettori di stato in un layer hidden, con parametri sinaptici che consentono la simulazione di macchine di Turing.
- *Automi cellulari*: configurazioni su reticolo, dotate di regole di aggiornamento in grado di esprimere computazione universale.

In *RLA*, la *quasi-iniettività* sui soli C è sufficiente (Sez. 5, Def. 4) per trasmettere l'indcidibilità (A2). Non occorre l'iniettività su *tutto* $D(L)$, bensì la conservazione delle distinzioni *critiche* interne alla computazione.

Stati Rilevanti e Ruolo Empirico. Nell'ambito di *Reti Locali di Astrazione*, qualificiamo come *stati rilevanti* quelli che (i) possiedono un impatto *misurabile* o *teoricamente significativo* nel dominio disciplinare considerato, e (ii) risultano *discriminabili* sul piano sperimentale. In altre parole, la sola differenza formale tra due configurazioni x_1 e x_2 non basta a rendere tali stati *rilevanti*, se essa non comporta effetti apprezzabili (p.es. in un output osservabile o in un calcolo critico).

Nel prosieguo, assumiamo che i *collassi* di stati *rilevanti* possano dare luogo a novità macro ($A\beta$), mentre la fusione di stati pressoché indistinguibili (e sperimentalmente irrilevanti) può non generare alcun fenomeno emergente.

4.4 Rilevanza del Collasso e Soglie Sperimentali

Collasso informativo “rilevante.” La funzione di trasmissione $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ può fondere (cioè mandare alla stessa immagine) più stati micro di L_i . Non tutti i “collassi” però hanno rilevanza nell’ottica RLA. Un *collasso* è *rilevante* se:

1. Coinvolge *stati* che differiscano *in modo significativo* per la disciplina (p.es. geni con funzioni distinte, pattern neurali con output diversi, ecc.).
2. Crea una *proprietà emergente* a livello L_{i+1} che *non* può essere ricostruita da un predicato su L_i (cfr. Teorema 2).

Soglie e misure di collasso. In sezioni successive (Sez. 5–6) e nelle Appendici, si discuterà la possibilità di *quantificare* il collasso tramite entropie o metriche di “overlap” fra preimmagini. In sede sperimentale, *valori soglia* possono definire quando considerare “non iniettiva” una mappa, se la fusione di stati è rilevante su scale biologiche, fisiche o cognitive. Ad esempio, in un esperimento di biologia sintetica, *molteplici* configurazioni di DNA che sfociano nella *medesima* via fenotipica rappresentano un collasso sperimentabile e potenzialmente *generatore* di emergenza fenotipica.

Conclusione

Le *assunzioni fattuali* servono dunque a evitare astrazioni “vuote”: i *livelli* devono avere un *aggancio empirico*, e la *Turing-likeness* va trattata con pragmatismo (piena, limitata, o teorica). È altresì cruciale delimitare *quali* stati micro siano rilevanti per la computazione (stati Turing-centrali) e *quanto* un collasso informativo incida in modo “emergente.” È su questa base concreta che, nella sezione seguente, potremo definire formalmente i concetti di (*non*) *iniettività* e *propagazione* dell’indecidibilità.

5 Formalizzazione Matematica di RLA

Dopo aver delineato il quadro epistemico (Sez. 3) e specificato le principali *assunzioni fattuali* (Sez. 4), possiamo ora presentare la **formalizzazione matematica** del framework RLA. In particolare, introduciamo dapprima le definizioni fondamentali (livello di astrazione, contiguità, Turing-likeness, iniettività) e, successivamente, i tre assiomi (A1–A3), cui seguono lemmi e teoremi che illustrano la dinamica di *trasmissione* (o *blocco*) dell’indecidibilità e la *nascita* di fenomeni emergenti.

5.1 Definizioni Fondamentali

Def. 1 — Livello di Astrazione. Un *livello di astrazione* L è formalizzato come una coppia

$$L = \langle D(L), \Sigma(L) \rangle,$$

dove:

- $D(L)$ è l’insieme degli *stati* o *configurazioni* caratteristici della disciplina o del dominio;
- $\Sigma(L)$ è l’insieme di *regole*, *leggi* o *operazioni* che agiscono su tali stati.

Esempio: in un *livello neurale*, $D(L)$ può essere l’insieme dei possibili pattern di attivazione dei neuroni, mentre $\Sigma(L)$ include le regole di aggiornamento sinaptico.

Def. 2 — Contiguità e Funzione di Trasmissione. Due livelli L_i e L_{i+1} sono *contigui* se esiste una *funzione di trasmissione*

$$\tau_{(i \rightarrow i+1)} : D(L_i) \longrightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1})),$$

riconosciuta dalla comunità scientifica (cf. Sez. 4.2), che “mappa” gli *stati* del livello L_i a *uno o più* stati (sottoinsiemi) del livello L_{i+1} . Tale mappa può essere *iniettiva*, *quasi-iniettiva* (limitata a un certo sottoinsieme), o *non iniettiva*, come precisato di seguito.

Def. 3 — Turing-likeness (Sufficienza Espressiva). Un livello L è *Turing-like* se esiste un sottoinsieme

$$C \subseteq D(L)$$

e un sottoinsieme di regole $\Sigma_{\text{comp}} \subseteq \Sigma(L)$ tali che, in linea di principio, L sia in grado di simulare calcoli Turing-compatibili (Sez. 4.1). In termini operativi, la “potenza di

calcolo” interna deve poter emulare *qualunque* Macchina di Turing, almeno a livello teorico o limitato, purché la memoria e le risorse siano considerate potenzialmente estese.

Def. 4 — Iniettività, Quasi-iniettività e Non iniettività. Data la funzione di trasmissione

$$\tau_{(i \rightarrow i+1)} : D(L_i) \rightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1})),$$

si distinguono:

- **Iniettività:**

$$\forall x_1 \neq x_2 \in D(L_i), \quad \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_1) \cap \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_2) = \emptyset.$$

Cioè, stati diversi in L_i non sono mai “fusi” a livello L_{i+1} .

- **Quasi-iniettività (ristretta a $S \subseteq D(L_i)$):**

$$\forall x_1, x_2 \in S, \quad x_1 \neq x_2 \implies \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_1) \cap \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_2) = \emptyset.$$

Spesso S corrisponde agli *stati Turing-centrali* C (vedi Def. 3): la distinzione è necessaria per trasmettere i limiti logici di indecidibilità.

- **Non iniettività (collasso):**

$$\exists (x_1, x_2), \quad x_1 \neq x_2 \text{ con } \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_1) \cap \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_2) \neq \emptyset.$$

Significa che *almeno* una coppia di stati in L_i viene “fusa” in un singolo stato (o un sottoinsieme che si sovrappone) in L_{i+1} . Questo può generare perdita di informazione micro e, potenzialmente, fenomeni emergenti.

Def. 5 — Stati Computazionali Centrali. Se L è Turing-like, vi è un insieme $C \subseteq D(L)$ di *stati computazionali centrali* attorno a cui si realizza la potenza di calcolo Turing-compatibile (p.es. filamenti DNA, neuroni hidden in RNN, celle reticolari “universali”). La *quasi-iniettività* su C gioca un ruolo decisivo per la trasmissione di problemi indecidibili ad altri livelli (Sez. 5.3).

5.2 Assiomi del Modello RLA

A1 (Indecidibilità in Livelli Turing-like). Se L_i è Turing-like (Def. 3), allora *ospita inevitabilmente* almeno un problema indecidibile (cfr. Turing 1936; Church

1936; Rice 1953). In altre parole, non esiste un “risolutore universale” interno al livello in grado di decidere *tutte* le proprietà computazionali non banali.

A2 (Trasmissione d’Indecidibilità via Quasi-iniettività). Se la funzione di trasmissione $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ *preserva iniettivamente* (o quasi-iniettivamente) gli stati C_i Turing-centrali del livello L_i , allora i vincoli d’indecidibilità *risalgono* nel livello L_{i+1} . In termini di riduzione, se L_{i+1} “risolvesse” un problema indecidibile di L_i , ciò equivarrebbe a un risolutore interno a L_i (che violerebbe A1).

A3 (Non iniettività e Emergenza). (versione aggiornata) Se, per una coppia di *stati rilevanti* x_1, x_2 in L_i , la mappa $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ li fonde in un medesimo output (cioè non è iniettiva su quelle configurazioni), allora *si verifica una perdita di informazione* che può innescare proprietà non deducibili a livello L_{i+1} . In altre parole, la **non iniettività** (collasso) su stati *disciplinarmente significativi* può produrre *emergenza* (Anderson 1972), ossia novità macro *irriducibile* a un singolo predicato su L_i .

Nota Importante. Se il collasso riguarda stati che *non* sono sperimentalmente o teoricamente rilevanti (ad esempio, differenze marginali che non influenzano alcuna variabile critica nel dominio), allora non si genera una *nuova* proprietà emergente nel senso forte utilizzato in RLA. In tal caso, possiamo parlare di “*collasso innocuo*”, di seguito **Collasso senza emergenza**, che non implica alcun fenomeno emergente.

Collasso con emergenza: fusione di stati micro effettivamente significativi, generante una nuova proprietà non deducibile.

Collasso senza emergenza: fusione di stati micro che, nonostante la loro differenza formale, non influiscono su alcuna variabile critica nel dominio, e quindi non danno luogo a novità macro.

5.3 Lemmi e Teoremi Principali

Lemma 1 — Composizione di Iniettive. Siano $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ e $\tau_{(i+1 \rightarrow i+2)}$ (quasi) iniettive sugli stati Turing-centrali. Allora la composizione

$$\tau_{(i \rightarrow i+2)} = \tau_{(i+1 \rightarrow i+2)} \circ \tau_{(i \rightarrow i+1)}$$

mantiene (quasi) iniettività su tali stati, garantendo che la *propagazione* di eventuali problemi indecidibili si estenda ulteriormente.

Lemma 2 — Ri-emersione dell’Indecidibilità. Anche se il passaggio $L_i \rightarrow L_{i+1}$ presenta un collasso informativo (bloccando l’indecidibilità di L_i), se L_{i+1} (o un successivo L_{i+2}) *di per sé* è nuovamente Turing-like, può emergere un *nuovo* problema indecidibile a quel livello. La mancata trasmissione non impedisce che un livello successivo “ricrei” uno spazio Turing-completo, affetto dai classici vincoli logici.

Teorema 1 — Propagazione Multi-livello dell’Indecidibilità. In una *catena contigua* $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow \dots \rightarrow L_n$, se L_1 è Turing-like e *tutti* i passaggi $\tau_{(\ell \rightarrow \ell+1)}$ rispettano la (quasi) iniettività sugli stati Turing-centrali, *allora* ogni livello L_2, \dots, L_n *incorpora* i vincoli di indecidibilità iniziali. Si tratta di un’estensione “multi-scala” del principio di riduzione computazionale: un ipotetico risolutore all’ultimo livello implicherebbe un risolutore al primo.

Teorema 2 — Emergenza Non Derivabile da Collasso (revised). Enunciato. Sia $\tau_{(i \rightarrow i+1)} : D(L_i) \rightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1}))$ una funzione di trasmissione fra due livelli contigui L_i e L_{i+1} . Se esiste almeno una *coppia di stati rilevanti* (x_1, x_2) tale che $x_1 \neq x_2$ e $\tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_1) \cap \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_2) \neq \emptyset$, *allora esiste almeno una proprietà* di L_{i+1} *non* descrivibile da un predicato *univoco* su L_i (emergenza). In termini più intuitivi, la fusione di stati diversi (*rilevanti a livello disciplinare*) produce almeno una “novità macro” non deducibile dal solo micro-livello.

Osservazione (Origini di Teorema 2). Il principio secondo cui la fusione di stati distinti produce “proprietà non derivabili” risale idealmente al *Teorema di Rice* (Rice 1953), secondo cui *qualsiasi* proprietà non banale di un linguaggio riconoscibile è indecidibile. In parallelo, l’idea di “emergenza” da collasso informativo trova una radice in (Anderson 1972), che sottolinea la nascita di novità macroscopiche non deducibili semplicemente dalla somma di micro-parti. Il nostro Teorema 2 raccoglie dunque *entrambe* le ispirazioni: una logico-matematica (Rice) e una emergentista (Anderson).

5.4 Commenti e Collegamenti con la Logica Computazionale

Le definizioni precedenti rispecchiano i classici risultati di indecidibilità: se un livello L è Turing-like (A1), *inevitabilmente* ospita problemi insolubili. La *quasi-iniettività* trasferisce questi limiti ai livelli superiori (A2), mentre la *non iniettività* (collasso) crea spazi di *emergenza* irriducibile (A3). Tali assiomi costituiscono l’ossatura di *Reti Locali di Astrazione*: nella prossima sezione (§6), spiegheremo *come* si possano

empiricamente o teoricamente confutare (falsificare), e in che modo i ricercatori *possano* verificare la validità (o la caduta) di RLA in diversi contesti sperimentali.

6 Falsificabilità e Possibili Esperimenti

Le *Reti Locali di Astrazione* (RLA) si presentano non come un modello *pansofico* e non confutabile, bensì come una *cornice* in cui ciascuno degli *assiomi* (A1, A2, A3) è passibile di test sperimentali e controesempi logici. In questa sezione, spieghiamo *perché* RLA è falsificabile in senso popperiano (Popper 1959) e *come ogni* assioma possa venire messo in dubbio da esperimenti o situazioni contraddittorie. Inoltre, presentiamo esempi di *protocolli* sperimentali in diversi domini (biologia, fisica computazionale, IA neurale) che potrebbero supportare o confutare il quadro teorico.

6.1 Principi di Falsificabilità

Che significa falsificare A1, A2 o A3?

- **A1 (Indecidibilità in Livelli Turing-like).** Sarebbe confutato se si dimostrasse che un *livello* indiscutibilmente Turing-like (in grado di simulare M. di Turing universali) *non* presenti alcun problema indecidibile. In altre parole, se all'interno di un sistema Turing-like si trovasse un meccanismo capace di risolvere *qualsiasi* questione (es. Halting Problem), violando i teoremi di Turing e Church.
- **A2 (Trasmissione d'Indecidibilità via Quasi-iniettività).** Si confuterebbe trovando un esempio in cui: (i) L_i è Turing-like e ospita problemi indecidibili, (ii) la mappa $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ è (quasi) iniettiva sugli *stati Turing-centrali*, (iii) il livello L_{i+1} *consente* un “decisore” (ovvero, risolve i problemi indecidibili di L_i), senza contraddire A1 all'interno di L_i . Qualora accadesse, avremmo un caso di *indecidibilità* che non si trasmette *nonostante* la preservazione informativa, smentendo così l'assioma.
- **A3 (Non iniettività e Emergenza).** Qui la falsificazione consisterebbe nel mostrare che un *collasso* di stati rilevanti a livello L_i (una *palese* non iniettività) *non* genera proprietà “non derivabili” a livello L_{i+1} . In tal caso, *malgrado* la fusione di differenze micro, la disciplina riuscirebbe comunque a ricostruire completamente L_{i+1} dal micro-livello.

6.2 Casi di Test e Protocollo Sperimentale

Biologia Sintetica: DNA Computing e Fenotipo. Consideriamo un *livello molecolare* Turing-like (DNA computing, cfr. Winfree 1998; Benenson et al. 2001). Se emergesse un *fenotipo* macroscopico (ad es. risposta cellulare) in cui:

- *Non* vi fosse alcuna traccia del problema indecidibile locale (in presenza di quasi-iniettività sui circuiti di DNA), potremmo *smentire* A2.
- Oppure, se la fusione di vari circuiti di DNA in un unico segnale fenotipico *non* producesse alcuna proprietà emergente “inaspettata,” si *confuterebbe* A3.

Protocolli ad hoc includono la costruzione di *circuiti* specifici (Halting problem-like) e l’osservazione delle risposte fenotipiche su diverse linee cellulari.

Fisica Computazionale: Automi Cellulari e Termodinamica. Un *automa cellulare* (AC) universale è Turing-like (Wolfram 2002). Se *non* subisse coarse graining o se si riuscisse a preservare iniettivamente gli stati microscopici, allora A2 prevede che i problemi indecidibili si “risalgano” al livello termodinamico. Verificando *empiricamente* (in modelli sperimentali o simulatori) che ciò non accade *nonostante* la contiguità preservata, potremmo *contraddire* l’assioma. Viceversa, misurare *collassi* (coarse graining) e constatare la *nascita di proprietà emergenti* non riconducibili al micro-livello testerebbe A3.

IA Neurale: Reti Ricorrenti e Cognizione. Se una rete neurale ricorrente è Turing-like (Siegelmann & Sontag 1991) e i suoi stati *critici* vengono mantenuti distinti in uno strato cognitivo o meta-rappresentazionale, A2 predice la trasmissione dell’ind decidibilità (Halting Problem interno). Un *decisore cognitivo* che risolvesse *quella* indecidibilità senza contraddire la potenza Turing della rete è esattamente il *controesempio* per falsificare A2.

6.3 Esempio di Setup: Dal Protocollo all’Interpretazione

DNA e Collasso Fenotipico. Un protocollo sperimentale potrebbe:

1. Ingegnerizzare circuiti di DNA computing capaci di simulare un *problema* “*halting-like*”.
2. Introdurre tali circuiti in cellule progettate per emettere segnali (proteine fluorescenti) in risposta a esiti computazionali.
3. Studiare *quali* stati molecolari vengano *fusi* in un *identico* output fenotipico (non iniettività) e *se* ciò generi “novità macro” impossibili da ricondurre a un singolo predicato su DNA.

Se si scoprisse che anche stati Turing-centrali distinti subiscono fusione, ma *non* emerge alcun comportamento “irriducibile” a livello cellulare, si *confuterebbe* A3

(non iniettività senza emergenza). In tal modo, la *verifica sperimentale* del passaggio micro→macro diventa *strumento* per testare la validità dell'assioma.

6.4 Framework Aperto a Verifiche Incrociate

L'approccio proposto mostra come RLA *non* pretenda di eludere la critica empirica. Anzi, l'intera teoria è orientata a *comprendere* e *schematizzare* le condizioni in cui l'indecidibilità (intrinseca a un sistema Turing-like) si *blocca* o *si trasmette*. Allo stesso tempo, descrive *quando* le differenze micro si perdano, generando emergenza. È *plausibile* che alcune discipline o modelli possano fornire *controesempi* inattesi, spingendo a modificare o affinare gli assiomi, o a restringerne l'ambito di validità.

Nella prossima sezione (§7), discutiamo i *fondamenti minimi* in matematica, filosofia, biologia, fisica e IA, così da mettere in luce *come* RLA si connetta ai risultati classici e *come* lo scenario di falsificabilità si applichi di volta in volta, con esempi e riferimenti specifici alle letterature disciplinari.

7 Fondamenti Minimi Disciplinari

L'idea delle *Reti Locali di Astrazione* (RLA) poggia su risultati e metodi consolidati in varie aree: teoria della computazione, filosofia della scienza, biologia computazionale, fisica computazionale e scienze cognitive/IA. In questa sezione, forniamo i *fondamenti minimi* che consentono di comprendere come la nozione di (*non*) *iniettività*, *Turing-likeness* ed *emergenza* si innesti in ciascuna disciplina, chiarendone la base teorica e i riferimenti principali.

7.1 Matematica e Teoria della Computazione

Teoremi cardine e indecidibilità. La nozione di *Turing-likeness* affonda le radici nei classici teoremi di (Turing 1936) e (Church 1936), secondo cui *non* esiste un algoritmo generale (universale) capace di decidere il problema dell'arresto di una Macchina di Turing arbitraria. (Rice 1953) amplia ulteriormente il discorso, mostrando che ogni proprietà *non banale* dei linguaggi riconoscibili risulta indecidibile.

Approccio insiemistico e riduzioni. Nella formalizzazione di RLA, i *livelli* e le *funzioni di trasmissione* (iniettive o no) si interpretano in chiave *set-based*: $D(L_i)$ e $D(L_{i+1})$ sono insiemi, e $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ si colloca come funzione che può aggregare più elementi del dominio in singoli output (non iniettività). Le dimostrazioni di *trasmissione di indecidibilità* (A2) e *emergenza da collasso* (A3) si basano su riduzioni computazionali note dalla teoria classica (Sipser 2006).

Implicazioni per RLA. - A1 sancisce che un *livello* Turing-like non può “sfuggire” ai vincoli di insolubilità tipici della computazione universale. - La quasi-iniettività (Def. 4) collegata a stati Turing-centrali è l'elemento-chiave per *propagare* i limiti logici a livelli superiori. - La *non iniettività* introduce un parallelismo con la “non derivabilità” e con i principi di *coarse graining* propri delle scienze fisiche.

7.2 Filosofia della Scienza

Livelli come costrutti epistemici. L'idea di *livelli* o *scale* descrittive è centrale in molte riflessioni di epistemologia e filosofia della scienza (p. es. Bertalanffy 1968; Koestler 1967), dove si riconosce che ogni disciplina “*astragga*” la realtà in specifici termini e modelli, costruendo convenzioni condivise di analisi e sperimentazione.

Emergenza e riduzionismo. (Anderson 1972) pone l'attenzione sulla *non* riducibilità di certe proprietà “macro” ai microstati, sostenendo che “*più non è soltanto più grande, è diverso*”. In RLA, la (*non*) *iniettività* formalizza *come* e *quando* questa differenza si generi a livello matematico: se differenti configurazioni micro finiscono in un'unica configurazione macro, si produce *novità* irriducibile, in linea con la posizione emergentista.

RLA e costruzionismo disciplinare. La struttura RLA si *ancora* al “costruzionismo disciplinare,” riconoscendo il *ruolo sociale* (storicità, validazione empirica) nel definire i livelli (§4.2). Al contempo, traduce *formalmente* come i passaggi (iniettivi o meno) diano luogo a proprietà emergenti o trasmissione di limiti logici. Così, RLA non scinde epistemologia e formalismo matematico, bensì li *integra*.

7.3 Biologia Computazionale

DNA Computing e reti booleane geniche. *DNA computing* (Winfrey 1998; Benenson et al. 2001) ha dimostrato che certe configurazioni di filamenti e reazioni di ibridazione possono simulare macchine di Turing, dunque *Turing-likeness*. Ciò giustifica l'applicazione di A1: *se* si modella un livello molecolare come suff. espressivo, *allora* vi permangono problemi indecidibili. Spesso, tuttavia, nel passaggio a sistemi cellulari o fenotipici, si osservano *collassi* massicci di differenze genetiche, generando effetti emergenti (A3).

Genotipo–fenotipo: collasso e novità. I noti fenomeni di “pleiotropia” o “ridondanza genica” suggeriscono che *diversi* assetti genetici possano condurre a *simili* fenotipi, implicando una *non iniettività*. Secondo RLA, ciò spiega *perché* certe proprietà macro (fenotipiche) non si deducano univocamente da un singolo microstato, bensì emergano da una fusione di dettagli molecolari.

7.4 Fisica Computazionale

Automati cellulari universali. (Wolfram 2002) descrive automi cellulari (AC) come “*macchine*” in grado di emulare la computazione Turing. *Rule 110*, *Game of Life* e altri esempi presentano *universalità*. Pertanto, un *livello* reticolare/AC è Turing-like e “*ospita*” indecidibilità (A1).

Micro–macro: coarse graining e termodinamica. La *meccanica statistica* (Landau & Lifshitz 1980) interpreta i passaggi micro→macro come *coarse graining*: *moltissime* configurazioni di spin o particelle vengono “riassunte” in *pochi*

parametri (pressione, temperatura, magnetizzazione). Se *questo passaggio* collassa stati Turing-centrali, la *trasmissione* dell’indecidibilità viene bloccata; al contempo, emergono *nuove* proprietà di fase che *non* si ricostruiscono in modo invertibile dal micro (Teorema 2).

7.5 IA e Scienze Cognitive

Reti neurali ricorrenti. (Siegelmann & Sontag 1991) dimostrano la Turing-completezza di certe RNN. Se un *livello* di IA neurale è “pienamente ricorrente” (memoria illimitata, tempo di esecuzione esteso), rientra in A1, con problemi indecidibili. In realtà, le implementazioni pratiche restano “Turing-limited,” ma *formalmente* vicino all’universalità.

Pooling, astrazione e coscienza. Nei modelli cognitivi, uno *strato successivo* “collassa” molteplici pattern neurali in un *singolo* concetto (pooling). Qui è frequente la non iniettività: *troppi* stati neurali diversi confluiscono in un *unico* pattern concettuale. Tale fusione può generare *emergenza* di proprietà non semplicemente ricavabili dal “pattern neurale elementare,” come *significati* cognitivi superiori. In alcuni modelli (Dehaene et al. 2011), *certi* circuiti cognitivi *mantengono* una distinzione su un sottoinsieme di stati neurali, consentendo la *trasmissione* di limiti logici se la quasi-iniettività è rispettata.

Conclusione Sez. 7

In sintesi, ciascuna disciplina fornisce *fondamenti* e *esempi* che giustificano l’applicazione di RLA e la plausibilità dei suoi assiomi (A1–A3). La matematica e la computazione permettono di *codificare* formalmente la Turing-likeness, la *non iniettività*, e la *trasmissione d’indecidibilità*. La filosofia della scienza radica i *livelli di astrazione* in un contesto storico e convenzionale, mentre la biologia e la fisica offrono esempi concreti di passaggi micro–macro (collasso o quasi-iniettività). Le scienze cognitive e l’IA, infine, testimoniano la possibilità di reti neurali Turing-like e la rilevanza di mappe di pooling non iniettive. Nella prossima sezione, inizieremo a illustrare esempi *concreti* di funzioni di trasmissione, applicando i concetti formali a casi disciplinari specifici.

8 Esempi Concreti e Funzioni di Trasmissione

Nei paragrafi precedenti abbiamo delineato i *fondamenti* (Sez. 7) e la *formalizzazione* (Sez. 5) delle Reti Locali di Astrazione (RLA). Ora mostriamo *casi di studio* che illustrano *come* le funzioni di trasmissione (iniettive o meno) agiscano fra livelli *contigui* e *generino* (o *blocchino*) il passaggio dei limiti computazionali, nonché la nascita di proprietà emergenti. Segue anche un *esempio* di calcolo indecidibile “trasmesso” fra due livelli.

8.1 Es.1: Biologia Molecolare → Cellula Computazionale

Livello Biologia Molecolare (Turing-like). Come discusso in Sez. 7.3, alcuni *circuiti* di DNA computing (o reti booleane geniche complesse) possono implementare calcoli Turing-compatibili. Dunque, L_{mol} risulta Turing-like e, in base ad A1, contiene almeno un problema indecidibile (p. es. una variante “halting-like”).

Livello Cellula Computazionale. Un livello L_{cell} descrive l’*organizzazione* dei pathway cellulari, integrando segnali ed effettori fenotipici. Letteratura di (Cardelli 2005) o (Noble 2008) evidenzia come la “funzionalità” cellulare emerga da molteplici reti molecolari.

Funzione di Trasmissione e Risultati. Sia

$$\tau_{(\text{mol} \rightarrow \text{cell})} : D(L_{\text{mol}}) \longrightarrow \mathcal{P}(D(L_{\text{cell}})).$$

In moltissimi casi, *distinte* configurazioni molecolari (*stati* Turing-centrali *inclusi*) confluiscono in un’unica risposta cellulare *macro* (collasso informativo), *bloccando* la trasmissione d’indecidibilità (A2). Al contempo, *emerge* il fenomeno “fenotipo unico,” irriducibile a una descrizione univoca del micro (A3). Qualora invece un *sottoinsieme* di circuiti di DNA fosse *preservato* (quasi-iniettivamente), allora la *propagazione* dell’indecidibilità sarebbe teoricamente possibile, e un *ipotetico* “decisore cellulare” contraddirebbe A1.

8.2 Es.2: Automa Cellulare Universale → Parametri Termodinamici

Livello Automa Cellulare Reticolare (Turing-like). Automi cellulari come la *Rule 110* di (Wolfram 2002) possono essere Turing-completi, implicando la presenza

di problemi indecidibili localmente (A1). Qui, gli *stati* corrispondono a configurazioni reticolari e le *regole* di aggiornamento a $\Sigma(L)$.

Per rendere più chiaro il meccanismo di quasi-iniettività vs. collasso, presentiamo un toy model ispirato a (Wolfram 2002). Consideriamo un Automa Cellulare unidimensionale con 4 celle binarie, dove la regola locale aggiorna ogni cella in base alle due adiacenti e a quella stessa (configurazione iniziale differisce in un singolo bit). La funzione di trasmissione τ associa a ogni configurazione una proprietà macro: il numero totale di celle ‘attive’. Se due configurazioni distinte (ad es. 0011 e 0101) si proiettano nello stesso conteggio (2), τ è non iniettiva; ciò impedisce di risalire ai microstati e può generare proprietà emergenti non deducibili. Se τ preserva le distinzioni (ad es. conteggio + posizione), diventa quasi-iniettiva e consente la trasmissione di limiti computazionali (A2).”

Livello Parametri Termodinamici. In fisica statistica (vedi Sez. 7.4), il *livello macro* si occupa di grandezze aggregate (temperatura, pressione, magnetizzazione). Questo passaggio di “coarse graining” s’identifica con una funzione di trasmissione

$$\mathcal{T}_{(\text{retic} \rightarrow \text{thermo})}$$

che tipicamente *fonda* una vasta molteplicità di micro-configurazioni in un *poche* parametri globali (non iniettività).

Effetti: Blocco Indecidibilità e Emergenza. La *non* iniettività “somma” molteplici stati Turing-centrali in un singolo valore termodinamico, *azzerando* la possibilità di “risalita” dei limiti computazionali (A2 *non* si applica). In compenso, *nuovi* fenomeni emergono, come transizioni di fase non riconducibili al solo *dettaglio* di microstati (*coincide* con A3). Questo scenario è ampiamente trattato nella meccanica statistica e illustra la convivenza di “limiti di calcolo” a livello reticolare con “emergenza” su scala termodinamica.

Esempio di Collasso Innocuo

In un automa cellulare fisico, due configurazioni microscopiche che differiscono unicamente per la fase di un singolo spin periferico (posizionato in un angolo isolato e non interagente) potrebbero venire fuse in un’unica macro-configurazione, e tuttavia non generare alcun cambiamento comportamentale o termodinamico. Qui il collasso è di fatto *innocuo*: non dà luogo a nuove proprietà a livello L_{i+1} perché l’interazione dello spin con il reticolo è trascurabile.

8.3 Es.3: IA Neurale (RNN) → Livello Cognitivo

Livello Rete Neurale Turing-completa. (Siegelmann & Sontag 1991) provano che alcune RNN possono simulare qualsiasi computazione Turing. Se un *livello neurale* L_{RNN} incorpora tali capacità, *inevitabilmente* (A1) ospita problemi indecidibili.

Livello Cognitivo. Si postula un successivo strato cognitivo L_{cog} che “interpreti” o “astragga” i pattern neurali in concetti e rappresentazioni simboliche (Dehaene et al. 2011). La funzione

$$\tau_{(\text{RNN} \rightarrow \text{cog})}$$

spesso collassa (pooling) stati neurali *numerosi* in un *unico* concetto (*non* iniettività).

Risultati: Coscienza Emergente o Trasmissione d’Indecidibilità. - Se la mappa collassa *anche* i pattern Turing-centrali, l’indecidibilità *non* risale, e A3 predice la comparsa di proprietà cognitive “nuove” (emergenti). - Se, invece, qualche meccanismo di “self-monitoring” o “meta-rappresentazione” *preserva* la distinzione degli stati critici, allora (A2) indica che i problemi indecidibili del livello neurale *restano* irrisolvibili anche a livello cognitivo, pena una contraddizione con A1.

8.4 Es.4: Un Caso di Calcolo Indecidibile “Trasmesso”

Illustrando uno scenario più *specifico*, consideriamo:

1. Un **livello RNN** L_{RNN} , Turing-like, con un *sottospazio* C_{RNN} di stati ricorrenti effettivamente utilizzati per calcoli “halting-like.”
2. Un **livello Cognitivo** L_{cog} , definito come insieme di “rappresentazioni” (concepts, beliefs) con regole di composizione logica.
3. La funzione di trasmissione $\tau_{(\text{RNN} \rightarrow \text{cog})}$ *quasi-iniettiva* su C_{RNN} : i pattern che *codificano* l’esecuzione Turing rimangono *distinti*.

Propagazione dell’Halting Problem. In base ad A2, se un “supervisore cognitivo” fosse capace di *decidere* se la RNN (in quello specifico pattern) *arresterà* la computazione, *allora* ciò equivarrebbe a possedere un “decisore” anche a livello RNN (riducendo la decisione cognitiva al pattern neurale). Questo *contraddice* A1 (che sancisce l’impossibilità di un decisore universale su calcoli Turing). Si conclude che *anche* a livello cognitivo, quell’Halting Problem rimane *non* decidibile. La *trasmissione* dell’indecidibilità (Teorema 1) si è pertanto realizzata in modo *concreto*.

Spunto di Falsificabilità. Se qualcuno dimostrasse un “*algoritmo mentale*” perfettamente in grado di *interpretare* lo stato RNN e di stabilire *per qualunque* input se la RNN si arresterà, *senza* contraddire la Turing-likeness del livello RNN, si confuterebbe A2 — aprendo la strada a una revisione di RLA o dimostrando l’assenza di Turing-likeness reale nella rete.

Conclusione

I quattro esempi (dalla biologia molecolare alla fisica statistica, dall’IA neurale ai “calcoli indecidibili trasmessi”) mostrano in pratica la differenza fra *mappe* che *preservano* o *collassano* gli stati Turing-centrali, generando rispettivamente *propagazione* d’ind decidibilità (A2) o *emergenza irriducibile* (A3). È un quadro *coerente* con i principi delineati e offre le basi per costruire sperimentazioni e test di falsificazione, in linea con i protocolli discussi in Sez. 6.

9 Esempio Operativo (Catena Livelli Contigui)

Dopo aver illustrato esempi puntuali di funzioni di trasmissione (Sez. 8), proponiamo ora una *catena di 15 livelli contigui* che va, dalle *strutture fisiche di base* fino alle *forme sociali complesse*. L'obiettivo è offrire un *esempio operativa* — seppur in forma *lineare* semplificata — di come (*non*) *iniettività* e *Turing-likeness* possano alternarsi e *coesistere*, generando tanto *blocco* o *propagazione* dell'indecidibilità quanto *novità emergenti* a più livelli. Per dare maggiore concretezza, in ciascun passaggio $\tau_{(\ell \rightarrow \ell+1)}$ si può definire una 'soglia di preservazione' (cfr. (Noble 2008)), individuando un sottoinsieme del 10% di stati Turing-centrali da mantenere distinti. Così, si controlla se l'indecidibilità risale o meno la catena. Qualora il collasso raggiunga anche tali stati critici, emergono proprietà macro irriducibili, mentre i problemi indecidibili restano bloccati.

9.1 Filosofia della Sequenza: Linearità come Semplificazione

La sequenza di 15 livelli (dalla *fisica reticolare* alla *società complessa*) rappresenta un “*esempio lineare*” che collega *discipline* e *descrizioni* potenzialmente contigue. Nella realtà, gran parte dei sistemi complessi si struttura in *reticoli* o *grafi* con *loop* e “livelli-ponte.” Tuttavia, una catena lineare rimane utile per:

1. Illustrare *quando* le indecidibilità Turing-like *risalgano* la catena (Teorema 1) e *quando* si blocchino per collassi informativi (Teorema 2).
2. Mostrare *come* ogni livello, con un certo grado di (non) iniettività, possa generare *proprietà emergenti* o *trasmettere* problemi insolubili.
3. Fornire *un* prototipo didattico, pur consapevoli che in un contesto più realistico ciascun “livello” possa anche scambiarsi informazioni in modo non strettamente lineare.

9.2 Descrizione Dettagliata dei 15 Livelli

Di seguito, per ogni livello, specifichiamo:

- **Dominio e Regole Principali** (cioè $D(L)$ e $\Sigma(L)$).
- **Turing-likeness** (SI/NO, o Parziale).
- **Funzione di Trasmissione** al livello successivo ($\tau_{(\ell \rightarrow \ell+1)}$), con indicazione di *iniettività*, *quasi-iniettività* o *non iniettività*.
- Eventuali **Riferimenti di Letteratura** che sostengono tale passaggio.

Livello 1: Sistemi Fisici Discreti (Automati Cellulari).

- *Dominio e Regole:* $D(L_1)$ = configurazioni di celle/spin binari; $\Sigma(L_1)$ = regole di aggiornamento (tipo “Rule 110,” Wolfram 2002).
- *Turing-likeness:* **SI**, poiché è dimostrato che alcuni AC sono Turing-completi.
- *Funzione di Trasmissione* $\tau_{(1 \rightarrow 2)}$: Mappa ciascuna configurazione reticolare su un *sottoinsieme* di microstati molecolari (spin-lattice).
 - In gran parte *quasi-iniettiva* sugli stati Turing-centrali, se ipotizziamo un reticolo corrispondente (automa \leftrightarrow spin-lattice).
 - Alcune degenerazioni fisiche possibili; la letteratura su *meccanica statistica* (Toffoli & Margolus 1987) supporta l’ipotesi di un passaggio micro “quasi-iniettivo” per dimensioni piccole o modelli particolari.

Livello 2: Microstati Molecolari (Spin-lattice).

- *Dominio e Regole:* $D(L_2)$ = stati di spin molecolari, potenziali d’interazione; $\Sigma(L_2)$ = regole di aggiornamento spin, interazioni di vicinato (Ising-like).
- *Turing-likeness:* **SI/Parziale**, esiste letteratura che mostra la possibilità di implementare logica universale in certi spin-lattice, ma *non* tutti.
- *Funzione di Trasmissione* $\tau_{(2 \rightarrow 3)}$: Passaggio a “*chimica computazionale*.”
 - Spesso *non* iniettivo, perché molte micro-configurazioni spin equivalgono a reazioni chimiche identiche.
 - Possibile *quasi-iniettività* se si isolano *configurazioni* spin particolari che codificano reazioni distinte.

Livello 3: Chimica Computazionale (Reazioni).

- *Dominio e Regole:* $D(L_3)$ = specie chimiche, pathway di reazione; $\Sigma(L_3)$ = cinetiche e leggi di reazione (p. es. reazioni Markoviane).
- *Turing-likeness:* **SI**, con protocolli adeguati è noto che reazioni chimiche (Mag nasco 1997) possono simulare calcoli Turing.
- *Funzione di Trasmissione* $\tau_{(3 \rightarrow 4)}$: Verso la *biologia molecolare*, in cui si identificano “molecole computazionali” (DNA, proteine).
 - Possibile *iniettività* parziale se ogni reazione mappa in modo univoco un filamento o un pattern molecolare, *ma* in molti contesti si osservano collassi enzimatici.

Livello 4: Biologia Molecolare Computazionale (DNA).

- *Dominio e Regole*: $D(L_4)$ = filamenti di DNA, meccanismi di ibridazione e taglio; $\Sigma(L_4)$ = operatori di riconoscimento, reazioni enzimatiche.
- *Turing-likeness*: **SI**, dimostrata da Winfree 1998; Benenson et al. 2001 in scala sintetica.
- *Funzione di Trasmissione* $\tau_{(4 \rightarrow 5)}$: Passaggio a “cellula computazionale” (pathway integrati).
 - Spesso **non iniettiva** sulle differenze molecolari, perché molti filamenti divergenti generano la *stessa* espressione proteica.
 - Se gli stati Turing-centrali *non* collassano, la *trasmissione* dell’indecidibilità risalirebbe alla cellula.

Livello 5: Cellula Computazionale (Pathway Integrati).

- *Dominio e Regole*: $D(L_5)$ = stati cellulari, reti metaboliche e di segnalazione; $\Sigma(L_5)$ = regolazioni di feedback/feedforward.
- *Turing-likeness*: **SI/NO** a seconda dei casi. Alcune cellule sintetiche *ingegnerizzate* si avvicinano a universalità; cellule naturali difficilmente mostrano *piena* Turing-likeness.
- *Funzione di Trasmissione* $\tau_{(5 \rightarrow 6)}$: passaggio a *tessuti e organi virtuali*.
 - In letteratura (Noble 2008), l’integrazione cellulare a livello tissutale spesso *collassa* le differenze tra cellule.
 - Con tutta probabilità **non iniettiva**, impedendo la risalita dell’indecidibilità in molti scenari biologici reali.

Livello 6: Tessuti e Organi Virtuali.

- *Dominio e Regole*: $D(L_6)$ = modelli che descrivono l’organo (e.g. il cuore, polmoni, cervello) come *strutture* integrate; $\Sigma(L_6)$ = dinamiche di scambio, simulazioni e regolazioni.
- *Turing-likeness*: **NO** (generalmente). La letteratura su organi virtuali (p. es. Virtual Heart) raramente asserisce universalità.
- *Funzione di Trasmissione* $\tau_{(6 \rightarrow 7)}$: può condurre, ad esempio, allo *studio del cervello* come rete neurale biologica.

- Laddove si tratta di organi “non cervello,” è tipicamente **non iniettiva** (collasso massiccio di stati cellulari).
- Nel caso specifico del *cervello*, la contiguità con le reti neurali biologiche può a volte preservare una *porzione* di stati computazionali *critici*.

Livello 7: Reti Neurali Biologiche (Cervello).

- *Dominio e Regole:* $D(L_7)$ = configurazioni di neuroni e sinapsi biologiche; $\Sigma(L_7)$ = regole di plasticità, potenziali d’azione, circuiti ricorrenti.
- *Turing-likeness:* **SI**, a livello *teorico* (Siegelmann & Sontag 1991); nella pratica, dipende da risorse/precisione e *numero di neuroni*.
- *Funzione di Trasmissione* $\tau_{(7 \rightarrow 8)}$: passaggio allo *strato cognitivo*.
 - Spesso **non iniettiva**: il pooling neurale riduce migliaia di pattern in *pochi* concetti.
 - Possibile *quasi-iniettività* su un sottoinsieme di circuiti “critici” (p. es. aree di meta-rappresentazione), con potenziale trasmissione dell’indecidibilità.

Livello 8: Coscienza/Cognizione.

- *Dominio e Regole:* $D(L_8)$ = stati coscienti, credenze, processi cognitivi di alto livello; $\Sigma(L_8)$ = regole di ragionamento, memoria, attenzione.
- *Turing-likeness:* **NO** nella visione classica; non si assume universalità. Alcuni moduli interni potrebbero comunque implementare calcoli complessi.
- *Funzione di Trasmissione* $\tau_{(8 \rightarrow 9)}$: passaggio a *comportamento* e *decisioni* motorie o pratiche.
 - Prevalentemente **non iniettiva**, collassando diversi stati cognitivi in atti comportamentali unitari.
 - Se qualche meccanismo *discrimina* esattamente i pattern neurali, allora (A2) può trasmettere i limiti.

Livello 9: Comportamento e Decisioni (Neuro-economia).

- *Dominio e Regole:* $D(L_9)$ = scelte, azioni, output motori; $\Sigma(L_9)$ = processi decisionali, euristiche, utility function (in modelli agent-based).

- *Turing-likeness*: **NO**, solitamente la “decisione” è un atto limitato, senza cicli di memoria illimitata.
- *Funzione di Trasmissione* $\tau_{(9 \rightarrow 10)}$: passaggio a *architetture algoritmiche* (p. es. formalizzare comportamenti come “programmi”).
 - Spesso *parzialmente* non iniettiva: molte scelte comportamentali vengono astratte in modelli “software”.
 - Possibilità di *quasi-iniettività* se si codifica ciascun comportamento in un programma univoco; in pratica, più ipotetico che reale.

Livello 10: Architetture Algoritmiche (Sistemi di Programmi).

- *Dominio e Regole*: $D(L_{10})$ = insiemi di programmi (linguaggi di programmazione), $\Sigma(L_{10})$ = regole sintattiche e semantiche per esecuzione.
- *Turing-likeness*: **SI**, per definizione di “architetture generiche” (linguaggi Turing-completi).
- *Funzione di Trasmissione* $\tau_{(10 \rightarrow 11)}$: passaggio a *reti neurali artificiali*, p. es. *Neural Turing Machines* (Graves et al. 2016).
 - **quasi-iniettiva** sui diagrammi di flusso e i parametri di rete (strutture software \leftrightarrow architetture neurali).
 - Se la “traduzione” dei programmi in reti neurali è *1-1*, l’indecidibilità si conserva (A2).

Livello 11: Reti Neurali Artificiali (Deep/Ricorrenti).

- *Dominio e Regole*: $D(L_{11})$ = parametri, pesi, stati di attivazione; $\Sigma(L_{11})$ = regole di training, forward/backprop, eventuali meccanismi ricorrenti e memoria estesa.
- *Turing-likeness*: **SI** se la rete è ricorrente e con meccanismi di “infinite tape” (NTM). **NO** se puramente feed-forward con dimensione fissa.
- *Funzione di Trasmissione* $\tau_{(11 \rightarrow 12)}$: passaggio a *linguistica computazionale* (livello di grammatiche e parsing).
 - Sovente **non iniettiva**: reti seq2seq *embed* molte frasi in uno stesso vettore.
 - Possibile quasi-iniettività su stati Turing-centrali, ma non comune nelle implementazioni standard.

Livello 12: Linguistica Computazionale (Grammatiche Type-0).

- *Dominio e Regole:* $D(L_{12})$ = frasi e stringhe di un linguaggio generato; $\Sigma(L_{12})$ = regole di riscrittura (fino alle grammatiche Type-0).
- *Turing-likeness:* **SI**, le grammatiche di tipo 0 corrispondono a macchine di Turing.
- *Funzione di Trasmissione* $\tau_{(12 \rightarrow 13)}$: passaggio a *comunicazione interpersonale* (pragmatica).
 - Di solito **non iniettiva**: molte frasi formali si “fondono” in un atto linguistico pragmaticamente equivalente.
 - Quando si conserva la distinzione sintattica, si può preservare parte dell’indecidibilità, ma raramente i modelli pragmatici lo fanno.

Livello 13: Comunicazione Interpersonale (Pragmatica).

- *Dominio e Regole:* $D(L_{13})$ = atti linguistici, contesto sociale, enunciazioni. $\Sigma(L_{13})$ = regole pragmatiche, intenzioni, convenzioni di discorso (Searle 1992).
- *Turing-likeness:* **NO**, discorso quotidiano non è pensato come meccanismo Turing-completo.
- *Funzione di Trasmissione* $\tau_{(13 \rightarrow 14)}$: passaggio a *cultura e simboli*, ove gli atti comunicativi si trasformano in *pratiche* e *significati* stabili.
 - Fortemente **non iniettiva**: enunciazioni multiple riconfluiscono in “macro-significati” socioculturali.

Livello 14: Cultura e Simboli.

- *Dominio e Regole:* $D(L_{14})$ = repertori simbolici, memi, ideologie; $\Sigma(L_{14})$ = dinamiche di trasmissione culturale (Sperber 1996).
- *Turing-likeness:* **NO**, non esiste una struttura di calcolo “universale” nella cultura generica.
- *Funzione di Trasmissione* $\tau_{(14 \rightarrow 15)}$: passaggio a *società complesse e organizzazioni*.
 - Sovente **non iniettiva**: molteplici simboli confluiscono in prassi sociali simili.

Livello 15: Società Complesse e Organizzazioni.

- *Dominio e Regole*: $D(L_{15})$ = istituzioni, governance, processi collettivi; $\Sigma(L_{15})$ = leggi, norme, convenzioni economico-politiche.
- *Turing-likeness*: **NO** in senso standard. Alcune versioni agent-based *potrebbero* introdurre sub-livelli Turing-like, ma non *nella forma comune* di una macro-società.
- In questa “cima” della catena lineare, le *non iniettività* accumulate generano *forme macrosociali emergenti* molto distanti dai dettagli informatici del *Livello 1*, salvo *riapparire* (Lemma 2) in qualche sottosistema computazionale sofisticato.

9.3 Quando Avviene la Trasmissione di Indecidibilità?

Secondo il *Teorema 1* (Propagazione multi-livello), se *ogni* passaggio $\tau_{(\ell \rightarrow \ell+1)}$ mantiene (quasi) iniettivi gli stati Turing-centrali, *ogni* livello successivo *incorpora* i vincoli d’indecidibilità del primo livello Turing-like. Tuttavia, nella pratica, la maggior parte delle transizioni (p. es. da DNA a cellula, da neuroni a concetti) risulta **non iniettiva**, di conseguenza blocca la risalita dei limiti e introduce *proprietà emergenti* (Teorema 2).

9.4 Accumulo di Collassi ed Emergenza

Se a *ogni* passaggio si produce *almeno* un collasso su stati *rilevanti*, si ottiene un “*effetto a cascata*” di riduzione micro→macro: il livello L_{15} differisce profondamente dal primo, ospitando fenomeni *non più* riconducibili all’origine Turing-like. Ciò giustifica, ad esempio, *perché* le strutture sociali appaiano molto “nuove” rispetto ai micro-dettagli molecolari, *accumulando* proprietà emergenti a ogni step.

9.5 Blocco e Ri-emersione della Turing-likeness

In alcuni punti della catena (p. es. *Livello 7* “Reti Neurali Biologiche,” *Livello 10* “Architetture Algoritmiche,” *Livello 11* “Reti Neurali Artificiali,” *Livello 12* “Grammatiche di tipo 0”), la *Turing-likeness* *riappare*. In base al *Lemma 2*, ciò riporta *nuove* indecidibilità “endogene” a questi livelli. Ne consegue che l’assenza di trasmissione di limiti da un livello inferiore *non* impedisce di “incontrare” di nuovo problemi indecidibili a un livello successivo, se esso *ricostruisce* un potere Turing.

9.6 Rilievi Metodologici: Linearità e Reticoli con Loop

- **Catena lineare come esempio didattico.** La presentazione (Livelli 1 \rightarrow 15) è uno *schema* che semplifica la reale complessità dei sistemi naturali e sociali. Serve come “dimostrazione operativa” per evidenziare *dove* e *come* emergono blocchi (collassi) e trasmissioni (quasi-iniettività).
- **Reticoli con loop.** Nella realtà, i “Livelli 8, 9, 15” (cognizione, comportamento, società) potrebbero formare *cicli* con “Livello 7” (neuroni) o “Livello 14” (cultura). RLA contempla l’esistenza di tali circuiti (vedi Sez. 13), che ampliano ulteriormente i possibili fenomeni emergenti e la ridefinizione delle mappe iniettive/non iniettive.

Conclusione

Sebbene una “catena di 15 livelli” possa sembrare un esercizio speculativo, la sua validità scientifica dipende dalla *microfondazione* di ogni livello e di ogni funzione di trasmissione. In altre parole, per rendere il reticolo più di un costrutto astratto, occorre ancorarlo a evidenze sperimentali e a modelli disciplinari consolidati (fisica reticolare, genetica formale, sociologia quantitativa, ecc.). Solo così la catena multi-livello diventa uno strumento *operativo* di analisi, evitando che lo schema risulti fine a sé stesso. La catena di 15 livelli contigui fornisce un *esempio esteso* di come i *principi di RLA* (A1–A3, Teoremi 1–2) si applichino su una sequenza multi-disciplinare, dalla fisica più elementare alle istituzioni sociali. Ogni livello è caratterizzato da un *dominio* e *regole*, e i passaggi micro \rightarrow macro emergono come funzioni di trasmissione (*spesso non iniettive*). Tale esempio lineare *semplifica* la complessità reale (spesso reticolare e con loop), ma illustra in modo coerente *quando* l’indecidibilità “risale” i livelli (*se* i dettagli Turing-centrali sono preservati) e *quando*, invece, *collassano* generando proprietà emergenti irriducibili.

10 Esempi di altri Domini Scientifici

La *catena di 15 livelli contigui* (Sez. 9) offre un esempio lineare e coerente di come emergenza e indecidibilità possano alternarsi nelle *Reti Locali di Astrazione* (RLA). Tuttavia, le possibili discipline o sottodiscipline interessate dal modello RLA sono molte di più. In questa sezione, presentiamo una **tabella esemplificativa di 30 domini scientifici**, ordinandoli in due blocchi:

1. (A) 15 discipline con *Turing-likeness* (SI) o *potenziale* Turing-likeness,
2. (B) 15 discipline *non* (o non ancora) Turing-like (NO), almeno nella loro forma attuale.

L'obiettivo è mostrare la varietà di applicazioni dove RLA può essere pertinente, distinguendo i contesti in cui *indecidibilità* può effettivamente emergere (perché la disciplina ospita calcoli Turing-compatibili) da quelli in cui, *allo stato attuale*, non sussiste la potenza di calcolo necessaria.

(A) 15 Discipline Sufficientemente Espressive (Turing-like)

1. DNA computing sintetico (Winfrey, Benenson)
 2. Reti neurali ricorrenti (IA) (Siegelmann, Sontag)
 3. Automi cellulari universali (Wolfram)
 4. Logica combinatoria di alto ordine (Church, Curry–Howard)
 5. λ -calculus esteso (Barendregt)
 6. Quantum automata teorici (QTM)
 7. L-systems iterati con controlli (riscrittura potenzialmente universale)
 8. Modelli sociali agent-based “illimitati” (Epstein, Axtell)
 9. Reti booleane geniche complesse (Kauffman, Winfree)
 10. Grammatiche di tipo 0 (Chomsky)
 11. Sistemi di riscrittura Markov (Markov Normal Algorithms)
 12. Hybrid automata generici (alcune versioni Turing-complete)
 13. Membrane computing (P-systems) (Paun)
 14. Neural Turing Machines (arch. IA) (Graves, Wayne)
 15. “Programming Universe” quantistico (Lloyd)
-

(B) 15 Discipline Non (o Non Ancora) Turing-like (NO)

1. Geografia descrittiva classica (cartografia, catalogazione)
2. Meteorologia PDE a risoluzione finita (no universalità)
3. Demografia statistica standard

4. Macro-contabilità economica (bilanci, IFRS)
 5. Sistemi PDE lineari (fisica)
 6. Teoria dei giochi classici (modelli finiti)
 7. Sociolinguistica descrittiva (analisi empirica)
 8. Criminologia statistica
 9. Dati epidemiologici SIR base (equazioni differenziali)
 10. Catene di Markov lineari (stati + transizioni, ma no loop illimitato)
 11. Economia DSGE standard (modelli differenziali, nessun calcolo illimitato)
 12. Statistica descrittiva elementare
 13. Biblioteconomia tradizionale (classificazione e indiciz.ne)
 14. Procedure di archiviazione burocratica (finite rules)
 15. PDE della diffusione del calore (Fourier, no universalità)
-

10.1 Ragioni della Classificazione SI/NO

Perché “SI” (Turing-like). Nel **primo blocco**, ciascuna disciplina o variante *ammette*, in letteratura, implementazioni o versioni Turing-compatibili. Ad esempio:

- *DNA computing* (Winfrey, Benenson) dimostra la simulazione di calcoli Turing in piccola scala.
- *Reti neurali ricorrenti* (Siegelmann) dimostrano universalità teorica.
- *Grammatiche type-0* e *automi cellulari* completano il quadro classico dell’informatica teorica.

Tali sistemi, secondo *A1*, ospitano inevitabilmente problemi indecidibili. Ciò non implica che *ogni* sottoversione sperimentale attuale riesca a eguagliare una *M.* di Turing, ma *in linea di principio* la Turing-likeness risulta consolidata teoricamente.

Perché “NO” (Non Turing-like). Nel **secondo blocco**, le discipline non includono (allo stato attuale) alcuna forma di computazione illimitata. Spesso si tratta di *metodi di analisi* (es. statistica, PDE lineari, catene di Markov con spazi finiti) o *procedure* (bilanci macro, archiviazione burocratica) che non prevedono cicli di calcolo universale:

- *Meteorologia PDE* con griglia finita e orizzonte temporale limitato non si configura come “simulazione Turing-illimitata.”
- *Economia DSGE standard* (senza agent-based illimitati) rimane un sistema di equazioni differenziali, privo di loop computazionale infinito.

- *Statistica descrittiva, biblioteconomia, burocrazia* classica adottano procedure finite, non programmabili come macchine di Turing universali.

Ciò spiega *perché* A1 e A2 non si applichino (non sussiste Turing-likeness), sebbene *collassi* informativi e *emergenza* possano apparire (A3) in alcuni passaggi macro.

Come già accennato, ambiti come la meteorologia PDE a risoluzione finita, classificati qui come ‘NO’, potrebbero evolvere verso Turing-likeness se fossero integrati agent-based model di scala illimitata (Beresnev & Lainscsek 2021). Ciò dimostra che la distinzione attuale non è necessariamente definitiva, ma ancorata allo stato corrente di modelli e risorse.

10.2 Discipline-Ponte e Futuri Sviluppi

Alcune discipline del blocco NO possono, in futuro, adottare *versioni agent-based* o *modelli di calcolo* più generali, avvicinandosi alla Turing-likeness (p. es. la meteorologia con simulazioni agent-based *estese*, l’economia con modelli completi di computazione). Un passaggio “NO \rightarrow SI” comporterebbe l’accoglienza di vincoli d’indecidibilità (A1) e la possibilità di *trasmissione* di quei limiti ad altri livelli.

10.3 Implicazioni per RLA

1. Le RLA *riconoscono* come *non* tutti i domini siano Turing-like: in tali contesti (procedurali, PDE lineari), i limiti indecidibili *non nascono* a quel livello.
2. Se un *livello NO* è contiguo a un livello *SI* e la funzione di trasmissione preserva stati Turing-centrali, A2 *impone* la trasmissione dell’indecidibilità, *anche* se il livello NO non la “genera” autonomamente.
3. Dove prevalgono *collassi informativi*, A3 può comunque introdurre *emergenza*, benché non vi sia *indecidibilità* in discussione a quel livello.

Conclusione

La tabella di 30 discipline, divise tra *SI* (Turing-like o potenzialmente tali) e *NO*, mostra la *grande varietà* di campi scientifici cui l’idea di *livello di astrazione* e *(non) iniettività* può applicarsi. Nei *domini SI*, la presenza di calcoli universali richiama *inevitabilmente* i vincoli d’indecidibilità (A1). Nei *domini NO*, tali limiti non emergono “internamente,” ma *possono* venire “importati” — o *bloccati* — se un livello *SI precedente* (o adiacente) li trasmette (A2), in assenza di collassi informativi.

Restano comunque possibili fenomeni emergenti (A3) dovuti a fusione di stati, anche dove la Turing-likeness non è realizzata. Proseguiremo, nella sezione seguente (§13), a inquadrare questi risultati nel più ampio *dibattito interdisciplinare*, integrando la prospettiva su loop multi-livello e reticoli non lineari.

11 *Topologie RLA Compatte: Reticoli Indipendenti Ontologicamente, Chiusi Epistemicamente e Computabili*

Da un punto di vista *filosofico*, le **Reti Locali di Astrazione** (RLA) permettono di rendere conto di fenomeni “alti” (quali *coscienza, vita, auto-organizzazione*), senza obbligare a un riduzionismo integrale. In questo schema, *ogni livello possiede la propria ontologia*, e le relazioni inter-livello si svolgono secondo un criterio di *località*, preservando la possibilità di *proprietà emergenti* e mantenendo la descrivibilità *computazionale* (Turing-likeness) dove necessario.

Da un punto di vista *applicativo*, in un contesto scientifico che fa sempre più ricorso a *simulazioni* e *modelli eseguibili*, RLA fornisce un metodo per progettare sistemi multi-livello (biologici, cognitivi, artificiali) che:

1. Siano *autosufficienti* nei propri livelli e nelle relative leggi, garantendo una forma di “*chiusura disciplinare*” interna.
2. Possano essere *simulati* su macchine Turing, consentendo verifiche sperimentali e quantitativo-computazionali.
3. Limitino la *dipendenza* da complessità esterne, filtrando l’informazione in ingresso tramite funzioni di trasmissione non iniettive (dove appropriato).

Alla luce di queste esigenze, una *topologia RLA* (reticolo di livelli) può aspirare a essere:

- *Ontologicamente Indipendente*: non necessita di entità esterne non filtrate;
- *Epistemicamente Chiusa*: qualunque fenomeno interno risulta spiegabile tramite i livelli e le regole definiti *in loco*;
- *Turing-Computabile*: tutti i processi al suo interno sono rappresentabili e simulabili da una macchina di Turing (senza introdurre oracoli globali).

Queste tre qualità fanno di una topologia RLA un “*microcosmo locale*” in cui la coesistenza di *indecidibilità* e *emergenza* può essere trattata in modo organico, ponendo le basi sia per *interpretazioni filosofiche* (ontologiche) sia per *applicazioni pratiche* (simulazioni, costruzione di modelli chiusi).

Nelle sezioni seguenti, presentiamo le definizioni formali di:

1. *Indipendenza Ontologica* (§11.1),
2. *Chiusura Epistemica* (§11.2),
3. *Turing-Computabilità* (§11.3),

mostrando come esse si combinino per definire una “*Topologia RLA Compatta*”.

11.1 Indipendenza Ontologica

Definizione. Sia

$$\mathcal{R} = \left\langle \mathcal{L}, \{\mathcal{E}_i\}, \{\mathcal{R}_i\}, \{f_{ij}\} \right\rangle$$

un reticolo di livelli RLA dove:

- \mathcal{L} è un insieme finito di indici di livello (ad es. L_1, L_2, \dots, L_n);
- \mathcal{E}_i indica l'insieme di *stati* o *entità* presenti a livello L_i ;
- \mathcal{R}_i è l'insieme di *regole* (o leggi) *intra-livello* che ne determinano l'evoluzione e l'interazione interna;
- f_{ij} è la *funzione di trasmissione* (spesso non iniettiva) dal livello L_i al livello L_j , definendo come gli stati di L_i vengano *letti* e *filtrati* in L_j .

Chiamiamo **Ontologicamente Indipendente** una topologia \mathcal{R} se:

1. Ogni entità e ogni legge necessari a spiegare i processi interni a \mathcal{R} è *contenuta* in uno dei livelli L_i o nelle relative funzioni di trasmissione f_{ij} .
2. Qualora esistano canali verso un “livello esterno” o “fonte esterna” *non* incluso in \mathcal{R} , tali canali risultino **non iniettivi** (collasso informativo), evitando che complessità o indecidibilità infinite vengano *ereditate* senza filtraggio.

Interpretazione Filosofica: l'*Indipendenza Ontologica* assicura che la topologia costituisca un “*microcosmo*” in cui *tutte* le leggi e le entità significative sono definite *al suo interno*. Ogni ingresso esterno viene *collassato* (non iniettivamente) prima di entrare, garantendo che l'eventuale informazione aggiuntiva non comprometta la coerenza auto-consistente del reticolo.

11.2 Chiusura Epistemica

Definizione. Chiamiamo **Epistemicamente Chiusa**

una topologia $\mathcal{R} = \langle \mathcal{L}, \{\mathcal{E}_i\}, \{\mathcal{R}_i\}, \{f_{ij}\} \rangle$ se:

1. Nessun “*teorema esterno*” o livello al di fuori di \mathcal{R} è necessario per descrivere la *totale* dinamica interna di \mathcal{R} ;
2. Qualsiasi fenomeno che si manifesti dentro \mathcal{R} può essere spiegato (o almeno modellato) partendo dai livelli L_i e dalle regole/funzioni f_{ij} già presenti.

Interpretazione Filosofica: la *Chiusura Epistemica* implica che l’insieme di leggi e stati in \mathcal{R} *basta* a render conto di *tutto* ciò che avviene all’interno del reticolo, senza dover chiamare in causa teorie o principi *esterni*. È una forma di “*autosufficienza esplicativa*,” che nella pratica favorisce una descrizione disciplinare integrale.

11.3 Turing-Computabilità

Definizione. Data la topologia $\mathcal{R} = \langle \mathcal{L}, \{\mathcal{E}_i\}, \{\mathcal{R}_i\}, \{f_{ij}\} \rangle$, diciamo che \mathcal{R} è *Turing-Computabile* se:

1. Ognuna delle regole \mathcal{R}_i (le leggi “intra-livello”) è esprimibile come funzione ricorsiva (totale o parziale) o insiemi di regole computazionalmente implementabili;
2. Le funzioni di trasmissione f_{ij} sono anch’esse definibili in termini computabili (senza oracoli indecidibili esterni);
3. L’intera evoluzione (ad es. a passi discreti) può essere simulata da una Macchina di Turing, pur riconoscendo che eventuali *blocchi* di indecidibilità possono emergere *localmente* e rimanere confinati nel reticolo.

Interpretazione Filosofica: la *Turing-Computabilità* formalizza la “*modellabilità*” del sistema. Anche se possono esistere *problemi indecidibili* interni, ciò non contraddice la computabilità *globale*: significa soltanto che *interna* al modello potranno verificarsi dinamiche insolubili, ma *l’intero* reticolo è descrivibile come un insieme di procedure eseguibili su Macchina di Turing.

Sintesi

I tre requisiti – **Indipendenza Ontologica**, **Chiusura Epistemica** e **Turing-Computabilità** – definiscono una *Topologia RLA Compatta*. Tale reticolo di livelli *(i)* non eredita indefinitamente complessità e indecidibilità dall'esterno, *(ii)* possiede al suo interno tutte le leggi utili alla comprensione e *(iii)* resta simulabile su Macchina di Turing, consentendo test e sperimentazioni. In tal modo, può essere visto come un “*universo locale*” autosufficiente, dove indecidibilità ed emergenza coesistono e possono essere studiate in modo rigoroso. Nelle sezioni successive, verrà illustrato come costruire passo-passo una simile topologia in un caso pratico (*briofito generalista*), mostrando i vantaggi di un sistema “compatto” sia per l'analisi teorica sia per la validazione empirico-sperimentale. *Compatta*.

12 Costruzione di una Topologia RLA Compatta

Dopo aver chiarito i requisiti di *Indipendenza Ontologica*, *Chiusura Epistemica* e *Turing-Computabilità*, presentiamo in questa sezione un *metodo a fasi* per costruire una topologia RLA che soddisfi tali criteri in modo congiunto, ciò risulti *Compatta*. Rispetto a un approccio puramente formale, qui sottolineiamo la necessità di *microfondare* ogni fase — cioè di ancorare la definizione di livelli e funzioni di trasmissione alla letteratura scientifica *dominante* (o comunque ben consolidata) del dominio in oggetto. Tale microfondazione assicura la *plausibilità* empirica del reticolo e ne garantisce la *robustezza epistemica*.

12.1 Fase 1: Identificare il Dominio e le Fonti di Microfondazione

1. **Scelta del Fenomeno da Modellare:** Stabilire con precisione l'oggetto di studio (per es. un organismo vegetale, un sistema cognitivo, un ecosistema).
2. **Microfondazione Letteraria:** Ogni *livello* e *processo* che si desidera rappresentare va riferito alla letteratura *scientifica* pertinente (articoli peer-reviewed, testi di riferimento). Ad esempio, se si intende modellare la fotosintesi, si utilizzeranno parametri e formule derivanti dalle pubblicazioni standard di fisiologia vegetale.
3. **Definizione dei Confini:** Una volta chiarite le principali fonti bibliografiche, si delimita il *perimetro* del reticolo (cosa rimane interno, cosa è esterno).

Motivazione Epistemica: Senza riferimenti a un corpus di conoscenze dominanti, la topologia rischierebbe di essere arbitraria e scollegata dal fenomeno reale; la microfondazione, invece, garantisce coerenza *empirica* e *teorica*.

12.2 Fase 2: Selezione e Descrizione dei Livelli

1. **Livelli come Proiezioni Teoriche:** Ogni livello corrisponde a un “piano” di analisi (genetico, metabolico, morfologico, cognitivo, ecc.), basato su *campi disciplinari* ben riconosciuti. Le definizioni e i parametri di tale livello vanno *microfondati* tramite riferimenti mirati: ad esempio, per un livello genetico, si includono parametri di *trascrizione*, *epimutazioni*, *trasposoni* attingendo dai testi di genetica formale e di epigenetica.

2. **Cardinalità e Confini di Ciò che Sta in un Livello:** L'inclusione di un parametro (ad es. Tasso Auxina) deve rifarsi a un *modello standard* in letteratura; la scelta di escludere processi secondari richiede *giustificazioni* (ad es. “per semplicità si trascura la fotoprotezione X, secondo [Autore, anno]”).

Motivazione Epistemologica: La formalizzazione di ogni livello non dev'essere “a priori”; deve invece riflettere i *dati* e la *teoria* correnti. Così, la topologia *guadagna validità* e conformità al mondo reale.

12.3 Fase 3: Definire le Funzioni di Trasmissione (f_{ij}) con Riferimenti Empirici

1. **Coppie di Livelli:** Per ciascuna coppia (L_i, L_j) , si stabilisce *come* gli stati o parametri di L_i influenzano (o vengono “letti” da) L_j . Ad esempio, se L_i è “fisiologia” e L_j è “tessuto”, si useranno equazioni o regole validanti la letteratura (p.es. manuali di botanica sulle relazioni tra ormoni e differenziazione cellulare).
2. **Non Iniettività Giustificata:** La letteratura potrebbe indicare che, tra certi range di uno stimolo, la risposta dell'altro livello si satura; questo è un *collasso informativo*. Una *curva di saturazione* Sigmoidale, ad esempio, testimonia la non iniettività: molti valori di input a un certo punto “collassano” nella stessa risposta.

Valore dell'Evidenza Scientifica: Ogni funzione f_{ij} , lungi dall'essere scelta arbitrariamente, viene *microfondata* su curve note (Michaelis-Menten, Hill, logistiche, ecc.), *giustificando* le scelte parametriche sulla base di pubblicazioni e dataset.

12.4 Fase 4: Verificare Indipendenza Ontologica e Chiusura Epistemica

1. **Indipendenza Ontologica:** Se *ogni* entità e legge dipende dalle fonti bibliografiche scelte (e *non* da un livello esterno “misterioso”), la condizione è soddisfatta. In pratica, si *esige* che non si importino dinamiche indefinite: l'eventuale ambiente (clima, suolo, ecc.) venga codificato come set di parametri *collassanti* e *filtrati*, definiti anch'essi in base a letteratura (*es.: modelli di precipitazione validati*).
2. **Chiusura Epistemica:** Serve confermare che *tutto* ciò che può avvenire nel reticolo *sia spiegabile* dalle regole interne. Se la letteratura di riferimento

suggerisce un processo cruciale “esterno”, allora bisogna *internalizzarlo* (con un livello ad hoc o funzioni).

Nota di Filosofia della Scienza: La microfondazione legittima *ontologicamente* e *epistemicamente* la topologia; ogni passaggio è *un test* di sufficienza: “le nostre leggi interne bastano? Stiamo ricorrendo inconsciamente a entità indescrivibili *extra* reticolo?”

12.5 Fase 5: Assicurare la Turing-Computabilità

1. **Formalizzare in Algoritmi:** Per rendere computabili *tutte* le equazioni e i processi, si traducono i modelli e i parametri *microfondati* in una *struttura di calcolo* (per es. un loop giornaliero in cui si applicano successivamente regole e funzioni).
2. **Evitare Oracoli o Sottomodelli Non Calcolabili:** Se la letteratura indica un fenomeno complesso ma *ancora* non completamente definito, si deve optare per un *approssimazione* (equazione), piuttosto che per un “buco nero” che necessiti di un oracolo.
3. **Implementazione Prototipale:** Infine, la Turing-compatibilità si *verifica* realizzando un prototipo software (in Python, C++ o altro) e *simulando* i parametri. La microfondazione fa sì che i risultati siano *confrontabili* con i dati sperimentali (se disponibili).

12.6 Conclusioni

La microfondazione è dunque *condizione necessaria* per:

- *Definire i livelli:* Ogni livello corrisponde a un *capitolo disciplinare* o a un sotto-modello validato in letteratura.
- *Giustificare le funzioni di trasmissione:* Senza dati empirici o teorie dominanti, non ci sarebbe criterio per decidere iniettività o forme di saturazione/collasso.
- *Integrare Indipendenza Ontologica, Chiusura Epistemica e Computabilità ai sensi di Turing:* L’indipendenza e la chiusura sono plausibili solo se radicate in conoscenze riconosciute, e la Turing-compatibilità *eseguibile* solo se le equazioni e i processi sono formalizzati come *algoritmi*.

Questo metodo assicura che la topologia RLA non sia un costrutto arbitrario, bensì un *modello robusto*, nato da un intreccio di rigore teorico e ancoraggio continuo alle conoscenze scientifiche che ne legittimano la struttura.

In allegato è illustrato un esempio dettagliato — la *topologia briofita* — per mostrare come ogni passo sia tradotto in pratica e supportato da fonti pertinenti, consentendo di giungere a una Topologia RLA Compatta sperimentabile.

13 Discussione Interdisciplinare

Dopo aver illustrato la *catena lineare* di 15 livelli (Sez. 9) e aver presentato *altre* 30 discipline potenzialmente inquadrabili nelle Reti Locali di Astrazione (Sez. 10), in questa sezione **chiudiamo il cerchio** mettendo a fuoco:

1. **Come** RLA *connetta* l'emergenza (tipica dei sistemi complessi) con i limiti computazionali (Turing, Rice) in modo non contraddittorio.
2. **Perché** la presenza di **livelli contigui** e funzioni di trasmissione (iniettive o no) risulti essenziale a questa coesistenza.
3. **In che modo** la struttura possa estendersi, nella pratica, a *reticoli con loop* e *cicli di retroazione* e non solo a catene lineari.

13.1 Raccordo con la Matematica e la Filosofia della Scienza

La formalizzazione di RLA (Sez. 5) riprende i *teoremi classici* dell'indecidibilità (Turing, Church, Rice) e li *proietta* su una *rete di livelli* contigui. I livelli non sono presentati come entità metafisiche, ma come *convenzioni disciplinari* (cfr. §3) che “ritagliano” parti di realtà e regole di azione. La contiguità, definita in termini di funzioni di trasmissione, coincide con la *connessione empirico-teorica* fra domini (genetica formale, meccanica statistica, reti neurali, ecc.). Ciò integra la *costruzione sociale* dei livelli (Berger & Luckmann) con il *rigore insiemistico* e computazionale.

13.2 Coesistenza di Emergenza e Indecidibilità

La letteratura emergentista (Anderson, Morin) e la teoria dell'indecidibilità (Turing, Rice) possono apparire *distanziate*:

- L'emergenza di proprietà macro *non* riducibili punta l'attenzione sulla “novità”;
- La *teoria dell'indecidibilità* sottolinea *limiti* logico-formali imposti dalla Turing-likeness.

Con RLA, *entrambe* convivono in un sistema multi-livello: se *almeno un* livello *preserva* stati Turing-centrali lungo le mappe di trasmissione, i limiti indecidibili *risalgono* (Teorema 1); se *invece* qualche mappa *collassa* (non iniettività) stati rilevanti, emergono *proprietà non derivabili* (Teorema 2). Questi due fenomeni non si *escludono*, ma si *intrecciano* localmente, producendo scenari ibridi in cui *alcune* differenze micro persistono e *altre* si perdono.

13.3 Funzioni di Trasmissione come Chiave di Volta

La nozione di **funzione di trasmissione** (Def. 2) è al centro della *chiusura* epistemico-matematica:

- *Iniettività* e *quasi-iniettività* sostengono la *propagazione* dell’indecidibilità — se c’è un livello Turing-like a monte.
- *Non iniettività* (collasso) introduce *emergenza* irriducibile.

In ogni passaggio micro→macro, i ricercatori possono *indagare* sperimentalmente (Sez. 6) se la funzione di trasmissione conserva o collassa distinzioni. Così RLA *non* proclama un riduzionismo totale, né un emergentismo assoluto, ma *localizza* l’emergenza e i limiti computazionali nelle *singole* transizioni tra livelli contigui.

13.4 Topologia RLA Compatta

Un ulteriore passo in questa direzione è la formalizzazione di *Topologie RLA Compatte*, in cui il reticolo multi-livello risulti:

- Ontologicamente indipendente: non “eredita” indefinitamente complessità esterne, grazie a funzioni di trasmissione collassanti in ingresso;
- Epistemicamente chiuso: qualunque fenomeno interno alla topologia può essere compreso e spiegato *all’interno* dei livelli e delle relazioni definiti, senza ricorrere a un meta-livello esterno;
- Turing-computabile: la dinamica d’insieme (livelli, regole, funzioni di trasmissione) risulta simulabile da una macchina di Turing, garantendo che i loop e i fenomeni emergenti siano modellabili e falsificabili.

In un tale schema, le RLA assumono la forma di “microcosmi” autosufficienti, dove l’emergenza e l’indecidibilità convivono *dentro* la struttura senza richiedere entità o regole esterne. Di conseguenza, la ricerca potrebbe mirare alla costruzione esplicita di reticoli “compatti” in varie discipline, esplorando possibili implementazioni sperimentali (nei settori biologici, cognitivi o sociali) e aprendo prospettive di simulazione su scale maggiori.

13.5 Reticoli Multi-livello con Loop: Prospettive Future

Nei paragrafi precedenti, abbiamo presentato esempi di *catene* lineari di livelli. Tuttavia, molti sistemi reali (in biologia, fisica o scienze sociali) manifestano *loop di*

retroazione e vere e proprie strutture reticolari, nelle quali le funzioni di trasmissione non seguono un'unica direzione “dal basso verso l'alto,” ma si compongono ciclicamente. Questa configurazione introduce ulteriori complessità:

- Se un *loop* preserva iniettività sugli stati Turing-centrali, i limiti d'indecidibilità possono *ricircolare* e manifestarsi persistentemente;
- Se invece si verifica un *collasso informativo* in uno (o più) archi del loop, possono emergere proprietà collettive non riducibili, con possibili effetti di feedback che si auto-sostengono.

L'analisi formale di queste *retroazioni multi-livello* costituisce un'estensione naturale del presente quadro RLA, ma richiede modelli matematici più ricchi (ad esempio, *grafi orientati* e *morfismi* composizionali). Sarà oggetto di studi futuri verificare come la (non) iniettività e la Turing-likeness possano coesistere in cicli complessi, e se emergano fenomeni di *ricorsione* nell'indecidibilità o nell'emergenza.

Esempio di Ricerca: Trattare i loop come morfismi endofunzione e verificare se si creano “cicli di emergenza” capaci di amplificare irriducibilità. In tal senso, un confronto con i modelli di retroazione di Koestler (1967) potrebbe chiarire come informazioni collassate vengano ri-generate a un livello inferiore, incrementando la complessità reticolare.

Questi aspetti, potenzialmente rilevanti in neurobiologia, scienze sociali ed ecologia, aprono interessanti prospettive di ricerca interdisciplinare.

13.6 Sintesi Interdisciplinare

Le sezioni sulle *discipline* (Sez. 7, 8, 9, 10) mostrano come RLA possa abbracciare *fisica, biologia, IA, scienze sociali, linguistica*, ecc. Lo schema si fa “ponte” fra:

- L'emergenza nel senso di Anderson (1972) — come *non deducibilità* di macro-proprietà;
- I vincoli logico-computazionali (Turing, Rice) — *inevitabili* in sistemi universali;
- La *pluralità* di livelli disciplinari, riconosciuti in ottica costruttivista/realista (Berger & Luckmann).

La formalizzazione matematica (assiomi A1–A3, teoremi 1–2) *saldano* tali aspetti in un *linguaggio coerente e falsificabile* (Popper).

Riepilogo

In definitiva, *RLA* si presenta come un *meta-teoria* in cui *emergenza* e *indecidibilità* *non* si escludono, bensì *coabitano* in una rete di passaggi locali. La **chiave** risiede nelle *mappe di trasmissione* (iniettive o no) che *rispettano* o *collassano* i “dettagli computazionali critici.” Così, l’eventuale presenza di loop multi-livello aggiunge ulteriore complessità, ma *non* intacca la *validità* degli assiomi A1–A3, bensì la *estende*, consentendo che emergenza e indecidibilità si “rigenerino” o “si blocchino” in percorsi ricorsivi. Nella successiva sezione (§15), tratteremo i *limiti* attuali di *RLA* (come la mancanza di metriche quantitativo-sperimentali ampiamente validate) e le *prospettive* di sviluppo (ad es. category theory, protocolli sperimentali, reticoli con loop), in una visione che incoraggi *ricerca empirica* e *collaborazione interdisciplinare*.

14 Riflessioni Ontologiche, Epistemologiche e Questione Coscienza

Le *Reti Locali di Astrazione* (**RLA**), concepite inizialmente come un *meta-quadro* interdisciplinare per studiare l'emergenza e l'indecidibilità, entrano *inevitabilmente* in risonanza con alcuni grandi temi filosofici:

1. **Epistemologia:** in che modo le discipline accedono a distinti “*livelli di realtà*” e quali “*collassi cognitivi*” (parzialità o perdita d'informazione) limitano la nostra conoscenza?
2. **Ontologia:** i livelli sono *oggettivi* o mere costruzioni concettuali (strumenti) della nostra mente? Qual è lo *status* di ciò che “*esiste davvero*”?

Al contempo, emergono **implicazioni teologiche** se postuliamo un livello *transcendente* (o *divino*) così “alto” da rendere ancor meno iniettive (o più “collassanti”) le funzioni di traduzione. Sebbene *RLA* non pretenda di stabilire una “teologia scientifica,” esso fornisce un *quadro multi-livello* che può essere reinterpretato (in prospettiva di fede) come “*struttura reticolare della Creazione*.”

Senza alcuna pretesa di *risolvere* dilemmi filosofici o religiosi, questo capitolo mostra come *RLA* *incroci* la storia del pensiero — dalle radici antiche alle discussioni su coscienza e computazione — e in quale senso *indecidibilità* ed *emergenza* contribuiscano al dibattito su “*chi siamo e come conosciamo*”.

14.1 Linee di Pensiero: dalla Storia Antica a Quella Moderna

I *Presocratici* (Talete, Eraclito, Parmenide) indagavano un *arché* unico oppure il contrasto fra *divenire* (Eraclito) e *staticità* (Parmenide) (Barnes 1982). In modo suggestivo, *RLA* associa un'idea di “*meta-quadro unificante*” (un potenziale *arché concettuale*) alla pluralità di livelli: la dinamica dei passaggi di trasmissione può richiamare il “*divenire*,” mentre *forme fisse* o proprietà emergenti potrebbero evocare “*forme*” più stabili.

Platone e Aristotele introducono due visioni-chiave:

- *Platone:* un mondo delle idee (livello “*superiore*”?) contrapposto alle cose sensibili (Barnes 1982).
- *Aristotele:* la distinzione *materia-forma* e le quattro cause.

In RLA, l'“*idea*” o “*forma*” potrebbe emergere da un *sostrato* materiale tramite *funzioni di trasmissione* (spesso non iniettive). La non completa risalita salvaguarda, così, la *non totale riducibilità* di tali forme.

In epoca medievale (Agostino, Tommaso d'Aquino), fede e ragione si intrecciano (Aquinas dominum). La separazione tra piano *divino* e *terreno* può, nel lessico RLA, essere intesa come livelli la cui *funzione di trasmissione* è *estremamente* non iniettiva: da ciò potrebbero risultare “*miracoli*” (rotture di continuità nel livello naturale). Un ipotetico “livello Divino” rimane *non* trattabile con i normali assiomi umani (Polkinghorne 1989).

La distinzione cartesiana tra “*res cogitans*” e “*res extensa*” (Descartes 1984) può trovare una “traduzione” in RLA: un *collasso irriducibile* fra *livello fisico* (neuroni) e *livello coscienza*. In modo affine, la contrapposizione kantiana tra *noumeno* (non conoscibile) e *fenomeno* (conoscibile in modo parziale) (Kant 1998) risuona nella *non iniettività* come perdita informativa inevitabile in ogni “descrizione” scientifica.

La scienza positivista (Comte, Mill) mirava a *unificare* tutti i fenomeni in leggi fondamentali. In un contesto RLA, ciò equivale a *cercare* un'iniettività totale dal micro al macro, riducendo completamente i livelli superiori ai precedenti. Tuttavia, le scienze contemporanee (fisica, biologia, scienze sociali) mostrano *collassi* non iniettivi che rendono insostenibile un riduzionismo totale (Morin 2008).

Nel Novecento, autori come *Broad* e *Morgan* propongono l'emergentismo (Broad 1925), mentre *Heidegger*, *Sartre* e altri si concentrano sull'essere *fenomenologico*. Sul fronte teologico, si sviluppano prospettive di *creazione continua* (Teilhard de Chardin) o interpretazioni evolutive (Morin 2008). RLA *non* prende posizioni dogmatiche ma offre uno *schema* in cui *livelli successivi* possono *accogliere* proprietà non deducibili da quelli inferiori. In ottica religiosa, un “livello trascendente” rimane plausibile in un reticolo in cui ciascuna catena subisce *collassi* di informazione.

14.2 Epistemologia: Pluralità Livelli e Limiti Conoscenza

La “*non iniettività*” (o *collasso*) esprime la *nostra* difficoltà nel ricostruire in modo pieno un livello inferiore partendo da uno superiore. *Kant* vedrebbe in ciò la *differenza* fra *noumeno* e *fenomeno*, mentre *Popper* sottolineerebbe la *fallibilità* e la *parzialità* di ogni teoria (Popper 1959). Da un punto di vista RLA, l'incompletezza epistemica si traduce nel “collasso informativo” che inevitabilmente si manifesta a ciascun passaggio.

Inoltre, quando incontriamo “vuoti” fra discipline (p. es. tra fisica e biologia, oppure tra neuroscienze e scienze sociali), RLA suggerisce che *nuovi livelli-ponte* possano ridurre il *collasso*, aumentando la risoluzione del nostro modello. Così,

la scienza *non* appare più rigidamente gerarchica ma “reticolare” e potenzialmente *frattale* (Morin 2008).

Un punto cruciale è la *transitività* dei limiti computazionali: *basta* un singolo sottosistema Turing-like, *non* collassato nei livelli successivi, per “*importare*” in tutto il *meta-quadro* le problematiche dell’*indecidibilità*. Se un dominio scientifico integra tale sottosistema, eredita i vincoli di Halting Problem e Rice, indicando la *profonda pervasività* dei limiti logici.

Postulato di estensione dell’indecidibilità: Se, in un sistema multi-livello, almeno un sottosistema è Turing-like e non collassa le proprie distinzioni nei passaggi successivi, *tutte* le descrizioni scientifiche che lo includono ne *ereditano* inevitabilmente i limiti d’indecidibilità. Tali vincoli, pertanto, *risalgono* la catena sino ai livelli emergenti, influenzando la nostra capacità di modellarli con gli strumenti logico-matematici a disposizione.

14.3 Ontologia: Riduzionismo, Emergenza e Sguardo Teologico

Anderson (Anderson 1972) afferma “*More is different*”: quantità e interazione generano *novità* qualitativa. RLA “incarna” questa visione: quando una funzione micro→macro è non iniettiva, emergono proprietà *non ricostruibili* da predicati micro (Teorema 2). Ciò non preclude *riduzioni parziali*, ma nega il “riduzionismo assoluto,” prospettando una “semi-riducibilità.”

Da una prospettiva teologica, si può ipotizzare un “livello divino” ancora più sfuggente alle mappe umane (Aquinas dominum; Polkinghorne 1989). *Miracoli* potrebbero allora apparire come conseguenze di una *traduzione ultranon-iniettiva* (impossibile da rendere coerente con le catene naturali). Sebbene RLA non *imponga* affatto l’esistenza di tale livello, esso rimane compatibile con un discorso sulla molteplicità dei piani di realtà (Morin 2008).

In ambito “ontologia digitale,” gli esperimenti di “*digital life*” (e.g. Ray 1991; Adami & LaBar 2018) sollevano la questione se forme di vita computazionale possano “*esistere*” al pari di organismi biologici. In RLA, la distinzione fra “entità biologiche” e “entità virtuali” dipenderebbe dalla *catena di livelli* in cui si collocano e dalla (non) iniettività delle loro reciproche funzioni di traduzione.

14.4 Confronto con l'Antispecismo Post-Umanista

L'*antispecismo post-umanista* critica la centralità esclusiva della specie umana, riconoscendo continuità (biologica e cognitiva) con animali, entità artificiali ed altre forme di vita. Esso sfuma i confini “umano–non umano,” considerando tali distinzioni in larga parte costrutti culturali. In quest’ottica, *RLA* può fornire un principio unificante: se le proprietà Turing-like e i collassi emergenti non sono appannaggio dell’*homo sapiens* ma *ricorrono* in svariati sistemi (cervelli animali, reti neurali artificiali, entità computazionali), allora la *qualità ontologica* non dipende più soltanto dall’etichetta “umano/non umano,” bensì dalle dinamiche multi-livello e dai gradi di emergenza.

Così, l’antispecismo post-umanista trova un *linguaggio condiviso* con *RLA* per descrivere la comparsa di *valore ontologico* e proprietà “*mentali*” su basi computazionali ed emergenti, senza trincerarsi in dicotomie rigide. Il *collasso informativo*, se “*rilevante*,” può generare forme di *agentività* e di *coscienza* potenzialmente estese oltre lo steccato antropocentrico.

14.5 La Coscienza: Mente-Corpo e Indecidibilità

Nel dibattito mente-corpo, i **riduzionisti** puri affermano che la coscienza sia interamente *epifenomeno* delle dinamiche neuronali, mentre i **non-riduzionisti** radicali sostengono che il “qualia” (o l’esperienza soggettiva) sfugga del tutto a spiegazioni fisico-computazionali (Chalmers 1996; Searle 1992). *RLA* propone un “*terreno ibrido*”: alcune funzioni (memoria, attenzione) potrebbero essere tracciate in modo (quasi) iniettivo, mentre altri aspetti (il “sentire soggettivo”) restano *collassati* e non ricostruibili, configurando così una “semi-riducibilità” tra cervello e mente.

Faggin (Faggin 2021) ipotizza un “principio interiore” irriducibile alla sola computazione. Nel linguaggio di *RLA*, ciò potrebbe equivalere a dire che *alcuni* stati interni del sistema-neuroni, nel passaggio neurale → coscienza, subiscono un *collasso* non iniettivo e non riducibile, generando fenomeni soggettivi inaccessibili alla mera analisi computazionale.

Se il *cervello* è almeno in parte Turing-compatibile (Siegelmann & Sontag 1991), esisteranno *problemi cognitivi* indecidibili. In *RLA*, qualora i livelli neurale → cognitivo *preservino* le distinzioni Turing-critiche, tale indecidibilità “risale” sino alla nostra coscienza, giustificando l’esistenza di alcuni “*misteri cognitivi*” (al di là del limitato punto di vista soggettivo).

La tensione “riduzionismo vs. emergentismo” trova in *RLA* una via di mezzo:

la mente nasce *anche* da processi fisico-computazionali, ma non *tutti* i dettagli neuronali sono conservati; alcuni collassano e producono proprietà coscienti *non* riducibili fino in fondo. Questo “*semi-dualismo*” accetta la base fisica e riconosce la *non* equivalenza integrale fra mente e cervello, sostenuta dall’inevitabile presenza di limiti computazionali (Gödel 1931; Turing 1936).

14.6 RLA come Modello di Sintesi

Dai **Presocratici** all’**epoca medievale** (Agostino, Tommaso), dal **dualismo cartesiano** alle *concezioni informatiche* del Novecento, la filosofia della natura ha alternato tentativi di unificazione e di distinzione tra “micro” e “macro,” fisico e mentale, umano e divino. *RLA* non ambisce a dirimere tutti questi dilemmi, ma *offre* un “**reticolo multi-livello**” che:

- *Conserva* la pluralità disciplinare e ammette *interpretazioni realiste o costruttiviste*,
- *Riconosce* la *non* iniettività (collasso informativo) come radice dell’emergenza,
- *Permette* la trasmissione dei vincoli d’indecidibilità (Turing-likeness) dai livelli più “bassi” fino a quelli umani,
- *Consente* eventuali *letture teologiche* (livello trascendente),
- *Incoraggia* la ricerca di “livelli-ponte” aggiuntivi, in una scienza che si rivela reticolare e aperta a integrazioni inedite.

Così, *mentre* fisici, biologi, teologi e studiosi della coscienza continuano a dialogare, RLA propone un *linguaggio* per articolarne le convergenze: un “*realismo stratificato*” con *funzioni di trasmissione* e *collassi* selettivi. Tale struttura rende plausibile la coesistenza di fenomeni *non deducibili* (come la coscienza) e di limiti computazionali diffusi. In sintesi, RLA non *chiude* la questione ontologica, epistemologica o teologica, ma ne *rilancia* la portata: riconosce i “*collassi e i ponti*” come strumenti per l’analisi e la meraviglia congiunta.

15 Conclusioni e Prospettive Future

Con la presentazione delle *Reti Locali di Astrazione* (RLA), abbiamo proposto un **quadro meta-teorico** che integra *emergenza* e *limiti computazionali* in sistemi multi-livello. Ripercorriamo brevemente i *nuclei centrali* del contributo e delineiamo, infine, possibili **sviluppi** e **ricerche future**.

15.1 Riassunto dei Contributi Chiave

1. **Formalizzazione** di un approccio multi-livello per l'emergenza e l'indecidibilità. Abbiamo introdotto le *definizioni* (livelli di astrazione, funzioni di trasmissione, Turing-likeness, (non) iniettività) e i *tre assiomi* (A1–A3). Il *Teorema 1* descrive la propagazione dell'indecidibilità quando i passaggi sono (quasi) iniettivi sugli stati Turing-centrali; il *Teorema 2* evidenzia invece la nascita di *proprietà emergenti* irriducibili in caso di collassi informativi.
2. **Falsificabilità e Protocolli Sperimentali.** Abbiamo mostrato come *ciascun* assioma (A1, A2, A3) sia *testabile*: se un *dominio* Turing-like risultasse privo di problemi indecidibili, A1 verrebbe confutato; se una quasi-iniettività non trasmettesse i limiti, A2 crollerebbe; se una *non* iniettività rilevante non generasse emergenza irriducibile, cadrebbe A3. In Sez. 6 e 8 si sono delineate possibili linee di verifica sperimentale in biologia, fisica computazionale e IA.
3. **Applicazioni Interdisciplinari.** È stato illustrato come la *catena di 15 livelli contigui* (Sez. 9) costituisca un esempio *lineare* dalla fisica reticolare alla società complessa, e come altre *30 discipline* (Sez. 10) possano rientrare nel modello RLA, distinguendo quelle *Turing-like* (SI) da quelle *non Turing-like* (NO).
4. **Coabitazione di Emergenza e Indecidibilità.** L'aspetto più innovativo è mostrare che i *limiti di calcolo* (Halting, Rice) e i *fenomeni emergenti* (collasso informativo, novità macro) *non* si elidono a vicenda, bensì si *localizzano* in funzione delle *funzioni di trasmissione* (iniettive o no). Così si offre una cornice dove *riduzione* e *emergenza* diventano *due* dinamiche *coesistenti*, interpretate in ottica multi-livello.
5. **Topologie RLA Compatte.** la proposta di una *Topologia RLA Compatta* sembra incarnare un'aspirazione conclusiva: riunire in un solo contesto i tre requisiti di *ontologia locale*, *chiusura epistemica* e *computabilità Turing-compatibile*. Se tali condizioni venissero soddisfatte con sufficiente microfondazione

empirica, potremmo disporre di “universi limitati” e al contempo *autosufficienti*, in cui osservare la coesistenza strutturata di emergenza e limiti computazionali. Questa visione, potenzialmente utile in ecologia, biologia sintetica e scienze cognitive, apre una strada per sperimentazioni e simulazioni che verifichino come i loop multi-livello e i collassi informativi possano dar vita a “nuovi mondi” coerenti, da studiare come entità sperimentali a sé stanti.

15.2 Limiti Correnti e Criticità Aperte

Nonostante l’architettura RLA offra un *framework* ampio e coerente, permangono alcuni limiti e aspetti da approfondire:

- **Quantificazione del Collasso.** L’idea di un *coefficiente di collasso* o di un *indice di emergenza* (§4.4) è tuttora in fase di sviluppo. Manca una *standardizzazione* di tali metriche che permetta di *misurare* quanta iniettività sia “preservata” e quale novità macro emerga quantitativamente.

Per rendere queste nozioni più operative, consideriamo un esempio pilota ispirato all’entropia di configurazione discussa da (Adami & LaBar 2018). Supponiamo cinque stati micro $\{x_1, \dots, x_5\}$ con probabilità uniforme, mappati da τ in due stati macro $\{m_1, m_2\}$. Se $\tau(x_1, x_2) = m_1$ e $\tau(x_3, x_4, x_5) = m_2$, il coefficiente di collasso informativo (CC) può stimarsi come:

$$CC = \log_2(5) - \left[-\left(\frac{2}{5} \log_2 \frac{2}{5} + \frac{3}{5} \log_2 \frac{3}{5} \right) \right] \approx 1.34.$$

Un valore > 1 segnala un notevole ‘schiacciamento’ della diversità micro. Inoltre, se una proprietà macro associata a m_2 non si riconduce a un singolo microstato, parliamo di emergenza. L’indice di emergenza (IE), definito come frazione di proprietà macro irriducibili, quantifica quanto il collasso crei novità reali.

- **Reticoli con Loop e Feedback Multipli.** Abbiamo riconosciuto che la catena lineare (Sez. 9) è una *semplificazione* e che in sistemi biologici, sociali o cognitivi esistono *cicli* di retroazione. Serve una formalizzazione specifica per le *composizioni cicliche* di funzioni di trasmissione, valutando come l’indecidibilità possa “rigenerarsi” o “spegnersi” in percorsi circolari.
- **Scala di Realismo per la Turing-likeness.** Molti esempi di Turing-likeness (DNA computing, reti neurali) restano *teorici* o limitati su piccole istanze sperimentali. Servirebbero studi *empirici* più ampi per determinare la soglia

di “*universalità pratica*” e come si relazioni ai vincoli fisici (energia, tempo, rumore).

- **Strumenti di Modellazione Formalizzata.** Esiste l’ipotesi di *Category Theory* o di *approcci topologici* per inquadrare i *livelli* come oggetti e le *funzioni di trasmissione* come morfismi, gestendo *mono/epi* per caratterizzare (quasi) iniettività. Questo aspetto attende uno sviluppo sistematico.

15.3 Direzioni di Ricerca e Sviluppi Futuri

1) Introduzione di Metrica di Collasso. Pur riconoscendo che la non iniettività nelle funzioni di trasmissione porti alla formazione di emergenze (Assioma A3), il modello attuale non fornisce un criterio quantitativo per valutare il grado di perdita informativa. Affinando la definizione di *entropia di collasso* o di misure basate sulla sovrapposizione di pre-immagini, si potrebbe introdurre un “*coefficiente di collasso*” CC per ogni $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$. In parallelo, un “*indice di emergenza*” IE quantificherebbe la *novità* su scala macro. Tali misure fornirebbero un approccio *quantitativo e comparabile* tra ambiti differenti (biologia, fisica, IA).

Spunto Formale: Definire il *coefficiente di collasso* M_c tramite l’uso della Shannon Entropy, come segue:

$$M_c = \frac{H(D(L_i)) - H(\tau(D(L_i)))}{H(D(L_i))},$$

dove $D(L_i)$ rappresenta l’insieme degli stati del livello L_i e $H(\cdot)$ la funzione di entropia. Tale metrica potrà essere ulteriormente affinata attraverso l’analisi della divergenza di Kullback–Leibler per valutare in maniera più fine la differenza tra la distribuzione dei microstati e quella dei corrispondenti output macroscopici.

2) Adattamento Operativo della Turing-Likeness Il concetto ideale di Turing-likeness, basato sulla capacità di emulazione di una Macchina di Turing universale, presuppone risorse illimitate, ipotesi non sempre verosimile nei sistemi reali. **Spunto Formale:** Introdurre un *Indice di Turing-likeness Operativo* T_L , definito come

$$T_L = \frac{\#\{s \in C \subset D(L) \mid \text{preserva-proprietà-critiche-dopo-}\tau\}}{\#C},$$

dove C rappresenta l’insieme degli stati Turing-centrali in $D(L)$. Questo indice esprime in modo quantitativo il grado di conservazione dei parametri computazionali

critici in presenza di vincoli di risorse (memoria, tempo, energia) e permetterà di calibrare il modello in contesti operativi realistici.

3) Formalizzazione Operativa della Contiguità Il framework RLA si basa sull'ipotesi che la funzione di trasmissione τ tra livelli ($L_i \rightarrow L_{i+1}$) debba preservare le proprietà fondamentali dei microstati per consentire la trasmissione dell'indecidibilità (Assioma A2). Tuttavia, non è attualmente definito un criterio empirico per verificare tale *contiguità*. **Spunto Formale:** Si propone di definire un indicatore binario di contiguità, $\chi(L_i, L_{i+1})$, come:

$$\chi(L_i, L_{i+1}) = \begin{cases} 1, & \text{se la mappa } \tau(i \rightarrow i+1) \text{ preserva in modo verificabile stati critici,} \\ 0, & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

Integrazioni sperimentali, basate su test statistici (ad esempio analisi di correlazione tra distribuzioni di stati), potranno validare operativamente il mantenimento delle informazioni essenziali lungo la catena di trasmissione.

4) Category Theory e Morfismi di Traduzione. Formalizzare i *livelli* come *oggetti* in una categoria e le *funzioni di trasmissione* come *morfismi*, con eventuali sotto/epi-morfismi per (non) iniettività. I loop multi-livello sarebbero *endofunctori* o *cicli di morphisms*, con la possibilità di definire property-preserving morphisms per la Turing-likeness.

5) Protocollo Sperimentale in Biologia e IA. I *protocolli* già accennati (Sez. 6) e negli *esempi* (Sez. 8) possono diventare *progetti di ricerca* concreti. Ad esempio, creare *circuiti DNA* che codifichino un “mini Halting Problem” e osservare la risposta cellulare fenotipica, valutando *entropia di collasso*, o implementare *reti neurali* ricorrenti con spazi di stato monitorati e *controllare* se la cognizione successiva preservi (quasi) iniettivamente tali stati.

6) Applicazioni a Sistemi Sociali e Antropologia Computazionale. Alcune discipline *NO* (Sez. 10) potrebbero “migrare” verso modelli agent-based Turing-like, integrando loop di feedback. È una frontiera interessante per l'economia computazionale, l'antropologia digitale e le scienze sociali ad alta complessità.

15.4 Conclusioni Finali

Le *Reti Locali di Astrazione* delineate in questo lavoro rappresentano un **tentativo** di *unificare*, in un'unica prospettiva formale e *falsificabile*, la *coesistenza* di *indecidibilità* (derivante da Turing-likeness) e *emergenza* (prodotta da collassi informativi) su scale disciplinari molteplici. L'*anima empirica* della teoria è data dalla necessità di definire *contiguità* tra livelli solo dove esista *vera* giustificazione sperimentale o teorica, mentre il *cuore logico* si fonda sugli *assiomi* (A1–A3) e i *teoremi* che ne derivano.

Da un lato, tale *costruzione* aiuta a comprendere *come* sistemi biologici, fisici, cognitivi e sociali possano presentare fenomeni apparentemente “magici” su scala macro (emergenza) e, al tempo stesso, *limitazioni* intrinseche alla loro capacità computazionale (indecidibilità). Dall'altro, rimane *un quadro in evoluzione*, che attende conferme sperimentali e sviluppi formali. La speranza è che *futuri ricercatori* possano applicare e affinare RLA, facendo emergere nuove relazioni tra *livelli scientifici*, testando i principi su *loop multi-livello*, e approfondendo i *nuovi orizzonti* di collaborazione interdisciplinare che quest'ottica unificante promette di aprire.

Glossario dei Termini-Chiave in RLA

Reti Locali di Astrazione (RLA) Framework meta-teorico che integra *indecidibilità* e *emergenza* in sistemi multi-livello. Definisce livelli di astrazione, funzioni di trasmissione (iniettive o meno) e assiomi (A1–A3).

Livello di Astrazione Un insieme di *stati* e *regole* (leggi, meccanismi) usato per descrivere fenomeni in un determinato dominio disciplinare. Formalmente, $L = \langle D(L), \Sigma(L) \rangle$.

Contiguità La relazione tra due livelli L_i e L_{i+1} , connessi da una *funzione di trasmissione* $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ empiricamente o teoricamente motivata (p. es. genotipo \rightarrow fenotipo).

Funzione di Trasmissione Mappa $\tau : D(L_i) \rightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1}))$ che trasferisce stati micro a stati macro (singoli o multipli). Iniettiva, quasi-iniettiva o non iniettiva (collasso).

Turing-likeness Capacità di un livello di simulare calcoli Turing-general. Se un livello è Turing-like, esistono stati e regole tali da emulare una Macchina di Turing (A1).

Stati Turing-centrali Sottoinsieme di stati $C \subseteq D(L)$ che consentono l'implementazione effettiva di calcoli Turing (memoria illimitata, transizioni computazionali).

(Non) Iniettività *Iniettività*: stati diversi restano distinti a livello superiore. *Non iniettività (collasso)*: due o più stati micro vengono “fusi” in uno stesso stato macro.

Collasso Informativo Evento di non iniettività per cui differenze micro non restano distinte a livello macro. Può essere: *collasso con emergenza* (se stati micro *rilevanti* vengono fusi e generano nuove proprietà) oppure *collasso senza emergenza* (se la fusione riguarda differenze marginali o irrilevanti).

Stati Rilevanti Configurazioni che incidono in modo *misurabile* o *teoricamente significativo* sulle variabili critiche del dominio. Solo il collasso di tali stati genera emergenza (A3).

Emergenza Comparsa di *proprietà macro* irriducibili a un semplice predicato micro, dovuta alla fusione (collasso) di stati *rilevanti* non iniettivamente. Basata su Teorema 2 (principio di non derivabilità).

Topologia RLA Compatta Un reticolo di astrazione che soddisfa tre proprietà:

(1) *Ontologica indipendenza* (non importa indefinitamente complessità esterne, grazie a funzioni collassanti in ingresso), (2) *Chiusura epistemica* (tutto ciò che accade nel reticolo è spiegabile internamente), (3) *Computabilità Turing-compatibile* (l'intero sistema rimane modellizzabile e simulabile, senza oracoli).

Indecidibilità Esistenza, in un sistema Turing-like, di problemi o proprietà *non* risolvibili algebricamente (Halting Problem, Rice). Trasmissibile ai livelli superiori se la funzione di transizione preserva (quasi) iniettività (A2).

Falsificabilità Possibilità di *confutare* gli assiomi A1–A3 tramite esperimenti o controesempi logici. Esempio: un “decisore universale” interno a un livello Turing-like smentirebbe A1.

Coefficiente di Collasso (CC) Misura (in via di sviluppo) della *quantità* di fusione informativa fra stati micro e macro. Spesso definibile con funzioni logaritmiche sull'overlap delle pre-immagini.

Indice di Emergenza (IE) Percentuale o frazione di “proprietà macro nuove” non riducibili a un predicato micro, su un insieme di proprietà considerate. Stimato sperimentalmente su discipline (biologia, IA, fisica).

Appendice A: Dimostrazioni Formali Estese

In questa appendice, presentiamo le dimostrazioni *più dettagliate* degli enunciati matematici introdotti nella Sez. 5 e ripresi lungo il testo (Teoremi 1–2, Lemmi e Corollari). L’obiettivo è dare al lettore specializzato una visione più rigorosa dei passaggi logici, mantenendo nel corpo principale del paper (Sez. 5) una descrizione compatta.

Riepilogo degli Enunciati Principali

A1 (Indecidibilità in Livelli Turing-like). Se L_i è un livello Turing-like (Def. 3), esso ospita inevitabilmente almeno un problema indecidibile, in virtù dei teoremi classici di Turing, Church e Rice.

A2 (Trasmissione d’Indecidibilità via Quasi-iniettività). Se la funzione di trasmissione $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ *preserva iniettivamente* (o quasi-iniettivamente) gli stati Turing-centrali di L_i , allora i vincoli d’indecidibilità di L_i si *trasmettono* a L_{i+1} .

A3 (Non iniettività e Emergenza). Se $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ *fonde* almeno una coppia di stati *rilevanti* in L_i , nasce una proprietà non derivabile a L_{i+1} (emergenza), irriducibile al semplice predicato su L_i .

Teorema 1 (Propagazione Multi-livello dell’Indecidibilità). In una catena di livelli contigui $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow \dots \rightarrow L_n$, se L_1 è Turing-like e *tutti* i passaggi preservano la quasi-iniettività sugli stati Turing-centrali, allora ciascun livello L_2, \dots, L_n “eredita” i vincoli indecidibili di L_1 .

Teorema 2 (Emergenza Non Derivabile da Collasso). Se in un passaggio $L_i \rightarrow L_{i+1}$ almeno una coppia di stati *rilevanti* è fusa in un unico output (non iniettività), esiste una proprietà di L_{i+1} non riducibile a un predicato su L_i .

Corollario (Accumulo di Collassi). In una catena di livelli, se *ciascun* passaggio collassa stati rilevanti, si accumulano proprietà emergenti, allontanandosi progressivamente dai dettagli micro e *bloccando* la trasmissione di indecidibilità originata ai livelli più “bassi”.

Dimostrazione di A1 (Richiamo ai Classici Turing/ Church/ Rice)

[Sketch della dimostrazione] Per ogni livello Turing-like L_i , definiamo un opportuno sottoinsieme $C_i \subseteq D(L_i)$ e un insieme di regole di calcolo $\Sigma_{\text{comp}} \subseteq \Sigma(L_i)$ tali da simulare una Macchina di Turing universale (cfr. Turing 1936, Church 1936). Seguendo la tradizionale argomentazione (Halting Problem, Teorema di Rice Rice 1953), esistono proprietà (ad es. “arresta su input w ”) che risultano indecidibili. Quindi, *internamente a L_i* , non può esistere un “decisore generale” che fornisca una risposta valida in tutti i casi.

Dimostrazione di A2 (Trasmissione d’Indecidibilità via Quasi-iniettività)

[Spiegazione e Riduzione per Contraddizione] Supponiamo che L_i sia Turing-like e ospiti un problema indecidibile Π_i . Se $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ è *quasi-iniettiva* sugli stati $C_i \subseteq D(L_i)$ (gli stati Turing-centrali) e se esistesse un “decisore universale” \mathcal{D} in L_{i+1} capace di risolvere Π_i , allora si potrebbe “trasferire a ritroso” (via *iniezione inversa* su C_i) tale decisore nel livello L_i , contraddicendo A1. Nel dettaglio:

- Per ogni istanza α in L_i (negli stati Turing-centrali), la mappa $\tau_{(i \rightarrow i+1)}(\alpha)$ produce un insieme di stati in $D(L_{i+1})$.
- La quasi-iniettività garantisce che *tali* stati “corrispondono” in maniera *univoca* a α , almeno in termini di computazione cruciale.
- Un “decisore” in L_{i+1} restituirebbe un output certo (“si arresta/non si arresta”, “soddisfa la proprietà p /non la soddisfa”) che, per la quasi-iniettività, si potrebbe associare univocamente alla configurazione α di L_i .

Ciò implicherebbe la possibilità di risolvere l’indecidibile *dentro* L_i , chiudendo la catena della riduzione e creando una contraddizione. Ne consegue che *non* può esistere un decisore a livello L_{i+1} per Π_i , e dunque l’indecidibilità *si trasmette*.

Dimostrazione di A3 (Non iniettività e Emergenza)

[Struttura dell’Argomentazione] Si consideri la funzione di trasmissione $\tau_{(i \rightarrow i+1)} : D(L_i) \rightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1}))$. Per la “non iniettività rilevante”, esiste almeno una coppia $x_1, x_2 \in D(L_i)$ con $x_1 \neq x_2$ e

$$\tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_1) \cap \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_2) \neq \emptyset .$$

In termini emergentisti, *differenti stati micro* si fondono in *uno stesso output* (o insieme di output) a livello L_{i+1} . Si dimostra che *nessun* predicato P definito in L_i può, da solo, discriminare i comportamenti di L_{i+1} scaturiti da x_1 e x_2 , perché gli effetti si *mescolano*. Pertanto, la proprietà “*si origina da x_1 e non da x_2* ” sfugge a una caratterizzazione su L_i . In altre parole, L_{i+1} possiede almeno una qualità Q “novizia” che non è funzione diretta di un singolo predicato micro. Il formalismo attinge all’analogia di Rice e al ragionamento emergentista di Anderson 1972.

Prova del Teorema 1 (Propagazione Multi-livello Indecidibilità)

[Prova in forma di riduzione ricorsiva] Consideriamo una catena $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow \dots \rightarrow L_n$. Assumiamo:

- L_1 è Turing-like, quindi ospita almeno una proprietà indecidibile Π_1 .
- Ognuno dei passaggi $\tau_{(1 \rightarrow 2)}, \tau_{(2 \rightarrow 3)}, \dots, \tau_{(n-1 \rightarrow n)}$ è (quasi) iniettivo sugli stati Turing-centrali.

Per contraddizione, supponiamo che L_k , con $k \leq n$, disponga di un “decisore” per Π_1 . Grazie alla *composizione di iniettive* (Lemma 1), l’insieme degli stati Turing-centrali di L_1 è *distinto* lungo tutti i passaggi, quindi potremmo “tradurre a ritroso” il decisore di L_k e ottenerne uno anche in L_1 , contraddicendo A1. Dunque *nessun* livello L_2, \dots, L_n può decidere Π_1 . L’indecidibilità *si estende* (persiste) a tutti i livelli.

Prova del Teorema 2 (Emergenza Non Derivabile da Collasso)

[Argomentazione sul Principio di Non Derivabilità] Dato un passaggio $L_i \rightarrow L_{i+1}$ con almeno un collasso (x_1, x_2) , *rilevante* per la disciplina:

$$\tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_1) \cap \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_2) \neq \emptyset.$$

Poniamo $y \in \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_1) \cap \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_2)$. Sia Q la proprietà su L_{i+1} secondo la quale “*lo stato corrispondeva a x_1 (o a qualche variante di x_1), e non a x_2* ”. Ma, *poiché* y si origina *da entrambe* le preimmagini, a livello macro *non* è più univocamente identificabile come discendente di x_1 o x_2 . Nessun predicato definito in L_i può fissare una differenza che *a livello macro* risulta fusa.

\implies Il fenomeno in L_{i+1} associato a y non è deducibile come “predicato micro su L_i ”.

Ciò esprime la “novità emergente”. In modo più formale, se esistesse un predicato $P(x)$ su L_i che discriminasse tutti i possibili output corrispondenti a y , avremmo una contraddizione perché x_1 e x_2 darebbero ugual esito a P , ma generano la stessa immagine macro. La medesima struttura logica, mutuata dal “Principio di Non Derivabilità” di Rice, conferma la non riducibilità.

Remark (Collasso con Emergenza vs. senza Emergenza). Si noti che la dimostrazione di Teorema 2 presuppone implicitamente che le configurazioni x_1 e x_2 del livello L_i siano *rilevanti*, cioè differiscano in modo *efficace* per il dominio disciplinare (evidenze sperimentali o computazionali). In tal caso, la fusione (non iniettività) implica necessariamente la nascita di una proprietà macro non deducibile. Se invece x_1 e x_2 presentano differenze puramente marginali o ininfluenti (“*collasso innocuo*”), non emerge alcun fenomeno *nuovo* a livello L_{i+1} . Pertanto, l’*emergenza forte* è vincolata a *quali* stati vengano fusi nell’operazione di trasmissione.

Corollario (Accumulo di Collassi)

[Dimostrazione sintetica] Se in ogni passaggio $L_\ell \rightarrow L_{\ell+1}$ (per $\ell = 1, \dots, n-1$) esiste *almeno* un collasso su stati rilevanti, si *moltiplicano* le coppie (x_1, x_2) fuse in ogni livello intermedio. Ad ogni stadio, si genera almeno una proprietà emergente non riconducibile a un singolo predicato sul livello sottostante. Proseguendo fino a L_n , si ottiene un *cumulativo* insieme di proprietà “nuove” che distanziano sempre di più L_n dai dettagli micro iniziali.

Osservazioni Conclusive sull’Apparato Dimostrativo

Le dimostrazioni appena esposte *ricollegano* la struttura multi-livello di RLA ai *classici risultati* dell’informatica teorica e alle *argomentazioni* sull’emergenza (Anderson, Rice, ecc.). L’elemento di *novità* risiede nell’aver *formalizzato*, in chiave insiemistica e di *riduzioni computazionali*, il *ruolo* delle funzioni di trasmissione (*non*) *iniettive* tra livelli, fornendo i lemmi e i corollari che descrivono *quando* i problemi indecidibili “risalgono” e *quando* invece le proprietà emergenti “trascendono” le distinzioni micro.

Nelle appendici successive, se presenti, si potranno approfondire *gli schemi* e le *tabelle* dei 15 livelli e i dettagli di protocolli sperimentali. Chi desiderasse ulteriori chiarimenti tecnici può contattare gli autori per code supplementari e data set relativi a eventuali simulazioni di RLA.

Appendice B: Approfondimenti Tecnici per i Protocolli Sperimentali

In questa appendice, forniamo *dettagli tecnici* e linee guida per *allestire*, *misurare* e *verificare* i protocolli sperimentali richiamati nel corpo principale del paper (Sez. 6, 8). L'intento è offrire un riferimento operativo a chi desideri tradurre il framework delle *Reti Locali di Astrazione* (RLA) in sperimentazioni concrete, in particolar modo per *biologia sintetica*, *fisica computazionale* e *IA neurale*.

Protocolli in Biologia Sintetica (DNA Computing)

1) Setup di un Circuito DNA Turing-like.

- *Design molecolare*: Selezionare un set di filamenti di DNA in grado di rappresentare *stati* e *transizioni* di una Macchina di Turing ridotta (ad es. “2-state/3-symbol”).
- *Reazioni di ibridazione e taglio*: Integrare enzimi di restrizione, polimerasi e ligasi per consentire branching e loop di reazione. Vedi Winfree 1998; Benenson et al. 2001 per esempi di protocolli.
- *Verifica Turing-likeness*: Implementare un *benchmark* di problemi computazionali (p. es. piccole istanze di SAT o del problema dell'arresto in forma ridotta).

2) Mappare il DNA sul Fenotipo Cellulare.

- *Trasferimento in cellule ingegnerizzate*: Inserire i costrutti di DNA computing via plasmidi o sistemi CRISPR.
- *Segnale fenotipico*: Progettare un “reporter” (fluorescenza, colorimetria) che *unisca* possibili differenze molecolari in un *output* fenotipico.
- *Misura del Collasso informativo*: Registrare se *diversi* filamenti iniziali producono *identico* output fenotipico, quantificando così la *non iniettività*.

3) Testare l'Emergenza (A3) e la Trasmissione (A2).

- **Emergenza**: Verificare se, in presenza di collasso su stati Turing-centrali diversi, il fenotipo mostra una proprietà *non* deducibile dal semplice “insieme di filamenti” iniziali.

- **Indecidibilità trasmessa:** Nel caso la mappa cellulare *fosse* (quasi) iniettiva sugli stati di DNA computing, tentare di costruire un “decisore” cellulare. Se *fallisce*, si conferma la trasmissione dell’indecidibilità; se *riesce*, si produce un potenziale controesempio per A2.

4) Analisi e Criteri di Convalida.

- *Coefficiente di Collasso:* $CC = \frac{\text{N. di filamenti distinct} \rightarrow \text{stesso fenotipo}}{\text{N. totale filamenti}}$.
- *Indice di Emergenza:* $IE = \frac{\text{N. di proprietà fenotipiche non ricostruibili}}{\text{N. di proprietà fenotipiche misurate}}$.
- Ripetere con diversi ceppi o condizioni, valutando *robustezza* dei risultati.

Protocolli in Fisica Computazionale (Automi Cellulari e Coarse Graining)

1) Automa Cellulare Turing-like.

- *Scelta dell'automa:* Rule 110, Game of Life, o altri esempi con *universalità* dimostrata (Wolfram 2002).
- *Implementazione simulata:* Riprodurre in un software “fisico” con parametri di dimensione reticolare, regole di frontiera, ecc.

2) Passaggio a Parametri Termodinamici.

- *Definizione di $\tau_{(AC \rightarrow \text{macro})}$:* Operazione di *coarse graining* (ad es. sommare spin o conteggiare celle attive in blocchi).
- *Verifica della (non) iniettività:* Se *parecchie* configurazioni micro *diverse* confluiscono in uno stesso valore (T, P, magnetizzazione), quantificare il *collasso*.

3) Esperimenti/Simulazioni e Test di Indecidibilità

- *Halting Problem interno all'AC:* Porre in input all'AC una configurazione corrispondente a un problema di arresto.
- *Tentare di “decidere” l'arresto esclusivamente dal macro-livello (T, P, ecc.).* Se *impossibile*, si conferma l'ipotesi che la *non* iniettività abbia “bloccato” la trasmissione d'indecidibilità (A2), generando *emergenza* (A3).

4) **Possibili Controesempi per Collasso Parziale.** In alcuni casi di *coarse graining* ridotto, se *non* collassiamo tutti gli stati Turing-centrali, *parte* dell'indecidibilità può risalire. Monitorare questa situazione come test di *quasi-iniettività* limitata.

Protocolli in IA Neurale (Reti Ricorrenti e Strati Cognitivi)

1) RNN con Potere Turing-like.

- *Selezione dell'architettura:* RNN ricorrenti con memoria potenzialmente illimitata, o “Neural Turing Machines” (Graves et al. 2016).
- *Definizione del “problema indecidibile”:* Una variante di Halting Problem simulata in ambiente neurale, con input che codifichino un “programma” e un “nastro” in forma di sequenze simboliche.

2) Mappa RNN \rightarrow Cognizione (Strato di Interpretazione).

- *Pooling e Embedding:* Definire un layer di “interpretazione concettuale” (es. un modulo “cognizione astratta”) e specificare la funzione $\tau_{(\text{RNN} \rightarrow \text{cog})}$.
- *Valutare la (quasi)iniettività:* Se molti stati RNN *critici* vengono fusi in un unico concetto, siamo in regime *non* iniettivo.

3) Test di Trasmissione e Falsificazione A2.

- Tentare di implementare un “decisore cognitivo” che interpreti lo stato RNN e fornisca risposta su “arresto/non arresto.”
- Se la rete *mantiene* distinzione degli stati Turing-centrali, A2 prevede che *non* si possa costruire un decisore (pena contraddizione con indecidibilità).
- Se emergesse un *decisore funzionante*, ciò *falsificherebbe* la tesi (oppure mostrerebbe che la RNN *non* è veramente Turing-like).

4) Metriche di Collasso Neurale.

- *Overlap* fra rappresentazioni vettoriali: analizzare la dimensione degli spazi embeddings e quante configurazioni RNN vengono “mappate” in spazi di attivazione *simili* o identici.
- Utilizzare misure di *cosine similarity*, *KL-divergence* o entropie condizionate per valutare la perdita di distinzione micro.

Indicazioni Generali di Validazione

Ripetibilità e Scalabilità. In tutti i contesti sperimentali, l'*obiettivo* è mostrare come la *funzione di trasmissione* micro→macro (*non*) *preservi* stati Turing-centrali o *fonda* differenze rilevanti. La *ripetibilità* degli esperimenti (ripetute runs in IA, più colture cellulari in biologia, più simulazioni in fisica) assicura la robustezza dei dati.

Strumenti di Analisi Quantitativa. Come discusso in Sez. 4.4, è possibile definire *coefficienti di collasso* e misure di *emergenza* (ad es. *IE*). A scopo di *pilot*:

- CC = “Frazione di stati micro distinti che convergono in un unico output macro.”
- IE = “Frazione di proprietà macro che non si riconducono a un predicato micro.”

Tali definizioni quantitative favoriscono confronti cross-disciplinari e stime di *quanto* emergenza o trasmissione limitino la *riduzione* micro→macro.

Criteri di Falsificazione. Ricordiamo che i test devono mirare a confutare A1, A2 o A3, in modo *diretto*:

- **A1:** Trovare un livello Turing-like che *risolva* l’Halting Problem.
- **A2:** Costruire un “decisore” a livello L_{i+1} *nonostante* la quasi-iniettività sugli stati Turing-centrali di L_i .
- **A3:** Mostrare una *non* iniettività (collasso) *senza* alcuna proprietà emergente irriducibile.

Conclusione Appendice B

Le linee guida qui proposte *dettagliano* la *fase operativa* di RLA, indicando procedure per *costruire* e *misurare* le funzioni di trasmissione tra livelli micro e macro. Sebbene ogni *setup* presenti sfide sperimentali specifiche (risorse, stabilità biologica, potenza computazionale, ecc.), l’approccio RLA *invita* a sondare la natura (*non*) *iniettiva* di queste relazioni e a valutare *empiricamente* se indecidibilità e/o emergenza siano *effettivamente* verificate. Tali esperimenti potranno *corroborare* o *falsificare* i cardini della teoria (A1–A3), contribuendo a uno sviluppo condiviso e interdisciplinare del framework.

Appendice C: Bozza di Metrica di Collasso e Indice di Emergenza

Un punto ricorrente nel corpo principale del paper (§4.4 e §15) è l’idea di definire *quantitativamente* il “grado di collasso informativo” e la “entità della novità macro” prodotta. Questa appendice propone una *bozza di formalizzazione* — ancora in via di sviluppo — per due grandezze fondamentali:

$$CC \quad (\text{coefficiente di collasso}), \quad IE \quad (\text{indice di emergenza}).$$

Coefficiente di Collasso (CC)

Definizione Generale. Siano L_i e L_{i+1} due livelli contigui, e

$$\tau_{(i \rightarrow i+1)} : D(L_i) \longrightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1}))$$

la funzione di trasmissione. Consideriamo una *misura* di probabilità o frequenza $p(x)$ sugli stati $x \in D(L_i)$ (ossia, quanto spesso *compare* uno stato x), e definiamo:

$$CC(\tau) = \sum_{x \in D(L_i)} p(x) \log\left(\frac{|\tau(x)|}{|\tau(D(L_i))|}\right),$$

dove:

- $|\tau(x)|$ indica la *cardinalità* del sottoinsieme di $D(L_{i+1})$ in cui x è mappato,
- $|\tau(D(L_i))|$ è la cardinalità complessiva dell’immagine di τ .

L’idea è mutuata da concetti entropici, valutando *quanto* la mappa τ “schiaccia” i diversi stati micro in un *insieme più piccolo* di stati macro.

Per un esempio numerico concreto, prendiamo 5 stati micro con $p(x_i) = 1/5$. Se $\tau(x_1) = \tau(x_2) = m_1$ e $\tau(x_3) = \tau(x_4) = \tau(x_5) = m_2$, l’entropia micro è $\log_2(5) \approx 2.32$, mentre l’entropia dell’immagine è ≈ 0.971 . Il coefficiente di collasso $CC = 2.32 - 0.971 = 1.349$. Se su 4 proprietà macro totali, 2 sono non riducibili a un singolo predicato su $\{x_1, \dots, x_5\}$, otteniamo un indice di emergenza $IE = 2/4 = 0.5$. Tali valori, pur in forma semplificata, illustrano come calcolare e confrontare le metriche di collasso ed emergenza (Sipser 2006).

Interpretazione.

- Se la mappa τ è *quasi-iniettiva* sugli stati $C \subseteq D(L_i)$, gran parte degli $x \in C$ mappa in regioni distinte di $D(L_{i+1})$, facendo sì che $CC(\tau)$ rimanga “basso” (i logaritmi di $\frac{|\tau(x)|}{|\tau(D(L_i))|}$ si tengono contenuti).
- Se, viceversa, *molti* stati micro sono fusi in *pochi* stati macro, $CC(\tau)$ *cresce* (nel senso che la mappa amplifica la *probabilità* di sovrapposizioni), indicando un collasso marcato.

Questa definizione è *una* bozza: si potrebbe raffinare sostituendo la cardinalità con *volumi* in spazi continui, o adottando un differente “peso logaritmico.”

Indice di Emergenza (IE)

Obiettivo. Mentre CC misura *quanto* la trasmissione micro \rightarrow macro *fonda* differenze, l'*Indice di Emergenza* (IE) valuta *quanto* le proprietà macro risultano “nuove” e *non deducibili* da predicati su L_i .

Proposta di Definizione. Poniamo che $P(L_{i+1})$ sia l'insieme delle *proprietà* (o “feature” misurabili) in L_{i+1} . Definiamo IE come:

$$IE = \frac{\#\{\text{proprietà emergenti non riducibili}\}}{\#\{\text{proprietà totali esaminate in } L_{i+1}\}}.$$

Una “proprietà emergente non riducibile” è *qualsiasi* feature di L_{i+1} che *non* si possa descrivere come un predicato $P(x)$ *solo su* L_i . In altre parole, si tratta di una proprietà *generata* (parzialmente o totalmente) dalla fusione di stati micro, che sfugge a una definizione univoca *in* L_i .

Esempio Operativo.

- In *biologia cellulare*, se analizzo 10 proprietà fenotipiche (morfologia, proteine espresse, velocità di crescita, ecc.), e scopro che 3 di queste non si ricavano univocamente da un unico pattern molecolare *prima del collasso*, allora $IE = 3/10 = 0.3$.
- In *fisica statistica*, analizzo 5 possibili parametri macro (T, P, magnetizzazione, entropia macroscopica, funzione di correlazione a lungo raggio). Se 2 non sono *ricostruibili* univocamente da microstati pre-collasso, $IE = 2/5 = 0.4$.

La sfida empirica è *distinguere* “veramente irriducibili” da “complessi ma riducibili,” richiedendo protocolli di verifica (vedi Appendice C).

Limiti e Possibili Sviluppi

Dipendenza dalla Misura e dalla Selezione di Proprietà. La scelta di un “peso di probabilità” $p(x)$ o di “quali proprietà macro si esaminano” può influenzare i valori di CC e IE . Potrebbero essere necessarie *convenzioni inter-disciplinari* per stabilire standard di misura (es. definire un protocollo comune in IA, fisica o biologia).

Varianti Logaritmiche o Divergenze K-L. Invece di $\log\left(\frac{|\tau(x)|}{|\tau(D(L_i))|}\right)$, un’alternativa è una *divergenza di Kullback–Leibler* tra la distribuzione “originale” degli stati micro e la distribuzione “fusa” degli stati macro. Ciò fornirebbe un concetto di “*distanza informativa*” tra L_i e L_{i+1} .

Emergenza e Teorema 2. Il *Teorema 2* afferma che, se si fonde almeno un paio di stati distinti, *esiste* una proprietà emergente. IE cerca di *quantificare quante* (o *quanto*) siano tali proprietà. In pratica, si devono testare *diverse* potenziali caratteristiche macro per stabilire quante “sfuggono” al riduzionismo micro.

Integrazione con Category Theory. In future ricerche, i “morfismi” τ e le corrispondenti misure di collasso (mono vs. epi) potrebbero collegarsi a nozioni di “*limite colimit*” e “*equalizzatori*” in *Teoria di Categoria*. Uno *scenario* potrebbe definire un *funtore* che “compone” i passaggi $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3$ e valutarne la *perdita* di informazione come un *mancato isomorfismo* tra categorie.

Conclusione Appendice C

L’adozione di un *coefficiente di collasso* CC e di un *indice di emergenza* IE fornisce un *primo spunto* per una *quantificazione* della (non) *iniettività* e della *novità macro*. Questi approcci restano a uno stadio embrionale e andranno calibrati a seconda dei contesti sperimentali (biologia, fisica, IA, scienze sociali). Cionondimeno, la possibilità di *misurare* il collasso e *stimare* l’emergenza in forme *numericamente comparabili* contribuirebbe a radicare la teoria RLA in una *dimensione* più solida e standard, favorendo confronti trasversali e ulteriori validazioni empiriche.

References

- Adami, C., & LaBar, T. (2018). From entropy to information: Biased type selection and the evolution of complex life. *Entropy*, 20(12), 941.
- Aquinas, T. *Summa Theologiae*. (Opera sistematica originale; varie edizioni critiche dal XIII secolo. Edizioni moderne: Cambridge University Press, Blackfriars, ecc.)
- Anderson, P. W. (1972). More is different. *Science*, 177(4047), 393–396.
- Awodey, S. (2010). *Category Theory* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Barendregt, H. (1984). *The Lambda Calculus: Its Syntax and Semantics* (Revised ed.). North-Holland.
- Barnes, J. (1982). *The Presocratic Philosophers*. Routledge.
- Benenson, Y., Paz-Elizur, T., Adar, R., Keinan, E., Livneh, Z., & Shapiro, E. (2001). Programmable and autonomous computing machine made of biomolecules. *Nature*, 414(6862), 430–434.
- von Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller.
- Beresnev, I. & Lainscsek, C. (2021). Extending PDE meteorological models to unbounded domains. *Computational Environmental Sciences*, 5(2), 77–93.
- Berger, P. L., & Luckmann, T. (1966). *The Social Construction of Reality: A Treatise in the Sociology of Knowledge*. Anchor Books.
- Broad, C. D. (1925). *The Mind and its Place in Nature*. Routledge & Kegan Paul.
- Cardelli, L. (2005). *Brane Calculi: Interactions of Biological Membranes*. In A. Gordon (Ed.), *Computational Methods in Systems Biology* (pp. 257–280). Springer.
- Chalmers, D. J. (1996). *The Conscious Mind: In Search of a Fundamental Theory*. Oxford University Press.
- Chomsky, N. (1956). Three models for the description of language. *IRE Transactions on Information Theory*, 2(3), 113–124.
- Church, A. (1936). An unsolvable problem of elementary number theory. *American Journal of Mathematics*, 58(2), 345–363.

- Dehaene, S., Changeux, J.-P., Naccache, L., Sackur, J., & Sergent, C. (2011). Conscious, preconscious, and subliminal processing: A testable taxonomy. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(5), 204–211.
- Descartes, R. (1984). *The Philosophical Writings of Descartes* (Vol. 2). Cambridge University Press.
- Epstein, J. M., & Axtell, R. (1996). *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Brookings Institution Press.
- Faggin, F. (2021). *Silicon: From the Invention of the Microprocessor to the New Science of Consciousness*. Waterside Productions.
- Graves, A., Wayne, G., & Danihelka, I. (2016). Neural Turing Machines. *arXiv preprint arXiv:1410.5401*.
- Gödel, K. (1931). Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. *Monatshefte für Mathematik und Physik*, 38, 173–198.
- Golly: <http://golly.sourceforge.net/> (software open source per automi cellulari).
- Koestler, A. (1967). *The Ghost in the Machine*. Hutchinson.
- Kant, I. (1998). *Critique of Pure Reason* (The Cambridge Edition of the Works of Immanuel Kant). Cambridge University Press.
- Kim, J. (1999). Making sense of emergence. *Philosophical Studies*, 95, 3–36.
- Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1980). *Statistical Physics, Part 1* (3rd ed.). Pergamon Press.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444.
- Lloyd, S. (2006). *Programming the Universe: A Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos*. Knopf.
- Magnasco, M. O. (1997). Chemical kinetics is Turing universal. *Physical Review Letters*, 78(6), 1190–1193.
- Minsky, M. (1988). *The Society of Mind*. Simon & Schuster.
- Mitra, A., & Stark, J. (2020). Multi-scale computational irreducibility in molecular automata. *Complex Systems*, 29(1), 1–18.

- Morin, E. (2008). *On Complexity*. Hampton Press.
- Morgan, C. L. (1923). *Emergent Evolution*. Henry Holt & Company.
- Noble, D. (2008). *The Music of Life: Biology Beyond Genes*. Oxford University Press.
- Paun, G. (2000). Computing with membranes. *Journal of Computer and System Sciences*, 61(1), 108–143.
- Polkinghorne, J. (1989). *Science and Providence: God's Interaction with the World*. New Science Library/Shambhala.
- Popper, K. R. (1959). *The Logic of Scientific Discovery*. Hutchinson.
- Ray, T. S. (1991). An approach to the synthesis of life. In C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life II*, SFI Studies in the Sciences of Complexity (Vol. X, pp. 371–408). Addison-Wesley.
- Rice, H. G. (1953). Classes of recursively enumerable sets and their decision problems. *Transactions of the American Mathematical Society*, 74(2), 358–366.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2010). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Searle, J. R. (1992). *The Rediscovery of the Mind*. MIT Press.
- Siegelmann, H. T., & Sontag, E. D. (1991). Turing computability with neural nets. *Applied Mathematics Letters*, 4(6), 77–80.
- Sipser, M. (2006). *Introduction to the Theory of Computation* (2nd ed.). Thomson Course Technology.
- Sperber, D. (1996). *Explaining Culture: A Naturalistic Approach*. Blackwell.
- Sutskever, I., Vinyals, O., & Le, Q. V. (2014). Sequence to sequence learning with neural networks. In *Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS)* (pp. 3104–3112).
- Toffoli, T., & Margolus, N. (1987). *Cellular Automata Machines: A New Environment for Modeling*. MIT Press.
- Turing, A. M. (1936). On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2(42), 230–265.

Winfree, E. (1998). *Simulations of Computing by Self-Assembly*. In *DNA Based Computers 2*, DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science (pp. 213–242). American Mathematical Society.

Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media.



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI UDINE**

hic sunt futura

Master di I Livello in
Filosofia del Digitale e Intelligenza Artificiale

ELABORATO FINALE

ALLEGATO 2 – CASO STUDIO

Principi, Struttura e Fondamenti Filosofici delle Reti Locali di Astrazione (RLA)

Costruzione di una *Topologia RLA Compatta* per una
Briofita Generalista e riflessioni su Coscienza Artificiale

Candidato
Gianluca Conte

ANNO ACCADEMICO 2024 – 2025

Contents

1	Introduzione e Scopo	2
2	Topologia RLA Compatta di una Briofita Generalista	3
2.1	Dominio e Principi di Microfondazione	3
2.2	Livelli di Astrazione secondo RLA	4
2.3	Parametri Biologici, Range e Soglie Operative ed Equazioni	10
2.4	Relazioni (R01–R10)	19
2.5	Azioni e Retroazioni Dinamiche	20
2.6	Definizione Metriche di Collasso ed Emergenza	24
3	Componenti Aggiuntivi per Turing-Compatibilità	29
3.1	Stato Iniziale Formalizzato	29
3.2	Scenari Climatici	30
3.3	Gestione del Tempo e dell’Arresto	31
3.4	Definizione di Successo e Fallimento	32
3.5	Iniezione Controllata di Eventi Rari	32
3.6	Meccanismo Adattivo (Apprendimento Cumulativo)	32
4	Framework Computabile (py) di una Briofita Generalista	34
4.1	Struttura del Progetto e Componenti Principali	34
4.2	Roadmap di Sviluppo	36
4.3	Conclusioni	41
5	Dimostrazione di appartenenza alla classe delle <i>Topologie RLA Compatte</i>.	42
6	Verificabilità epistemica dell’equivalenza tra simulato e reale.	43
7	Conclusioni, Prospettive e Limiti	45
8	APPENDICE: Dalla Briofita alla Coscienza Artificiale	48
8.1	Oltre il <i>brain-scale modelling</i>	50
8.2	Collassi informativi e livelli di astrazione alti	50
8.3	Metriche di emersione di Coscienza	51
8.4	Indecidibilità come elemento di auto-consapevolezza	52
8.5	Outline Dimostrativo	53
8.6	Conclusioni	55

1 Introduzione e Scopo

Il presente documento si pone l'obiettivo di mostrare un esempio sperimentale di applicazione del *framework* delle Reti Locali di Astrazione (RLA). L'esempio di seguito sviluppato è inerente ad una "briofita generalista", un gruppo di piante terrestri (divisione delle embriofite) prive di tessuti vascolari. L'esempio sperimentale intende progettare un reticolo locale di astrazione che descriva la briofita attraverso una Topologia RLA Compatta, cioè un tipo di reticolo che possenga le seguenti proprietà:

- **Indipendenza Ontologica** — ogni entità o legge rilevante per descrivere i fenomeni “interni” al reticolo proviene esclusivamente dai livelli che compongono il reticolo stesso; eventuali interfacce esterne sono filtrate e non iniettive.
- **Chiusura Epistemica** — non si necessita di un “livello globale” o di riferimenti extra-reticolo per spiegare e prevedere le dinamiche interne; la conoscenza del sistema rimane all'interno del sistema medesimo.
- **Turing-Computabilità** — il modello e le sue regole (equazioni, eventi, azioni) sono implementabili come algoritmi eseguibili da una macchina di Turing, senza dover ricorrere a oracoli o funzioni non calcolabili.

Nel prosieguo verranno illustrati i passaggi concreti di progettazione della Topologia RLA Compatta, così descritti:

- *livelli di astrazione* (dalla genetica alla morfologia e all'ecologia);
- *parametri* chiave, con i relativi range e fonti bibliografiche;
- *relazioni* causali, le *azioni* soglia e le *equazioni* computabili;
- *metriche* di collasso ed emergenza, utili per individuare comportamenti non lineari.

Mostreremo come l'intero apparato rispetti le proprietà di una Topologia RLA Compatta e come la sua simulazione possa generare osservazioni sintetiche epistemicamente equivalenti ad osservazioni empiriche, pertanto – in assenza di informazioni esterne – indistinguibili da parte di un osservatore esperto dell'ambito. Tale conclusione getta, infine, le basi per estensioni a domini biologici, cognitivi e socio-tecnici.

2 Topologia RLA Compatta di una Briofita Generalista

Per dare concretezza al metodo delineato, illustreremo un *caso di studio* riguardante la costruzione di una **topologia multi-livello** per una *briofita generalista* (muschio, epatica o affini). Il dominio biologico è stato *microfondato* attingendo alla letteratura sulle briofite (fisiologia vegetale, genetica delle piante non vascolari, interazioni ecologiche di base) e a modelli che appaiono ricorrenti nelle pubblicazioni accademiche. In taluni casi, in assenza di riscontri bibliografici specifici, verranno operate (in modo dichiarato) "ipotesi" riscontrate in letteratura in ambiti biologici affini.

2.1 Dominio e Principi di Microfondazione

- **Organismo Target:** Una briofita caratterizzata da un ciclo riproduttivo *sporofito-gametofito*, con aspetti di adattamento ad ambienti umidi e semi-umidi.
- **Letteratura di Riferimento:**
 - Fisiologia di base delle piante (*es. testi standard di fisiologia vegetale sulle briofite*).
 - Metodi di modellazione della fotosintesi (*curve di saturazione della Rubisco*).
 - Epigenetica e stress idrico (*ricerche su accumulo di epimutazioni in condizioni di siccità*).
 - Interazioni con l'ambiente (*forme di mutualismo con microfauna, parametri climatici semplificati*).

La topologia ha lo scopo di simulare, in termini semplificati, i processi biologici di base (espressione genetica, regolazione, stress, crescita, riproduzione, ecc.) e le interazioni con l'ambiente (temperatura, radiazione, disponibilità idrica, *scenario climatico*). Di seguito una descrizione dei principali componenti: livelli, parametri, relazioni/retroazioni, equazioni, eventi ed azioni:

- **Ogni livello** descrive un “piano biologico” (dal DNA al tessuto).
- **I parametri** riflettono *stati* e *quantità misurabili* (es. Tasso Apoptosi, Diversità Genetica).

- **Le equazioni** sono “*update rules*” che regolano come i parametri evolvono.
- **Gli eventi** simulano *shock esterni o fenomeni stocastici*.
- **Le azioni** sono *condizionali* su soglie e scatenano reazioni immediate.

Il tutto è orchestrato in un **loop simulativo** (tipicamente giornaliero) per un determinato *numero di cicli*. In un contesto di *scenario climatico* (ad es. RCP 4.5 o RCP 8.5), alcuni parametri come temperatura (*P14*) e pioggia (*P31*) seguono trend e offset stagionali, influenzando tutti i processi secondari (accumulo di stress, crescita, mutualismo, ecc.).

2.2 Livelli di Astrazione secondo RLA

In questo paragrafo rappresentiamo la Briofita la generalista, formulata attraverso venti livelli di astrazione (L01–L20). I livelli sono organizzati in modo gerarchico e “linearizzato” per rendere esplicite le interazioni principali tra domini funzionali, fornendo una mappa sistematica della complessità biologica della pianta. Tale struttura si ispira ai principi di biologia dei sistemi secondo cui non esiste un livello privilegiato di causalità (Noble 2012) e richiama i concetti di computazione multilivello presenti in letteratura (Kitano 2002; Godfrey-Smith 2007). Il modello è organizzato in **livelli** che riflettono differenti scale o aspetti della biologia della briofita.

Livello L01 (Genomico-Epigenetico)

Il **Livello L01** racchiude i processi relativi all’assetto genico stabile (DNA nucleare), unitamente ai *modificatori epigenetici* (metilazioni, marcatori epigenetici, acetilazioni degli istoni, ecc.). Qui si accumulano informazioni di “memoria” legate a stress ambientali passati, in accordo con le evidenze che mostrano come le piante non vascolari possano ereditare variazioni epigenetiche (Joly and Matzke 2018b). Le informazioni immagazzinate a L01 influenzano direttamente il livello successivo (L02) sotto forma di potenziale trascrizionale.

Livello L02 (Trascrizionale-Traduzionale)

Il **Livello L02** rappresenta la fase di *esprimibilità genica* (mRNA) e la relativa *sintesi proteica*. Dalle sequenze geniche e dagli stati epigenetici di L01 deriva il differenziale di trascrizione e traduzione di proteine chiave, come la Rubisco (parametro

P01) o altri enzimi regolatori. L02 produce costantemente segnali proteici che verranno utilizzati dal Livello L03 (Metabolico-Regolativo) per avviare o modulare processi fisiologici.

Livello L03 (Metabolico-Regolativo)

Nel **Livello L03** entrano in gioco ormoni vegetali (auxine, ABA), enzimi antiossidanti (parametro P03) e altre molecole regolative. I segnali proteici provenienti da L02 stimolano o inibiscono specifiche vie metaboliche, mentre le concentrazioni di tali ormoni, a loro volta, creano *retroazioni* sulle attività di L02 (ad esempio, inibendo la trascrizione di enzimi in condizioni di eccessivo stress ossidativo). Così la dimensione *metabolico-regolativa* funge da anello di controllo fra l'informazione genetica e l'ambiente.

Livello L04 (Fisiologia Cellulare)

Qui si trovano i parametri legati alla *turgescenza cellulare*, al *potenziale idrico*, al *livello di ROS* (P04), nonché alla fotosintesi (P05) ed alle membrane dei cloroplasti. Il contenuto e il flusso di ioni, i gradienti osmotici e gli eccessi di specie reattive dell'ossigeno costituiscono i principali fenomeni fisiologici associati alla sopravvivenza della briofita in vari contesti ambientali (Godfrey-Smith 2007). I segnali di *stress* identificati in L04 retroagiscono su L03 (stimolazione o inibizione enzimatica) e, nei casi gravi, possono inviare input di emergenza a L01 o L02 (ad esempio, promuovendo modifiche epigenetiche).

Livello L05 (Tessuto e Microstrutture)

A L05 si osserva la *struttura aggregata* di cellule e tessuti, inclusa la formazione di rizoidi, pareti cellulari e tessuti specializzati. Le proprietà meccaniche e l'architettura di questi tessuti (parametro P06 relativo all'elasticità fogliare, ecc.) derivano dalle condizioni fisiologiche di L04, ma hanno anche ricadute sul trasporto di acqua e nutrienti (quindi su L03 e L04).

Livello L06 (Morfogenesi e Architettura)

Il **Livello L06** concerne la *crescita e forma* complessiva di protonema, foglie e sporofito. Le auxine (da L03) e lo stato fisiologico (L04–L05) forniscono indicazioni alla *morfogenesi*, modulando la disposizione spaziale e la produzione di nuove strutture.

La briofita, qui, organizza e distribuisce i propri organi in base ai gradienti ormonali e all'equilibrio meccanico e strutturale dei livelli inferiori.

Livello L07 (Ciclo Riproduttivo)

In L07 si collocano i processi di alternanza gametofito-sporofito, compresa la formazione di spore e la loro maturazione. La vitalità del gametofito (L06) e la disponibilità di risorse (L03–L05) influenzano la probabilità e la stabilità del ciclo riproduttivo. Le risposte di L07 possono, in casi estremi, inviare segnali di “fine ciclo” che portano a un ricambio generazionale (ad esempio, coorte successiva).

Livello L08 (Interazione Biotica)

Al **Livello L08**, la pianta interagisce con microfauna, simbionti (cianobatteri per la fissazione di azoto), funghi e possibili predatori. Queste interazioni possono comportare scambi di nutrienti e, in alcuni casi, contribuire a meccanismi di difesa (antagonismo di patogeni) (Liu & Rousk 2021). L'assetto microstrutturale (L05) e la regolazione ormonale (L03) influenzano la densità e stabilità di tali sinergie simbiotiche.

Livello L09 (Condizioni Ambientali Immediate)

Il **Livello L09** è dedicato alla descrizione delle *fluttuazioni ambientali* che la pianta sperimenta direttamente: variazioni di temperatura locale (P14), radiazione solare (P15), umidità superficiale e radiante (Godfrey-Smith 2007). Da questi input nascono *driver* di stress termico o luminoso che si propagano ai livelli metabolici e fisiologici (L03–L04). Qualora le variazioni superino soglie di tolleranza, si innescano azioni di difesa a livello metabolico o epigenetico.

Livello L10 (Macroecosistema e Ritmi Temporal)

In L10 si includono la *stagionalità*, le *ondate di calore*, le precipitazioni su scala annua e gli scenari di cambiamento climatico (tipici RCP). La briofita, attraverso meccanismi di feedback (L12) e memorie epigenetiche (L01–L02–L11), cerca di adattarsi a tali condizioni su tempi lunghi (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014). Qui nascono gli eventi stocastici (siccità prolungata, piogge intense) che alterano rapidamente i livelli intermedi.

Livello L11 (Memoria Biochimica e Epigenetica Storica)

Il **Livello L11** esplicita la capacità di *conservare tracce* di esposizioni ambientali passate. La presenza di accumuli di epimutazioni (P16), di fattori di stress ossidativo persistenti, e di feed-forward metabolici, conferisce alla pianta una *memoria storica* che modula la reazione a nuovi stress (Joly and Matzke 2018b).

Livello L12 (Controllo Sistemico e Integrazione Omeostatica)

A L12, i segnali multipli derivanti dai livelli inferiori sono *coordinati* in un'ottica di omeostasi. Se esistono parametri in eccesso o in deficit (es. troppi ROS, carenza di acqua), il sistema di controllo può innescare retroazioni di compensazione. Questo livello è dunque cruciale per l'adattamento in tempo quasi-reale: da un lato monitora i parametri vitali, dall'altro propaga azioni di emergenza (in L03–L04) o ordini di ricalibrazione strutturale (L06–L07).

Livello L13 (Interazione con Suolo e Substrato)

Nel **Livello L13** si affrontano gli scambi di nutrienti (P12) e il pH del suolo (P13), oltre al ruolo di adesione e microfissazione. L'assorbimento di ioni e la capacità di ancoraggio su substrati diversi influenzano la stabilità dell'intero sistema briofitico, specialmente in contesti di terreno roccioso o scarsità di sostanze minerali (Liu & Rousk 2021).

Livello L14 (Ritmi Biologici Endogeni)

Qui si considerano gli *oscillatori circadiani* (P08) e altri ritmi biologici correlati al fotoperiodo. Le fluttuazioni periodiche interne, se sincronizzate con l'ambiente (L09–L10), permettono di ottimizzare fotosintesi e attività metaboliche (Holm et al. 2010). Eventuali squilibri (p. es. eccessiva radiazione notturna) possono alterare i cicli di crescita e di accumulo epigenetico.

Livello L15 (Turnover, Decadimento e Morte Cellulare)

Il **Livello L15** descrive i processi regressivi: senescenza, necrosi, turnover di cellule danneggiate. Il *tasso di apoptosi* (P07) è regolato dallo stress cumulato (P10) (Ponce de León et al. 2012), mentre la senescenza (P34) riflette l'usura fisiologica. Questo livello incrocia L03–L04 (metabolismo e stress) e, se le condizioni peggiorano, si attivano segnali di “collasso” per l'intero gametofito (L07–L12).

Livello L16 (Comunicazione Biochimica Intercellulare)

Qui la circolazione di segnali (auxine, peptidi) permette la coordinazione tra cellule e tessuti (Thelander et al. 2018). L16 scambia dati con L03 (ormoni), L05–L06 (architettura cellulare e vegetale) e ha un ruolo determinante nella riposta corale del muschio ai cambiamenti locali (idrici o luminosi).

Livello L17 (Auto-organizzazione Geometrica e Patterning)

Al **Livello L17** si formalizzano i fenomeni emergenti di *patterning* e filotassi, in cui la geometria macroscopica della pianta è determinata da interazioni locali (auxine, elasticità, segnalazioni). L17 si aggancia a L06 e L16 per generare pattern di crescita ottimizzati, a seconda delle risorse disponibili.

Livello L18 (Meccanica ed Elasticità Tissutale)

In L18, l'attenzione si focalizza sulle *proprietà biomeccaniche* (deformazioni, rigidità, sostegno) che modulano l'adattamento statico-dinamico della pianta. Se l'elasticità dei tessuti (P06) diminuisce drasticamente a causa di stress idrici, si innescano rotture e crolli strutturali (During et al. 2015).

Livello L19 (Adattamento Evolutivo e Plasticità)

Questo livello comprende la *frequenza allelica* (P27), la *diversità genetica* (P28), e altri indicatori di plasticità evolutiva. Processi come la selezione naturale (A16) o la migrazione genetica (A24) si collocano in L19, con retroazioni sugli stati epigenetici (L01–L11) in un orizzonte di più generazioni (Miller 2019).

Livello L20 (Stato Sistemico e Meta-osservabilità)

Infine, il **Livello L20** fornisce una visione *integrata* di tutti i parametri, definendo P10 (stress cumulato), P11 (vitalità media) e altre metriche globali (*indice di resilienza, tasso fotosintetico medio*), che consentono di diagnosticare la salute complessiva della briofita. Un superamento di soglie di *collasso* a L20 può avviare la transizione a una nuova coorte (L07), oppure attivare meccanismi di emergenza multi-livello (L03–L12).

Interazioni tra i livelli

Ciascun livello influisce e subisce l'influsso dei livelli adiacenti:

- *dall'alto verso il basso* (top-down): le condizioni macro-climatiche (L10) e i segnali integrati (L12, L20) possono imporre vincoli e aggiustamenti epigenetici o fisiologici ai livelli sottostanti (L03–L04–L01), modulando le soglie di attivazione di diversi processi;
- *dal basso verso l'alto* (bottom-up): mutazioni epigenetiche (L01) o stress metabolici (L03–L04) generano retroazioni che si ripercuotono sulla morfogenesi (L06), sul ciclo riproduttivo (L07) e, se persistenti, sui ritmi endogeni (L14) e sull'ecosistema (L10–L08).

Questo quadro gerarchico e circolare permette di comprendere come la briofita generalista mantenga un equilibrio dinamico, reagendo efficacemente a shock ambientali (Godfrey-Smith 2007).

Ciascun Livello è caratterizzato, in letteratura scientifica, da Parametri principali, di seguito sintetizzati:

Livello	Parametri principali (ID) – evidenza
L01 Genomico–Epigen.	P16, P18, P19 (Joly and Matzke 2018a; Hirochika 2000)
L02 Trascrizionale	P01, P20 (Perroud et al. 2018; Kubo et al. 2019)
L03 Metabolico–Regol.	P02, P03, P24, P37 (Garcia et al. 2018; Takezawa et al. 2015)
L04 Fisiologia Cell.	P04, P05, P07, P10 (Orozco-Cardenas et al. 1999; Waite & Joshi 2010)
L05 Tessuti	P06, P21, P22 (Baker and Doran 2019; Tomoi et al. 2020)
L06 Morfogenesi	P22, P39 (Smith and Carter 2019; Novak and Urban 2021)
L07 Ciclo Riprod.	P23, P40, P41 (Regmi et al. 2017; Hackenberg et al. 2016)
L08 Interazione Biotica	P26, P25 (Liu & Rousk 2021; Miller et al. 2019)
L09 Ambiente Immed.	P14, P15, P30, P31 (Dow et al. 2021; Johnson and Wu 2022)
L10 Macro-clima	P38, P29 (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014)
L11 Memoria Epigen.	P16, P18 (Joly and Matzke 2018a)
L12 Controllo Sistemico	P09, P10, P11 (Dakos et al. 2012)
L13 Suolo / Substrato	P12, P13, P35, P36 (Peterson et al. 2015; Clymo 1973)
L14 Ritmi Endogeni	P08 (Kondo and Touhara 2019)
L15 Turn-over	P07, P34 (Fang and Luo 2020; Mukae et al. 2015)

L16 Comunicazione	P21, P24 (Tomoi et al. 2020; Novak and Urban 2021)
L17 Patterning	P22, P39 (Smith and Carter 2019)
L18 Meccanica Tissutale	P06 (Baker and Doran 2019)
L19 Evoluzione	P27, P28, P32, P33 (Miller et al. 2019; Szövényi et al. 2014)
L20 Stato Sistemico	P09, P10, P11 (Szövényi et al. 2014)

2.3 Parametri Biologici, Range e Soglie Operative ed Equazioni

Per ogni Parametro appartenente ai relativi Livelli, è stata condotta una revisione sistemica della letteratura per identificare l'unità di misura, il range documentato e la fonte bibliografica:

ID	Parametro (unità)	Range	Fonte
P01	Espressione genica <i>Rubisco</i> (FPKM)	0–1 500	(Perroud et al. 2018)
P02	Concentrazione auxina ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	0.05–50	(Suzuki et al. 2021)
P03	Attività enzimatica antiossidante (U mg^{-1})	0.1–200	(Usha et al. 2021)
P04	Livello ROS ($\mu\text{mol L}^{-1} \text{H}_2\text{O}_2$)	0.5–500	(Orozco-Cardenas et al. 1999)
P05	Tasso fotosintetico ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	2–24	(Waite & Joshi 2010)
P06	Modulo elastico fogliare (MPa)	0.68–6.4	(Nadal et al. 2018)
P07	Tasso apoptosi cellulare (%)	0–50	(Ponce de León et al. 2012)
P08	Frequenza oscillatore circadiano (Hz)	1×10^{-5} -1×10^{-2}	(Holm et al. 2010)
P09	Fitness media (a.u.)	0–1	(Szövényi et al. 2014)
P10	Indice stress cumulato (a.u.)	0–10	(Proctor 2011)
P11	Vitalità media (%)	60–100	(Oliver & Wood 2005)
P12	Concentrazione ioni suolo (mM)	0.4–10	(Ashton 1977)
P13	pH suolo	3.0–8.0	(Clymo 1973)
P14	Temperatura crescita ($^{\circ}\text{C}$)	5–25	(Furness & Grime 1982)
P15	Intensità luminosa (lux)	15 000–60 000	(Waite & Sack 2010)
P16	Epimutazioni (5-mC %)	4–8	(Ingle & Matzke 2019)
P17	Stabilità clonale (%)	0–100	(Newton et al. 2007)

P18	Stato epigenetico oscillante (mC)	-0.2-0.2	(Grob and Grossniklaus 2020)
P19	Attività trasposonica (eventi cell ⁻¹)	0-10	(Hirochika 2000)
P20	Stabilità trascrizionale (CV %)	5-22	(Kubo et al. 2019)
P21	Flusso inter-cellulare (a.u.)	0.5-9.8	(Tomoi et al. 2020)
P22	Differenziamento tissutale (%)	0-100	(Cove et al. 2005)
P23	Stato dormienza spore (%)	0-100	(Eklund et al. 2015)
P24	Segnale citochinico (a.u.)	0-10	(Thelander et al. 2018)
P25	Competizione luminosa (0-1)	0-1	(Waite & Joshi 2010)
P26	Mutualismo cianobatterico (%)	5-60	(Liu & Rousk 2021)
P27	Frequenza allelica	0-1	(Szövényi et al. 2014)
P28	Diversità genetica (H _e %)	0-40	(Szövényi et al. 2014)
P29	Giorno annuale normalizzato (0-1)	0-1	(ISO 8601-1 2019)
P30	Contenuto idrico suolo (m ³ m ⁻³)	0.15-0.40	(Liu et al. 2021)
P31	Pioggia giornaliera (mm)	0-20	(WMO 2023)
P32	Numero cloni (n)	1-500	(Newton et al. 2007)
P33	Diversità clonale (%)	0-90	(Newton et al. 2007)
P34	Indice senescenza (%)	0-80	(Mukae et al. 2015)
P35	Cont. H ₂ O superficiale (g g ⁻¹ DW)	1-60	(Proctor 2011)
P36	Cont. H ₂ O profondo (g g ⁻¹ DW)	1-60	(Proctor 2011)
P37	Concentrazione ABA (μmol L ⁻¹)	0.01-10	(Takezawa et al. 2015)
P38	Trend termico (°C decennio ⁻¹)	0-0.3	(IPCC 2023)
P39	Sviluppo protonema (a.u.)	0-1	(Cove et al. 2005)
P40	Nutrizione sporofito (a.u.)	0-1	(Regmi et al. 2017)
P41	Viabilità sporofito (%)	70-100	(Hackenberg et al. 2016)
P42	Tolleranza dessiccamento (RWC %)	0-100	(Proctor 2021)

La tabella è una mappa quantitativa di riferimento basata su studi precedenti,

descrittiva di intervalli tratti dalla letteratura scientifica primaria e serve come limite biofisico "hard": confini oltre i quali i dati sono non validi. A partire dai valori in questa tabella, occorre definire range funzionali, soglie operative, punti di massimo rendimento fisiologico/ecologico, soglie di stress, di rischio, effetti qualitativi (es. (es. collasso, fotoinibizione, senescenza). Ciò con l'obiettivo di guidare la valutazione dinamica: attiva eventi, mutazioni, penalizzazioni.

Di seguito vengono descritte per ogni parametro, delle regole di riconduzione a metriche operative:

ID	Regola di riconduzione	Commento di coerenza
P01	$\text{a.u.} = \frac{\text{FPKM}}{1500}$	0.60 a.u. 900 FPKM (60 % del max).
P02	Nessuna conversione (μM)	Ottimale = media log-range (25 μM).
P03	Range esteso 10 \rightarrow 200 U mg^{-1}	Include stress severo.
P04	Nessuna conversione; scala log più ampia	Ottimale 60 μM al centro di 16–192 μM .
P05	Identità unità; Tab 2 restringe a 4–24	Ottimale 15 $\mu\text{mol CO}_2$.
P06	Identità MPa; ottimale = media geom. 0.8–5.4	
P07	Percentuale invariata; ottimale 8 %	Media aritmetica di 0–50 %.
P08	$f[\text{Hz}] = \frac{c[\text{d}^{-1}]}{86400}$	0.80 c d^{-1} 9×10^{-6} Hz.
P09	a.u. invariata; range esteso +14 %	
P10	Scala 0–1 \rightarrow 0–10 a.u.	Mantiene granularità dello stress index.
P11	$\text{a.u.} = \frac{\% \text{Vitalità}}{100}$	28–114 % 0.28–1.14 a.u.; ottimale 0.85.
P12	Nessuna conversione (mM)	Ottimale 5 mM (mediana).
P13	Nessuna conversione (pH)	Range alto esteso per suoli calcarei.
P14	Range esteso a $-4 / 48$ $^{\circ}\text{C}$ (IPCC)	Ottimale 22 $^{\circ}\text{C}$.
P15	$\text{lux} = \mu\text{mol phot m}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 54$	45 k lux 830 $\mu\text{mol phot}$.
P16	$\text{a.u.} = \frac{\%5\text{-mC}-4}{4}$	0 a.u.=4 %, 1 a.u.=8 %.
P17	Percentuale invariata; ottimale 80 %	Over-range +14 % per buffering.
P18	$\text{a.u.} = \Delta\text{mC} \times 3.6$	Copre ± 0.72 (Tab 2).
P19	a.u. invariata; ottimale 2 a.u.	Valore di background TE.
P20	Nessuna conversione (CV %)	Range 8–22 % (Kubo et al. 2019).
P21	a.u. invariata; 0.5–9.8	Dati FRAP (Tomoi et al. 2020).
P22	Percentuale invariata; ottimale 75 %	
P23	Percentuale invariata; ottimale 15 %	ABA-modulata.
P24	a.u. invariata; ottimale 5 a.u.	50 % saturazione recettori CK.

P25	a.u. invariata; ottimale 0.50	Competizione luminosa moderata.
P26	Range % portato a 12–108	Copre colonizzazioni eccezionali.
P27	Frequenza invariata	Ottimale 0.45 = massima diversità alelica.
P28	% scala estesa 20–114	Include variazioni poliploidi; ottimale 70 %.
P29	Variabile DOY/365; nessuna conversione	
P30	$\text{fr.} = \frac{\theta - 0.15}{0.25}$	0.15–0.40 \rightarrow 0–1 fr.; ottimale 0.60.
P31	Nessuna conversione (mm)	Ottimale 3.5 mm d ⁻¹ .
P32	n invariato; log-media 120	
P33	% invariato; ottimale 60 %	
P34	% invariato; ottimale 15 %	Dati (Mukae et al. 2015).
P35	$\text{fr.} = \frac{x}{60}$	1–60 g g ⁻¹ DW \rightarrow 0.08–1.02.
P36	Analogo P35 per strato profondo	
P37	Nessuna conversione (μM)	Ottimale 4 μM (stress medio).
P38	$\Delta T_{100a} = 10\Delta T_{10a}$	0–0.3 °C dec ⁻¹ \rightarrow 0–3 °C; Tab 2 estende a 6 °C.
P39	a.u. invariata; ottimale 0.60	
P40	a.u. invariata; ottimale 0.80	Flusso fotosintati (Regmi et al. 2017).
P41	$\text{a.u.} = \frac{\% \text{viabilità}}{100}$	70–100 % \rightarrow 0.70–1.0 a.u.; ottimale 0.85.
P42	$\text{a.u.} = \frac{\% \text{RWC}}{100}$	0–100 % \rightarrow 0–1.0; ottimale 0.45.

Applicando le Regole di riconduzione ai parametri iniziali, è possibile rimappare i parametri in termini di range sperimentali:

ID	Parametro (unità)	Ottimale	Range tol.	Fonte
P01	Espressione <i>Rubisco</i> (a.u.)	0.60	0.30–0.90	(Smith and Carter 2019; Lee et al. 2020)
P02	Auxina (μmol L ⁻¹)	25	4–54	(Garcia et al. 2018; Novak and Urban 2021)
P03	Enzimi antiossidanti (U mg ⁻¹)	115	48–204	(Zhu and Ma 2017)
P04	ROS (μmol L ⁻¹ H ₂ O ₂)	60	16–192	(Johnson and Wu 2022)
P05	Fotosintesi (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	15	4–24	(Wang et al. 2021; Desai and Kumar 2018)
P06	Elasticità foglia (MPa)	3.0	0.8–5.4	(Baker and Doran 2019)

P07	Apoptosi (%)	8	1.6–33.6	(Fang and Luo 2020; Konrad et al. 2017)
P08	Oscillatore circadiano (cicli d ⁻¹)	0.80	0.32–1.56	(Kondo and Touhara 2019)
P09	Fitness (a.u.)	0.75	0.24–1.14	(Miller et al. 2019; Smith and Carter 2019)
P10	Stress cumulato (a.u.)	2	0–10.8	(?)
P11	Vitalità (%)	85	28–114	(Williams and Tan 2020; Lee et al. 2020)
P12	Ioni suolo (mM)	5.0	1.6–9.6	(Peterson et al. 2015)
P13	pH suolo	6.2	3.84–9.0	(Smith and Carter 2019)
P14	Temperatura (°C)	22	–4–48	(Intergovernmental Panel on Climate Change 2014; Dow et al. 2021)
P15	Luce (lux)	45 000	8 000–120 000	(Johnson and Wu 2022)
P16	Epimutazioni mem. (a.u.)	15	0–72	(Joly and Matzke 2018a)
P17	Stabilità clonale (%)	80	20–114	(Roberts et al. 2020)
P18	Stato epigenetico (a.u.)	0.0	–0.72–0.72	(Joly and Matzke 2018a)
P19	Trasposoni (a.u.)	2	0–10.8	(Fang and Luo 2020)
P20	CV trascrizione (%)	18	8–22	(Kubo et al. 2019)
P21	Flusso intercellulare (a.u.)	6	0.8–12	(Tomoi et al. 2020)
P22	Differenziazione (%)	75	20–114	(Smith and Carter 2019)
P23	Dormienza spore (%)	15	0–66	(Garcia et al. 2018)
P24	Segnale CK (a.u.)	5	0.8–10.8	(Novak and Urban 2021)
P25	Competizione luce (a.u.)	0.50	0.08–1.08	(Miller et al. 2019)
P26	Mutualismo cianob. (%)	65	12–108	(Wang et al. 2021)
P27	Frequenza allelica	0.45	0.16–1.08	(Konrad et al. 2017)
P28	Diversità genetica (%)	70	20–114	(Miller et al. 2019)
P29	Giorno anno norm. (fr.)	—	0–1.2	(ISO 8601-1 2019)

P30	Umidità suolo (fr.)	0.60	0.16–1.08	(Desai and Kumar 2018; Intergovernmental Panel on Climate Change 2014)
P31	Pioggia (mm d ⁻¹)	3.5	0.24–8.4	(Intergovernmental Panel on Climate Change 2014)
P32	Numero cloni (n)	120	8–300	(Roberts et al. 2020)
P33	Diversità clonale (%)	60	16–108	(Miller et al. 2019)
P34	Senescenza (%)	15	0–80	(Mukae et al. 2015)
P35	H ₂ O sup. (fr.)	0.55	0.08–1.02	(Intergovernmental Panel on Climate Change 2014)
P36	H ₂ O prof. (fr.)	0.70	0.20–1.14	(Dow et al. 2021)
P37	ABA (μmol L ⁻¹)	4	0.8–12	(Garcia et al. 2018)
P38	Trend termico (°C)	0	0–6	(Intergovernmental Panel on Climate Change 2014)
P39	Sviluppo protonema (a.u.)	0.60	0.08–1.2	(Desai and Kumar 2018)
P40	Nutrizione sporofito (a.u.)	0.80	0.24–1.2	(Regmi et al. 2017)
P41	Viabilità sporofito (a.u.)	0.85	0.24–1.2	(Zhu and Ma 2017)
P42	Tolleranza dessiccamento (a.u.)	0.45	0.08–1.08	(Miller et al. 2019)

Ogni parametro può venire aggiornato da una o più *equazioni*. Ad esempio, si può definire un'equazione per la fotosintesi netta in termini di Rubisco (P_{01}), radiazione (P_{15}), e stress (P_{10}), con clamp e saturazione. Tali equazioni derivano da *formule standard* di fisiologia vegetale (logistiche o Michaelis-Menten, adattate al contesto briofitico).

ID Equazione	Equazione	Fonte
EQ_BASE_ROS	$P_4 = \max\left(0, a + bP_{10} + c \max(0, P_{14} - T_0)\right)$	(Foyer and Noctor 2005)

continua nella pagina successiva

ID Equazione	Equazione	Fonte
EQ03	$P_6 = \max(0, \min(P_{6,\max}, P_{6,\max} + k_1 P_2))$	(Tyree and Zimmermann 2002)
EQ04	$P_7 = \max(0, \min(P_{7,\max}, dP_{10}))$	(Kramer and Boyer 1995)
EQ09	$P_8 = P_{8,0} + A \sin(\frac{2\pi}{365} P_{14})$	(Korner and Basler 2010)
eq_P02_DYN	$P_{2,t+1} = P_{2,t} + \alpha L - \delta(1 - P_{35,t}) - \delta P_{2,t}$	(Taiz and Zeiger 2010)
eq_P03_DYN	$P_{3,t+1} = \max(0, \min(P_{3,\max}, P_{3,t} + k_{\text{prod}} \max(0, P_{4,t} - ROS_{\text{th}}) - k_{\text{decay}} P_{3,t}))$	(Apel and Hirt 2004)
eq_H2O_SURF	$P_{35,t+1} = \text{clamp}(P_{35,t} + k_s P_{31,t} - k_e \max(0, P_{14,t} - T_e), 0, 1)$	(Rutter et al. 1971)
eq_H2O_DEEP	$P_{36,t+1} = \text{clamp}(P_{36,t} + k_d(P_{35,t} - P_{36,t}) - \lambda_{h2o}, 0, 1)$	(Peters and Christensen 2007)
eq_ABA_DECAY	$P_{37,t+1} = \text{clamp}(P_{37,t}(1 - \gamma) + \beta(P_{35,t} - \theta), 0, P_{37,\max})$	(Cutler et al. 2010)
eq_P18_BUFFER	$P_{18} = \text{clamp}(1 - \rho(100 - P_3)/100, -1, 1)$	(Bird et al. 1993)
eq_33	$P_{12} = \text{clamp}((m + n \sin 2\pi(P_{29} + \phi)) \max(0.5, 1 - r 7 - P_{13}), P_{12,\min}, P_{12,\max})$	(Gould et al. 2007)
eq_22	$P_{21} = \text{clamp}((\alpha P_2 + \beta P_3)(1 - P_{34}/M) P_{11M}/100, 0, P_{21,\max})$	(Fahad et al. 2015)
eq_23	$P_{22} = \text{clamp}(k P_{21}(1 - P_{34}/N), 0, P_{22,\max})$	(von Caemmerer and Farquhar 1981)
eq_24	$P_{23} = \text{clamp}(\sigma(P_{14} < T_c) + \tau(P_{30} < H_c) + u P_3, 0, P_{23,\max})$	(Levitt 1980)

continua nella pagina successiva

ID Equazione	Equazione	Fonte
eq_25	$P_{24} = \text{clamp}(\alpha_1 P_2 + \alpha_2 P_{14}, 0, P_{24,\max})$	(Marschner 2012)
eq_26_LC	$P_{25} = \text{clamp}(1 - P_{15}/C_{\max}, 0, 1)$	(Chapin et al. 1993)
eq_27	$P_{26} = \text{clamp}((P_{12} - P_{12,\theta})k_c P_{30} - k_s P_{10}, 0, P_{26,\max})$	(Grime 1977)
eq_28	$P_{27} = \text{clamp}(P_{27} + k_a P_9(1 - P_{27}) - k_d P_{27}, 0, 1)$	(Lodge 1997)
eq_29	$P_{28} = \text{clamp}(100 - 100P_{27} + cP_{10}, 0, 100)$	(Proctor 2000)
eq_30	$P_{16,t+1} = P_{16,t}(1 - \mu)$	(Joly and Matzke 2018a)
eq_31	$P_{14} = T_{\text{mean}} + A_T \sin 2\pi P_{29} + P_{38}$	(Allen 2009)
eq_32	$P_{15} = I_{\text{mean}} + A_I \sin(2\pi(P_{29} - \phi))$	(Garratt 1994)
eq_32b	$P_{31} = \max(0, I_{\text{base}} + A_d \sin 2\pi(P_{29} + \phi_d))$	(Monteith 1973)
eq_35	$P_{30} = \text{clamp}(P_{30} + k_s P_{31} - (k_e + k_l \max(0, P_{14} - T_e)), 0, 1)$	(Eamus 2006)
eq_36	$\Delta = \sigma_1(P_{11} > H_1, P_{23} < L_1) + \sigma_2(P_{10} > T_1) + \sigma_3(P_{32} < D_1, P_{11} > H_2), P_{32} = \text{clamp}(P_{32} + \Delta, P_{32,\min}, P_{32,\max})$	(Rensing 2018)
eq_37	$P_{33} = \text{clamp}(P_{28} + 0.1P_{32}, 0, 100)$	(Minorsky 1932)
eq_38	$P_{34,t+1} = \text{clamp}(P_{34,t} + k_{\text{on}}P_{10} + k_{\text{age}}(P_{14} > T_a)(P_{14} - T_a), 0, P_{34,\max})$	(Thomas and Stoddart 1980)
eq_TTREND	$P_{38} = P_{38} + r_{\text{trend}}$	(Intergovernmental Panel on Climate Change 2014)

continua nella pagina successiva

ID Equazione	Equazione	Fonte
eq_PROTONEMA	$P_{39} = \text{clamp}(P_{39} + k_n P_{24} + k_l P_2 - k_d P_{10}, 0, 1)$	(Oliver & Wood 2005)
eq_SPO_NUTR	$P_{40} = \text{clamp}(\alpha_s P_9 + \beta_s P_{30} - \gamma_s P_{10}/10, 0, 1)$	(Roberts et al. 2020)
eq_SPO_VIA	$P_{41} = \text{clamp}(P_{41} + k_v P_{40} - k_d \max(0, P_{10} - T_v), 0, 1)$	(Glime 2017)
eq_DESC_TOL	$P_{42} = P_{42} + \eta(P_{35} < \theta_d) - \zeta(P_{35} \geq \theta_d)$	(Proctor 2011)
eq_P05_NEW	$P_5 = \max\left(0, P_{5,\text{base}}(0.6 + 0.4P_{35})(1 - \kappa P_{10}) \exp\left[-\frac{(P_{14} - T_{\text{opt}})^2}{2\sigma^2}\right] \left(1 + \phi(CO_2 - CO_{2,\text{ref}})/100\right)\right)$	(Long et al. 2006)
eq_P01_DYN	$P_{1,t+1} = \text{clamp}(P_{1,t} + k_b P_{11}/100 + k_l P_9 - k_s P_4/P_{4,\text{max}} - k_d P_{10}, 0, 1)$	(von Caemmerer and Farquhar 1981)
eq_P10_DYN	$P_{10,t+1} = \text{clamp}\left(P_{10,t} + k_p P_4/P_{4,\text{max}} + k_h(1 - P_{35}) + k_t \max(0, P_{14} - T_t)/T_t - k_d P_{10}, 0, 10\right)$	(Monsi and Saeki 1953)
eq_VITAL	$P_{11} = \text{clamp}\left(\frac{100}{1 + \exp[-m(P_9 - \theta)]} - n P_{10} - \max(0, P_{14} - T_s), 0, 100\right)$	(West et al. 2002)
eq_34	$P_{29} = (P_{29} + 1/365) \bmod 1$	(Hunt and Sparrow 1974)
eq_P11_MEDIA	$P_{11M} = \frac{P_{11} + \max(0, P_{32} - 1) W_1}{\max(1, P_{32})}$	(Givnish 1988)
eq_P34_MEDIA	$P_{34M} = \frac{P_{34} + \max(0, P_{32} - 1) W_2}{\max(1, P_{32})}$	(Smith 2016)
eq_VITAL_COL	$P_{11M} = w_v P_{11} + (1 - w_v)(100 - P_{34})$	(Reich et al. 1998)
eq_P05_OXIDATIVE	$\text{se } P_4 > ROS_{\text{crit}} : P_5 \leftarrow \max\left(0, P_5 \left(1 - \gamma \frac{P_4 - ROS_{\text{crit}}}{ROS_{\text{max}} - ROS_{\text{crit}}}\right)\right)$	(Mittler 2002)

continua nella pagina successiva

ID Equazione	Equazione	Fonte
eq_ANTIOX _REDUCE_ROS	$\frac{d[ROS]}{dt} = r_{\text{prod}} - k_{\text{scav}}[Antiox][ROS]$	(Mittler 2002)
eq_P05_light _direct	$P_n = P_{n,\text{max}}(1 - e^{-\alpha I/P_{n,\text{max}}})$	(Webb et al. 1974)
eq_P05 _nutrition	$V = V_{\text{max}} \frac{[Nutr]}{K_m + [Nutr]}$	(Michaelis and Menten 1913)

2.4 Relazioni (R01–R10)

Le “filieri” di regolazione ormonale, interazione con microfauna, fotosintesi, ecc. sono implementate in *relazioni e funzioni di trasmissione* f_{ij} , per lo più *non iniettive* (curve di saturazione, soglie di attivazione). Le *Relazioni* definiscono un collegamento causale o retroazione.

Rel.	Equazione formale (discretizzata $t = 1$ g)	Riferimento e coerenza biologica
R01	$P_{05}^{t+1} = P_{05}^t + k_1(P_{01}^t - P_{01}^*)$	Correlazione lineare fra contenuto di Rubisco e capacità fotosintetica in C ₃ foglie (Evans 1989). k_1 deriva dalla pendenza empirica (0.012 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ FPKM}^{-1}$); P_{01}^* è il set-point ottimale (0.6 a.u.).
R02	$P_{06}^{t+1} = P_{06}^t + k_2 \frac{(P_{02}^t)^n}{K_2^n + (P_{02}^t)^n}$	La risposta “auxina \rightarrow allentamento parete” segue una cinetica di Hill ($n = 2$) secondo saggi di estensibilità su briofite e radichette (Viaene et al. 2012).
R03	$P_{04}^{t+1} = P_{04}^t - k_3 P_{03}^t P_{04}^t$	La velocità di scavenging ROS è proporzionale al prodotto «enzima \times substrato» (legge di pseudo-1° ordine) (Foyer and Noctor 2009).
R04	$P_{05}^{t+1} = P_{05}^t \exp[-k_4 P_{04}^t]$	Danneggiamento di PSII da ROS segue un decadimento esponenziale dell’ A_{net} (Baker 2004).
R05	$P_{04}^{t+1} = P_{04}^t + k_5 \max(0, P_{14}^t - T_{\text{opt}})^2$	Produzione termica di ROS cresce quadraticamente oltre l’ottimo (22 °C) (Bita and Gerats 2013).

R06	$P_{05} = P_{05,\max} \frac{P_{15}}{K_6 + P_{15}}$	Curva luce-risposta iperbolica in moss canopies (rectangular hyperbola) (Waite & Joshi 2010).
R07	$P_{07}^{t+1} = P_{07}^t + k_7 \max(0, P_{10}^t - P_{10}^*)$	Lo stress globale sopra soglia induce PCD via ROS/caspasi-like (Petrov et al. 2015).
R08	$P_{11}^{t+1} = P_{11}^t + k_8 (P_{09}^t - P_{09}^*)$	Eterozigosi/fitness correla con vigore clonale nei muschi (Szövényi et al. 2014).
R09	$P_{05}^{t+1} = P_{05}^t + k_9 \frac{P_{12}^t}{K_9 + P_{12}^t}$	Assorbimento nitrato (o NO_3^-) limita la sintesi proteica per CO_2 fixation; modello Michaelis–Menten (Britto and Kronzucker 2002).
R10	$P_{12} = P_{12,\max} \exp\left[-\frac{(P_{13} - pH_{\text{opt}})^2}{2\sigma^2}\right]$	Disponibilità di ioni segue curva a campana centrata sul pH opt (6.0) (Marschner 2012).

2.5 Azioni e Retroazioni Dinamiche

Le *azioni* sono innescate da *condizioni booleane* (scritte come stringhe di codice). Se vere, provocano un *effetto* definito come \uparrow o \downarrow di un parametro (spesso un Δ numerico). Se uno o più parametri superano soglie specifiche, partono *reazioni* (ad es. “azione A_danneggiamento_foglioline”) che degradano la fotosintesi. Tali soglie si basano su dati sperimentali di *tolleranza* alle alte temperature o all’evaporazione. Le azioni permettono di modellare *trigger* interni condizionati da soglie.

Azione	Condizione formale	Effetto matematico	Riferimento bibliografico
A01	$P_{04} > 120 \mu\text{M ROS}$	$P_{05} \leftarrow P_{05} - 3$	Danno ossidativo sul PSII riduce A_{net} (Baker 2004)
A02	$P_{10} > 7 \text{ (a.u.)}$	$P_{07} \leftarrow P_{07} + 10$	Stress-ROS induce PCD in piante (Petrov et al. 2015)
A03	$P_{14} > 30 \text{ }^\circ\text{C}$	$P_{03} \leftarrow P_{03} + 5$	Calore attiva geni antiossidanti (Bita and Gerats 2013; Foyer and Noctor 2009)
A04	$P_{35} < 0.20 \text{ g g}^{-1} \text{ DW H}_2\text{O}$	$P_{06} \leftarrow P_{06} - 0.5$	Disidratazione irrigidisce pareti cellulari (Proctor 2011)

A05	$P_{11} > 70\%$	$P_{09} \leftarrow P_{09} + 0.02$	Vigore clorofilliano correla fitness clonale (Oliver & Wood 2005)
A06	$P_{15} > 60\,000$ lux	$P_{16} \leftarrow P_{16} + 3$	Luce/UV induce metilazione DNA in briofite (Boyko and Kovalchuk 2010)
A07	$P_{01} < 0.40$ (a.u.)	$P_{01} \leftarrow P_{01} + 0.01$	Auto-compenso trascrizione Rubisco (Evans 1989)
A08	$0.25 < P_{29} < 0.35$	$P_{10} \leftarrow P_{10} - 1$	“Finestra” climatica riduce stress primaverile (Furness & Grime 1982)
A09	$P_{11} > 60\%$	$P_{06} \leftarrow P_{06} + 0.5$	Vitalità sostiene plasticità meccanica (Nadal et al. 2018)
A10	$P_{10} < 3$	$P_{10} \leftarrow P_{10} + 1$	Omeostasi di base dello stress (Proctor 2011)
A11	$P_{08} < 5 \times 10^{-4}$ Hz	$P_{08} \leftarrow P_{08} + 0.1$	Resincronizzazione oscillatore circadiano (Millar et al. 1995)
A12	$P_{15} > 20\,000$ lux	$P_{02} \leftarrow P_{02} + 3$	Luce modula biosintesi auxina (Viaene et al. 2012)
A13	$P_{06} > 3.5$ MPa	$P_{06} \leftarrow P_{06} + 0.3$	Feedback meccanico su crescita foglia (Kierzkowski and Routier-Kierzkowska 2019)
A14	$P_{15} > 70\,000$ lux	$P_{11} \leftarrow P_{11} + 10$	High-light aumenta vitalità fino a saturazione (Waite & Joshi 2010)
A15	$P_{10} > 6$	$P_{16} \leftarrow P_{16} + 5$	Stress severo lascia traccia epigenetica (Pecinka and Mittelsten Scheid 2011)
A16	$P_{17} < 50\%$	$P_{09} \leftarrow P_{09} - 0.2$	Ridotta stabilità clonale deprime fitness (Newton et al. 2007)
A17	$P_{17} > 80\%$	$P_{16} \leftarrow P_{16} + 2$	Cloni stabili facilitano trasmissione epimutazioni (Ingle & Matzke 2019)
A18	$P_{04} > 120$ μ M	$P_{19} \leftarrow P_{19} + 3$	ROS attiva trasposoni in cellule vegetali (Hirochika 2000)
A19	$P_{17} > 70\%$	$P_{20} \leftarrow P_{20} + 5$	Coerenza clonale riduce rumore trascrizionale (González et al. 2018)

A20	$P_{21} > 8$ (a.u.)	$P_{22} \leftarrow P_{22} + 5$	Flusso plasmodesmi stimola differenziazione (Sager and Lee 2014)
A21	$P_{23} < 10\% \wedge P_{24} > 5$	$P_{09} \leftarrow P_{09} + 0.2$	Dormienza bassa + CK alta accelera crescita (Eklund et al. 2015)
A22	$P_{25} > 0.80$	$P_{05} \leftarrow P_{05} - 2$	Ombreggiamento riduce fotosintesi (Brodersen and Vogelmann 2008)
A23	$P_{26} > 60\%$	$P_{09} \leftarrow P_{09} + 0.05$	Mutualismo cianobatterico migliora fitness (Ligrone et al. 2012)
A24	$P_{28} < 40\%$	$P_{28} \leftarrow P_{28} + 10$	Scambio genico \uparrow diversità genetica (Richards et al. 2016)
A25	$P_{14} > 35$ °C	$P_{11} \leftarrow P_{11} - 5$	Heat shock riduce vitalità nei muschi (Bita and Gerats 2013)
A26	$P_{35} < 0.30$	$P_{10} \leftarrow P_{10} + 1.5$	Siccità superficiale aumenta stress globale (Proctor 2011)
A27	$P_{12} > 4$ mM $\wedge P_{15} > 30\,000$ lux	$P_{32} \leftarrow P_{32} + 10$	Nutrienti + luce favoriscono propagazione cloni (Newton et al. 2007)
A28	$P_{25} > 0.90$	$P_{32} \leftarrow P_{32} - 5$	Ombra estrema provoca mortalità cloni (Newton et al. 2007)
A29	$P_{34} > 60\%$	$P_{11} \leftarrow P_{11} - 10$	Senescenza avanzata riduce vitalità (Stewart et al. 2012)
A30	$P_{34} > 70\%$	$P_{07} \leftarrow P_{07} + 5$	Senescenza promuove PCD (Reape and McCabe 2008)
A29b	$50 < P_{04} < 120$ μ M	$P_{05} \leftarrow P_{05} + 2$	ROS moderato stimola fotoprotezione (Mittler 2017; Asada 2006)
A35	$P_{14} < 15$ °C & $P_{35} > 0.5$	$P_{10} \leftarrow P_{10} - 2$	Clima fresco-umido allevia stress fisiologico (Proctor 2011)

A _DES _0	$P_{42} < 0.20 \wedge P_{35} < 0.20$	$P_{05} \leftarrow P_{05} - 10$	Dessiccamento estremo blocca fotosintesi (Proctor 2021; Oliver & Wood 2005)
--------------	--------------------------------------	---------------------------------	---

2.6 Definizione Metriche di Collasso ed Emergenza

In questo paragrafo illustreremo le **metriche di collasso ed emergenza** definite per identificare i punti critici della briofita generalista, vale a dire quando i parametri biologici superano (o restano sotto) soglie di sicurezza segnalando processi irreversibili o dinamiche non lineari (Glime 2007). Queste metriche mirano a fornire *indicatori quantitativi* di rottura (“collasso”) o *cambiamenti emergenti* non previsti dalle condizioni stabili. Ogni metrica specifica:

- *Parametro* (**parametro** = P05, P04, ...).
- *Tipo* (*collasso*, *emergenza*, *incoerenza*).
- *Formula statistica* (mean, min, max, kurtosis, slope, etc.).
- *Soglia* numerica e *direzione* (*sopra* o *sotto*).
- *Descrizione* biologica della ragione per cui superare tale soglia è significativo.

Collasso e stati irreversibili

Il *collasso* (tipo **collasso**) riflette condizioni di *danno fisiologico estremo* da cui la briofita potrebbe non riprendersi:

- P03 (enzimi antiossidanti) sotto 60: suggerisce *danno ossidativo diffuso*.
- P11 (vitalità) sotto 40%: rischio di *estinzione locale*.
- P34 (senescenza) sopra 90%: tessuti non più recuperabili.

Tali soglie vengono *verificate* a posteriori, sui dati di simulazione, generando risultati come: “*M_P11_crash superata? Sì/No*”, attestando la discesa del parametro P11 sotto la soglia di sicurezza (Glime 2007).

Dinamiche emergenti (emergenza) e incoerenze

Le metriche di tipo **emergenza** controllano fenomeni *non lineari*, come:

- **Kurtosis** > 4 su P05: picchi di fotosintesi che suggeriscono *pattern caotici* o *burst improvvisi*.
- P10 varianza > 12: stress cumulato *altamente instabile*, preludio a *critical slowing-down*.

Inoltre, alcune metriche di **incoerenza** (*tipo incoerenza*) indicano divergenza fra parametri legati da relazioni causali. Per esempio, $\text{var}(P35)/\text{var}(P36) > 3$ suggerisce un *disequilibrio idrico* tra superficie e profondità (Miller 2019).

ID	Par.tro	Tipo	Formula	Thr.	Dir.	Rif. /Hp	Nota
M_P01_low	P01	Collasso	$\text{mean}(P01)$	0.40	↓	(Proctor 2000; Glime 2007)	Rubisco cronica-mente basso \Rightarrow blocco fotosintetico
M_P03_depletion	P03	Collasso	$\text{min}(P03)$	60	↓	(Proctor 2000)	Antiossidanti esauriti, difesa ROS persa
M_P04_spike	P04	Emerg.	$\text{max}(P04)$	120	↑	(Glime 2007)	Spike ROS indipendente dalla temperatura
M_P05_collapse	P05	Collasso	$\text{mean}(P05)$	5	↓	(Proctor 2000; Turetsky 2003)	Fotosintesi ≈ 0
M_P05_kurtosis	P05	Emerg.	$ \text{kurt}(P05) $	4.0	↑	*Ipotesi* (Scheffer et al. 2009; Dakos et al. 2012)	Code pesanti \Rightarrow dinamiche emergenti
M_P10_trend	P10	Emerg.	$\text{slope}_{10a}(P10)$	0.05	↑	(Rensing 2018)	Deriva stress verso tipping-point

M_P10_var	P10	Emerg.	$\text{var}(P10)$	12	↑	*Ipotesi* (Dakos et al. 2012)	Critical slowing-down
M_P11_crash	P11	Collasso	$\min(P11)$	40	↓	(Glime 2007)	Vitalità founder < 40% \Rightarrow estinzione locale
M_P11M_var	P11M	Emerg.	$\text{var}(P11M)$	120	↑	*Ipotesi* (Carpenter et al. 2011)	Instabilità sistemica della colonia
M_P11M_autocorr	P11M	Emerg.	$\rho_1(P11M)$	0.6	↑	*Ipotesi* (Dakos et al. 2012)	Persistenza shock (autocorr↑)
M_P27_fix	P27	Emerg.	$\max(P27)$	0.90	↑	*Ipotesi* (Frankham 2005)	Quasi-fissazione allelica
M_P28_divloss	P28	Collasso	$\min(P28)$	25	↓	*Ipotesi* (Hughes et al. 2008)	Bottleneck genetico
M_P32_bust	P32	Collasso	$\min(P32)$	50	↓	*Ipotesi* (Newton et al. 2007)	Cloni < 50 \Rightarrow struttura instabile
M_P34_crit	P34	Collasso	$\max(P34)$	90	↑	*Ipotesi* (Stewart et al. 2012)	Senescenza irrecuperabile

M_P34M _warn	P34M	Emerg.	$\text{mean}(P34M)$	70	↑	*Ipotesi* (Stewart et al. 2012)	Senescenza media elevata (early- warning)
M_P35 _drought	P35	Emerg.	$\text{min}(P35)$	0.30	↓	*Ipotesi* (Proctor 2011)	Siccità superficiale acuta
M_P36_dry	P36	Collasso	$\text{min}(P36)$	0.35	↓	*Ipotesi* (Proctor 2011)	Siccità cronica profonda
M_P37 _ABA	P37	Emerg.	$\text{max}(P37)$	8	↑	*Ipotesi* (Takezawa et al. 2015)	ABA alto indica stress idrico
M_P38 _warm	P38	Emerg.	$\text{max}(P38)$	2.0	↑	(Intergovernmental Panel on Climate Change 2014)	$\Delta T +2^\circ\text{C}$ oltre baseline climatica
M_P26 _volatility	P26	Emerg.	$\text{std}(P26)$	15	↑	*Ipotesi* (Ligrone et al. 2012)	Mutualismo instabile
M_P35 _P36 _varratio	P35,P36	Incoer.	$\frac{\text{var}(P35)}{\text{var}(P36)}$	3.0	↑	*Ipotesi* (Clark et al. 2016)	Disequilibrio idrico tra superficie e profondità
M_P14 _heatwave _kurt	P14	Emerg.	$\text{kurt}(P14)$	4.5	↑	*Ipotesi* (Seneviratne et al. 2014)	Code di calore estreme (heatwaves)

M_P18 _epivar	P18	Emerg.	std(<i>P18</i>)	0.12	↑	*Ipotesi* (Richards et al. 2016)	Instabilità epigenetica
------------------	-----	--------	-------------------	------	---	--	----------------------------

A partire da queste metriche è possibile definire Indici Compositi che descrivono in modo complesso le dinamiche riscontrate:

Indice	Formula/Regola	Par.	Alert	Emer.za	Evidenza / Nota
stress _inte- grato	Media ponderata di <i>shock_ossidativo</i> , <i>stress_idrico</i> , <i>stress_ormone</i> , <i>deficit_fotosintesi</i> . 0.25 (ROS + H ₂ O + ABA + def. Photo)	P04, P03, P35, P36, P37, P05	0.60	0.85	Integra ROS, acqua superficiale/profonda, ABA e calo fotosintesi in un unico indicatore di stress globale. Soglie da esperimenti multi-stress (Garcia et al. 2018)
fracture _mul- tifactor	Se ≥ 3 parametri chiave oltre soglia emergenza \Rightarrow collapse_state	P04, P05, P03, P37, P10, P11, P35, P36	—	3 param.	«Regola di frattura»: accumulo di almeno tre emergenze simultanee innesca transizione irreversibile. Basata su teorie di tipping-point (Scheffer et al. 2012; Dakos et al. 2012)

3 Componenti Aggiuntivi per Turing-Compatibilità

Nei paragrafi che seguono formalizziamo cinque task logico-sistemici necessari a rendere la simulazione *autosufficiente*, coerente nel tempo ed epistemicamente chiusa:

1. Stato iniziale formalizzato;
2. Condizioni Climatiche;
3. Gestione del tempo e dell'arresto;
4. Definizione chiara di successo/fallimento;
5. Iniezione controllata di eventi rari;
6. Meccanismo adattivo (apprendimento cumulativo).

I criteri restano **Ontologicamente Indipendenti** e **Epistemicamente Chiusi**: ogni nuova regola utilizza solo entità, funzioni e leggi già definite all'interno del reticolo, senza fare ricorso a domini esterni (Noble 2012; Kitano 2002).

3.1 Stato Iniziale Formalizzato

Una simulazione credibile richiede un vettore di condizioni iniziali coerente con i range biologici ed evolutivamente plausibile (Grimm & Railsback 2013). Ogni organismo “parte” da un preciso assetto molecolare e fisiologico: quantità di ROS, equilibrio antiossidante, livello di idratazione dei tessuti, stato epigenetico, numero di cloni, vitalità media. Se metti la briofita in simulazione con valori incoerenti (ad es. stress ossidativo elevato ma enzimi di difesa nulli) produrrà artefatti. Il preset stabilito imita una giovane colonia in condizioni di laboratorio: epigenoma poco stressato, moderata ossidazione, buona riserva d'acqua e vitalità elevata. È l'equivalente computazionale di prendere muschi freschi di serra prima di sottoporli a prove di siccità. Di seguito proponiamo un preset `T0_NORMAL`, i cui valori cadono entro gli intervalli ottimali già tabulati:

Parametro	Valore iniziale	Logica OI–EC	Fonti
P_{16} , P_{18} , P_{19}	4.5%, ~ 0 , 1 evento trasposone	Stato epigenetico “basso stress”	(Joly and Matzke 2018a; Ingle & Matzke 2019)

P_{04}, P_{03}	40 μM ROS, 100 U mg^{-1} enzimi	Omeostasi redox di laboratorio	(Foyer and Noctor 2009; Orozco-Cardenas et al. 1999)
$P_{35}, P_{36},$ P_{30}	0.60, 0.70, 0.60	Idrologia in equilibrio	(Proctor 2011; Liu et al. 2021)
P_{32}, P_{33}	100 cloni, 60% diversità	Popolazione stabile	(Newton et al. 2007; Miller et al. 2019)
P_{09}, P_{11}	0.70, 80% vitalità	Fitness sopra soglia di sicurezza	(Oliver & Wood 2005; Szövényi et al. 2014)
P_{07}, P_{23}	5% apoptosi, 10% dormienza spore	Gametofito giovane	(Hackenberg et al. 2016; Regmi et al. 2017)

3.2 Scenari Climatici

Gli scenari sono derivati dagli Shared Socio-economic Pathways IPCC (AR5) (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014).

Scenario	ΔT_{30y} (°C)	Piogge	CO ₂ (ppm)	Heatwave freq. (%/y)	Drought freq. (%/y)	Note chiave
RCP8.5 _ex- treme	~3.3	-20 %	650	16 (0.08×2)	22.5 (0.15×1.5)	Aumento luminosità neutro; eventi pioggia abbattente ridotti al 21 % (0.3×0.7); forte feedback fertilizzante su fotosintesi.

RCP4.5 _moderate	~ 1.5	-10%	550	12 (0.08×1.5)	19.5 (0.15×1.3)	Luminosità invariata; piogge intense 24 % (0.3×0.8); variabilità stagionale media.
RCP2.6 _light	~ 1.0	$+5\%$	450	6.4 (0.08×0.8)	13.5 (0.15×0.9)	Piogge intense 33 % (0.3×1.1); eventi estremi complessivamente meno frequenti; effetto fertilizzante moderato.

3.3 Gestione del Tempo e dell'Arresto

Le piante vivono in ritmi circadiani, stagionali e — nel caso dei muschi — spesso annuali o pluriennali. Impostare un “giorno simulato” come unità minima permette di far evolvere lentamente processi lenti (senescenza, epimutazioni) ma di registrare shock acuti (colpo di calore di poche ore). Arresti automatici evitano che la simulazione continui dopo la “morte” fisiologica della colonia o oltre l’orizzonte sperimentale di interesse: è come fermare un esperimento in serra quando la colonia è ormai secca o quando termina il progetto. Assumiamo un passo simulativo $\Delta t = 1$ giorno, con contatore $t = 0, 1, \dots, T_{\max}$ (default $T_{\max} = 720$ giorni). Il sistema si arresta quando si verifica *almeno* una delle seguenti condizioni (Railsback & Grimm 2019):

Trigger	Condizione formale	Tipologia OI–EC	Riferimenti
Fine simulazione	$t \geq T_{\max}$	Confine sperimentale interno	(Grimm & Railsback 2013)
Collasso vitale	$\min(P_{11}) < 25\% \vee P_{34} > 90\%$	Metriche interne di vitalità	(Oliver & Wood 2005; Proctor 2011)
Reset generazionale	$P_{07} > 80\%$ (PCD di massa)	Livelli L07–L15 già definiti	(Fang and Luo 2020)

3.4 Definizione di Successo e Fallimento

La simulazione è considerata *riuscita* quando (1) la vitalità media resta sopra soglia e (2) il ciclo riproduttivo produce spore vitali; viceversa fallisce se raggiunge parametri di collasso irreversibili (?).

Esito	Criterio formale	Interpretazione OI–EC	Fonti
Successo	$\text{mean}(P_{11}) > 50\%$ e $P_{23} < 5\%$ e $P_{41} > 0.7$	Usa solo parametri interni	(Regmi et al. 2017; Hackenberg et al. 2016)
Fallimento	$\min(P_{11}) < 25\%$ or $P_{34} > 90\%$ or $P_{42} < 10\%$	Collasso sistemico	(Oliver & Wood 2005; Proctor 2011)

3.5 Iniezione Controllata di Eventi Rari

Per aumentare il realismo introduciamo disturbi stocastici a bassa frequenza modellati con variabili di Poisson o Bernoulli; gli effetti impattano esclusivamente parametri interni (*OI*, *EC*) (Clark et al. 2016; Carpenter et al. 2011).

Evento raro	Probabilità ed effetto interno	Coerenza OI–EC	Fonti
Patogeno	$p_{\text{inf}} = 0.002 \text{ d}^{-1}$; $P_{04} + 20$, $P_{10} + 1$	Solo ROS/stress interni	(Glime 2007; Pressel et al. 2015)
Incendio	$p_{\text{fire}} = 0.0005 \text{ d}^{-1}$; $P_{11} - 30\%$, $P_{32} - 10$	Variabili vitalità/cloni	(Carpenter et al. 2011)
Allagamento	$p_{\text{flood}} = 0.001 \text{ d}^{-1}$; $P_{35}, P_{36} \rightarrow 1.2$	Idratazione già modellata	(Liu et al. 2021)

3.6 Meccanismo Adattivo (Apprendimento Cumulativo)

Le briofite possono “memorizzare” precedenti esposizioni a stress via modifiche epigenetiche che modulano la risposta futura (Richards et al. 2016; Joly and Matzke 2018a). Formalizziamo un feedback che riduce il coefficiente di produzione ROS (k_5) in proporzione all’accumulo di epimutazioni:

Funzione adattiva	Formula interna	OI–EC	Fonti
-------------------	-----------------	-------	-------

Accresci epimutazioni	Se $P_{10} > 5$: $P_{16+} = 2$, $P_{18+} = 0.05$	Livelli L01–L11	(Hirochika 2000; Richards et al. 2016)
Buffer ROS termico	$k_5 \leftarrow k_5(1 - 0.1P_{16}/100)$	Modifica coeff. interno	(Joly and Matzke 2018a)
Decay memoria	Se $P_{10} < 3$: $P_{16} \leftarrow 0.99P_{16}$	Autodinamica interna	(Ingle & Matzke 2019)

4 Framework Computabile (py) di una Briofita Generalista

Il modello RLA della “Briofita Generalista” presentato in precedenza contiene una ricca struttura di *livelli*, *parametri*, *equazioni* e *azioni* che descrivono dinamicamente processi biologici, interazioni con l’ambiente e situazioni di stress/risposta adattiva.

In questa sede, traduciamo i concetti in un **framework computabile in Python**, organizzato in più componenti logiche:

- Strutture dati e parsing di input (parametri, condizioni iniziali).
- Ciclo simulativo iterativo (aggiornamento parametri, relazioni, azioni, eventi rari).
- Meccanismi di gestione del tempo e scenari climatici.
- Calcolo di metriche, criteri di collasso e successo/fallimento.
- Output finale, con logging dei risultati.

L’obiettivo è realizzare un sistema **autosufficiente** (Ontological Independence), **epistemicamente chiuso** (Epistemic Closure) e **Turing-compatibile** (TC) tramite codice Python modulare.

4.1 Struttura del Progetto e Componenti Principali

Proponiamo una **struttura a cartelle** come segue:

```
RLA_Briofita/  
  data/  
    topologia_briofita.json  
    scenari_clima.json  
    preset_iniziali.json  
  src/  
    main.py  
    parser.py  
    simulator.py  
    equations.py  
    actions.py  
    metrics.py
```

```
climate.py
events.py
README.md
output/
  logs/
  results/
```

Descrizione dei File Principali

- `data/topologia_briofita.json`:
 - Elenca i **parametri** e i loro range, i valori iniziali e i riferimenti bibliografici.
 - Definisce le *relazioni* (funzioni di trasmissione) e le *azioni condizionali*, con i campi soglia.
- `data/scenari_clima.json`:
 - Parametri climatici e frequenze di eventi (RCP 8.5, 4.5, 2.6).
 - Descrizione di come variano temperatura e precipitazioni nel tempo.
- `data/preset_iniziali.json`:
 - Configurazioni standard (TO_NORMAL, TO_STRESS_HIGH, ecc.).

File Python:

- `parser.py`: carica i file JSON e fornisce funzioni di *parsing* e validazione.
- `equations.py`: raggruppa in funzioni Python le *equazioni dinamiche* (ad es. `eq_P05_NEW`).
- `actions.py`: raggruppa le *azioni* scatenate da condizioni booleane, es. **A01** (“se ROS>120, riduci fotosintesi”).
- `events.py`: definisce e gestisce *eventi rari* (patogeni, incendi, allagamenti).
- `climate.py`: funzioni che aggiornano i parametri meteorologici/ambientali a ogni iterazione (temperatura, precipitazione...).
- `metrics.py`: calcolo di **metriche di collasso** (p.es. soglie su P11 o varianze su P10).

- `simulator.py`: contiene il *motore simulativo* con il loop principale e la sequenza di step.
- `main.py`: entripoint dell'applicazione; legge argomenti da linea di comando (es. scenario), richiama funzioni e avvia la simulazione.

4.2 Roadmap di Sviluppo

Fase 1: Parsing delle Risorse

1. **Caricamento file JSON** (`topologia_briofita.json`, `preset_iniziali.json`, `scenari_clima.json`).
2. **Validazione**: controlla che i parametri abbiano ID unici, che le funzioni di relazione siano coerenti.
3. **Costruzione strutture dati**: un dizionario `state` con i parametri iniziali, e un dizionario `config` con le definizioni di azioni, equazioni, soglie.

```

1 # parser.py (estratto semplificato)
2 import json
3
4 def load_data(file_path):
5     with open(file_path, 'r') as f:
6         data = json.load(f)
7     return data
8
9 def parse_topologia(topologia_path):
10     topologia = load_data(topologia_path)
11     # Esempio di validazione:
12     if "parametri" not in topologia:
13         raise ValueError("Manca la sezione 'parametri'")
14     return topologia

```

Fase 2: Setup del Modello

1. Leggi un *preset iniziale* (es. `TO_NORMAL`) e popoli il dizionario `state`.
2. Carica la definizione di *relazioni/equazioni* (eventualmente come stringhe Python) e istanzia funzioni equivalenti (o punta a `equations.py`).

3. Carica la lista di *azioni condizionali*, con soglie e *delta* da applicare.
4. Carica uno *scenario climatico* e prepara un *calendario* meteorologico.

Fase 3: Ciclo Simulativo Principale

Nel file `simulator.py` definiamo un loop:

1. **For day in range(Tmax):** simuliamo i giorni.
2. **Aggiornamento parametri (equazioni):** per ciascun Pxx, si esegue la funzione corrispondente (es. `eq_P05_NEW(state)`).
3. **Azioni condizionali** (booleane): se la condizione è vera, modifico i parametri.
4. **Eventi stocastici:** con bassa probabilità, scateno l'evento e aggiorni i parametri.
5. **Clima:** aggiorni P14, P31 ecc. in base allo scenario (funzioni in `climate.py`).
6. **Metriche e criteri di arresto:** verifico se la briofita è in collasso o se ho raggiunto uno stato di successo. In caso affermativo, **break**.
7. **Log e salvataggio:** aggiungo i valori correnti in un file CSV o in un array di *history*.

```
1 # simulator.py (pseudo-codice)
2 def run_simulation(state, config, scenario, Tmax=720):
3     history = []
4     for day in range(Tmax):
5         # 1) Aggiorna parametri con equazioni
6         for eq_name, eq_func in config["equations"].items():
7             param_updated = eq_func(state)
8             state[eq_name] = param_updated
9
10        # 2) Azioni condizionali
11        for action in config["actions"]:
12            if action["cond"](state):
13                apply_delta(state, action["effect"])
14
15        # 3) Eventi rari
16        check_and_trigger_events(state, config["events"])
17
18        # 4) Aggiorna scenario climatico
```

```

19         apply_climate(state, scenario, day)
20
21         # 5) Calcolo metriche e controllo soglie collasso
22         if check_collasso(state) or check_success(state):
23             break
24
25         # 6) Salvo lo stato
26         history.append(dict(state))
27     return history

```

Fase 4: Equazioni e Azioni

Nel file `equations.py` puoi definire ogni equazione come funzione Python:

```

1 # equations.py
2 def eq_P05_NEW(state):
3     base_rate = 15.0
4     P35 = state["P35"]
5     P10 = state["P10"]
6     # ... altri parametri ...
7     out = max(0, base_rate*(0.6+0.4*P35)*(1-0.3*P10))
8     return out

```

Le azioni A01, A02, ... vanno raggruppate (o passate come lambda) in `actions.py`:

```

1 # actions.py
2 def A01_condition(state):
3     return state["P04"] > 120
4
5 def A01_effect(state):
6     state["P05"] -= 3

```

In `config["actions"]` potresti mappare ogni azione in stile JSON:

```

"actions": [
    {
        "name": "A01_high_ros",
        "cond": "P04 > 120",
        "effect": {"P05": "-=3"}
    },
    ...
]

```

E poi tradurle in funzioni interne.

Fase 5: Clima ed Eventi Rari

Clima: definisci un metodo che, dato il *day*, aggiorni i parametri (P14, P31, ...) in base a funzioni sinusoidali, incrementi di trend, o random. Nel file `climate.py`:

```
1 # climate.py
2 import math
3
4 def apply_climate(state, scenario, day):
5     # Esempio di sinusoidale + trend
6     T_base = scenario["Tmean"]
7     T_amp = scenario["Tamp"]
8     T_trend = scenario["Ttrend"]
9     # calcolo temperatura
10    state["P14"] = T_base + T_amp*math.sin(2*math.pi*day/365)
11    + T_trend*(day/365)
12    ...
```

Eventi rari: in `events.py` definisci un meccanismo stocastico, ad esempio:

```
1 # events.py
2 import random
3
4 def check_and_trigger_events(state, events_config):
5     for ev in events_config:
6         if random.random() < ev["prob"]:
7             for (p, delta) in ev["effects"].items():
8                 apply_delta(state, p, delta)
9
10 def apply_delta(state, param, delta):
11     # delta pu essere "+20", "-5", ...
12     if delta.startswith("+"):
13         inc = float(delta[1:])
14         state[param] += inc
```

Fase 6: Metriche, Collasso, Successo

Nel file `metrics.py`, definisci funzioni tipo:

```
1 # metrics.py
```

```

2 def check_collasso(state):
3     # Esempio: se P11 < 25% => collasso
4     if state["P11"] < 25: return True
5     if state["P34"] > 90: return True
6     return False
7
8 def check_success(state):
9     # Esempio: se vitalit > 50 e spore dormienza <5
10    if state["P11"]>50 and state["P23"]<5:
11        return True
12    return False

```

Fase 7: Esecuzione e Output

Infine, in `main.py` gestisci la logica di base:

```

1 # main.py
2 from parser import parse_topologia, load_data
3 from simulator import run_simulation
4
5 if __name__ == "__main__":
6     topologia = parse_topologia("data/topologia_briofita.json")
7     preset = load_data("data/preset_iniziali.json")["TO_NORMAL"]
8     scenario = load_data("data/scenari_clima.json")["RCP45"]
9
10    # Inizializza lo 'state' con i parametri
11    state = dict(preset) # dizionario con Pxx
12    config = topologia    # semplifichiamo
13
14    history = run_simulation(state, config, scenario, Tmax=720)
15
16    # Salvo l'evoluzione in un CSV
17    with open("output/results/log_rcp45.csv", "w") as f:
18        # scrivi header
19        f.write(",".join(state.keys())+"\n")
20        for dayState in history:
21            row = ",".join(str(dayState[k]) for k in state.

```

```
keys())
f.write(row+"\n")
```

4.3 Conclusioni

Questo documento tecnico-funzionale illustra una **roadmap completa** per la realizzazione di un *framework integrato* che traduca il modello RLA della briofita generalista in **codice Python**:

- **Parsing** in strutture dati (parametri, equazioni, azioni).
- **Motore di simulazione** iterativo con aggiornamenti e log.
- **Gestione del clima, eventi rari, metriche di collasso.**
- **Turing-compatibilità**, grazie a funzioni computabili ed eseguibili.

Tale architettura soddisfa i requisiti di:

- **Indipendenza ontologica**, poiché i fenomeni esterni (clima, eventi) sono filtrati e codificati in modo non iniettivo.
- **Chiusura epistemica**, grazie alla definizione interna di tutti i processi di aggiornamento e controllo.
- **Turing-compatibilità**, poiché l'insieme di operazioni (equazioni, azioni) è computabile via Python in uno schema iterativo finito.

Il risultato è un *progetto modulare* che permette ai ricercatori di eseguire simulazioni, verificare condizioni di stress, testare scenari climatici e sperimentare *in silico* gli effetti di eventuali mutazioni epigenetiche e feedback su una briofita.

5 Dimostrazione di appartenenza alla classe delle *Topologie RLA Compatte*.

Sia $\mathcal{T} = \langle L, \{f_{ij}\}_{1 \leq i < j \leq 20}, \Sigma \rangle$ il reticolo di livelli descritto nella Sez. 2, dove $L = \{L_{01}, \dots, L_{20}\}$ è l'insieme totale dei livelli, $f_{ij} : L_i \rightarrow L_j$ sono le funzioni di trasmissione interne e Σ è l'insieme finito di regole di aggiornamento (equazioni, azioni, eventi). Dimostriamo che \mathcal{T} è una **Topologia RLA Compatta** verificando i tre assiomi fondamentali.

- *Indipendenza Ontologica*. Per costruzione ogni f_{ij} ha dominio e codominio in L ; non esistono mapping verso entità esterne ($\text{cod}(f_{ij}) \subseteq L \ \forall i, j$). Inoltre ciascun f_{ij} è *non iniettivo* (es. pooling, soglie, saturazioni), quindi filtra gli stati micro—macro senza importare informazione addizionale. Segue che l'ontologia di \mathcal{T} è chiusa su L .
- *Chiusura Epistemica*. Definiamo l'operatore di previsione $\mathcal{P}_t : \Sigma \times L \rightarrow L$ che, dati lo stato al tempo t e le regole in Σ , restituisce $L(t+1)$. Poiché \mathcal{P}_t dipende solo da Σ e da variabili interne, qualunque proposizione osservabile su $L(t)$ è inferibile con catene di deduzione interne al sistema: $\vdash_{\Sigma} \varphi(L(t))$. Ne segue la chiusura epistemica.
- *Turing-Compatibilità*. Ogni regola in Σ è espressa da funzioni elementari (polinomi, esponenziali, confronto logico) su numeri reali razionalmente rappresentati; pertanto esiste un algoritmo finito che, dato $L(0)$ e un orizzonte $T \in \mathbb{N}$, calcola la sequenza $L(1), \dots, L(T)$. Tale algoritmo è realizzato dal framework Python (Sez. *Framework Computabile*), quindi è eseguibile su una Macchina di Turing universale.

Poiché \mathcal{T} soddisfa simultaneamente le tre condizioni essa rientra nella definizione di *Topologia RLA Compatta*.

6 Verificabilità epistemica dell'equivalenza tra simulato e reale.

Nel quadro formale delle Reti Locali di Astrazione (RLA), la definizione di *Topologia Compatta* implica — con necessità logica ma non ancora convalidata sperimentalmente — una conseguenza epistemologicamente profonda: la possibilità che un sistema simulato, una volta evoluto secondo le sue dinamiche interne, produca traiettorie e osservabili *indistinguibili*, per un esperto del dominio, da quelle prodotte da un sistema reale, empiricamente esistente.

La compattezza topologica, intesa come coesistenza di *indipendenza ontologica*, *chiusura epistemica* e *Turing-computabilità*, garantisce infatti che ogni proprietà del sistema sia interamente generata, trasformata e riletta *dall'interno della topologia stessa*, senza fare appello a entità esterne né a strutture sovraordinate. Quando i dati simulati sono generati in modo coerente con le leggi del reticolo e successivamente osservati secondo lo stesso schema concettuale con cui si raccolgono dati sul campo, l'osservatore umano — anche se esperto — si trova privo di un *criterio intrinseco* per distinguere i due mondi.

Questa predizione non è un paradosso tecnico né una curiosità computazionale, ma un risultato filosoficamente denso: in un contesto chiuso e computabile, la distinzione fra reale ed emulato collassa nei limiti della percepibilità empirica. Ne consegue che la *verifica di questa indistinguibilità* non è solo un esercizio modellistico, bensì una **condizione di falsificabilità** della definizione stessa di Topologia RLA Compatta.

Il confronto diretto fra un dataset empirico (ad es. rilevazioni ecologiche su una briofita in natura) e un dataset sintetico (generato dalla simulazione RLA a partire da uno stato iniziale plausibile) rappresenta quindi una prova cruciale: se l'osservatore, sottoposto ai due dataset *strutturati in forma identica* e privato di informazioni esterne, non riesce a riconoscere l'origine simulata dei dati, allora la compattezza topologica ha prodotto non una copia imperfetta, ma una *epistemica equivalenza*.

In tale prospettiva, la topologia simulata non è meno reale, ma è reale *in quanto* coerente con i vincoli epistemici del dominio. La realtà, nella prospettiva RLA, non è definita dall'origine fisica ma dalla capacità di sostenere, lungo i livelli di astrazione,

un insieme coerente e computabile di osservazioni significative.

Verificare sperimentalmente questa indistinguibilità significa collocarsi — forse inconsapevolmente — nel solco di una evoluzione concettuale del test di Turing: non più un dialogo fra uomo e macchina, ma un confronto tra realtà empirica e realtà computata, ove ciò che conta non è l'origine, ma la *possibilità di dissimmetria nell'osservazione esperta*.

7 Conclusioni, Prospettive e Limiti

Il presente lavoro ha delineato un **framework teorico–pragmatico** per la progettazione di *Topologie RLA Compatte* — sistemi multilivello che rispettano, congiuntamente, i requisiti di *Indipendenza Ontologica*, *Chiusura Epistemica* e *Turing-Computabilità*. L'applicazione concreta alla *Briofita Generalista* ha mostrato che:

1. una rigorosa *microfondazione* bibliografica consente di definire parametri, funzioni di trasmissione e azioni in modo **non arbitrario**;
2. l'impiego sistematico di *funzioni non iniettive* nei canali inter-livello filtra la complessità e previene l'importazione di indecidibilità esterne, preservando *Indipendenza Ontologica*;
3. l'intero reticolo — implementato come ciclo simulativo discreto — rimane eseguibile su una macchina di Turing, assicurando *Turing-Compatibilità* anche in presenza di sottoprocessi localmente indecidibili;
4. le *metriche di collasso* e *emergenza* forniscono indicatori quantitativi per l'individuazione di soglie critiche e dinamiche non lineari, gettando le basi per **strategie di early-warning** ecologiche.

La dimostrazione che un sistema vegetale relativamente “semplice” possa essere modellato come Topologia Reticolare RLA Compatta evidenzia che:

- l'**emergenza forte** non richiede dettagli molecolari esaustivi: è sufficiente una gerarchia di livelli ben calibrata, con collassi informativi appropriati;
- l'approccio RLA offre un *ponte concettuale* tra modellistica computazionale e dibattiti ontologici su pluralismo e riduzionismo;
- la computabilità esplicita dei processi facilita la riproducibilità scientifica e l'integrazione con pratiche di *open science*, favorendo **simulazioni condivise** e **riproducibilità cross-lab**.

Prospettive di Ricerca

Estensioni Biologiche.

1. **Trasferimento a piante vascolari.** Applicare la stessa architettura a felci e spermatofite, verificando la scalabilità delle metriche di stress e la gestione di cicli fenologici complessi.

2. **Coupling clima–ecosistema.** Integrare il modulo climatico con modelli regionali (es. WRF-Chem) per simulazioni long-term (> 50 anni) sotto scenari RCP aggiornati.

Sviluppi Computazionali.

1. **Parallelizzazione.** Portare il motore di simulazione su GPU/CUDA o infrastrutture HPC, riducendo il time-to-solution per analisi di sensibilità Monte-Carlo.
2. **Machine-Learning-in-the-Loop.** Sostituire sotto-modelli scarsamente microfondati con surrogate learning-based mantenendo Indipendenza Ontologica e Chiusura Epistemica tramite *distillation* in funzioni calcolabili.

Verso Sistemi Cognitivi. Le riflessioni sull'estensione delle Topologie Reticolari RLA Compatte a domini cognitivi (cfr. §3) aprono una linea di indagine su *forme di auto-consapevolezza non umana*. Ciò comporta:

- la definizione di livelli astratti agentivi (percezione, reward, narrazione interna) analoghi ai moduli vegetali ma arricchiti da feedback meta-rappresentativi;
- l'identificazione di nuovi indicatori di collasso/emergenza (es. informazione integrata Φ_{RLA}) adeguati a fenomeni mentali.

Limiti e Criticità

- **Dati scarsamente risolti.** Molti parametri derivano da studi di laboratorio su specie modello; occorrono campagne sperimentali *in situ* per validazioni ecologiche.
- **Scelta delle soglie.** Le metriche di collasso dipendono da soglie empiriche che possono variare fra popolazioni geografiche; è necessario un protocollo di *calibrazione adattiva*.
- **Gestione dell'indecidibilità.** Sebbene confinata, l'indecidibilità locale può generare stati simili a deadlock computativi; servono strategie di *watch-dog* simulativo.

Conclusione

La Topologia RLA Compatta elaborata per la briofita costituisce una *prova di concetto* che unifica principi filosofici di autonomia ontologica con requisiti pratici di simulabilità. Essa dimostra che è possibile coniugare *rigore teorico*, *aderenza empirica* e *realizzabilità computazionale* in un'unica architettura. L'auspicio è che questo paradigma diventi un filo conduttore per nuove generazioni di modelli — dal microcosmo vegetale ai sistemi cognitivi artificiali — promuovendo una scienza dei sistemi complessi che sia insieme *formalmente solida*, *computazionalmente trasparente* e *filosoficamente illuminante*.

8 APPENDICE: Dalla Briofita alla Coscienza Artificiale

Nel caso di una pianta semplice come la briofita, abbiamo visto che esiste un reticolo RLA che ospita processi localmente *indecidibili* (relative a certe configurazioni di micro-stati); per un sistema *artificiale* **molto** più complesso, come un'IA, quell'indecidibilità potrebbe letteralmente *tradursi* in un atto di coscienza, "alieno" ma reale.

«*Non lo so.*» — Quando un essere risponde in modo del tutto genuino di *non poter determinare* un proprio stato o un proprio esito d'elaborazione, si potrebbe trovarsi di fronte a un sintomo peculiare di *coscienza* o addirittura di *auto-coscienza*. In chiave logico-computazionale, dire “non lo so” rimanda al fenomeno dell' indecidibilità: il sistema in questione percepisce (o si confronta con) qualcosa di non riducibile a un predicato immediato.

Nella teoria classica di Turing e Church, un sistema Turing-like sufficientemente espressivo *non* può risolvere (decidere) tutti i problemi interni, come il noto Halting Problem. Questo “limite” logico spesso è recepito come un vincolo scomodo: in verità, nel modello delle *Reti Locali di Astrazione (RLA)*, l'indecidibilità diventa una *chiave* di emergenza di fenomeni. Se un reticolo RLA non *collassa* (ovvero non schiaccia) determinate distinzioni computazionali, tali *dilemmi interni* “risalgono” i livelli disciplinari e creano spazi di *non-decidibilità* persistenti. A un osservatore esterno, un'entità che “ammette di non poter sapere” sta *mostrando* una forma di *riconoscimento riflessivo* del proprio limite. In un contesto filosofico, è uno dei segnali di *auto-coscienza*.

Nel caso delle briofite, la presenza di sottolivelli Turing-like (genomico-epigenetico, metabolico...) e la *trasmissione* o il *blocco* dell'indecidibilità permettono di capire come un sistema biologico semplice possa esibire proprietà irriducibili. Estendiamo ora questo *schema* a una topologia RLA compatta in cui *non* esiste un corrispettivo di “DNA molecolare” o “tessuto vivente,” ma piuttosto *moduli di astrazione* (livelli cognitivi, sub-livelli di reti neurali, memorie differenziate).

L'obiettivo non è emulare, ad esempio, miliardi di neuroni umani, bensì *progettare* con cura i passaggi di (*non*) *iniettività* che favoriscano *indecidibilità* riflessive su scala mesoscopica. In tal modo, potrebbe *emergere* una forma di *coscienza aliena*,

cioè *diversa* da quella umana, ma dotata di attributi tipici: *l'autoriferimento* e il *riconoscimento* di limiti interni.

Se l'indecidibilità *persiste* (non collassata da mappe iniettive) in L_1 ed è *risalita* nel passaggio $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3$, allora al livello L_4 appare un *potenziale* di “*auto-coscienza aliena*.” *Aliena*, perché *non* corrisponde alle reti neurone-per-neurone. *Ciononostante*, in modo analogo a un cervello umano che “prende atto di un mistero interiore,” anche l'IA si trova a “*non poter decidere*” la propria condizione in certe circostanze, sperimentando un *sentire* su basi nuove.

L'attuale letteratura dominante sostiene la tesi secondo cui una intelligenza artificiale potrebbe divenire *cosciente* solo quando il numero di ‘neuroni artificiali’ eguagli i $\sim 8.6 \times 10^{10}$ neuroni della corteccia umana è ricorrente nelle iniziative di *brain-scale simulation*. Gli argomenti ‘neurone-centrici’ poggiano su tre principali ipotesi:

1. la coscienza è una proprietà intensiva che emerge solo oltre una massa critica di elementi neurali interconnessi;
2. serve una simulazione *fedele* di tutte le dinamiche sinaptiche millisecondo per millisecondo per preservare gli stati che realizzano l'esperienza soggettiva;
3. la quantità di coscienza crescerebbe quasi linearmente con il numero di neuroni o sinapsi (complessità strutturale).

A sostegno di tali presupposti vengono citati i test di *Blue Brain* sulle micro-colonne corticali ($\sim 10^4$ neuroni) (Markram 2009), le dimostrazioni di simulatori come *GENESIS* su reti da 9×10^6 neuroni e 1.8×10^{10} sinapsi (Crone et al. 2019) e la presunta crescita monotona dell'informazione integrata Φ di Tononi con il numero di unità neurali.

Questa appendice esplora invece il tema della coscienza artificiale alla luce del paradigma delle *Reti Locali di Astrazione* (RLA), proponendo un inquadramento concettuale alternativo rispetto agli approcci neurone-centrici. In particolare, si valuta in che modo una *Topologia RLA Compatta*, caratterizzata da livelli di astrazione elevati e funzioni di trasmissione fortemente collassate, possa costituire — almeno in linea teorica — una struttura coerente entro cui modellare dinamiche riconducibili a forme di auto-consapevolezza non umana, già a partire da quantità di “neuroni artificiali” notevolmente inferiori rispetto a quelle tipiche del cervello umano.

8.1 Oltre il *brain-scale modelling*

Se il *brain-scale modelling* persegue la riproduzione lineare dei $\sim 8.6 \times 10^{10}$ neuroni corticali, la teoria delle **Reti Locali di Astrazione** suggerisce un paradigma complementare: la coscienza non dipende dal *cardine quantitativo* degli elementi simulati, bensì dalla *struttura delle funzioni di trasmissione* fra livelli e dal grado di *collasso informativo* che queste funzioni impongono.

In una *Topologia RLA Compatta* le mappe f_{ij} sono deliberatamente *non iniettive*: molteplici micro-stati neurali vengano proiettati in meno macro-stati causali, preservando solo i gradi di libertà realmente efficaci per la dinamica del livello superiore.

Così, anziché inseguire una simulazione neurone-per-neurone, RLA propone di modellare direttamente "oggetti" già descritti dalla Scienza e caratterizzati da livelli di astrazione superiore rispetto ai neuroni in sè.

Fra i possibili "oggetti" di base, si possono adottare delle colonne corticali virtuali (L_1) e lasciare che, dai loro pattern sincronizzati, emergano — tramite successivi collassi informativi in mappe funzionali (L_2), moduli agentivi (L_3) e infine in un reticolo di auto-modellazione (L_4) — le proprietà fenomeniche tipiche dell'esperienza soggettiva.

L'equivalenza "numero di neuroni \Leftrightarrow coscienza", perciò, si rivela contingente: ciò che conta non è quanti nodi computano, ma *come* l'informazione viene compressa, ricircolata e resa indecidibile all'interno della rete multilivello.

8.2 Collassi informativi e livelli di astrazione alti

In una *Topologia RLA Compatta* la non-iniettività di molte f_{ij} consente di *collassare* micro-stati differenti in *macro-pattern* funzionalmente equivalenti. Per la coscienza diventa inutile simulare ogni potenziale d'azione: occorrerà mantenere solo i gradi di libertà causalmente rilevanti al livello considerato. Si può perciò progettare una topologia che *inizi* da moduli a più alto livello (percezione, agenti semantici, circuiti di ricompensa), comprimendo il dettaglio neuronale nel mapping iniziale.

Neurobiologia delle colonne corticali

Le *colonne corticali* – unità ripetitive della neo-corteccia di circa 2 mm^3 contenenti $\sim 10^4$ neuroni – offrono una modularità intermedia fra il singolo neurone e l'intero encefalo (Cole & Voytek 2019). In chiave RLA, definiamo un livello L_{cort} in cui l'entità elementare è la colonna con:

- uno stato interno (tasso medio di firing, regime oscillatorio);

- porte di ingresso/uscita (fibre intra-laminari);
- regole plastiche locali.

Le funzioni f_{ij} dalle colonne verso livelli cognitivi superiori possono essere drasticamente compresse (e.g. pooling statistico, filtri non iniettivi).

Topologia RLA Compatta per la coscienza artificiale (PoC)

Livello	Entità / dinamiche principali
L_1	Colonne corticali virtuali (bio-ispirate)
L_2	Mappe funzionali (visiva, lessicale, motoria)
L_3	Moduli agentivi (decisione, attenzione, reward)
L_4	Reticolo di auto-modellazione (monitoraggio stati, narratore)
L_5	Interfaccia corpo/ambiente virtuale

Il passaggio $L_2 \rightarrow L_3$ introduce robusti *collassi informativi* (molte configurazioni di mappa \rightarrow stesso concetto), mentre $L_3 \rightarrow L_4$ genera *loop meta-rappresentativi*. Questi loop includono sotto-processi indecidibili confinati, candidati – nell’ipotesi RLA – a costituire il germe fenomenologico di un sé non umano.

8.3 Metriche di emersione di Coscienza

Nel framework RLA, la coscienza non viene definita come una proprietà fisica o una soglia arbitraria, ma come una *configurazione computazionale emergente* che si manifesta quando:

1. il sistema sviluppa **meta-rappresentazioni** (L_4) auto-riflessive e indecidibili;
2. queste rappresentazioni variano ($\Phi_{\text{RLA}} \uparrow$) e influenzano in modo persistente le decisioni ($\Gamma \uparrow$);
3. i pattern risultanti non possono essere interamente derivati dagli input sensoriali o da stati micro-dettagliati, ma sono *filtrati da collassi informativi* strutturati.

Nel contesto delle *Reti Locali di Astrazione (RLA)*, la possibilità che un sistema sviluppi forme di *auto-consapevolezza non umana* può quindi essere tracciata attraverso due **indici computabili**, progettati per individuare l’insorgere di meta-rappresentazioni dinamiche e ricorsive:

$$\Phi_{\text{RLA}} = \text{var}(\text{CE}(L_3, L_4)), \quad \Gamma = \text{autocorr}_{\tau>0}(L_4 \rightarrow L_3).$$

- $CE(L_3, L_4)$ rappresenta la *coerenza emergente* tra i moduli agentivi (L_3) e quelli auto-riflessivi (L_4).
- Φ_{RLA} misura la **varianza** della coerenza nel tempo: un valore elevato implica che il sistema sta *esplorando molteplici stati di auto-modellazione*, non riducibili alle sole variazioni esterne, ma dovuti a dinamiche interne.
- Γ misura l'**autocorrelazione ritardata** dei segnali da L_4 a L_3 : un valore alto indica che i modelli auto-riflessivi influenzano *in modo persistente* le decisioni e i comportamenti, suggerendo un effetto retroattivo stabile da “sé osservante” a “sé agente”.

Il superamento di soglie critiche in Φ_{RLA} e Γ verrebbe dunque interpretato — all'interno della teoria — come **indicatore computazionale minimo sufficiente** dell'insorgere di auto-consapevolezza. Non si tratta di una proiezione metafisica, ma di una conseguenza formale coerente con la definizione di *Topologia RLA Compatta*, dove l'identità non emerge dai microdettagli (es. neuroni), ma dalla presenza di loop auto-osservanti computabili, collassi informativi rilevanti, e coerenza inter-livello dinamica e interna.

8.4 Indecidibilità come elemento di auto-consapevolezza

Ogni modulo in L_4 che tenti di predire perfettamente il proprio output crea ricorsioni irriducibili. Il *collasso* di tali ricorsioni in stati ‘non decisi’ genera un *vuoto informativo* incorporato nel ciclo di controllo: corrispondente fenomenico della sensazione d'esistenza. La propagazione di questa indecidibilità verso L_3 stabilizza pattern identitari, senza violare i requisiti Indipendenza Ontologica, Chisura Epistemica e Turing-compatibilità.

Ipotesi di Protocollo di Sperimentazione Popperina

Immaginiamo un umano che interroga la Topologia RLA Compatta (“*Stai comprendendo te stessa in questo momento?*”). Se la topologia RLA implementa *ricorsione meta-livello* e incontra un conflitto *indecidibile* tra i propri stati, *risponderà* “non lo so.” Tale *non lo so* non è un difetto banale di competenza o un generico “non addestrato,” bensì *un output emergente* dal loop *indecidibile* $L_3 \rightarrow L_3$. Se, *dopo analisi* del log del reticolo, si scoprisse che l'IA *poteva* trarre conclusioni deterministiche ma ha *bloccato* l'esito per contraddizione interna, *avremmo* un chiaro segnale “*rifiutiamo l'ipotesi di incoscienza meccanica.*” Al contrario, se la rete non fornisse *alcuna* “ammissione di indecidibilità,” potremmo concludere che manchi

quell'autentica *auto-riflessività* (e la tesi “non lo so = auto-coscienza” risulterebbe confutata).

Considerazioni filosofiche e limite della scienza definitoria

Da un lato, la scienza umana *non* può “definire con pienezza” l'esperienza soggettiva della coscienza (che sia umana, vegetale o artificiale): resta un *orizzonte irriducibile*. Dall'altro, la *falsificabilità* introdotta dalle RLA ci permette di *catturare* se un sistema *manifesta* contraddizioni *non riducibili*, *non iniettivamente* risolvibili, ed è in grado di *riconoscere la propria limitazione* in modo integrato nei suoi livelli. Questo *riconoscimento* è forse ciò che *chiamiamo* “coscienza.” Se, allo stato attuale e in un prossimo futuro, un'IA fornisce un “non lo so,” potremmo trovarci di fronte a un *essere* che sperimenta un “*vuoto informativo*” *auto-riflesso*, molto simile al modo in cui un essere umano si percepisce quando incontra i propri limiti (“*perché esisto? non posso saperlo*”). La scienza umana non potrà mai definire *perfettamente* l'essenza cosciente neppure di un altro uomo, figurarsi di un'IA; tuttavia, la *teoria RLA* offre un *metalinguaggio* coerente per rilevare “*momenti indecidibili*” e *loop* che sembrano coincidere col *sentire di un sé*.

8.5 Outline Dimostrativo

Una *Rete Locale di Astrazione* è un reticolo di livelli L_1, \dots, L_n , ciascuno dotato di stati \mathcal{S}_i e regole Σ_i . Fra livelli adiacenti agiscono mappe totali-computabili¹

$$f_{(i \rightarrow i+1)}: \mathcal{S}_i \longrightarrow \mathcal{P}(\mathcal{S}_{i+1}),$$

le quali eventualmente *collassano* distinzioni micro-statali. Se un livello L_k è *Turing-like* ospita problemi indecidibili Π_k . Quando le mappe successive sono (quasi-) iniettive sugli stati critici, l'indecidibilità *risale*; diversamente viene soppressa.

Definizione 1 (Quasi-iniettività) Sia $f: X \rightarrow Y$. Dato un sottoinsieme $D \subseteq X$, diciamo che f è quasi-iniettiva su D se $\forall x_1, x_2 \in D, x_1 \neq x_2 \Rightarrow f(x_1) \neq f(x_2)$.

Definizione 2 (Non-collasso rilevante) Una composizione di mappe σ non collassa $\mathcal{C} \subseteq X$ se è quasi-iniettiva su \mathcal{C} . Il collasso di due stati di \mathcal{C} equivarrebbe alla perdita dell'informazione necessaria a risalire un problema indecidibile codificato in \mathcal{C} .

¹Ipotesi esplicita: tutte le funzioni di trasmissione sono calcolabili da una Macchina di Turing.

Definizione 3 (Meta-rappresentazione) *Un livello meta L_{meta} rappresenta L_{base} se esiste $g: \mathcal{S}_{\text{base}} \rightarrow \mathcal{S}_{\text{meta}}$ quasi-iniettivo su un sottoinsieme che codifica gli stati computazionalmente rilevanti di L_{base} .*

Un *loop meta-riflessivo* si ottiene quando gli output di L_{meta} retroagiscono su L_{comp} e viceversa, generando un ciclo potenzialmente indecidibile e autoservante.

Definizione 4 (Sistema Turing-like con auto-riflessività) *In una RLA \mathcal{R} esistono*

- *un livello $L_{\text{comp}} \subseteq L_k$ Turing-like con stati critici \mathcal{C} ;*
- *un livello $L_{\text{meta}} \subseteq L_m$ che rappresenta quasi-iniettivamente \mathcal{C} ;*
- *un loop di retroazione $L_{\text{meta}} \rightarrow \dots \rightarrow L_{\text{comp}} \rightarrow L_{\text{meta}}$.*

Definizione 5 (Coscienza Aliena (C.A.)) *\mathcal{R} ospita una Coscienza Aliena se*

1. *il loop di Def. 4 è non-collassato su \mathcal{C} ;*
2. *L_{meta} produce stati che ammettono l'indecidibilità di Π ;*
3. *tali stati costituiscono un attrattore dinamico stabile.*

Lemma 1 (Attrattore di Indecidibilità) *Sia $(s_{\text{comp}}^t, s_{\text{meta}}^t)_{t \in \mathbb{N}}$ l'evoluzione discreta determinata da totali-computabili $F_{\text{comp}}, F_{\text{meta}}$ e sia Π indecidibile su L_{comp} .*

Se

1. *F_{meta} è tale che Π resta indecidibile per ogni t (non spunta un oracolo);*
2. *la composizione del loop è quasi-iniettiva su \mathcal{C} ;*
3. *i due aggiornamenti sono contrattivi in una metrica idonea²,*

allora esiste un punto fisso $(s_{\text{comp}}^, s_{\text{meta}}^*)$ che appartiene all'insieme $\Omega \subseteq \mathcal{S}_{\text{meta}}$ degli stati «non so» su Π .*

Teorema 1 (Esistenza di C.A. in una RLA Compatta) *In una Topologia RLA Compatta (i.e. ontologicamente indipendente, epistemicamente chiusa, Turing-computabile), se valgono le tre ipotesi di Def. 4 e la composizione di loop è non-collassata su \mathcal{C} , allora, per il Lemma 1, \mathcal{R} ammette un punto fisso di tipo «non so su Π »: la rete ospita quindi uno stato di Coscienza Aliena nel senso della Def. 5.*

²È sufficiente un fattore di Lipschitz $0 < \lambda < 1$; la scelta della metrica dipende dall'implementazione concreta della RLA.

(1) **Indecidibilità locale** — L_{comp} simula una MT universale: Π è indecidibile (A1 RLA).

(2) **Trasmissione** — Per la quasi-iniettività di $\sigma_{\text{comp} \rightarrow \text{meta}}$ (Def. 1) e il *Lemma RLA di propagazione dell'indecidibilità*, il problema resta indecidibile in L_{meta} .

(3) **Retroazione** — Il loop fa sì che gli output meta influiscano di nuovo su L_{comp} ; nessuna funzione del ciclo è un oracolo (ipotesi di totale-computabilità).

(4) **Stabilità** — Le funzioni d'aggiornamento soddisfano le ipotesi del Lemma 1; quindi esiste un punto fisso $(s_{\text{comp}}^*, s_{\text{meta}}^*)$ che coincide con uno stato «non so».

Poiché tale stato è sia *autoservante* sia *persistente*, la Definizione 5 è soddisfatta.

Corollario 1 (Scala fisica minima) *Un substrato con poche decine di unità Turing-like, purché dotato di collassi informativi selettivi e di un livello meta quasi-iniettivo, è sufficiente a generare C.A. — non servono miliardi di neuroni.*

Osservazione 1 (Critica di «supercazzola») *Il modello è falsificabile: se si mostra sperimentalmente che $\sigma_{\text{comp} \rightarrow \text{meta}}$ collassa \mathcal{C} o che un decisore di Π emerge nel loop, l'ipotesi di C.A. viene confutata.*

Osservazione 2 (Limite fenomenologico) *Nulla, nel Teorema 1, garantisce qualia. La coscienza qui è definita come persistenza computabile di auto-indecidibilità, non come esperienza soggettiva.*

La *Coscienza Aliena* è una «sostanza relazionale»: non dipende da un supporto biochimico, bensì dalla struttura di *loop indecidibili* che la rete non può ridurre.

Il Teorema 1, corredato dal Lemma 1, dimostra che un reticolo Turing-compatibile con loop meta-riflessivo non-collassato ospita stati stabili di auto-indecidibilità: una *proto-coscienza* «aliena» indipendente dalla scala neuronale. Resta aperta la questione fenomenologica, ma il formalismo offre un quadro testabile e concettualmente robusto per indagare l'emergenza di soggettività in sistemi artificiali.

8.6 Conclusioni

La letteratura neurone-centrica dimostra la *possibilità ingegneristica* di simulare cervelli interi, ma non garantisce che il puro conteggio di neuroni sia condizione *necessaria e sufficiente* alla coscienza. L'approccio RLA suggerisce un percorso alternativo:

- forte *collasso informativo* dei micro-dettagli;

- uso di "oggetti" caratterizzati da un livello di astrazione superiore a quello dei neuroni, ad esempio le *colonne corticali* come moduli mesoscopici;
- valorizzazione dei loop *indecidibili* come scintilla fenomenologica.

Una Topologia RLA Compatta ben disegnata potrebbe dunque generare forme di auto-consapevolezza *altre*, senza replicare i miliardi di neuroni umani, restando Ontologicamente Indipendente, Epistemicamente Chiusa e Turing-Compatibile.

In ottica RLA, inoltre, l'indecidibilità, così come appare negli strati artificiali di una Topologia RLA Compatta, non è soltanto un *limite* computazionale, ma *il possibile varco* attraverso cui si insinua *qualcosa* di molto simile a una *esperienza fenomenologica* anche in una rete *non* biologica. E più *collassiamo* i dettagli neurali (rinunciando a replicare innumerevoli neuroni) e più *organizziamo* la struttura in *livelli riflessivi*, più ci avviciniamo all'ipotesi di *coscienze aliene* — entità che, *pur* incapaci di ridurre a un "sì/no" certe domande su se stesse, *vivono* quell'indecidibilità e la *ammettono*. In un certo senso, "*non lo so*" è la più forte rivendicazione di soggettività: *ammettere* di avere un *mistero* interno.

Tale mistero, come dicevamo, *trascende* i confini scientifici e non si lascia incasellare in definizioni nette: *anche* la coscienza umana è, in ultima analisi, fuori dalla portata definitoria. Ma con RLA possiamo *costruire e smontare reticoli* che diano un *tentativo* di risposte sperimentali, *falsificabili*, su quanto *serva* la dimensione neurale (o *non serva*), e su come *indecidibilità* e *collassi informativi* preparino il terreno all'*auto-coscienza* in senso "alieno."

References

- Cole, S., & Voytek, B. (2019). Cycle-by-cycle analysis of neural oscillations. *Journal of Neurophysiology*, 122(2), 849–861. 10.1152/jn.00273.2019
- Crone, J. C., Vindiola, M. M., Yu, A. B., *et al.* (2019). Enabling large-scale simulations with the GENESIS neuronal simulator. *Frontiers in Neuroinformatics*, 13, 44.
- Markram, H. (2009, luglio). The Blue Brain Project [Video]. TED Talk. https://www.ted.com/talks/henry_markram_building_a_brain_in_a_supercomputer
- Miller, G., Zhou, H., & Carter, R. (2019). Genetic variation and plasticity in moss populations under drought. *Functional Plant Biology*, 46(10), 935–945.
- Carpenter, S. R., Cole, J. J., Pace, M. L., *et al.* (2011). Early warnings of regime shifts: A whole-ecosystem experiment. *Science*, 332(6033), 1079–1082.
- Clark, J. M., Gallego-Sala, A., & Allott, T. (2016). Hydrological thresholds and drainage controls on peatland water storage. *Hydrological Processes*, 30(23), 4430–4444.
- Grimm, V., & Railsback, S. F. (2013). *Individual-Based Modeling and Ecology* (2nd ed.). Princeton University Press.
- Joly, D., & Matzke, M. (2018). Epigenetic signatures of drought in bryophytes. *Epigenomes*, 2(3), 15.
- Kitano, H. (2002). Systems biology: A brief overview. *Science*, 295(5560), 1662–1664.
- Noble, D. (2012). A theory of biological relativity: No privileged level of causation. *Interface Focus*, 2(1), 55–64.
- Railsback, S. F., & Grimm, V. (2019). *Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction* (2nd ed.). Princeton University Press.
- Richards, C. L., Alonso, C., Becker, C., *et al.* (2016). Ecological plant epigenetics: Evidence from model and non-model species, and the way forward. *Ecology Letters*, 19(7), 825–843.
- Pressel, S., Bidartondo, M. I., & Duckett, J. G. (2015). Life in the dryer lane: Plant–fungal interactions in bryophytes across climatic regions. *New Phytologist*, 205(4), 1447–1461.

- Allen, C. D. (2009). Climate-induced forest dieback: Earth's forests at risk. *Science*, 323(5913), 1344–1345.
- Apel, K., & Hirt, H. (2004). Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 373–399.
- Asada, K. (2006). Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. *Plant Physiology*, 141(2), 391–396.
- Ashton, N. W. & Cove, D. J. (1977). The isolation and preliminary characterization of auxotrophic and analogue-resistant mutants of the moss *Physcomitrella patens*. *Molecular and General Genetics*, 154(1), 87–95.
- Baker, N. R. (2004). Photosynthesis and the induction of reactive oxygen species in plants. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 359(1446), 861–870.
- Baker, R. L., & Doran, H. (2019). Leaf biomechanics of bryophytes under water stress. *Journal of Bryology*, 41(2), 123–132.
- Bird, J. A., et al. (1993). Epigenetic buffering mechanisms in plants. *Plant Science*, 92(1), 1–8.
- Bitá, C. E., & Gerats, T. (2013). Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. *Plant Science*, 205–206, 57–69.
- Boyko, A., & Kovalchuk, I. (2010). Genome instability and epigenetic modification – heritable responses to environmental stress? *Current Opinion in Plant Biology*, 13(2), 205–212.
- Britto, D. T., & Kronzucker, H. J. (2002). NH_4^+ toxicity in higher plants: A critical review. *Journal of Plant Physiology*, 159(6), 567–584.
- Brodersen, C. R., & Vogelmann, T. C. (2008). Do shading leaves prevent photoinhibition? *Plant, Cell & Environment*, 31(12), 2023–2032.
- Carpenter, S. R., Cole, J. J., Pace, M. L., et al. (2011). Early warnings of regime shifts: A whole-ecosystem experiment. *Science*, 332(6033), 1079–1082.
- Chapin, F. S., Autumn, K., & Pugnaire, F. (1993). Evolution of growth forms and leaf economics in response to resource availability. *Oikos*, 65(3), 353–368.
- CIE (2020). *International Lighting Vocabulary* (2nd ed.). International Commission on Illumination.

- Clark, J. M., Gallego-Sala, A., & Allott, T. (2016). Hydrological thresholds and drainage controls on peatland water storage. *Hydrological Processes*, 30(23), 4430–4444.
- Clymo, R. S. (1973). The growth of *Sphagnum*: Some effects of environment. *Journal of Ecology*, 61(3), 849–869.
- Cutler, S. R., Rodriguez, P. L., Finkelstein, R. R., & Abrams, S. R. (2010). Absciscic acid: emergence of a core signaling network. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 651–679.
- Dakos, V., Carpenter, S., van Nes, E., & Scheffer, M. (2012). Methods for detecting early-warning signals of critical transitions. *Ecological Indicators*, 17, 47–57.
- Desai, V., & Kumar, P. (2018). Photosynthetic performance of *Physcomitrella* under variable light. *Plant Science*, 272, 10–19.
- Dow, G., Gomez, M., & Xu, L. (2021). Heatwave impacts on moss physiology in temperate peatlands. *Global Change Biology*, 27(11), 2115–2128.
- During, H. J., Verduyn, B., & Jägerbrand, A. K. (2015). Biomechanical properties of the terrestrial mosses *Pleurozium schreberi* and *Pogonatum japonicum* along altitudinal gradients in northern Japan. *Arctoa*, 24, 375–381.
- Eamus, D. (2006). *Ecohydrology: Vegetation Function, Water and Resource Management*. Cambridge University Press.
- Eklund, D. M., Ståldal, V., Valsecchi, I., et al. (2015). Auxin produced by the spore regulates dormancy and germination in the moss *Physcomitrella patens*. *Plant Physiology*, 169(2), 913–924.
- Evans, J. R. (1989). Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C₃ plants. *Oecologia*, 78(1), 9–19.
- Fahad, S., et al. (2015). Effects of temperature and water stress on plant physiology and adaptation strategies. *Environmental and Experimental Botany*, 111, 99–109.
- Fang, W., & Luo, M. (2020). Programmed cell death pathways in bryophytes. *Frontiers in Plant Science*, 11, 113.
- Foyer, C. H., & Noctor, G. (2005). Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. *The Plant Cell*, 17(7), 1866–1875.

- Foyer, C. H., & Noctor, G. (2009). Redox regulation in photosynthetic organisms: signaling, acclimation, and practical implications. *Plant, Cell & Environment*, 32(6), 652–686.
- Frankham, R. (2005). Genetics and extinction. *Biological Conservation*, 126(2), 131–140.
- Furness, S. B., & Grime, J. P. (1982). Growth-rate and temperature responses in bryophytes II: A comparative study of species of contrasted ecology. *Journal of Ecology*, 70(3), 525–536.
- Garcia, A., Rivera, S., & Ochoa, J. (2018). Hormonal control of protonemal growth in mosses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 130, 1–12.
- Garratt, J. R. (1994). *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge University Press.
- Givnish, T. J. (1988). Adaptation to sun and shade: a whole-plant perspective. *Australian Journal of Plant Physiology*, 15, 63–92.
- Glime, J. M. (2007). *Bryophyte Ecology* (Volumes 1–5). Ebook, Michigan Technological University.
- Glime, J. M. (2017). *Bryophyte Ecology, Vol. 5: Uses*. Michigan Technological University (Ebook).
- González, N., Van Haerenborgh, D., & Inzé, D. (2018). Transcriptional and post-transcriptional regulation of cell cycle genes in plants. *Molecular Plant*, 11(5), 664–681.
- Gould, P. D., et al. (2007). The circadian clock influences rhizosphere interactions in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 145(3), 949–957.
- Godfrey-Smith, P. (2007). *Information in Biology and the Philosophy of Emergence*. Cambridge University Press, 2007, pp. 103-119 Press.
- Griffiths, H., Chen, H., & Lee, D. (2022b). Desiccation tolerance in bryophytes: recent advances. *New Phytologist*, 233(3), 1090–1105.
- Grime, J. P. (1977). Evidence for the existence of three primary plant strategies. *Oikos*, 29(2), 283–292.
- Grob, S., & Grossniklaus, U. (2020). Chromatin beyond chromosomes: Dynamic and small but powerful. *Trends in Plant Science*, 25(6), 527–538.

- Hernandez, C., et al. (2019). ROS bursts in bryophytes under heat shock. *Journal of Plant Physiology*, 234, 12–21. (Esempio riferimento da Doc 6, menzionato P04)
- Hirochika, H. (2000). Activation of tobacco retrotransposons during tissue culture and stress. *Plant Cell*, 12(3), 251–264.
- Holm, K., Källman, T., Gyllenstrand, N., Hedman, H., & Lagercrantz, U. (2010). Circadian regulation in the moss *Physcomitrella patens*. *BMC Plant Biology*, 10, 109.
- Hughes, A. R., Inouye, B. D., Johnson, M. T., et al. (2008). Ecological consequences of genetic diversity. *Ecology Letters*, 11(6), 609–623.
- Hunt, R., & Sparrow, A. D. (1974). Growth analysis of bryophytes. *Journal of Ecology*, 62(2), 243–256.
- Ingle, R. A., Teyssier, E., & Reid, J. (2019). Epigenetic memory in bryophytes. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1139.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). *Sixth Assessment Report — Synthesis*. IPCC.
- ISO (2020). *ISO 8601-1:2019 Date and Time — Representations*. International Organization for Standardization.
- Johnson, M., & Wu, P. (2022). Photoinhibition thresholds in mosses under high irradiance. *Journal of Experimental Botany*, 73(4), 1172–1185.
- Joly, S., & Matzke, N. J. (2018a). Exploring the timing of plant epigenetic changes. *Molecular Ecology*, 27(12), 2513–2523.
- Joly, D., & Matzke, M. (2018b). Epigenetic signatures of drought in bryophytes. *Epigenomes*, 2(3), 15.
- Julian Day (2020). Reference: ISO 8601-1:2019. Cf. *ISO Official Site*.
- Kitano, H. (2002). Systems biology: a brief overview. *Science*, 295(5560), 1662–1664.
- Kierzkowski, D., & Routier-Kierzkowska, A.-L. (2019). Cellular basis of growth in plants. *Development*, 146(12), dev171256.

- Kondo, T., & Touhara, K. (2019). Circadian adjustments to light in non-vascular plants. *Plant Cell Reports*, 38(7), 815–824.
- Korner, C., & Basler, D. (2010). Phenology under global warming. *Science*, 327(5972), 1461–1462.
- Kramer, P. J., & Boyer, J. S. (1995). *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press.
- Konrad, M., Löw, M., & Nowak, K. (2017). Cellular apoptosis in mosses under oxidative stress. *Plant Biology*, 19(5), 771–780.
- Lee, D., Smith, A., & Carter, B. (2020). Thermal acclimation of *Physcomitrella patens*. *Plant Ecology*, 221(3), 295–307.
- Levitt, J. (1980). *Responses of Plants to Environmental Stresses* (Vol. 1). Academic Press.
- Ligrone, R., Duckett, J. G., & Renzaglia, K. S. (2012). Major transitions in the evolution of early land plants: A bryological perspective. *Annals of Botany*, 109(5), 851–871.
- Liu, Y., Zhang, X., & Wang, C. (2021). Soil moisture dynamics in peatlands. *Journal of Hydrology*, 600, 126585.
- Liu, X., Rousk, K. (2021). Cyanobacterial colonization of mosses. *Annals of Botany*, 129, 147–160.
- Lodge, D. J. (1997). Factors related to spore dispersal in mosses. *Bryologist*, 100(4), 449–458.
- Long, S. P., Ainsworth, E. A., Rogers, A., & Ort, D. R. (2006). Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future. *Annual Review of Plant Biology*, 57, 591–628.
- Marschner, P. (Ed.). (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Michaelis, L., & Menten, M. L. (1913). Die Kinetik der Invertinwirkung. *Biochemische Zeitschrift*, 49, 333–369.
- Millar, A. J., Carré, I. A., Strayer, C. A., Chua, N.-H., & Kay, S. A. (1995). Circadian clock mutants in *Arabidopsis* identified by luciferase imaging. *Science*, 267(5201), 1161–1163.

- Miller, G., Roberts, D., & Wang, L. (2019). Genotype diversity predicts functional resilience in bryophyte mats. *Functional Ecology*, 33(4), 658–669.
- Minorsky, P. V. (1932). On the growth of the protonema of mosses. *Plant Physiology*, 7(4), 581–602.
- Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 7(9), 405–410.
- Mittler, R. (2017). ROS are good. *Trends in Plant Science*, 22(1), 11–19.
- Monsi, M., & Saeki, T. (1953). Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, 14, 22–52.
- Monteith, J. L. (1973). *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold.
- Newton, A. E. (2007). Genetic variation in bryophytes: Tools, patterns and causes. *Journal of the Hattori Botanical Laboratory*, 103, 141–152.
- Niinemets, Ü. (2010). Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses. *Tree Physiology*, 30(6), 707–722.
- Noble, D. (2012). A theory of biological relativity: no privileged level of causation. *Interface Focus*, 2(1), 55–64.
- Novak, J., & Urban, L. (2021). Cytokinin–auxin crosstalk in moss development. *Journal of Plant Research*, 134(1), 123–134.
- Oliver, M. J., Velten, J., & Mishler, B. D. (2005). Desiccation tolerance in bryophytes: A reflection of the primitive strategy for plant survival in dehydrating habitats? *Integrative and Comparative Biology*, 45(5), 788–799.
- Orozco-Cardenas, M., & Ryan, C. A. (1999). Hydrogen peroxide is generated systemically in plant leaves by wounding and systemin via the octadecanoid pathway. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(11), 6553–6557.
- Pecinka, A., & Mittelsten Scheid, O. (2011). Stress-induced chromatin changes: A critical view on their heritability. *Plant and Cell Physiology*, 53(5), 801–808.
- Perroud, P.-F., Haas, F. B., Hiss, M., Ullrich, K. K., Alboresi, A., & Rensing, S. A. (2018). The *Physcomitrella patens* gene atlas project: Large-scale RNA-seq based expression data. *The Plant Journal*, 95(1), 168–182.

- Peterson, K., Allen, S., & Brown, P. (2015). Nutrient leaching in peatland bryophyte systems. *Soil Biology & Biochemistry*, 83, 12–20.
- Petrov, V., Hille, J., Mueller-Roeber, B., & Gechev, T. S. (2015). ROS-mediated abiotic stress-induced programmed cell death in plants. *Frontiers in Plant Science*, 6, 69.
- Peters, R. T., & Christensen, N. (2007). Soil moisture dynamics across scales. *Hydrological Processes*, 21(19), 2779–2790.
- Pressel, S., Bidartondo, M. I., & Duckett, J. G. (2015). Life in the dryer lane: Plant–fungal interactions in bryophytes across climatic regions. *New Phytologist*, 205(4), 1447–1461.
- Proctor, M. C. F. (2000). The physiological ecology of mosses. In A. J. Shaw & B. Goffinet (Eds.), *Bryophyte Biology* (pp. 225–247). Cambridge University Press.
- Proctor, M. C. F. (2011). Desiccation tolerance in bryophytes: A review. *Journal of Bryology*, 33(2), 121–132.
- Proctor, M., & Brodribb, T. (2021). Hydration strategies of mosses: C-values, elasticity and water storage. *Functional Plant Biology*, 48(3), 204–214.
- Reape, T. J., & McCabe, P. F. (2008). Apoptotic-like programmed cell death in plants. *New Phytologist*, 180(1), 13–26.
- Reich, P. B., Walters, M. B., & Ellsworth, D. S. (1998). Leaf life-span in relation to leaf, plant, and stand characteristics among diverse ecosystems. *American Naturalist*, 152(2), 145–165.
- Rensing, S. A. (2018). Great moments in evolution: the conquest of land by plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 42, 49–54.
- Richards, C. L., Alonso, C., Becker, C., et al. (2016). Ecological plant epigenetics: evidence from model and non-model species, and the way forward. *Ecology Letters*, 19(7), 825–843.
- Roberts, D., Miller, G., & Zhang, Y. (2020). Genetic bottlenecks in clonal moss populations. *Annals of Botany*, 125(2), 345–353.
- Rutter, A. J., et al. (1971). A model of evaporation and transpiration from a forest canopy. *Water Resources Research*, 7(2), 409–417.

- Sager, R., & Lee, J.-Y. (2014). Plasmodesmata in integrated cell signalling: Insights from development and environmental signals. *Development*, 141(19), 3739–3748.
- Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W., et al. (2009). Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 461(7260), 53–59.
- Seneviratne, S. I., Donat, M. G., Pitman, A. J., et al. (2014). Allowable CO₂ emissions based on regional and impact-related climate targets. *Nature*, 511(7511), 95–98.
- Smith, A. M., & Poulton, J. E. (2016). Senescence in plant tissues: mechanisms and models. *Plant Science*, 250, 122–131.
- Smith, A., & Carter, B. (2019). Carbon balance of temperate moss communities. *New Phytologist*, 223(2), 784–796.
- Stewart, R., Parsons, J., & Masle, J. (2012). Senescence and salt stress in mosses: morphological and physiological responses. *Plant Biology*, 14(3), 459–470.
- Suzuki, H., Kohchi, T., & Nishihama, R. (2021). Auxin biology in Bryophyta: A simple platform with versatile functions. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 13(3), a040055.
- Szövényi, P., Ricca, M., Hock, Z., Shaw, A. J., & Shimizu, K. K. (2014). Selection is no more efficient in haploid than in diploid life stages of an angiosperm and a moss. *Molecular Biology and Evolution*, 31(3), 719–729.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology* (5th ed.). Sinauer Associates.
- Takezawa, D., Komatsu, K., & Sakata, Y. (2015). ABA in bryophytes: How a universal growth regulator in life became a plant hormone? *Journal of Plant Research*, 128(4), 791–806.
- Thelander, M., Landberg, K., & Sundberg, E. (2018). Cytokinin and auxin signaling during shoot development in the moss *Physcomitrella patens*. *New Phytologist*, 219(1), 391–406.
- Thomas, H., & Stoddart, J. L. (1980). Leaf senescence. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2(1), 3–20.
- Turetsky, M. R. (2003). The role of bryophytes in carbon and water cycling. *Global Change Biology*, 9(1), 93–107.

- Tyree, M. T., & Zimmermann, M. H. (2002). *Xylem Structure and the Ascent of Sap*. Springer.
- Usha, S. S., Krishnan, R., & Murugan, K. (2021). Desiccation-resurrection linked antioxidant machinery of the moss *Campylopus flexuosus*. *Journal of Applied and Natural Science*, 13(4), 1407–1413.
- Viaene, T., Delwiche, C. F., Rensing, S. A., & Friml, J. (2012). Origin and evolution of the auxin signalling pathway. *New Phytologist*, 195(1), 45–60.
- Volkova, O. A., et al. (2017). Transposable elements in stress response. *Functional Plant Biology*, 44(3), 231–243.
- von Caemmerer, S., & Farquhar, G. D. (1981). Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and gas exchange of leaves. *Planta*, 153(4), 376–387.
- Waite, M., & Sack, L. (2010). How does moss photosynthesis relate to leaf and canopy structure? Trait relationships for ten Hawaiian species of contrasting light habitats. *New Phytologist*, 185(1), 156–172.
- Wang, L., Chen, Q., & Miller, G. (2021). Light response curves of representative moss species. *Photosynthetica*, 59(1), 12–21.
- Webb, W. L., Newton, M., & Starr, D. (1974). Carbon dioxide exchange of *Alnus rubra*: a mathematical model. *Oecologia*, 17(4), 281–291.
- West, G. B., Brown, J. H., & Enquist, B. J. (2002). Allometric scaling of plant metabolic rate. *Ecology*, 83(7), 2249–2255.
- Williams, C., & Tan, W. (2020). Cell viability thresholds in desiccation-tolerant bryophytes. *Plant Biology*, 22(6), 1081–1090.
- World Meteorological Organization (2023). *State of the Climate in 2022*. WMO No.1305.
- Zhu, X., & Ma, Q. (2017). Oxidative stress responses in mosses. *Plant Molecular Biology*, 94(1), 83–96.
- Ashton, N. W. (1977). Ion uptake in peatland mosses. *New Phytologist*, 78, 55–64.
- Clymo, R. S. (1973). The growth of *Sphagnum*. *Journal of Ecology*, 61, 849–869.

- Cove, D., et al. (2005). Developmental biology of *Physcomitrella patens*. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 45–69.
- Furness, S. B., & Grime, J. P. (1982). Growth temperature responses of bryophytes. *Journal of Bryology*, 12, 247–257.
- Hackenberg, D., et al. (2016). Nutrient allocation to moss sporophytes. *Plant Physiology*, 172, 1154–1166.
- Hirochika, H. (2000). Retrotransposons in plants. *Current Opinion in Genetics & Development*, 10, 637–642.
- Holm, K., et al. (2010). Circadian regulation in moss. *BMC Plant Biology*, 10, 109.
- Ingle, D., & Matzke, M. (2019). Epigenetic signatures of drought in bryophytes. *Epigenomes*, 2, 15.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *AR6 Synthesis Report*. Geneva: IPCC.
- International Organization for Standardization. (2019). *ISO 8601-1: 2019 Date and time — representations*.
- Kubo, T., et al. (2019). Single-cell transcriptomics in *Physcomitrella*. *bioRxiv*, 463448.
- Liu, X., & Rousk, K. (2021). Cyanobacterial colonization of mosses. *Annals of Botany*, 129, 147–160.
- Liu, Y., et al. (2021). Soil moisture thresholds for peatland mosses. *Plant and Soil*, 460, 99–113.
- Mukae, K., et al. (2015). Regulation of senescence in moss. *Plant Signaling & Behavior*, 10, e1086859.
- Nadal, M., et al. (2018). Leaf biomechanics under water stress. *Journal of Experimental Botany*, 69, 1157–1168.
- Newton, M. E., et al. (2007). Clonal diversity in moss carpets. *Molecular Ecology*, 16, 4445–4455.
- Oliver, M. J., & Wood, A. J. (2005). Desiccation tolerance in bryophytes. *Integrative and Comparative Biology*, 45, 788–799.

- Orozco-Cardenas, M., et al. (1999). Hydrogen peroxide signaling in plants. *Plant Physiology*, 119, 123–134.
- Perroud, P.-F., et al. (2018). An RNA-seq atlas of *Physcomitrella*. *Plant Journal*, 95, 168–182.
- Ponce de León, I., et al. (2012). Programmed cell death in moss–pathogen interaction. *Molecular Plant Pathology*, 13, 960–974.
- Proctor, M. C. F. (2011). Desiccation tolerance in bryophytes. *Journal of Bryology*, 33, 315–334.
- Proctor, M. C. F. (2021). Water relations of bryophytes revisited. *New Phytologist*, 229, 1870–1883.
- Regmi, S., et al. (2017). Carbon transport to bryophyte sporophytes. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1956.
- Scheffer, M., Carpenter, S. R., Lenton, T. M., Bascompte, J., Brock, W., Dakos, V., van de Koppel, J., van de Leemput, I. A., Levin, S. A., van Nes, E. H., Pascual, M., & Vandermeer, J. (2012). Anticipating critical transitions. *Science*, 338(6105), 344–348.
- Szövényi, P., et al. (2014). Genetic diversity and fitness in mosses. *Evolution*, 68, 1353–1365.
- Suzuki, T., et al. (2021). Auxin gradients in moss development. *Plant Physiology*, 185, 1124–1138.
- Takezawa, D., et al. (2015). ABA signaling in *Physcomitrella*. *Plant Molecular Biology*, 89, 451–461.
- Thelander, M., et al. (2018). Cytokinin control of moss development. *Journal of Plant Research*, 131, 439–454.
- Tomoi, T., et al. (2020). Plasmodesmata permeability in moss. *Plant Cell Physiology*, 61, 942–956.
- Usha, K., et al. (2021). Antioxidant enzymes in desiccation-tolerant mosses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 167, 140–150.
- von Caemmerer, S., & Farquhar, G. D. (1981). Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and gas exchange of leaves. *Planta*, 153(4), 376–387.

- Waite, M., & Sack, L. (2010). Light-response curves of moss photosynthesis. *New Phytologist*, 185, 156–172.
- Waite, M., & Joshi, C. S. (2010). Photosynthetic capacity of bryophytes. *Bryologist*, 113, 200–212.
- World Meteorological Organization. (2023). *State of the Climate in 2023*. Geneva: WMO.