



**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 Temporali)

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) produrrai 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 aggiorno i parametri.
5. **Clima:** aggiorno 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.