



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

**IL RUOLO DEI MECCANISMI DI RETROAZIONE NELLE
INTERAZIONI TRA SISTEMI ANTROPICI ED ECOSISTEMI NATURALI**

Relatore: Prof. Mirco Rampazzo

Laureanda: Caterina Nespolo

ANNO ACCADEMICO 2021 - 2022

Data di laurea: 19/09/2022

Abstract

La retroazione caratterizza molti sistemi dinamici, che grazie ad essa riescono a modulare l'uscita relativa a un determinato ingresso sfruttando le risposte generate in istanti precedenti. Un ecosistema umano è un sistema interdisciplinare complesso caratterizzato dalle interazioni tra uomo e natura che, unendo fattori biofisici e fattori sociali, inserisce la specie umana in una cornice ecologica. Nel corso del tempo sono stati compiuti diversi studi sull'ecosistema umano e su come i meccanismi di feedback agiscano su di esso. L'obiettivo di questa tesi è quello di raccogliere e spiegare alcune di queste ricerche, sottolineando come implementare il feedback in fase di modellizzazione sia fondamentale per fare previsioni corrette dell'andamento degli output del sistema. Partendo da due modelli compartimentali di ecosistema umano si analizza l'effetto della retroazione sulla sostenibilità del sistema. In seguito si espongono studi relativi alla presenza del feedback nei sottosistemi dell'ecosistema umano, in particolare in ambito ecologico, socio-ecologico, sociale ed urbanistico.

Indice

Introduzione	1
1 Il meccanismo di retroazione	4
1.1 Retroazione negativa	4
1.2 Retroazione positiva	5
1.3 Un semplice esempio	5
2 L'ecosistema umano	8
2.1 Modelli compartimentali	9
2.2 Validazione del modello	11
2.3 Meccanismi di retroazione nel sistema	12
2.4 Possibili scenari e risultati numerici	15
2.5 Riflessioni	19
3 La retroazione nei sottosistemi dell'ecosistema umano	20
3.1 Ambito ecologico: il declino delle dimensioni delle specie pescate	20
3.2 Ambito socio-ecologico: il processo invasivo	22
3.3 Ambito sociale: l'acquisto di prodotti biologici	24
3.4 Ambito urbano: fornitura idrica nelle città resilienti	26
3.5 Riflessioni	30
Conclusioni	31
Bibliografia	32

Introduzione

Già negli anni '70 i movimenti ambientalisti ed ecologisti hanno iniziato a mostrare preoccupazione per il futuro del nostro pianeta. Da allora questa paura non ha fatto altro che aumentare. L'attività antropica, cioè l'intervento umano sul territorio, è infatti in costante crescita e con essa l'impatto che ha sulla Terra. È quindi utile studiare la reciproca interazione del sistema uomo-ambiente per poter prevedere i possibili scenari futuri e aiutare chi deve prendere decisioni (ovvero i governi e in generale gli organi legislativi) a fare scelte il più sostenibili possibili. È quindi opportuno aprire una breve parentesi sul concetto di sostenibilità. Con questo termine si intende la capacità di un sistema di soddisfare le necessità di una generazione senza compromettere questa stessa possibilità alle generazioni successive [1]. La sostenibilità dunque non riguarda le singole parti o aspetti tra loro indipendenti del sistema ma lo considera coeso nel suo insieme. È formata infatti da quattro componenti: economica, ecologica, sociale e istituzionale [2]. Scelte sostenibili quindi devono riguardare tutte le variabili del sistema: non possono esserlo esclusivamente ecologicamente [3]. In Figura 1 è mostrato un sistema eco-socio-economico complesso multidimensionale le cui variabili evolvono rispetto al tempo: una traiettoria sostenibile deve rimanere confinata entro i vincoli delimitati dal "tunnel", se non li rispetta anche per una sola variabile, la traiettoria non è più considerata sostenibile per quel sistema. La Figura 1 mostra anche come ci possano essere due tipi di deviazione da un percorso sostenibile: una, in azzurro, che si auto-corregge e una, in arancione, che non lo fa. Quest'ultima risulta essere più problematica della prima in quanto ha bisogno di un intervento esterno per essere riportata all'interno delle condizioni di sostenibilità [4].

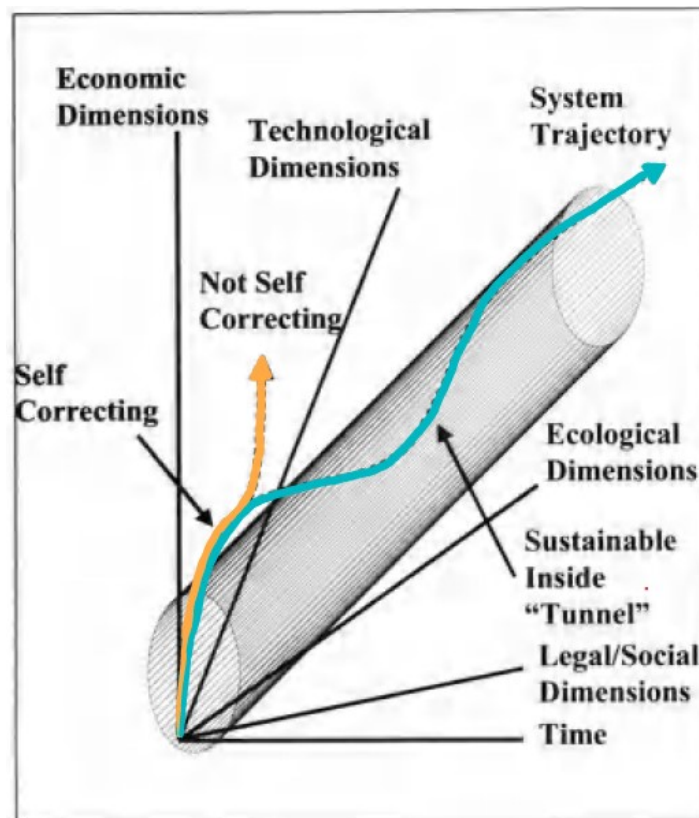


Figura 1: percorso attraverso il tempo per un sistema eco-socio-economico complesso [4]

Ad oggi sono stati raccolti molti dati e compiuti molti studi riguardanti l'impatto dell'uomo sull'ambiente, che hanno spesso portato a sovrastime o sottostime dell'effetto degli eventi analizzati. Uno dei primi è stato il lavoro di Malthus [5] che a fine '700 aveva previsto per l'inizio del secolo successivo scarsità di cibo e fame a livello mondiale. Sono state predette molte altre catastrofi economiche, sociali e ambientali che non si sono mai avverate. Una possibile spiegazione del perché questo accada risiede nel fatto che i sistemi naturali sono dotati di meccanismi di retroazione intrinseci [6] che possono attenuare o amplificare gli effetti degli stimoli a cui sono sottoposti. Tralasciare questi meccanismi in fase di modellizzazione di un sistema può portare a previsioni errate del comportamento del sistema stesso in risposta a eventi esterni.

In questa tesi ci si soffermerà soprattutto sugli aspetti modellistico-funzionali dei diversi sistemi di cui fa parte l'uomo, analizzando l'effetto dei cicli di feedback, per mostrare come agiscono sui sistemi e come tralasciarli possa portare ad avere risultati che non rispecchiano l'uscita reale del sistema. Nel primo capitolo viene introdotto e spiegato, anche attraverso un esempio, il concetto di meccanismo di retroazione. Nel secondo capitolo si entra nel vivo dello studio: vengono presentati due modelli di ecosistema

umano contenenti cicli di feedback, i cui comportamenti vengono poi simulati su diversi scenari possibili e i risultati numerici ottenuti vengono discussi. Infine nel terzo capitolo si espongono diversi esempi di sistemi retroazionati, rimarcandone l'importanza e la presenza non trascurabile in ambito ecologico, socio-ecologico, sociale ed urbano-economico, ovvero negli aspetti che principalmente caratterizzano un sistema in cui uomo e natura coesistono e si influenzano l'un l'altro.

Capitolo 1

Il meccanismo di retroazione

La retroazione è un meccanismo tipico di alcuni sistemi dinamici, che permette loro di modulare l'uscita relativa a un determinato ingresso in base alle risposte prima generate. Un sistema si dice dinamico quando il valore dell'output in un istante t dipende da almeno un valore dell'input in un istante diverso da t [7]. Il sistema retroazionato riporta in ingresso l'uscita indotta da un input precedente creando così un ciclo causa-effetto in grado di influenzare ed eventualmente correggere il comportamento del sistema. In Figura 2 è presentato lo schema a blocchi di un sistema con retroazione.



Figura 2: sistema retroazionato [8]

1.1 Retroazione negativa

Si parla di retroazione negativa quando l'output viene sottratto all'input. Le risposte del sistema a un determinato ingresso vanno quindi a smorzare il comportamento del segnale di uscita, contrastandone l'andamento naturale. I meccanismi di retroazione negativa generalmente portano il sistema verso una posizione di equilibrio.

Il sistema climatico è un sistema complesso costituito principalmente da cinque componenti (atmosfera, idrosfera, criosfera, litosfera, biosfera) e dalle loro reciproche interazioni [9]. Tra le sue dinamiche interne presenta un primo esempio di retroazione

negativa, quando la tendenza al riscaldamento produce un effetto di raffreddamento. Il meccanismo principale è quello dovuto alla legge di Stefan-Boltzmann: quando la temperatura di un corpo aumenta, la radiazione infrarossa che esso emette aumenta proporzionalmente alla sua temperatura assoluta elevata alla quarta potenza [10;11]. Il risultato è una retroazione negativa che tende a stabilizzare nel tempo il sistema climatico.

1.2 Retroazione positiva

Si parla invece di retroazione positiva quando l'uscita viene sommata all'ingresso, amplificando il segnale di output. Questo tipo di feedback rafforza quindi il comportamento naturale dell'uscita del sistema, crescente o decrescente che sia, portandola tipicamente a divergere.

Nel sistema climatico è presente anche un esempio di retroazione positiva, quando il riscaldamento globale porta un ulteriore effetto di riscaldamento. Il meccanismo principale è quello dell'evaporazione dell'acqua: il riscaldamento dell'atmosfera porta ad un aumento della quantità di vapore acqueo in essa presente ed essendo questo un gas serra fa a sua volta aumentare la temperatura atmosferica creando quindi un effetto valanga che può essere interrotto solo da un fattore esterno.

1.3 Un semplice esempio

In seguito si riporta un semplice esempio per chiarire il funzionamento dei cicli di feedback. A un processo integratore viene messo in input un gradino unitario (questo sistema può rappresentare per esempio la posizione istantanea di un corpo che da fermo viene fatto muovere a velocità costante). Il sistema viene prima lasciato agire naturalmente, poi vengono implementati separatamente i meccanismi di retroazione negativo e positivo. In Figura 3 sono rappresentati gli schemi a blocchi delle simulazioni (fatte con MATLAB) e in Figura 4 i grafici risultanti. Si può notare come il sistema tenda naturalmente a divergere con andamento lineare. La retroazione negativa lo porta a stabilizzarsi nel tempo facendogli raggiungere un equilibrio, mentre la retroazione positiva aumenta l'errore dell'uscita rispetto all'ingresso facendola divergere in maniera quadratica.

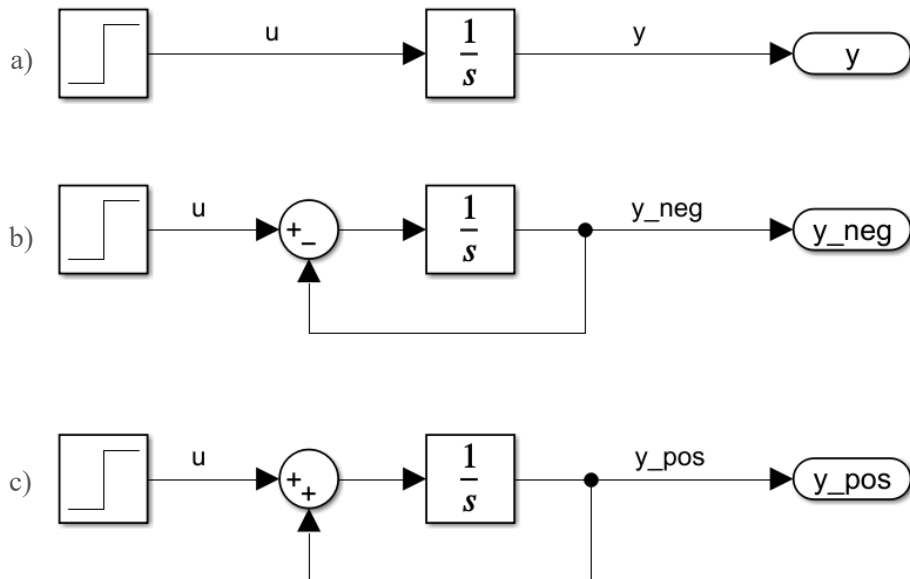


Figura 3: schemi a blocchi di un sistema integratore a) senza retroazione, b) con retroazione negativa e c) con retroazione positiva

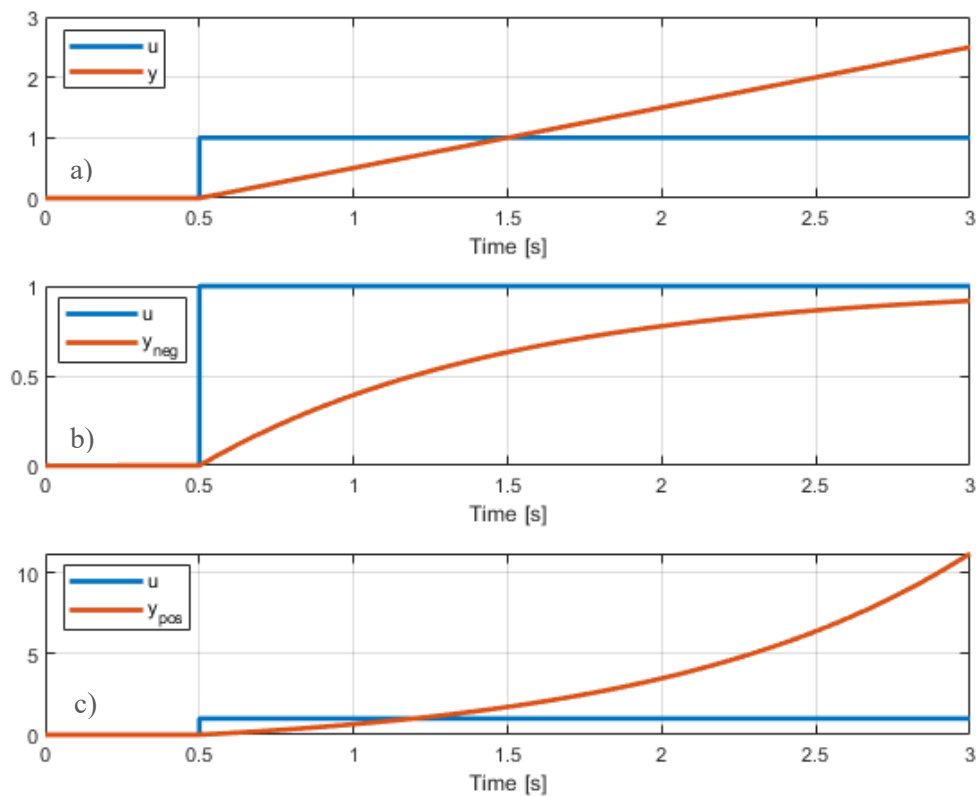


Figura 4: risultati delle simulazioni di un sistema integratore a) senza retroazione, b) con retroazione negativa e c) con retroazione positiva, con in input un segnale a gradino unitario

Nei prossimi due capitoli si analizzerà l'effetto che questi cicli di retroazione hanno nell'interazione tra sistemi umani ed ecosistemi naturali, prima soffermandosi su un livello più generale dove si riscontrano principalmente feedback negativi, poi su sistemi

più specifici che invece contengono per la maggior parte feedback positivi. Perché un sistema complesso come l'ecosistema umano o il sistema Terra riesca a mantenere l'equilibrio è infatti necessario che i suoi sottosistemi si bilancino a vicenda contrastando ad esempio la crescita di alcuni con l'estinguersi di altri e viceversa.

Capitolo 2

L'ecosistema umano

Un ecosistema umano è un sistema interdisciplinare complesso che inserisce la specie umana in una cornice ecologica e di cui i processi sono parte integrante. Formalmente si definisce come “un sistema coerente composto di fattori biofisici e sociali capace di adattarsi e di essere sostenibile nel tempo” [12].

Con “coerenza” si intende la connessione e l'interdipendenza di funzioni, processi o parti del sistema ben identificati [12].

I fattori biofisici e sociali di maggiore importanza sono le risorse critiche (biofisiche, socioeconomiche e culturali) e il sistema sociale (l'organizzazione complessiva dei rapporti e delle istituzioni collettive e le interazioni che vi si stabiliscono [13]). Questi elementi sono composti da più componenti che includono ognuno diverse variabili [12].

La “capacità” del sistema delinea la sua contingenza e il suo potenziale. L'ecosistema umano mostra infatti una regolare ma variegata efficacia nell'adattamento, senza esibire bilanciamenti statici e costanti [12].

Il concetto di adattamento è inteso come una risposta alle condizioni ed è strettamente soggettivo: ciò che è adattativo per una determinata componente del sistema può non esserlo per un'altra [12].

La nozione di sostenibilità è già stata definita: ha accezione sia socioculturale che biofisica e rappresenta una sorta di equilibrio dinamico tra gli input e gli output del sistema [12].

Il tempo è strettamente correlato al tipo di sistema cui ci si riferisce e per questo è sempre importante specificarlo [12].

In questo capitolo si analizzeranno due modelli di ecosistema umano, sviluppati rispettivamente da Rodriguez-Gonzalez et al. nel 2020 [14] e da Nisal et al. Nel 2022 [15]. Nel primo dei due verrà implementato un meccanismo di retroazione. Le uscite con e senza feedback saranno poi valutate rispetto alla sostenibilità del sistema e confrontate tra di loro.

2.1 Modelli compartimentali

Il primo a essere presentato è il modello compartimentale, mass-based di Rodriguez-Gonzalez et al. [14]. Un modello compartimentale è una rappresentazione matematica del sistema che vuole rappresentare, è suddiviso in parti (compartimenti) comunicanti tra loro le cui grandezze sono uniformi e non negative. Tipicamente descrivono trasporti di massa (come in questo caso), dinamiche di popolazione, flussi di informazione, etc.

Questo modello non rappresenta alcun ecosistema o società in particolare, ma riproduce un ecosistema umano in generale, includendone tutti gli aspetti più cruciali. Esso (mostrato in Figura 5) comprende quindici compartimenti suddivisi in tre bacini di risorse, otto rami ecologici, due settori umani, un comparto energetico e uno di produzione [14].

RP (resource pool) è la principale sorgente di risorse richieste dal sistema, quali acqua, nutrienti, luce solare, etc. IRP (inaccessible resource pool) comprende quelle risorse che derivano dagli scarti dell'attività antropica, per questo inaccessibili al settore umano ma gradualmente reintegrati da quello ecologico. Infine ERP (energetic resource pool) rappresenta le fonti di energia non rinnovabili [14].

I compartimenti ecologici P1, P2 e P3 rappresentano i produttori primari, H1, H2 e H3 gli erbivori e C1 e C2 i carnivori [15]. P1 e H1 rappresentano rispettivamente il settore agricolo e zootecnico, entrambi domestici e direttamente dipendenti dall'uomo. P2 sono le piante selvatiche controllate dallo Stato, H2 gli erbivori selvaggi che consumano P1 e C1 i carnivori che si nutrono di H1. Analogamente P3, H3 e C2 sono piante, erbivori e carnivori selvaggi che però non interagiscono con l'uomo. Il compartimento ecologico selvatico (in particolare P2 e P3 [15]) si occupa di riciclare piccole quantità di IRP e di renderle nuovamente accessibili al sistema [14]. Piante e animali domestici, a differenza di quelli selvatici, sono considerati parte integrante dei mercati, ovvero hanno un valore economico [16].

Il modello rappresenta una società iniqua in cui la maggior parte della popolazione ha un reddito relativamente basso (HH1) mentre la minor parte detiene la più grande quantità di ricchezze (HH2) [14].

EP è il settore di produzione energetica mentre IS il settore industriale [14]. Quest'ultimo usa P1 e RP per creare prodotti preziosi per l'uomo che non incrementano la massa di HH1 e HH2 ma fanno crescere IRP [16].

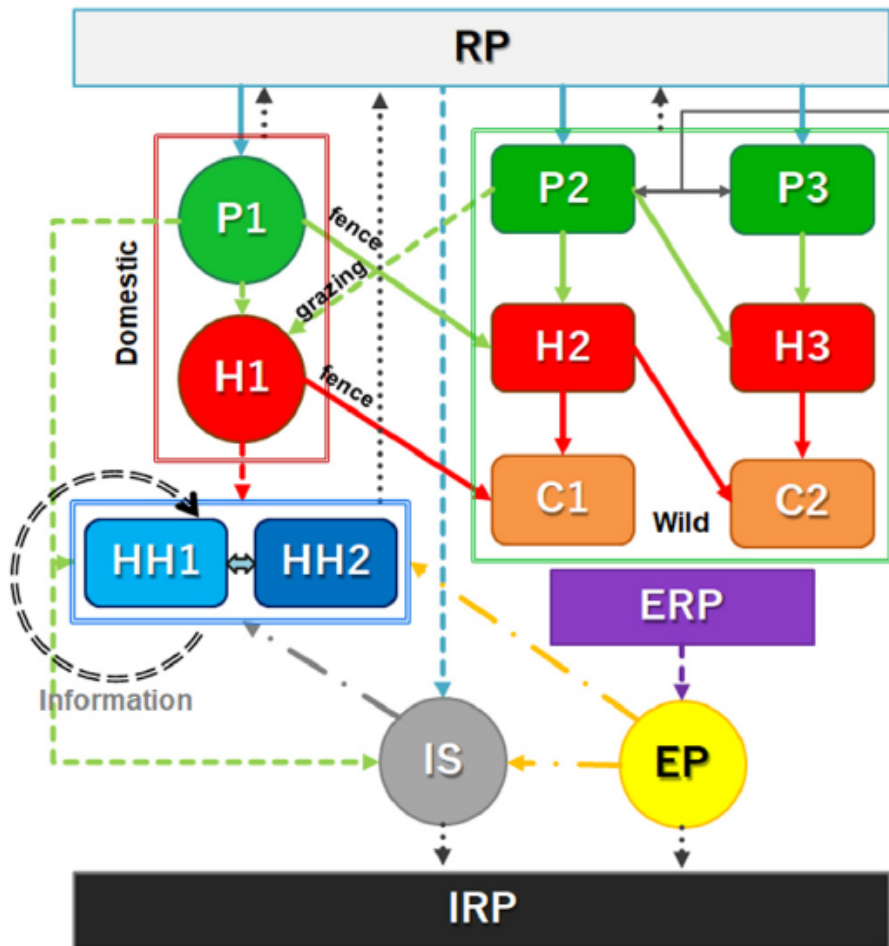


Figura 5: modello dell'ecosistema umano creato da Rodriguez-Gonzalez et al. [14]

Per descrivere i flussi di massa tra compartimenti vengono usate equazioni di Lotka-Volterra. Questo tipo di equazioni sono utili per descrivere i modelli preda-predatore e sono coppie di equazioni differenziali non lineari del primo ordine:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha x - \beta xy \\ \frac{dy}{dt} = \delta xy - \gamma y \end{cases} \quad (1)$$

Nell'equazione (1) x e y variano nel tempo e sono rispettivamente il numero di prede e di predatori, le derivate rappresentano il tasso di crescita istantaneo delle due popolazioni, t simboleggia il tempo, α , β , δ e γ sono parametri reali positivi che descrivono i tassi di natalità e mortalità delle due popolazioni anche dovuti all'interazione tra loro [17;18].

Le interazioni naturali (presentate da linee continue in Figura 5) sono caratterizzate da normali equazioni di Lotka-Volterra, mentre per quelle influenzate dall'uomo (linee tratteggiate) i termini sono calcolati tramite equazioni algebriche derivate da osservazioni di carattere economico e sociale [19].

Il secondo modello è quello creato da Nisal et al. [15]. Pressoché identico a quello sopra mostrato, vi aggiunge la rete idrica che si compone di tre comparti. Il modello risultante, rappresentato in Figura 6, è sempre mass-based e comprende diciassette compartimenti (il settore umano viene ridotto a un solo blocco HH).

Come i bacini di risorse, anche l'acqua ha una riserva accessibile (water reservoir) e una inaccessibile (inaccessible water reservoir). Il terzo compartimento è quello del riciclo dell'acqua (water recycling), cui afferiscono HH, IS e EP [15].

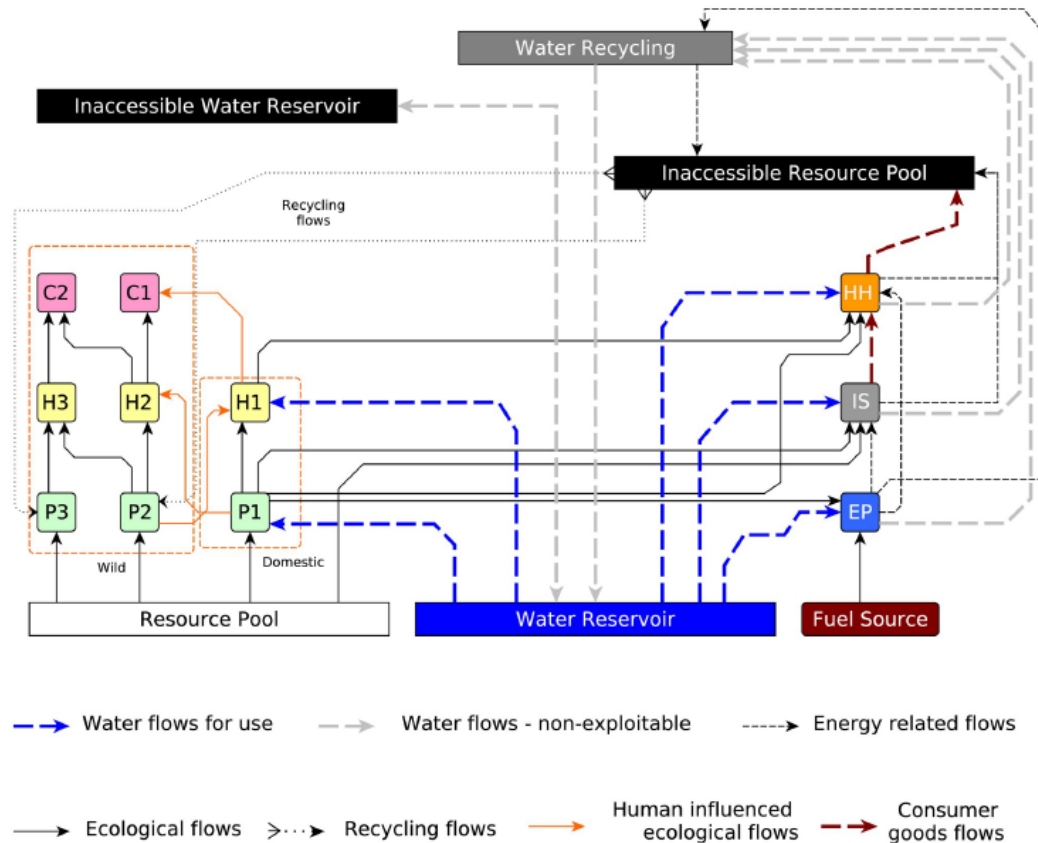


Figura 6: modello dell'ecosistema umano creato da Nisal et al. [15]

2.2 Validazione del modello

Nel lavoro di Nisal et al. [15] viene presentata una validazione del modello sviluppato, effettuata confrontando i risultati delle simulazioni con i dati raccolti dal 1950 al 2020 sulla popolazione umana, sul prodotto interno lordo mondiale (PIL oppure GDP, gross domestic product [20]) e sulle emissioni di CO₂ (anidride carbonica) e di NO_x (ossido di azoto) [21-24]. Per inizializzare i vari compartimenti (come ad esempio P1 [25]) sono stati usati dati storici, mentre la parametrizzazione delle emissioni di gas serra (CO₂ e NO_x) sono avvenute usando tecniche di ottimizzazione non lineari.

Dalla Figura 7, dove sono riportate in rosso le previsioni del modello e in blu i dati storici, si può facilmente comprendere che si tratti di un modello piuttosto accurato: i risultati del modello ricalcano bene l'effettivo andamento storico dei parametri sotto osservazione.

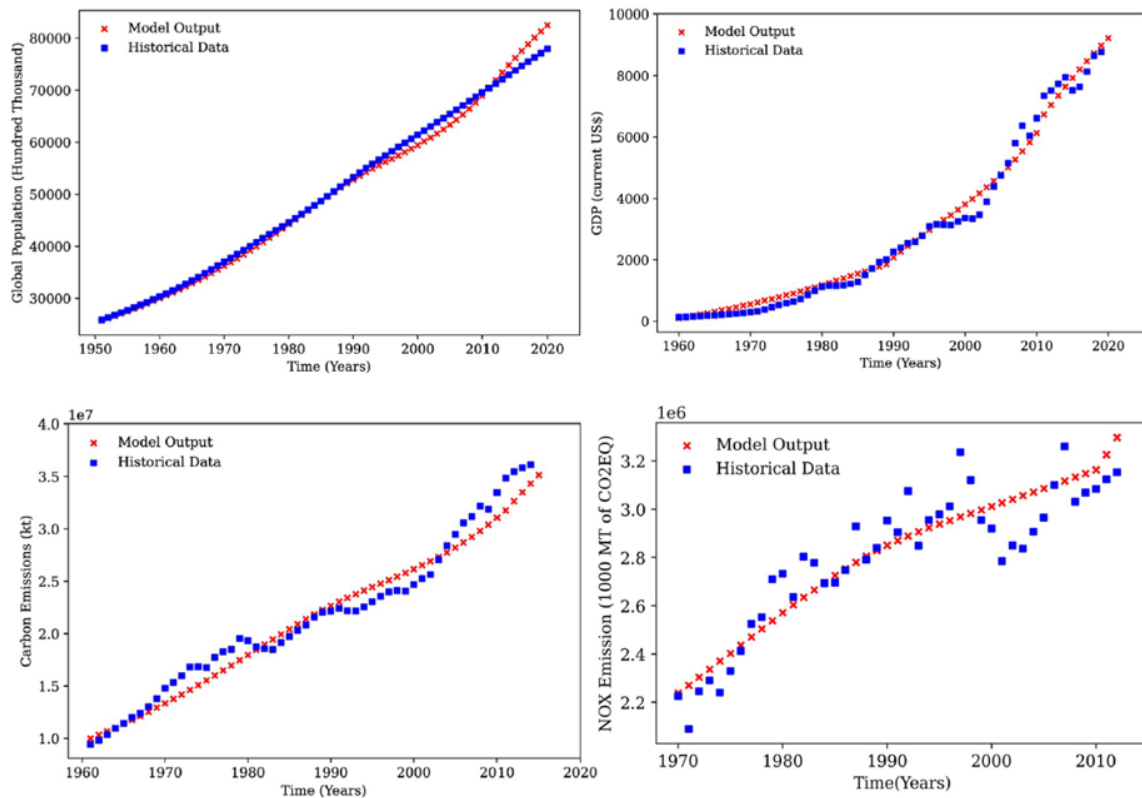


Figura 7: confronto tra uscita del sistema e dati storici per popolazione globale, GDP, emissione di CO₂ ed emissione di NO_x [15]

2.3 Meccanismi di retroazione nel sistema

Per comprendere al meglio le dinamiche causate dai cicli di feedback nell'interazione uomo-natura, questi sono stati raggruppati in due macro categorie: meccanismi di retroazione naturali e antropici. I primi analizzano gli elementi naturali che intervengono nei cicli di retroazione dell'ecosistema. Essendo un sistema descritto tramite equazioni di Lotka-Volterra, l'ecosistema si autoregola agendo sulla popolazione di determinate specie [26], che sono quindi il principale soggetto di analisi nello studio dei meccanismi di retroazione naturali. I secondi si dividono a loro volta in teorici e numerici. Entrambi analizzano le risposte comportamentali umane ai cambiamenti esterni al sistema, ma l'approccio teorico studia il feedback a livello più concettuale, definendo le connessioni tra le parti del sistema e cercando strategie qualitative per ottenere sistemi più sostenibili, mentre quello numerico usa strumenti matematici, statistici e computazionali per

determinare quantitativamente l'entità della risposta umana e le sue conseguenze sull'ambiente [14].

Nel modello di Rodriguez-Gonzalez et al. viene incorporato un meccanismo di retroazione antropico. Le dinamiche del sistema sono governate principalmente dal settore umano, dunque cambiamenti nella popolazione dell'uomo influenzano significativamente il comportamento del sistema. I tassi di mortalità e natalità sono piuttosto incerti, dunque il comportamento a lungo termine del sistema è imprevedibile. Per questo la strategia migliore è quella di apportare periodicamente cambiamenti socio-tecnologici tramite normative e leggi per far sì che il sistema mantenga o raggiunga l'obiettivo sostenibile prefissato [14].

Per valutare la sostenibilità del sistema vengono calcolati cinque indicatori: informazione di Fisher (Fisher Information, FI), impronta ecologica (Ecological Footprint Analysis, EFA), prodotto regionale verde netto (Green Net Regional Product, GNRP), salario pro-capite (Wage, W) e concentrazione di gas serra (Greenhouse Gases, GHG) [14].

L'informazione di Fisher è una misura dell'ordine del sistema [4] ed è un concetto legato alla sostenibilità grazie all'ipotesi di regime sostenibile [27]. L'impronta ecologica quantifica la domanda di territorio equivalente necessario per supportare i consumi e gli sprechi medi annui della popolazione [28]. Il prodotto regionale verde netto stima la sostenibilità del sistema dal punto di vista del benessere sociale [29]. Il salario pro-capite rappresenta il concetto di PIL individuale ed è quindi legato all'evoluzione economica della società. Infine, la concentrazione di gas serra dipende dalla quantità di CO_{2eq} emessa dall'uomo e assorbita dall'ambiente [14].

Il meccanismo ciclico tramite cui, usando dati e trend storici sulla popolazione, si fa periodicamente una previsione dell'uscita futura del sistema, che poi viene usata per prendere decisioni legislative che possono alterare o meno questo output è un ciclo di retroazione concettuale demografico.

La Figura 8 mostra la procedura di implementazione numerica del ciclo di retroazione concettuale di cui sopra. I passaggi principali sono tre: simulazione stocastica di un periodo di tempo, sviluppo di un modello predittivo e propagazione dell'informazione retroattiva ai periodi successivi tramite ottimizzazione [14].

Nel primo step il lasso temporale che si vuole studiare viene diviso in n periodi di p anni ciascuno, al termine dei quali le normative vengono aggiornate. Nel primo periodo la simulazione viene attuata usando condizioni iniziali e valori dei parametri dati. Il modello

considera le incertezze legate al tempo dei parametri demografici ed è per ciò stocastico. I risultati della simulazione vengono analizzati e i parametri demografici aleatori vengono linearizzati per poter essere usati nel passaggio successivo [14].

A questo punto i parametri demografici calcolati precedentemente sono usati per costruire un modello lineare predittivo con il quale si anticipano gli scenari futuri e si valutano i cinque indicatori di sostenibilità. Poiché i parametri casuali sono stati linearizzati questo modello è deterministico [14].

Nell'ultimo passaggio vengono stabilite normative accurate per modificare alcuni parametri (target governativi) del modello lineare in modo da raggiungere gli obiettivi stabiliti. Il modello è dinamico, per questo bisogna avvalersi della teoria del controllo ottimo [30]. Il problema è un insieme di equazioni differenziali (rappresentanti le dinamiche compartimentali del sistema), di equazioni algebriche (che corrispondono ai flussi di massa e alle variabili socio-economiche del sistema) e di variabili di controllo tempo dipendenti, identificate come quei parametri interni al sistema che possono essere manipolati e i cui cambiamenti hanno il maggiore impatto sul sistema stesso. La funzione da minimizzare è definita usando gli indicatori di sostenibilità ed è quindi tempo dipendente. Questo step fornisce nuovi valori per i parametri di controllo selezionati che vengono inseriti nella simulazione stocastica del prossimo periodo temporale, chiudendo così il ciclo [14].

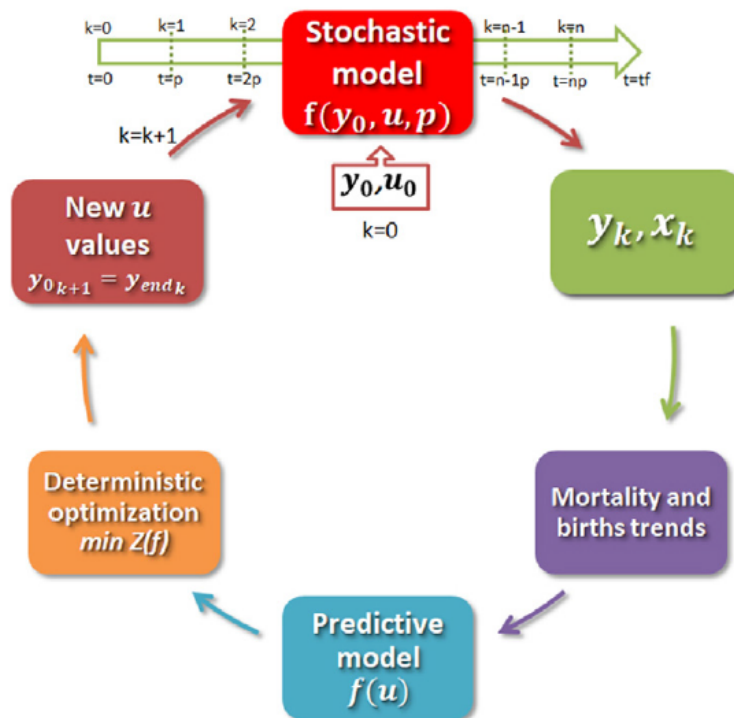


Figura 8: meccanismo di retroazione adattato al sistema [14]

Le variabili di controllo selezionate sono la crescita di P2 dovuta al consumo di RP (gRPP2), il fattore di calcolo del prezzo di IS (cISp), il consumo di legname (k), il fattore di calcolo di W (aW), la produttività di P1 per IS (θ) e la produttività di PR per IS (λ) [14].

2.4 Possibili scenari e risultati numerici

Rodriguez-Gonzalez et al. identificano quattro tipi di società alle quali è possibile applicare il loro modello, con il ciclo di feedback implementato: il tipo A è una società ideale con una perfetta distribuzione delle risorse (usata come caso base), il tipo B è un paese sviluppato, il tipo C uno stato recentemente sviluppato e il tipo D un paese in via di sviluppo [14].

Nisal et al. selezionano a loro volta quattro possibili scenari in cui svolgere la simulazione senza però implementare la retroazione: lo scenario 1 in cui i parametri del modello si adattano al meglio ai dati storici (caso base), lo scenario 2 in cui la popolazione umana esplose, lo scenario 3 in cui aumentano i consumi pro capite e lo scenario 4 che unisce il secondo e il terzo [15].

Vengono in seguito esposti i risultati delle simulazioni su entrambi i modelli per alcune variabili di stato del sistema, specificatamente: la massa del settore agricolo P1, le emissioni di gas serra, la popolazione globale e il settore economico (guadagno pro-capite W e prodotto interno lordo globale GDP).

In Figura 9, Figura 10 e Figura 11 sono mostrati i risultati delle simulazioni del modello di Rodriguez-Gonzalez et al., rispettivamente per le società B, C e D [14]. In particolare a) rappresenta la massa del settore P1, b) la concentrazione di GHG in ppm (parti per milione), c) la popolazione umana e d) il guadagno pro capite in dollari americani. Le analisi sono state compiute su periodi di 200 anni divisi in 10 intervalli da 20 anni ciascuno. Ognuno dei cinque indicatori di sostenibilità è stato usato come target di

governo. La linea nera rappresenta i risultati senza feedback che vengono considerati come riferimento.

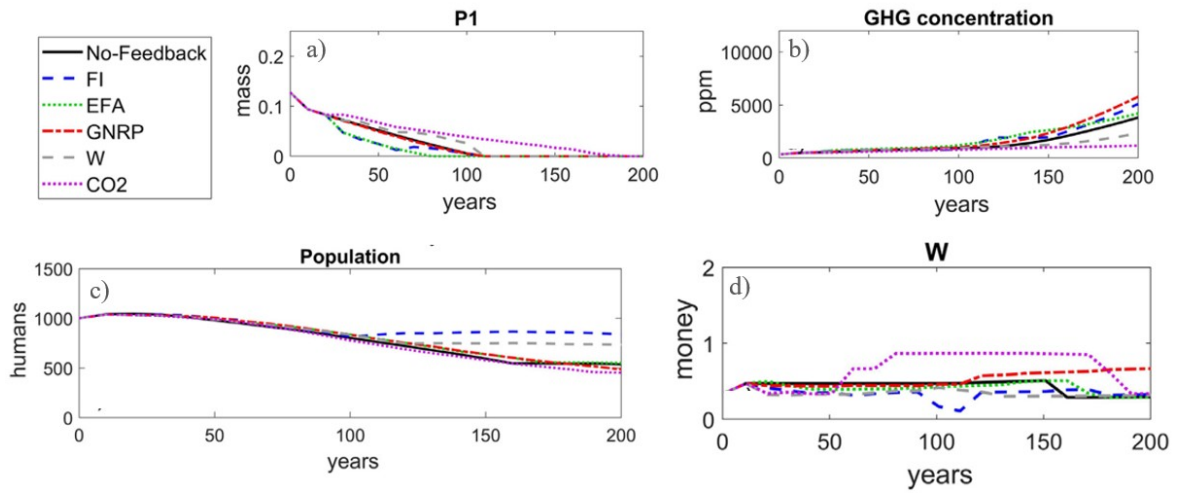


Figura 9: risultati simulazione società B [14]

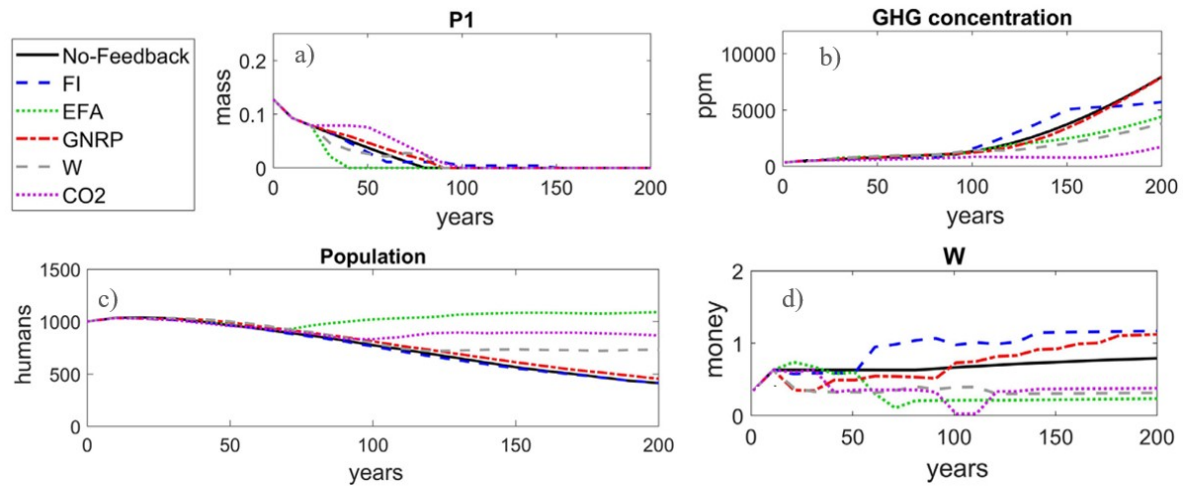


Figura 10: risultati simulazione società C [14]

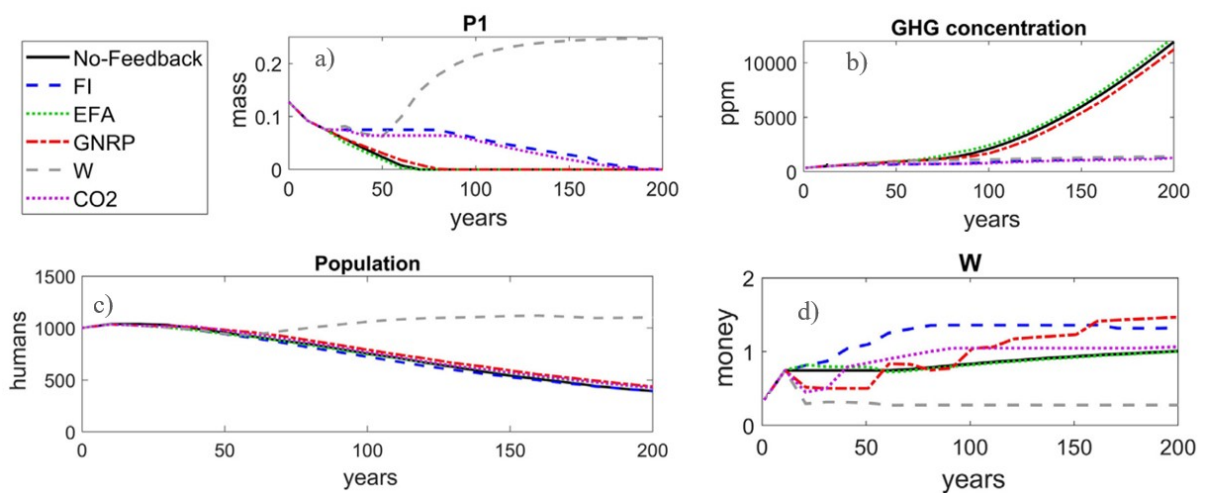


Figura 11: risultati simulazione società D [14]

La società B non performa bene dal punto di vista ambientale in quanto porta sempre all'estinzione di P1, che è però rallentata usando come target CO₂. La concentrazione di gas serra diminuisce solo quando è essa stessa ad essere usata come target. La popolazione tende a decrescere, ma l'uso di FI e W come indicatori attutisce questo processo. Da un punto di vista economico il salario W aumenta prendendo in considerazione CO₂ e GNRP. In generale, il comportamento delle variabili del sistema è migliorato dall'uso di CO₂ come target, a discapito però della popolazione umana, che viene dimezzata.

Anche la società C porta inevitabilmente all'estinzione di P1. L'utilizzo di W, CO₂ o EFA come controllore diminuisce la concentrazione di GHG e contrasta il trend di decrescita della popolazione. EFA in particolare mantiene la popolazione pressoché costante. Dal punto di vista economico sono GNRP e FI a migliorare le dinamiche del sistema. Si può notare un rapporto inverso tra popolazione e salario, infatti usare CO₂, W ed EFA migliora l'andamento della popolazione peggiorando il salario pro-capite mentre viceversa succede usando FI e GNRP.

L'unica società che evita l'estinzione di P1 è la D, grazie all'uso di W come target. Anche FI e CO₂ portano un miglioramento in P1, ritardandone la scomparsa. La concentrazione di GHG viene drasticamente diminuita considerando come indicatori W, FI e CO₂. W è l'unico che riesce a stabilizzare la popolazione ma al contempo non porta un aumento del salario medio. FI e CO₂ riducono la concentrazione di GHG e migliorano l'andamento di P1, senza però limitare la diminuzione della popolazione. È l'uso di W come indicatore a portare le maggiori miglie alle prestazioni del sistema.

Sono di seguito presentati gli esiti delle simulazioni compiute da Nisal et al. senza feedback. Il loro modello è applicato agli scenari da loro identificati: scenari 1 e 2 in Figura 12 e scenari 3 e 4 in Figura 13 [15]. Nello specifico a) raffigura la massa del compartimento P1, b) le emissioni di gas serra in kt (kiloton), c) la popolazione umana e d) il PIL mondiale in dollari americani. Le simulazioni sono svolte su un periodo di 130 anni che parte dal 2020 e termina nel 2150.

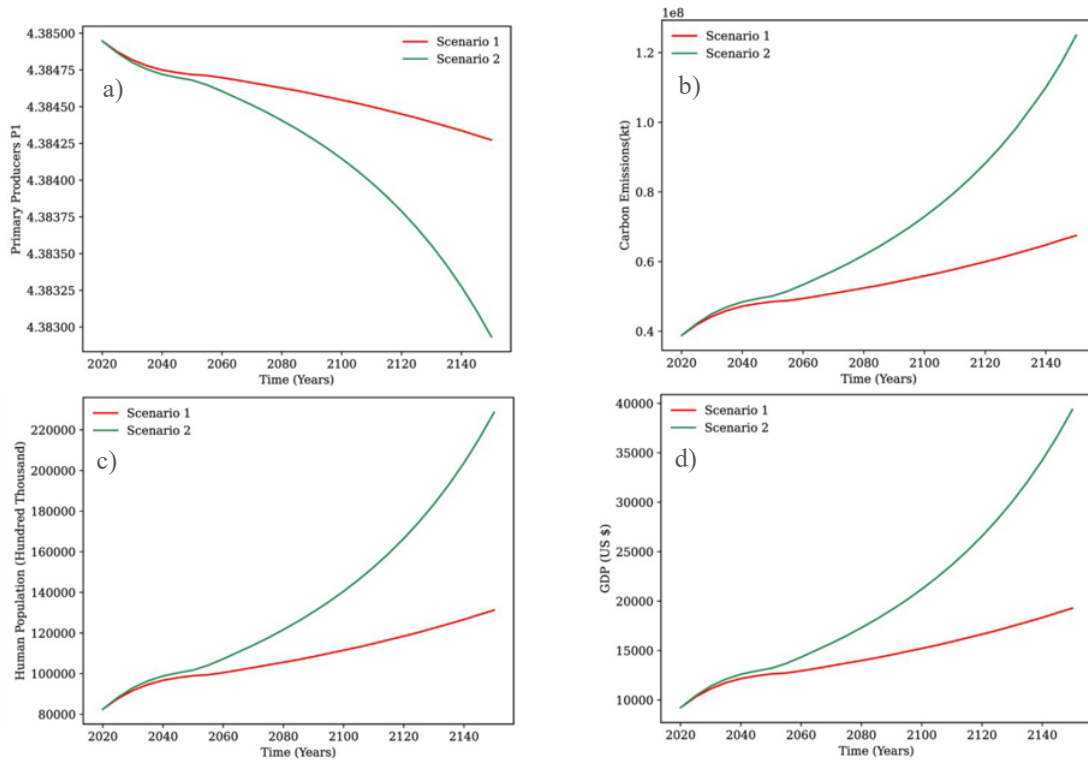


Figura 12: risultati simulazioni scenario 1 e scenario 2 [15]

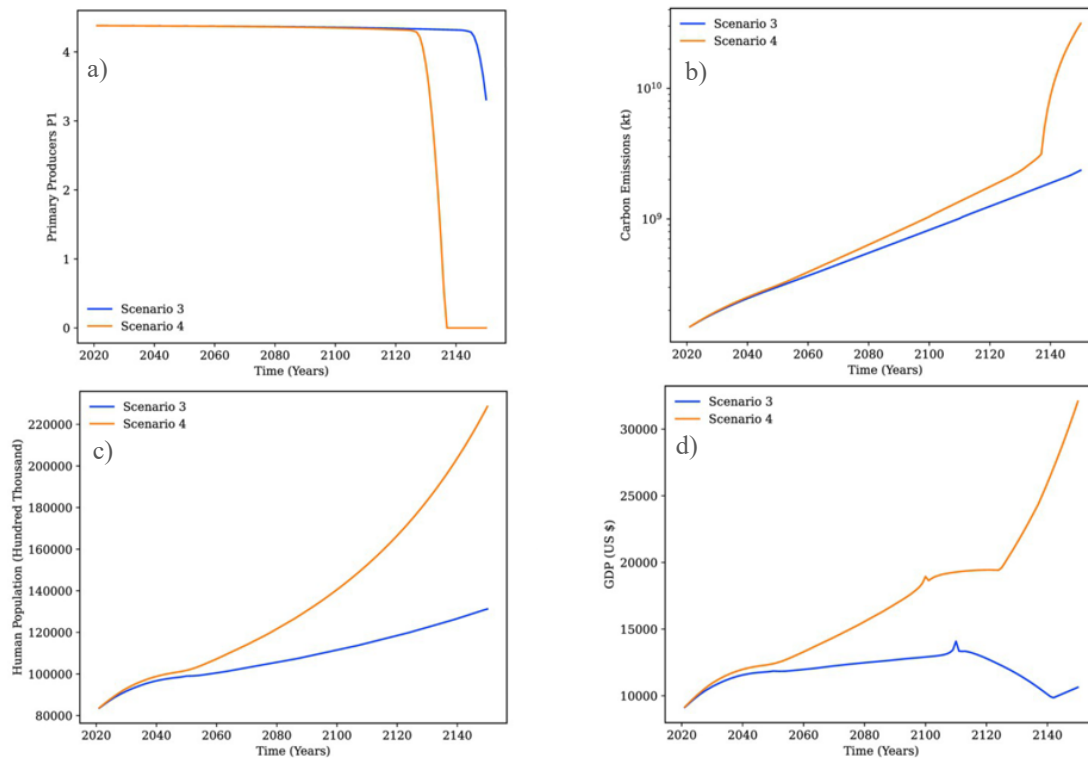


Figura 13: risultati simulazioni scenario 3 e scenario 4 [15]

Nello scenario 1 la massa di P1 decresce molto lentamente. La popolazione umana cresce stabilmente nel tempo e di conseguenza le emissioni di CO₂ e il PIL.

Il comportamento delle variabili nello scenario 2 è simile a quello del caso base ma i coefficienti di crescita e di decrescita sono maggiori. Per definizione dello scenario la popolazione umana cresce più velocemente del caso precedente e con essa le emissioni di CO₂ e il PIL. P1 invece decresce più rapidamente. Se ne evince che la popolazione umana ha un impatto significativo sull'intero ecosistema.

Nello scenario 3 si riscontrano delle instabilità: P1 decresce velocemente dopo essersi mantenuto stabile per un periodo di circa 120 anni, le emissioni aumentano linearmente e il PIL è instabile.

Lo scenario 4 è quello che per costruzione più si avvicina alla realtà, infatti la popolazione umana non può crescere senza che ne aumentino conseguentemente anche i consumi. Questo è lo scenario più instabile: P1 si mantiene inizialmente in equilibrio, ma poi arriva all'estinzione con una rapida caduta. Con la scomparsa di P1 le emissioni aumentano drasticamente e il PIL risulta molto instabile.

2.5 Riflessioni

Implementare nel modello il ciclo di feedback spiegato nel paragrafo 2.3 fa sì che le uscite del sistema siano attenuate rispetto a quelle ottenute senza. Si tratta quindi di feedback negativo. Le simulazioni svolte senza retroazione generano output che risultano essere molto più drammatici per la sostenibilità del sistema. Per questo omettere il feedback in fase di modellizzazione può portare a previsioni del futuro errate.

Risulta inoltre evidente che l'ambiente non può supportare un aumento dei consumi contestuale all'aumento della popolazione globale [15]. Tuttavia il problema si può arginare tramite misure legislative indirizzate verso un obiettivo di sostenibilità. Tali misure vanno adottate e modificate periodicamente, scegliendo di volta in volta il target più adeguato a seconda del tipo di società in cui ci si trova e del traguardo da raggiungere [14].

Capitolo 3

La retroazione nei sottosistemi dell'ecosistema umano

Come si è visto nel capitolo precedente un ecosistema umano si compone di tanti sottosistemi che interagiscono tra loro e le cui dinamiche vengono valutate rispetto a diversi parametri. In questo capitolo si entrerà nello specifico di questi sottosistemi portando esempi che evidenziano la presenza di meccanismi di retroazione negli ambiti più svariati.

3.1 Ambito ecologico: il declino delle dimensioni delle specie pescate

Un esempio lampante di come l'attività antropica possa influenzare l'ecosistema in negativo è la diminuzione delle dimensioni delle specie marine pescate [31,32]. L'impatto umano, amplificato da feedback positivi, è dovuto ad azioni sia dirette che indirette: la pesca selettiva per taglia rimuove gli individui più grandi lasciando solo i più piccoli, l'elevata mortalità dovuta alla pesca porta le specie ad evolvere verso un maggiore impiego di energia per la riproduzione, sottraendola alla crescita. Inoltre il cambiamento climatico fa scaldare gli oceani, diminuendone così la concentrazione di ossigeno e provocando un declino fisiologico del tasso di crescita delle specie animali [31-38].

Audzijonyte et al. [39] hanno condotto uno studio basandosi sul modello Atlantis [40] dell'ecosistema marino dell'Australia sudorientale. Si tratta di un modello compartimentale dei principali processi fisici, ecologici e di pesca, basato sugli scambi di azoto tra le parti. I parametri del modello sono ricavati dai dati di cattura raccolti in lassi temporali di 20-90 anni e da indagini scientifiche disponibili negli ultimi 50 anni [41]. Le simulazioni (riportate in Figura 14) sono state compiute usando come variabili di controllo il tasso di pesca e il coefficiente di diminuzione delle dimensioni di cinque specie di pesci demersali [42]. Sono stati identificati dodici scenari, ottenuti combinando quattro diversi fattori di mortalità istantanea dovuta alla pesca ($F = 0$, $F = 0.2$, $F = 0.4$

e $F = 0.6$ all'anno) con tre livelli di cambiamento fenotipico delle specie (decrescita continua e costante di $R = 0\%$, $R = 2\%$, e $R = 4\%$ ogni 50 anni, ovvero 0.04% e 0.08% all'anno). Il caso base, corrispondente a $F = R = 0$, non è presente in Figura 14, ma tutti i risultati sono normalizzati rispetto ad esso. Ogni colore corrisponde a una diversa intensità di pesca F , mentre i simboli diversi rappresentano diversi gradi di diminuzione R . Le analisi sono fatte su un periodo di 90 anni, ma i primi 40 anni sono stati scartati a causa delle forti fluttuazioni della biomassa delle specie in quel periodo temporale [39].

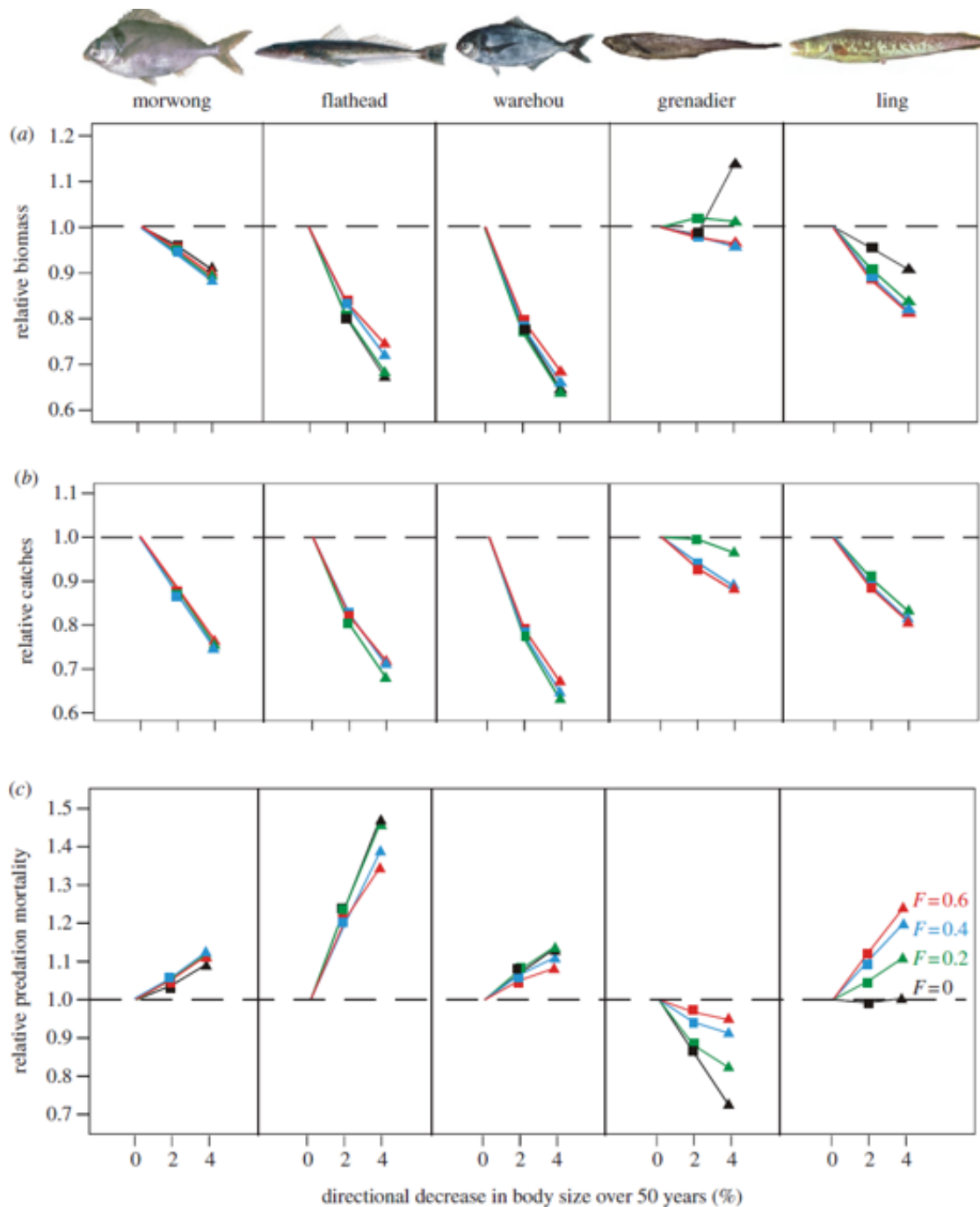


Figura 14: a) biomassa, b) numero di catture relativo e c) mortalità da predatori delle cinque specie pescate nei dodici scenari ottenuti [39]

La maggior parte delle specie va incontro a una diminuzione della biomassa. Di conseguenza il tasso di cattura si abbassa del 5-35%, mentre il tasso di mortalità dovuto ai predatori aumenta del 3-48%. A valori maggiori di F corrispondono cambiamenti nelle dimensioni corporee più rapidi. Questi a loro volta influenzano le velocità di cambiamento dei tassi di mortalità per pesca e per predatori, aumentandole.

L'ecosistema marino è un sistema complesso, ma si può ipotizzare la presenza di un meccanismo di retroazione positiva. Infatti la tendenza naturale delle specie a diminuire le proprie dimensioni corporee viene accentuata in risposta allo stimolo antropico della pesca. Ignorare questo meccanismo può risultare nella sovrastima di alcuni parametri, quali la dimensione degli individui e il rendimento nella pesca delle specie, e nella sottostima di altri parametri, come la mortalità per predatori. Si possono avere gli stessi risultati errati se non si riconsiderano periodicamente le conseguenze dei cambiamenti avvenuti nelle specie.

3.2 Ambito socio-ecologico: il processo invasivo

Le interazioni dinamiche bilaterali tra uomo e natura sono caratterizzate da sistemi accoppiati uomo-natura (Coupled Human And Natural System, CHANS) [43,44]. I meccanismi di retroazione sono emblematici di questo tipo di sistema, in cui due componenti sono fortemente interconnesse e l'una guida e risponde ai cambiamenti dell'altra. Un esempio di CHANS è il processo di invasione biologica, ovvero quel fenomeno per cui individui di una specie si spostano in una regione geografica della quale non sono nativi, vi si stabiliscono e iniziano a riprodursi in maniera spesso incontrollata [45]. Più precisamente (Figura 15) il processo di invasione si divide in stadi (sorgente, trasporto, introduzione, insediamento e diffusione) nei quali si possono individuare tre CHANS: sorgente, trasporto e destinatario. I cicli di feedback a loro intrinseci diminuiscono il tasso di trasporto o il tasso di crescita delle specie non autoctone se sono negativi, mentre se sono positivi li aumentano [46].

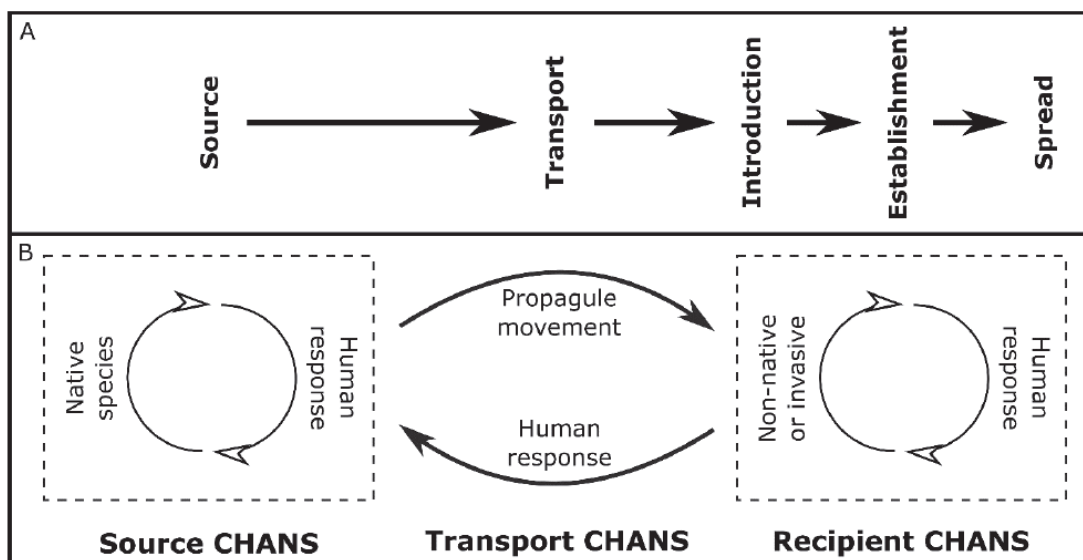


Figura 15: confronto tra stadi del processo di invasione e CHANS che vi si sovrappongono [46]

Il CHANS alla sorgente evidenzia la presenza di cicli di feedback localizzati nella regione da cui provengono le specie invasive. La retroazione dipende dalla risposta umana ai cambiamenti dell'ambiente circostante e dall'influenza che tale reazione può avere sul territorio stesso. Simili dinamiche possono influenzare la quantità e la diversità delle specie esportate verso regioni in cui non sono autoctone. Meccanismi di retroazione negativa si possono verificare, ad esempio, in seguito alla regolamentazione del commercio di animali o piante in vita, o riducendo il trasporto intenzionale e non intenzionale di specie native, anche grazie alla consapevolezza che esse possono essere considerate invasive altrove. La retroazione positiva invece è spesso dovuta all'inserimento di normative che incentivano la diversificazione commerciale delle specie [46].

Il ciclo di retroazione del trasporto comprende le interazioni tra il territorio di partenza e quello di arrivo dovute allo spostamento delle specie. Infatti l'introduzione di questi individui ha effetti ecologici, culturali, economici e sociali nella regione destinataria, i quali possono ripercuotersi nella sorgente, ad esempio tramite politiche di prevenzione o cambiamenti nella domanda dei consumatori, condizionando ancora una volta il tasso di esportazione. Quando le conseguenze dell'importazione di specie non autoctone nell'area di arrivo portano una risposta umana che ne riduce la diffusione si scatenano i feedback negativi, spesso di natura economica o culturale. Quelli positivi invece sono tipicamente frutto di normative socioeconomiche, dovute alla crescente richiesta delle specie importate nella zona di ricezione [46].

L'ultimo CHANS, il destinatario, mette in luce come la reazione umana alla specie invasiva e all'impatto che essa ha sul territorio sia guidato principalmente da fattori culturali, demografici, economici e biologici. Quando una specie non nativa danneggia l'ambiente in cui si instaura, si attiva un ciclo negativo per bloccarne la crescita, che può essere guidato da risposte individuali di piccole comunità o da sforzi governativi. Reazioni (sia ecologiche che socio-economiche) favorevoli all'insediamento innescano invece cicli positivi, tramite l'aumento della domanda, incentivando così la diffusione della specie fino alla sua totale integrazione nel territorio [46].

Il feedback continuo tra persone e specie (autoctone e non) può dunque produrre interazioni imprevedibili in grado di influenzare sia la regione di partenza che quella di arrivo degli organismi invasivi. Tali scambi continuano a cambiare nel corso del tempo, seguendo l'andamento della risposta adattativa dell'uomo alla presenza di specie non native [46].

3.3 Ambito sociale: l'acquisto di prodotti biologici

Anche le dinamiche sociali della popolazione umana includono meccanismi di retroazione: più i componenti di un gruppo mettono in pratica un dato comportamento, più questo è atteso, aumentando così la partecipazione degli altri membri a tale comportamento [47-49]. Ogorevc et al. hanno compiuto uno studio per modellizzare il processo decisionale umano, in particolare quello che spinge all'acquisto di alimenti biologici [50], includendo il feedback loop tra norma sociale e comportamento individuale di cui sopra [51]. Le norme sociali descrivono la percezione da parte di un singolo dell'influenza che la società ha nello spingerlo ad impegnarsi o meno in determinati comportamenti [52]. Un cambiamento nel modo di agire di una persona influisce sull'impressione che gli altri individui appartenenti allo stesso insieme sociale hanno di quel comportamento. Quest'impressione a sua volta delinea la futura condotta del gruppo, che si può mantenere e sviluppare grazie alla presenza della retroazione positiva nel sistema [53].

Il modello concettuale di Ogorevc et al. (Figura 16) si compone di nove compartimenti, quattro dei quali sono indipendenti e influenzano gli altri cinque. I parametri indipendenti sono valori, attitudine e controllo comportamentale percepito (CCP). I valori sono le risposte dell'uomo, in quanto organismo biologico, alle sue necessità primarie, ovvero la sopravvivenza della specie e la coordinazione delle interazioni sociali. Si dividono in due

categorie: valori di auto-trascendenza e di esaltazione personale [50]. L'attitudine è la disposizione di una persona verso uno specifico oggetto o attività [54], mentre il CCP è la percezione che un individuo ha di poter attuare il comportamento desiderato [55]. Le variabili dipendenti, invece, sono minaccia percepita, interesse per l'ambiente, intenzioni comportamentali, comportamento e norme sociali [50].

Le relazioni di dipendenza tra i vari compartimenti del sistema sono formulate attraverso delle ipotesi. I valori possono avere un effetto positivo o negativo sull'interesse per l'ambiente, a seconda che siano di auto-trascendenza o di esaltazione personale (rispettivamente H1a e H1b). L'attitudine ha un effetto positivo sulle intenzioni comportamentali (H2). Il CCP ha un'influenza positiva sia sulle intenzioni che sul comportamento (H3a e H3b) e le intenzioni hanno conseguenze positive sul comportamento (H4). Infine il comportamento e le norme sociali si influenzano positivamente a vicenda (H5): è il meccanismo di retroazione positiva sopra descritto [50].

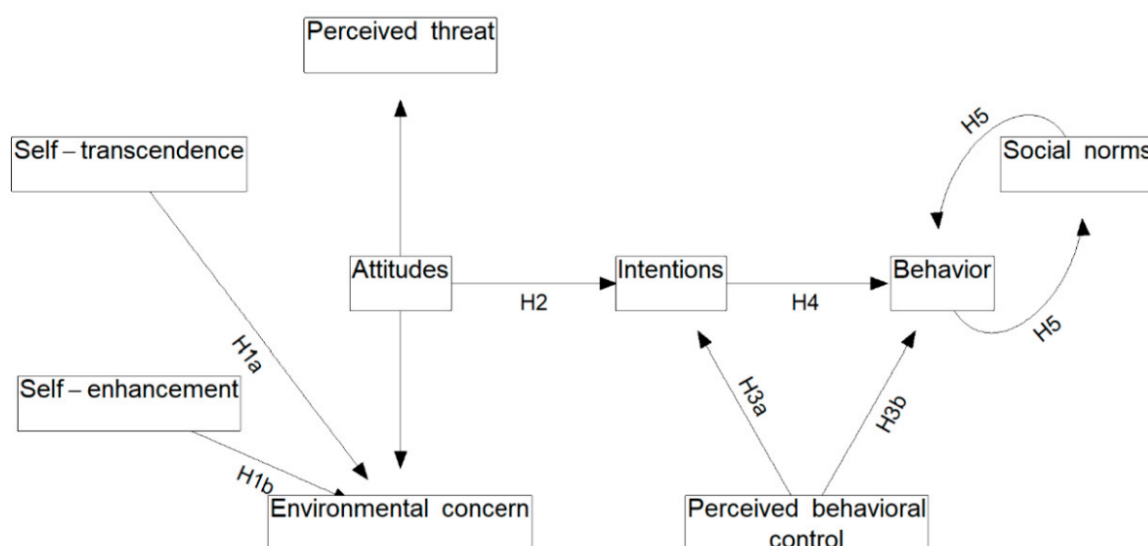


Figura 16: modello concettuale del processo di decisione umano [50]

I parametri del modello concettuale presentato sono stati poi valutati da Ogorevc et al. usando dati di livello individuale presi includendo circa 14.000 persone da 17 stati, per la maggior parte europei. In particolare per il ciclo di feedback è stato usato un modello di ritardo spaziale [56] secondo il quale due persone sono dette vicini se risiedono nello stesso stato e hanno età e percorsi scolastici simili, e una norma sociale è definita come il comportamento medio pesato sull'inverso della distanza. I risultati numerici sono tutti non negativi [50] e mostrano che le relazioni H1a, H2, H3a, H3b, H4 e H5 evidenziate nel modello teorico sono corrette. Il coefficiente legato a H1b risulta invece nullo,

sottolineando come l'etica di auto-potenziamento non abbia influenze sulla preoccupazione ambientale. Nello specifico del meccanismo di retroazione, la relazione H5 tra norme sociali e comportamento (Figura 17) mostra come persone i cui vicini si sforzano ogni tanto di comprare alimenti biologici tendano a non fare questo sforzo quasi mai, mentre persone i cui vicini lo compiono spesso sono portate a farlo a loro volta di più. Il coefficiente di correlazione positivo indica la presenza di mutua dipendenza: gli individui si comportano similmente ai loro pari. Maggiore è il coefficiente più forte è il legame [50].

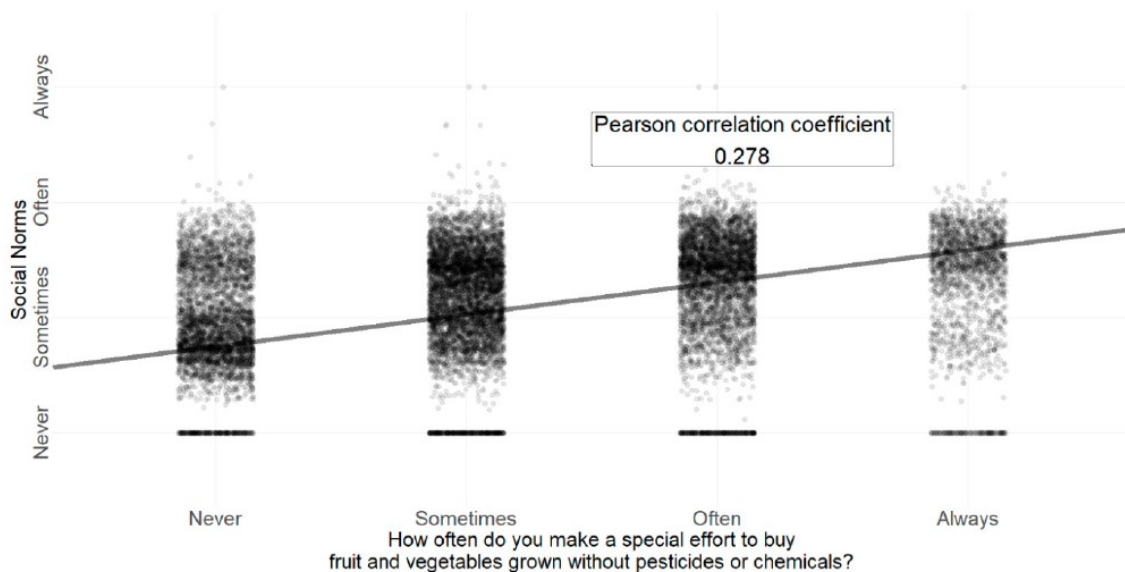


Figura 17: correlazione tra comportamento individuale e norme sociali [50]

Il feedback positivo attivato dal cambiamento iniziale del comportamento di un individuo verso l'acquisto di prodotti biologici fa sì che questo atteggiamento venga attuato da altre persone. Questa è una considerazione importante perché mostra come le scelte di una persona non influenzino solo essa stessa ma l'intera comunità in cui è inserita.

3.4 Ambito urbano: fornitura idrica nelle città resilienti

Come ultima prova della presenza di meccanismi di retroazione nei sistemi antropici si porta un'analisi della resilienza urbana, nel caso specifico delle forniture d'acqua potabile a seguito di una catastrofe naturale, usando come caso di studio il terremoto de L'Aquila del 2009 [57].

Il concetto di resilienza si definisce come l'abilità di un sistema di assorbire gli eventi estremi. Essa può essere raggiunta migliorando le capacità di funzionamento infrastrutturali durante e dopo il pericolo, attraverso strategie di recupero e di risposta alle

emergenze [58]. La resilienza aumenta la capacità del sistema di affrontare l'imprevedibile [59,60], aumentando la sua abilità di anticipare e assorbire potenziali disturbi, di sviluppare un comportamento adattativo e di stabilire risposte in grado di reiettare il disturbo o di recuperare velocemente le prestazioni [61]. Uno degli approcci più comuni per la valutazione della resilienza infrastrutturale è il metodo TOSE (tecnico, organizzativo, sociale ed economico) [62]. L'aspetto tecnico della resilienza si riferisce alla capacità del sistema di funzionare a un livello desiderato. La dimensione organizzativa denota l'abilità delle istituzioni di affrontare le situazioni critiche e di agire per migliorare la resilienza del sistema. L'ambito sociale misura il contributo che la comunità può fornire, tramite le proprie azioni, nell'affrontare le difficoltà. Infine il dominio economico si riferisce alla capacità di limitare le perdite finanziarie dirette e indirette in seguito a una calamità.

Il lavoro di Pagano et al. [57] descrive un metodo per determinare la resilienza di un sistema urbano, riferendosi specificatamente ai sistemi di fornitura di acqua potabile. Viene sviluppato un modello dinamico che, essendo costruito tramite compartimenti, flussi e catene causa-effetto, descrive il sistema attraverso cicli di retroazione, facilitandone l'analisi [63]. L'approccio di modellizzazione dinamica prevede diversi passaggi [64]: la comprensione generale del sistema e dei suoi confini, l'identificazione delle variabili principali, la descrizione matematica dei processi che le coinvolgono, la strutturazione del modello e la simulazione degli scenari. È quindi necessario, per ottenere un modello matematico accurato, passare prima per un modello concettuale. Quest'ultimo (Figura 18) è creato per poter lavorare separatamente con i quattro aspetti principali della resilienza identificati dall'approccio TOSE, senza però tralasciare le loro reciproche interazioni. Le variabili più importanti sono la qualità infrastrutturale e la perdita di servizio idraulico in ambito tecnico, il livello di conoscenza e di preparazione della comunità ad affrontare le difficoltà in ambito organizzativo, la richiesta idrica in ambito sociale e le risorse finanziarie disponibili in ambito economico. La calibrazione quantitativa è avvenuta basandosi sui dati raccolti dopo il terremoto de L'Aquila [57].

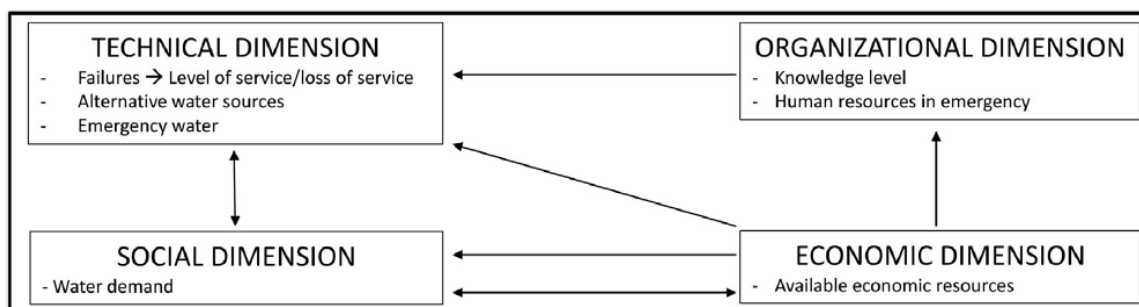


Figura 18: schema concettuale qualitativo del modello dinamico [57]

Poiché lo scopo principale di questo modello è quello di aiutare gli organi legislativi a identificare strategie di reazione in caso di disastri naturali, sono stati individuati quattro scenari in cui si può trovare un sistema nel momento in cui deve fronteggiare il cataclisma. Ognuno di questi corrisponde a un diverso assetto sociale ed è caratterizzato dai valori delle variabili (normalizzati tra 0 e 1) che ne influenzano il comportamento. Il caso base (scenario 0) è quello de L'Aquila. Esso è caratterizzato da valori dei parametri medio-alti, ad eccezione di quelli delle variabili organizzative che sono invece piuttosto bassi, identificando così un paese con buone disponibilità economiche, ma con acquedotti vulnerabili e carenze organizzative. Lo scenario 1 ha le grandezze a valori medio-bassi, rappresentando una società con infrastrutture non all'avanguardia, capacità organizzative scarse, una richiesta idrica media e poche disponibilità economiche. Lo scenario 2 presenta misure alte solo per le variabili tecniche ed economiche, denotando un background simile a quello dello scenario 0 ma con infrastrutture più solide. Lo scenario 3 infine rappresenta una strategia integrata, in cui le migliori tecnico-infrastrutturali sono accompagnate da una maggiore consapevolezza socio-organizzativa. In Tabella 1 sono descritte le variabili principali con i rispettivi valori in ogni scenario. Come misura delle prestazioni del sistema è stato adottato il deficit idrico, ovvero la differenza tra il volume di acqua disponibile e quello necessario [57].

Variable	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Community awareness	0.2	0.2	0.2	0.7
Reduction ratio	0.5	0.8	0.5	0.5
Maintenance	0.5	0.4	0.7	1
Concern and cooperation	0.8	0.3	0.8	0.8
Cooperation with other institutions	0.8	0.3	0.8	0.8
Knowledge of critical points	0.7	0.3	0.7	1
Availability of wells	1	0	1	1
Infrastructure physical vulnerability	0.8	0.8	0.5	0.5
Training level	0.3	0.3	0.3	1
Initial available economic resources	0.4	0	0.4	0.8

Tabella 1: variabili principali e loro valori [57]

In Figura 19 sono riportati i risultati delle simulazioni sui diversi scenari. Nel caso base il servizio non diminuisce drasticamente, ma impiega circa trenta giorni a recuperare piene funzionalità. Lo scenario 1 mostra come una perdita di abilità organizzative possa avere un'influenza drammatica sulle dinamiche del sistema che decrescono velocemente: le risorse economiche già inizialmente limitate diminuiscono ulteriormente a causa dell'incapacità di fornire un servizio adeguato, attivando così nel sistema un ciclo di feedback positivo che rinforza la decrescita della disponibilità idrica. Lo scenario 2 simula un miglioramento infrastrutturale rispetto allo scenario 1, con un effetto decisamente positivo sulla carenza idrica. Nello scenario 3 invece il disturbo esterno è quasi perfettamente reiettato grazie alla preparazione dei cittadini e alla disponibilità economica che fanno sì che il servizio idrico riesca ad adattarsi rapidamente alla variazione dell'ambiente esterno.

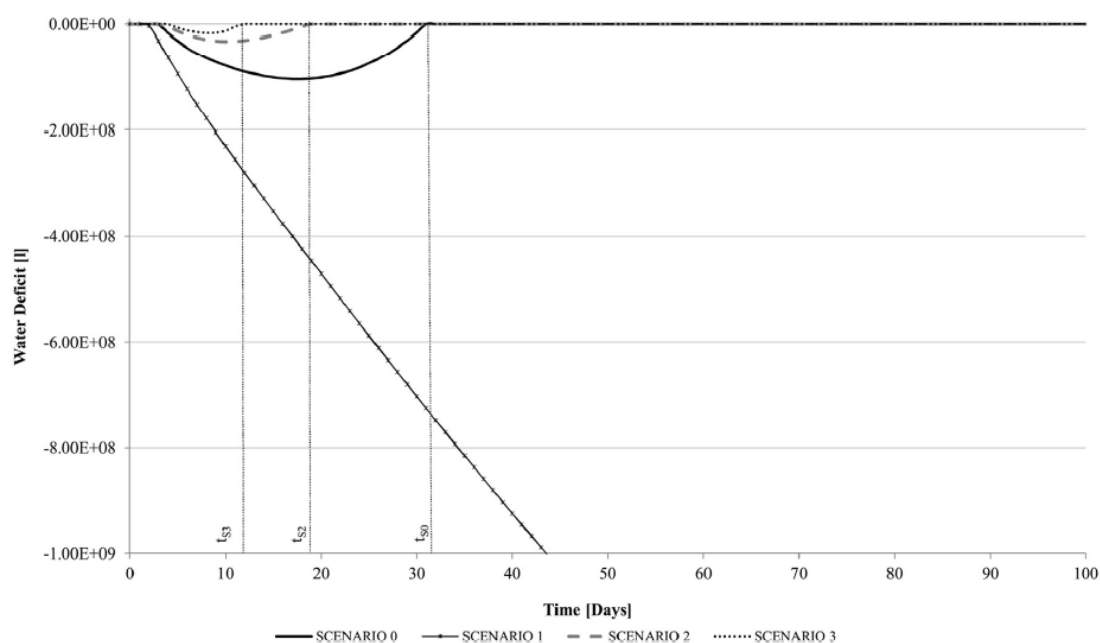


Figura 19: risultati dell'analisi di resilienza in relazione agli scenari sviluppati [57]

Gli scenari 0, 2 e 3 mostrano uscite con andamenti tipici dei sistemi con retroazione negativa, mentre l'output dello scenario 1 è caratteristico della retroazione positiva. Le principali differenze tra scenario 0 e scenario 1 risiedono nelle variabili economiche. Questa dimensione del modello TESO è dunque legata a due meccanismi di retroazione. Le carenze finanziarie attivano quello positivo (decrescente) che aumenta il deficit idrico, mentre la loro disponibilità ne attiva uno negativo che porta il sistema ad auto regolarsi. Anche gli ambiti tecnico, sociale e organizzativo sono associati a un feedback negativo, infatti il tempo di ripresa del sistema diminuisce significativamente se la disposizione di beni finanziari è combinata con un buon assetto sociale [57].

3.5 Riflessioni

Gli studi presentati in questo capitolo servono come prova della presenza massiccia di meccanismi di retroazione non solo nel complesso ecosistema umano, ma anche nei sottosistemi più specifici che lo compongono. I modelli esaminati si riferiscono a problemi attuali e che spesso possono influenzare la quotidianità della vita umana. Comprendere appieno il funzionamento del feedback e implementarlo in modelli sempre più accurati è dunque fondamentale per riuscire a spostare anche le singole attività umane verso un percorso sostenibile, stimando correttamente gli effetti di ogni comportamento o azione sull'ambiente circostante.

Conclusioni

In questo lavoro sono stati esposti molti studi riguardanti diversi sistemi, aventi come caratteristiche comuni la presenza umana e la sua interazione con l'ambiente naturale. Per ognuno di essi è stato presentato un modello, sviluppato ogni volta con tecniche diverse e poi simulato su uno o più scenari possibili. Quelli mostrati in questa tesi sono modelli concettuali, che sono in grado di fornire molte informazioni utili sul sistema, offrendone una visualizzazione grafica e fungendo da base per quelli quantitativi. I modelli teorici risultano spesso più comprensibili di quelli matematici, anche quando implementano complessi cicli di feedback. La modellizzazione è uno strumento molto valido per lo studio dei sistemi, ma non è perfetto. Infatti ogni tipo di modello, per quanto possa essere preciso e accurato, è una semplificazione della realtà che prova ad emulare. Quando le uscite di un modello ricalcano bene il comportamento effettivo del sistema, come nei casi qui presentati, la sua utilità principale è quella di analizzarne il funzionamento, in modo da poter fare previsioni future e da poter aiutare gli organi legislativi a compiere scelte oculate per raggiungere l'obiettivo sostenibile prefissato per il sistema. Per questo un modello deve essere il più inclusivo possibile, ovvero deve saper simulare situazioni e contesti diversi, tenendo anche conto dell'azione di potenziali disturbi, in modo da riflettere e anticipare al meglio la realtà. La simulazione su diversi scenari è utile anche per poter capire quale di questi garantisca uscite con andamenti più desiderabili, in modo da riuscire a regolare i parametri del sistema verso quello scenario ottimale. Per essere adeguato un modello deve includere la struttura fondamentale del sistema, quindi anche eventuali feedback intrinseci. Si è infatti visto che i modelli che li contengono sono spesso più accurati, per quanto chiaramente anche la retroazione sia una semplificazione di interazioni in realtà più complesse. Il feedback negativo porta il sistema ad auto regolarsi, aumentandone quindi la resilienza, mentre quello positivo lo porta ad esplodere. Previsioni fatte omettendo la retroazione possono quindi portare a risultati non accurati, che sovrastimano o sottostimano le capacità del sistema. È stato mostrato che spesso il comportamento del sistema è più sostenibile di quanto non si ritenga, proprio grazie alla presenza di questi meccanismi di retroazione che ne regolano l'uscita. Si è anche notato come scelte diverse compiute dagli organi legislativi possano portare all'attivazione di cicli di retroazione diversi, indirizzando così il comportamento del sistema verso gli andamenti che vengono ritenuti più opportuni.

Bibliografia

- [1] <https://www.treccani.it/enciclopedia/sostenibilita>
- [2] Vázquez P., del Río J.A., Cedano K.G., Martínez M., Jensen H.J. (2015) An Entangled Model for Sustainability Indicators. PLoS ONE 10(8): e0135250
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135250>
- [3] <https://www.treccani.it/enciclopedia/ecologia/>
- [4] Sikdar S.K., Glavič P., Jain R., Technological Choices for Sustainability, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004, 37-64
- [5] Malthus T.R., An Essay on the Principle of Population., Londra, J. Johnson, 1798
- [6] Kunz N.C., Moran C.J., Kastle T., Conceptualising “coupling” for sustainability implementation in the industrial sector: a review of the field and projection of future research opportunities, Journal of Cleaner Production, Volume 53, 2013, Pages 69-80, ISSN 0959-6526,
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.040>
- [7] Finesso L. Segnali e sistemi, Padova, Libreria Progetto, 2021
- [8] <https://www.okpedia.it/retroazione>
- [9] Glossario minimo dell'IPCC, CMCC, Lecce, 2014
- [10] Stefan J., Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur, Sitzungsberichte der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, 1879
- [11] Boltzmann L., Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der elektromagnetischen Lichttheorie, Annalen der Physik und Chemie, 1884
- [12] Burch W.R. Jr., Machlis G.E., Force J.E., The Structure and Dynamics of Human Ecosystems. Toward a Model for Understanding and Action, New Haven & London, Yale university press, 2017
- [13] https://www.treccani.it/enciclopedia/sistema-sociale_%28Dizionario-di-Storia%29/#:~:text=Nella%20tradizione%20analitica%20delle%20scienze,lega%20le%20parti%20al%20tutto

- [14] Rodriguez-Gonzalez P.T., Rico-Martinez R., Rico-Ramirez V., Effect of feedback loops on the sustainability and resilience of human-ecosystems, *Ecological Modelling*, Volume 426, 2020, 109018, ISSN 0304-3800, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109018>
- [15] Nisal A, Diwekar U, Hanumante N, Shastri Y, Cabezas H (2022) Integrated model for food-energy-water (FEW) nexus to study global sustainability: The main generalized global sustainability model (GGSM). *PLoS ONE* 17(5): e0267403. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267403>
- [16] Cabezas H., Whitmore H.W., Pawlowski C.W., Mayer A.L., On the sustainability of an integrated model system with industrial, ecological, and macroeconomic components, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 50, Issue 2, 2007, Pages 122-129, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.06.011>
- [17] Lotka A., *Elements of Physical Biology*. Williams and Wilkins, Baltimore, Maryland, 1925
- [18] Volterra V., *Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi*. *Memoria Regia Accademia Nazionale Lincei* 6 (2), 1926, 31–113
- [19] Rodriguez-Gonzalez P.T., Rico-Martinez R., Rico-Ramirez V., An integrated stochastic economic-ecological-social model with stratified-population, *Ecological Modelling*, Volume 368, 2018, Pages 15-26, ISSN 0304-3800, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.11.012>
- [20] https://www.treccani.it/enciclopedia/pil_%28Dizionario-di-Economia-e-Finanza%29/
- [21] The World Bank. CO2 Emissions (kt) Data; 2020
- [22] The World Bank. GDP (current USD) Data; 2020
- [23] The World Bank. Nitrous Oxide Emissions (thousand metric tons of CO₂ equivalent) Data; 2020
- [24] United Nations D. *World Population Prospects Highlights, 2019 revision Highlights, 2019 revision*. United Nations; 2019.
- [25] Boumans R., Costanza R., Farley J., Wilson M.A., Portela R., Rotmans J., Villa F., Grasso M., Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the GUMBO model, *Ecological Economics*, Volume 41, Issue 3, 2002, Pages 529-560, ISSN 0921-8009, [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00098-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00098-8)
- [26] Watson A., Lovelock J.E., 1983. Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld. *Tellus* 35 (B), 286–289, <https://doi.org/10.3402/tellusb.v35i4.14616>
- [27] Eason, T., Cabezas, H., Evaluating the sustainability of a regional system using Fisher information in the San Luis Basin, Colorado, *Journal of Environmental Management*, Volume 94, Issue 1, 2012, Pages 41-49, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.08.003>

- [28] Wackernagel M.A., 1996. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publishers, Philadelphia.
- [29] Heberling, M.T., Templeton, J.J., Wu, S., Green Net Regional Product for the San Luis Basin, Colorado: An economic measure of regional sustainability, *Journal of Environmental Management*, Volume 111, 2012, Pages 287-297, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.02.035>
- [30] Todorov, E., Optimal control theory. In: *Bayesian brain*, ed. K. Doya, pp. 269–98. MIT Press, 2006
- [31] Cheung W.W.L., Sarmiento J.L., Dunne J., Frolicher T.L., Lam V., Palomares M.L.D., Watson R., Pauly D., Shrinking of fishes exacerbates impacts of global ocean changes on marine ecosystems. *Nature Clim. Change*, 2012, <https://doi.org/10.1038/nclimate1691>
- [32] Shackell N.L., Frank K.T., Fisher J.A.D., Petrie B., Leggett W.C., 2010 Decline in top predator body size and changing climate alter trophic structure in an oceanic ecosystem. *Proc. R. Soc. B* 277, 1353–1360, <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.1020>
- [33] Garcia S.M., Kolding J., Rice J., Rochet M.J., Zhou S., Arimoto T., Beyer J.E., Borges L., Bundy A., Dunn D., Fulton E.A., Hall M., Heino M., Law R., Makino M., Rijnsdorp A.D., Simard F., Smith A.D.M., 2012 Reconsidering the consequences of selective fisheries. *Science* 335, 1045–1047, [10.1126/science.1214594](https://doi.org/10.1126/science.1214594)
- [34] Jørgensen C., Enberg K., Dunlop E.S., Arlinghaus R., Boukal D.S., Brander K., Ernande B., Gårdmark A.G., Johnston F., Matsumura S., Pardoe H., Raab K., Silva A., Vainikka A., Dieckmann U., Heino M., Rijnsdorp A.D., 2007 Managing evolving fish stocks. *Science* 318, 1247–1248, [10.1126/science.1148089](https://doi.org/10.1126/science.1148089)
- [35] Sharpe D., Hendry A., 2009 Life history change in commercially exploited fish stocks: an analysis of trends across studies. *Evol. Appl.* 2, 260–275, <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2009.00080.x>
- [36] Palkovacs E.P., 2012 The overfishing debate: an eco-evolutionary perspective. *Trends Ecol. Evol.* 26, 616–617
- [37] Enberg K., Jørgensen C., Dunlop E.S., Varpe Ø., Boukal D.S., Baulier L., Eliassen S., Heino M., 2012 Fishing induced evolution of growth: concepts, mechanisms and the empirical evidence. *Mar. Ecol.* 33, 1–25, <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2011.00460.x>
- [38] Andersen K.H., Brander K., 2009 Expected rate of fisheries-induced evolution is slow. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 106, 11 657–11 660, <https://doi.org/10.1073/pnas.0901690106>

- [39] Audzijonyte A., Kuparinen A., Gorton R., Fulton E.A., 2013 Ecological consequences of body size decline in harvested fish species: positive feedback loops in trophic interactions amplify human impact. *Biol Lett* 9: 20121103, <https://doi.org/10.1098/rsbl.2012.1103>
- [40] Fulton E.A., Link J.S., Kaplan I.C., Savina-Rolland M., Johnson P., Ainsworth C., Horne P., Gorton R., Gamble R.J., Smith A.D.M., Smith D.C., 2011 Lessons in modelling and management of marine ecosystems: the Atlantis experience. *Fish and Fisheries*, Volume 12, Issue 2, p. 171-188, <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2011.00412.x>
- [41] Fulton E.A., Smith A.D.M., Smith D.C., 2007 Alternative management strategies for Southeast Australian Commonwealth fisheries: Stage 2: Quantitative management strategy evaluation. Australian Fisheries Management Authority, Fisheries Research and Development Corporation
- [42] <http://www.marepesca.it/enciclopedia/demersale>
- [43] Environmental Resource and Education Funding Opportunities National Science Foundation
- [44] Liu J., Dietz T., Carpenter S.R., Folke C., Alberti M., Redman C.L., Schneider S.H., Ostrom E., Pell A.N., Lubchenco J., Taylor W.W., Ouyang Z., Deadman P., Kratz T., Provencher W. (2007) Coupled human and natural systems. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 36: 639–649. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[639:CHANS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[639:CHANS]2.0.CO;2)
- [45] [https://www.treccani.it/enciclopedia/invasioni-biologiche_\(Enciclopedia-Italiana\)#:~:text=Con%20il%20termine%20invasioni%20biologiche,in%20maniera%20abnorme%20e%20incontrollata.](https://www.treccani.it/enciclopedia/invasioni-biologiche_(Enciclopedia-Italiana)#:~:text=Con%20il%20termine%20invasioni%20biologiche,in%20maniera%20abnorme%20e%20incontrollata.)
- [46] Sinclair J.S., Brown J.A., Lockwood J.L. (2020) Reciprocal human-natural system feedback loops within the invasion process. In: Wilson J.R., Bacher S., Daehler C.C., Groom Q.J., Kumschick S., Lockwood J.L., Robinson T.B., Zengeya T.A., Richardson D.M. (Eds) *Frameworks used in Invasion Science*. *NeoBiota* 62: 489–508
- [47] Burke M.A., Young H.P., Social norms. In *Handbook of Social Economics*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2011; pp. 311–338.
- [48] Abrahamse W., Steg L., Social influence approaches to encourage resource conservation: A meta-analysis, *Global Environmental Change*, Volume 23, Issue 6, 2013, Pages 1773-1785, ISSN 0959-3780, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.07.029>
- [49] Miller D.T., Prentice D.A., Changing Norms to Change Behavior. *Annu. Rev. Psychol.* 2016, 67, 339–361
- [50] <https://www.treccani.it/vocabolario/biologico/>

- [51] Ogorevc M., Primc K., Slabe-Erker R., Kalar B., Dominko M., Murovec N., Bartolj T., Social Feedback Loop in the Organic Food Purchase Decision-Making Process. *Sustainability* 2020, 12, 4174. <https://doi.org/10.3390/su12104174>
- [52] Goldsmith, E.B.; Goldsmith, R.E. Social influence and sustainability in households. *Int. J. Consum. Stud.* 2011, 35, 117–121, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1470-6431.2010.00965.x>
- [53] Nowak A., Vallacher R.R., Bui-Wrzosinska, L., Coleman, P.T., Attracted to conflict: A dynamical perspective on malignant social relations. In *Understanding Social Change: Political Psychology in Poland*; Nova Science Pub. Inc.: Hauppauge, NY, USA, 2006; pp. 33–49.
- [54] Ajzen, I. The theory of planned behavior. *Organ. Behav. Hum. Decis. Process.* 1991, 50, 179–211
- [55] Ajzen I. (1985). From intentions to actions: A theory of planned behavior. In J. Kuhi & J. Beckmann (Eds.), *Action-control: From cognition to behavior* (pp. 11-39). Heidelberg: Springer
- [56] Saputro D.R.S. et al 2019 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1217 012104
- [57] Pagano A., Pluchinotta I., Giordano R., Vurro M., Drinking water supply in resilient cities: Notes from L’Aquila earthquake case study, *Sustainable Cities and Society*, Volume 28, 2017, Pages 435-449, ISSN 2210-6707, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.005>
- [58] Chang S.E., Pasion C., Tatebe K., & Ahmad R. (2008). Linking lifeline infrastructure performance and community disaster resilience: Models and multi-stakeholder processes, technical report MCEER-08-0004
- [59] Davies T. (2015). Developing resilience to naturally triggered disasters. *Environment Systems & Decisions*, <http://dx.doi.org/10.1007/s10669-015-9545-6Dolce>,
- [60] Park J., Seager T P., Rao P.S., Convertino M., & Linkov I. (2013). Integrating risk and resilience approaches to catastrophe management in engineering systems. *Risk Analysis*, 33(3), 356–367. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01885.x>
- [61] Francis R., & Bekera B. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 121, 90–103.
- [62] Bruneau M., Chang S.E., Eguchi R.T., Lee G.C., O’Rourke T.D., Reinhorn A.M. et al. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra*, 19(4), 733–752
- [63] Sterman J. (2000). *Business Dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw Hill.

[64] Davies E.G.R. and Simonovic S P. (2011). Global water resources modeling with an integrated model of the social-economic-environmental system. *Advances in Water Resources*, 34(6), 684–700. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.02.010>