

PRESENTE E FUTURO DELLA TERRA: LA PAROLA ALL'ECOLOGIA

di Giuseppe Barbiero

Dall'ipotesi Gaia alle scienze del sistema Terra 248

Il controllo della biosfera sulla temperatura di superficie 248

Il controllo della biosfera sulla composizione chimica dell'atmosfera 250

L'ecologia globale del futuro 253

Parole chiave 256

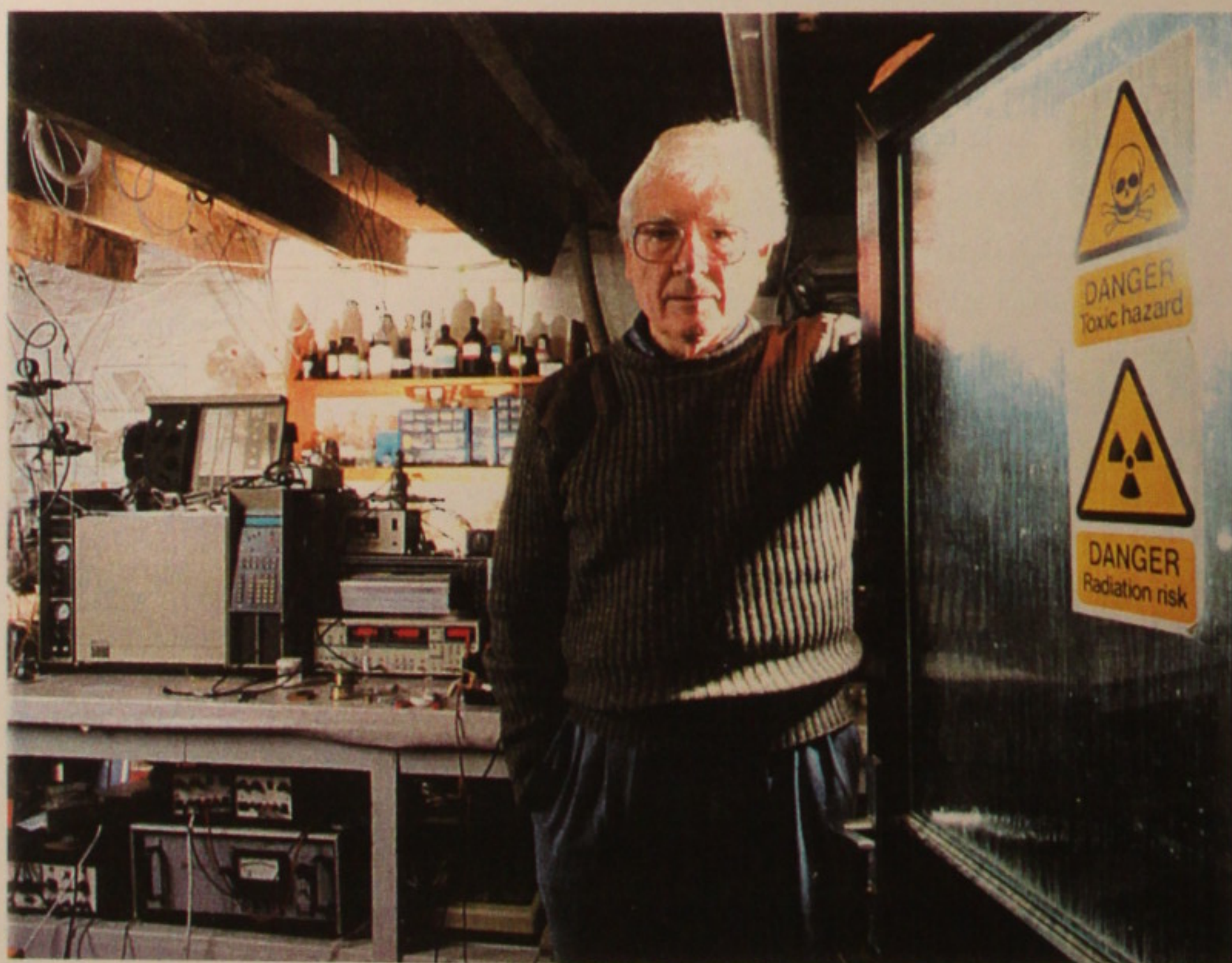
Bibliografia

Sitografia ragionata

Dall'ipotesi Gaia alle scienze del sistema Terra

Gli astronauti che hanno avuto il privilegio di poter contemplare da lontano il nostro pianeta affermano di essere rimasti incantati da quel piccolo pianeta bianco e blu che si staglia nell'immensa oscurità dello spazio (Lovelock, 2000). I colori che lo caratterizzano – il bianco delle nubi e delle calotte polari, il blu degli oceani – sono rivelatori della presenza di acqua nei tre stati: liquido, solido e gassoso. E la presenza di grandi quantità d'acqua allo stato liquido significa che la temperatura media di superficie è compresa tra 0 e 100 °C: condizioni eccellenti per la vita. La principale caratteristica della Terra è infatti quella di essere un pianeta che ospita la vita. Forse è qualcosa di più: è un pianeta vivo, con un metabolismo

James Lovelock, lo scienziato britannico "padre" di Gaia: secondo la sua teoria, tutti gli ecosistemi sono interconnessi e possono essere studiati costruendo dei modelli matematici opportuni. La Terra viene vista come un unico organismo vivente, di cui l'uomo è solo una delle componenti: da qui il richiamo a una maggiore responsabilità e sensibilità ecologica dell'agire umano nel delicato equilibrio del sistema Terra.



sui generis che ne ha garantito le condizioni di abitabilità per non meno di 3,8 miliardi di anni.

Dopo l'esperienza trascorsa ai Jet Propulsion Laboratories a metà degli anni sessanta, lo scienziato britannico James Lovelock cominciò a meditare su due insolite caratteristiche del nostro pianeta: la temperatura media di superficie è decisamente più bassa di quella che si potrebbe dedurre considerando la distanza dal Sole e la struttura della Terra; la composizione chimica dell'atmosfera è assai improbabile, caratterizzata in prevalenza da azoto e ossigeno molecolari, dalla virtuale assenza di anidride carbonica e dalla presenza in tracce di alcuni gas che non dovrebbero esserci, come il metano. Lovelock si convinse che queste due strane caratteristiche non potevano che essere opera degli organismi viventi che abitano il pianeta: sono loro infatti a produrre quasi tutto l'azoto e l'ossigeno molecolari dell'atmosfera, e a mantenere la temperatura media di superficie entro valori compatibili con la presenza di acqua allo stato liquido.

La vita quindi non è solo una forza geologica come le altre, capace di modellare la superficie e l'atmosfera del pianeta, ma svolgerebbe questo compito seguendo logiche omeostatiche che favoriscono la presenza della vita stessa sul pianeta. È l'"ipotesi Gaia" (Lovelock e Margulis, 1974) che ha dato origine a due fondamentali linee di ricerca dell'ecologia globale moderna: individuare i fattori controllati dalla biosfera che stabilizzano ovvero modificano il clima; comprendere il ruolo della biosfera nel regolare i cicli (bio)geochimici del pianeta. Nel corso degli anni le conferme sperimentali hanno progressivamente trasformato l'ipotesi Gaia in una vera e propria teoria (Lovelock, 1990), che rappresenta il *core* di nuove discipline scientifiche come la geofisiologia o le scienze del sistema Terra. L'approccio sistemico della teoria di Gaia e la potenza degli strumenti di calcolo attuali hanno reso possibile allestire un programma di ricerca che promette negli anni a venire di far sì che la vita, nella sua forma umana, possa prendere coscienza del ruolo che gioca nel delicato incastro degli equilibri ecologici del pianeta.

Il controllo della biosfera sulla temperatura di superficie

Il mondo delle margherite

La principale critica mossa all'ipotesi Gaia agli esordi fu quella di un'eccessiva teleologia, nel suo affidare alla biosfera il compito di regolare e mantenere le condizioni per il fiorire della vita stessa. Per rispondere a questa fondamentale obiezione Lovelock e



Andrew Watson, all'epoca suo giovane collaboratore, cominciarono a studiare un modello teorico che potesse rendere ragione del controllo termostatico della superficie del pianeta escludendo intenti finalistici. Nacque così Daisyworld, un mondo immaginario dove le margherite sono capaci di regolare la temperatura di superficie del proprio pianeta (Watson e Lovelock, 1983). Stephan Harding, uno dei più acuti studiosi dei sistemi termocibernetici di Gaia, così descrive Daisyworld: «Daisyworld – il “pianeta delle margherite” – è un modello di pianeta semplificato che, come il nostro, ruota intorno a un Sole che nel corso degli eoni aumenta lentamente il proprio flusso di energia. Nel suolo umido e ricco di nutrienti di Daisyworld ci sono milioni di semi delle uniche due specie che popolano il pianeta: margherite nere e margherite bianche. All'inizio il Sole di Daisyworld è così debole che non riesce a scaldare il suolo a sufficienza per poter far germinare i semi. Ma dopo qualche tempo la sua energia aumenta, fino a quando è abbastanza intensa da far germogliare i semi di margherita in gran numero. Grazie al loro colore le margherite nere sono in grado di assorbire l'energia solare con maggiore efficienza di quelle bianche, che invece ne riflettono una gran parte. Le margherite nere così si diffondono in ogni angolo del pianeta, perché sono capaci di produrre un numero molto maggiore di semi. Le margherite nere diventano dominanti nella porzione abitabile del pianeta e, assorbendo energia radiante, contribuiscono a riscaldare l'atmosfera, rendendo le condizioni più adatte alla vita in generale. Ma via via che il Sole di-

venta più caldo, le margherite bianche cominciano a stare meglio, perché, riflettendo il calore, evitano il surriscaldamento. Inoltre, grazie alle loro proprietà riflettenti, le margherite bianche contribuiscono a raffreddare la superficie del pianeta. Nell'arco di un lungo periodo di tempo su Daisyworld, la temperatura di superficie del pianeta è regolata in modo automatico dalle fluttuazioni delle due popolazioni di margherite bianche e nere, che competono fra loro in accordo con le leggi della selezione naturale di Darwin» (Harding, 1998).

Omeostasi e omeorresi


Daisyworld è ovviamente una semplificazione che dimostra soltanto che in linea teorica la biosfera può regolare la temperatura di superficie del pianeta senza che ciò implichi consapevolezza o un comportamento diretto a un fine che vada oltre la propria capacità di sopravvivenza e di riproduzione. Daisyworld è quindi un tipico sistema omeostatico dove le parti instaurano e mantengono un equilibrio fra loro che garantisce stabilità all'intero mediante una catena di anelli di retroazione negativa. Tuttavia nella biosfera possono affermarsi specie che tendono a perturbare piuttosto che a mantenere l'equilibrio e che, in linea di principio, possono innescare processi a cascata (anelli di retroazione positiva) che amplificano, anziché smorzare, le fluttuazioni. Un sistema omeostatico per definizione tende ad assorbire le fluttuazioni, ma se il processo a cascata riesce a spostare lo stato di equilibrio (*steady state*) del sistema in modo irreversibile, il sistema entra in crisi fino a quando non raggiunge un nuovo e di-

Immaginiamo un mondo, Daisyworld, in cui ci siano solo due tipi di popolazione, margherite bianche e margherite nere: questo mondo sarà in grado di rispondere alle variazioni di energia solare che giungono sulla sua superficie in modo da mantenere le proprie condizioni di equilibrio? Il modello descritto da Lovelock e Watson attraverso l'esperimento mentale di Daisy mostra che sul lungo periodo la biosfera è in grado di autoregolare la temperatura di superficie del pianeta, senza dover ricorrere con ciò a intenti finalistici.

verso equilibrio. Si parla allora di sistema *omeorretico* per indicare un tipo di sistema omeostatico caratterizzato nel corso del tempo da modifiche irreversibili dello stato di equilibrio. Gli organismi viventi sono tipici sistemi omeorretici e Gaia non fa eccezione (Schwartzman, 1999).

La vita sulla Terra: fortuna o necessità?

La storia di Gaia è costellata di eventi drammatici che hanno mutato drasticamente il corso dell'evoluzione degli organismi viventi. Le grandi catastrofi che si sono abbattute sul pianeta hanno provocato grandi estinzioni. Alcune di queste catastrofi sono di natura *abiotica*, come per esempio quelle generate dalla caduta di meteoriti o dall'esplosione di grandi vulcani, altre sono invece di natura *biotica*, come la comparsa degli organismi fotosintetizzatori che hanno trasformato l'atmosfera riducente dei primordi in un'atmosfera ossidante e pericolosa per gli organismi anaerobi. Molte volte Gaia ha dovuto far fronte a emergenze grandi e piccole che ha sempre superato brillantemente. Partendo da queste considerazioni Andrew Watson, il coautore del modello di Daisyworld, discute della possibilità che la biosfera possa essere un sistema autoregolante.

«L'ipotesi Gaia – che la superficie della Terra sia un sistema omeostatico che favorisce il fiorire della vita – implica che la biosfera sia un agente molto importante nel forgiare l'ambiente globale, in particolare la sua composizione chimica. L'idea che il ruolo della biosfera sia normalmente quello di stabilizzare e regolare l'ambiente è assai controversa e molta gente non la condivide. Ad essa si contrappone una visione che, a mio avviso, è una forma particolare del “principio antropico” . La maggior parte dei geologi e dei geochimici non assumono consapevolmente il “principio antropico” come quadro concettuale, tendono a essere più prosaici. Tuttavia se domandiamo loro “perché siamo ancora qui?” scrollano le spalle e rispondono: “solo un caso fortunato”. In realtà questa è, secondo me, una formulazione laica del “principio antropico”. Se entriamo nel merito possiamo dire che la nostra presenza sulla Terra dipende dalla vita che si è insediata, ha resistito e si è evoluta su questo pianeta. Ma la persistenza della vita su questo pianeta non può essere utilizzata come prova o confutazione di alcunché, è solo la preconditione per cui noi siamo qui. Le probabilità che la vita metta radici, le probabilità che la vita resista su questo pianeta potrebbero essere virtualmente nulle, ma se la vita non si fosse impegnata in tal senso noi non potremmo essere qui e non potremmo riflettere sulla vita. Possiamo porre la questione in altri termini:

la differenza tra un sistema che è sopravvissuto per puro caso e un sistema che è sopravvissuto nei termini dell'ipotesi Gaia – che è sopravvissuto cioè perché non poteva fare a meno di farlo – sta nel fatto che nel secondo si afferma che l'autoregolazione è una proprietà intrinseca del sistema» (Watson, 1999).

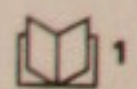
Il controllo della biosfera sulla composizione chimica dell'atmosfera

Gaia ricicla continuamente tutti gli elementi essenziali alla vita. Gli scarti di un organismo diventano la materia prima per un altro e così via, fino a chiudere quello che poeticamente è stato definito «il grande cerchio della vita». Gli elementi chimici essenziali alla vita quindi vengono continuamente metabolizzati dalla biosfera e dopo il loro utilizzo rilasciati nelle matrici gaiane (il suolo, l'aria e l'oceano). Qui possono essere ripresi da altri organismi oppure finire seppelliti o intrappolati in qualche pozzo, che a sua volta con il tempo si trasformerà in serbatoio. Il 95% delle molecole che compongono l'atmosfera sono frutto di processi chimico-fisici mediati dalla biosfera. Le due principali specie molecolari – l'ossigeno (O_2) e l'azoto (N_2) – sono prodotti che transitano nell'atmosfera provenendo rispettivamente dal ciclo del carbonio, a opera degli organismi fotosintetizzatori, e dal ciclo dell'azoto, a opera degli organismi denitrificatori.

Il ciclo biogeochimico del carbonio

Ancora vent'anni fa il ciclo geochimico del carbonio era immaginato come un meccanismo meramente inorganico. Oggi sappiamo che la biosfera è fortemente coinvolta. Attraverso il ciclo del carbonio infatti la biosfera da un lato regola la quantità di ossigeno molecolare presente nell'atmosfera, dall'altro influenza il clima per via diretta, mediante il seppellimento di carbonio organico prima che questo si trasformi di nuovo in CO_2 . Ed è noto infatti che le oscillazioni della temperatura media di superficie riflettono assai fedelmente le variazioni di concentrazione di CO_2 nell'atmosfera.

Il primo a considerare in maniera sistematica il contributo – qualitativo e quantitativo – della biosfera al ciclo del carbonio è stato il geochimico della Yale University, Robert Berner (Berner e Berner, 1996). «Nel modello caro a Bob Berner – spiega Watson – la temperatura tende progressivamente a diminuire, grazie soprattutto alla sottrazione di CO_2 dall'atmosfera. In un certo senso il modello di Berner funziona come Lovelock aveva previsto nell'ipotesi Gaia. La principale caratteristica di questo modello tuttavia è la rapida diminuzione





della concentrazione della CO_2 atmosferica tra la fine del Silurano e il Devoniano, causata dall'espansione delle piante tracheofite, la vegetazione che ricopre la superficie terrestre. La crescita degli alberi e la formazione del legno contribuiscono a sottrarre CO_2 all'atmosfera, ma pongono un problema ecologico del tutto nuovo: la lignina. Questo polimero non doveva essere facile da degradare e infatti lo vediamo accumularsi per tutto il Carbonifero, periodo in cui si sono formati i giacimenti petroliferi e le miniere di carbone. Il risultato è che la CO_2 scompare quasi del tutto dall'atmosfera e si è prossimi a un'altra grande crisi. Ma fortunatamente, dopo circa 100 milioni di anni, gli organismi trovano il modo di decomporre la lignina. E di nuovo la concentrazione atmosferica di CO_2 riprende a salire. Osservando con attenzione questo modello possiamo dire che, sì, l'intero sistema reagisce come un sistema regolatore, ma non in modo preciso e costante, come farebbe un termostato. Sembra invece un sistema regolatore piuttosto inaffidabile, specialmente nei casi in cui occorra sviluppare rapidamente un'innovazione biologica per riequilibrare il sistema entrato in crisi» (Watson, 1999).

Ancora non conosciamo molti dettagli del ciclo del carbonio, ma è chiaro che la biosfera non sempre ha una funzione omeostatica. Talvolta essa contribuisce ad alimentare le oscillazioni del sistema. Nel caso dei

recenti cicli di glaciazione, per esempio, una volta oltrepassati i limiti di temperatura entro i quali oscilla il sistema, la biosfera anziché smorzare le oscillazioni tende ad amplificarle. Non sappiamo esattamente perché questo accada anche se è ragionevole supporre che entrino in gioco anelli di retroazione positiva.

Il ciclo biogeochimico dell'azoto

Il ciclo dell'azoto è secondo forse solo a quello del carbonio nel metabolismo di Gaia. L'azoto è il principale elemento presente nell'aria, contribuisce in modo sostanziale al mantenimento della pressione atmosferica, ed è virtualmente ubiquitario nella biosfera: dagli aminoacidi che costituiscono le proteine alle basi azotate degli acidi nucleici, passando per un enorme numero di biomolecole. Il biochimico canadese George Ronald Williams ha probabilmente più di ogni altro studiato la relazione tra il metabolismo delle cellule e il metabolismo di Gaia. Egli osserva come tre enzimi – la glutamina sintetasi, l'azoto reduttasi e la nitrigenasi – catalizzino reazioni fondamentali non solo per i rispettivi organismi ma anche per l'intero ciclo biogeochimico dell'azoto (Williams, 1996). Secondo Williams è significativo che «l'interazione a livello biologico dei grandi cicli biochimici globali del carbonio e dell'azoto in realtà rifletta eventi che si verificano a livello molecolare. Si potrebbe quindi sostenere che la regola-

Il modello che spiega il contributo della biosfera nel ciclo del carbonio fornito dal geochimico Robert Berner sembra funzionare in armonia con il meccanismo dell'equilibrio di Gaia: la crescita degli alberi e la formazione del legno contribuiscono a sottrarre CO_2 (anidride carbonica) all'atmosfera, fino a farla quasi scomparire, finché l'arrivo di organismi in grado di decomporre la lignina fa risalire nuovamente la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera, permettendo al sistema di ritornare in una situazione di equilibrio. Ma lungi dal funzionare come un termostato, questo sistema regolatore pare inefficace per intervenire a breve termine in situazioni critiche.

zione dei cicli biochimici globali stia nel controllo molecolare sul metabolismo degli organismi. Da questa prospettiva, il metabolismo globale andrebbe visto proprio più o meno come una conseguenza delle proprietà delle proteine sintetizzate sotto il controllo dei geni, esattamente come nel metabolismo cellulare. I cicli biochimici globali degli elementi nutritivi fanno davvero pensare al metabolismo di un metaorganismo, Gaia. Ma, la similitudine è ancora più impressionante giacché questi cicli ci appaiono coordinati e regolati dagli stessi meccanismi molecolari cui sottostanno i processi metabolici degli organismi reali. Forse dovremmo cominciare a occuparci di questi meccanismi avendo chiaro in mente il loro significato ecologico, anche globale».

Il concetto di gilda biochimica

Finora l'analisi dei cicli biogeochimici è stata di natura prevalentemente qualitativa. Nel futuro è possibile prevedere che si potrà disporre di dati sempre più precisi, tali da permettere un'analisi quantitativa dei flussi di materia nei cicli. Occorre però sviluppare contestualmente anche nuovi strumenti concettuali che consentano agli studiosi di definire entro quadri teorici più chiari i cicli biogeochimici. Per esempio, talvolta diventa molto più utile abbandonare la classica cladistica su base genetica per adottare una classificazione su base funzionale, raggruppando gli organismi viventi in gruppi che svolgono la stessa funzione biochimica nei cicli biogeochimici del pianeta. È Tyler Volk a offrire una spiegazione del valore di questo sistema classificatorio: «nel gergo ecologico questa suddivisione si concretizza in gruppi chiamati "gilde". Abbiamo così la gilda degli impollinatori, che include api, falene e colibrì, quelle dei perforatori di germogli, dei traforatori di fusti, dei masticatori di radici. Per ciascuna gilda si può immaginare una bandiera con emblema, sullo stile delle gilde medioevali degli orafi, dei lavoratori del peltro e dell'ardesia. Proprio come le gilde degli artigiani nell'economia del Medioevo, i livelli ecologici e le gilde sono spesso considerati componenti funzionali» (Volk, 1998).

La classificazione funzionale delle gilde biochimiche consente di individuare le specie chiave che possiedono un corredo enzimatico fondamentale. Le specie chiave sono quelle che provvedono all'organizzazione di un determinato elemento mettendolo in questo modo a disposizione dell'intera biosfera. Ogni ciclo biogeochimico è caratterizzato da una gilda che svolge il ruolo di organizzazione, spesso coadiuvata da altre gilde che provvedono a fissare l'elemento, concentrandolo in aree circoscritte al fine di migliorare l'efficienza dell'organizzazione. Al

termine del percorso dell'elemento nella biosfera il ciclo viene poi chiuso da altre gilde biochimiche che provvedono a decomporre le sostanze organiche liberando molecole inorganiche. Queste vie che collegano il mondo organico a quello inorganico sono però ancora in gran parte da esplorare.

Riconoscere Gaia dopo Daisyworld: il tasso di ricircolo

Abbiamo visto come in alcuni casi la biosfera abbia contribuito ad amplificare le normali oscillazioni della temperatura di superficie sulla Terra. Se la vita può di volta in volta essere un fattore stabilizzante ovvero destabilizzante delle condizioni di abitabilità del pianeta, che cosa rimane allora della teoria di Gaia? «Nulla – risponde ancora Volk – se non che Gaia è quello che è. Nessuno in realtà sostiene che Daisyworld debba essere l'unico paradigma indicatore per la teoria di Gaia. Abbiamo bisogno di altri indicatori oltre a Daisyworld che ci permettano di riconoscere aspetti poco chiari di Gaia. Recentemente ho proposto un indicatore quantitativo che mi sembra possa essere adatto allo scopo. L'ho chiamato "tasso di ricircolo" ed è definito come il rapporto tra il flusso di un elemento che viene processato dalla fotosintesi e quello che esce dal ciclo della biosfera. Il tasso di ricircolo misura la capacità di amplificazione della vita per mezzo di processi interni alla biosfera (tasso di ricircolo > 1), rispetto alla capacità di organizzazione della fotosintesi se questa potesse contare solo sull'approvvigionamento esterno e non sul riciclaggio, immaginando per esempio che tutti i prodotti della fotosintesi finiscano seppelliti, anziché in parte riciclati (tasso di ricircolo = 1). In altre parole, il tasso di ricircolo indica il numero di volte in cui un dato elemento entra ed esce dai vari organismi prima di finire seppellito in qualche pozzo, cioè di non essere più riciclabile dalla vita entro tempi biologici. Proviamo a utilizzare i valori del tasso di ricircolo per valutare l'importanza di ciascun elemento nella dinamica di Gaia. Prendiamo i valori del ciclo biogeochimico globale del carbonio: 100 miliardi di tonnellate di carbonio vengono fissate ogni anno dalla fotosintesi a fronte di appena mezzo miliardo di tonnellate offerte dal mondo inorganico, rocce o vulcani. Il tasso di ricircolo di Gaia per il carbonio è quindi di 200, mentre il tasso di ricircolo dello zolfo è di 10. Che cosa vogliono dire questi valori? Il tasso di ricircolo è una misura della forza della vita. Varia da elemento a elemento. Studiare le variazioni del tasso di ricircolo ci permette di studiare gli elementi in rapporto fra di loro e valutarne la loro importanza nella costruzione del sistema Gaia. Per esempio, il

tasso di ricircolo terrestre del fosforo è di 46. Ciò significa che ciascun atomo di fosforo che viene organicato nella biosfera terrestre verrà riciclato dalle piante al suolo e viceversa mediamente 46 volte prima di lasciare il sistema terrestre attraverso un corso d'acqua. Così i cicli biogeochimici della vita, o più precisamente, della vita e delle matrici che circondano la vita (oceano, suolo, atmosfera), amplificano la normale disponibilità di fosforo dal mondo inorganico per creare 46 volte più vita di quanto ce ne potrebbe essere se ciascun atomo venisse utilizzato una sola volta dalla pianta prima di uscire dai confini della biosfera» (Volk, 2001).

Il messaggio è quindi chiaro: Gaia è un sistema chiuso che nel corso del tempo tende a favorire l'evoluzione di organismi capaci di operare smorzamenti nelle oscillazioni delle condizioni di abitabilità del pianeta. Tuttavia, la vita ha una esuberanza propria, una capacità cioè di amplificare i processi della vita stessa, che in determinate circostanze consente di violare questa regola generale. È questo che rende Gaia quello che è.

L'ecologia globale del futuro

Gaia è stabile nel tempo perché è un sistema chiuso attraversato da flussi di energia, ma non di materia. Gaia quindi ricicla tutto, il rifiuto di un organismo è cibo per un altro, e in questa opera continua di riciclaggio non c'è posto per l'accumulo di rifiuti. Quando la biosfera non è capace di smaltire i rifiuti, questi si accumulano e forzano gli equilibri del sistema fino a un punto di non ritorno che genera nuovi equilibri. Lo studio dei fattori critici che ci avvicinano pericolosamente a punti di non ritorno è uno dei principali sforzi della ricerca gaiana. Conoscere rende più consapevoli delle scelte e potrebbe portarci a cambiare il nostro atteggiamento, attualmente paragonabile a quello di un parassita che danneggia l'organismo ospite, e farci diventare organismi simbiotici capaci di mutuo soccorso. E prolungare così a lungo l'esperienza umana su questo pianeta.

Sul controllo della temperatura di superficie

Al termine del suo libro, David Schwartzman (1999) esamina le più probabili linee di sviluppo delle scienze del sistema Terra. Fatti salvi i progressi degli studi sul campo, Schwartzman individua due importanti linee di ricerca che riguardano la climatologia e la biologia. Le simulazioni eseguite con computer a elevata potenza di calcolo dovrebbero consentire agli studiosi di estendere i modelli climatici fino al periodo Archeano e al primo Proterozoico. Modelli

di clima temporalmente così ampi migliorerebbero la nostra capacità previsionale sulle dinamiche dell'effetto serra. «Siamo in attesa di un modello del ciclo del carbonio molto più sofisticato di quello attuale, che si estenda fino al periodo Archeano, prendendo in seria considerazione la possibilità che si siano conservati resti fossili della vita sulla superficie terrestre del Precambriano. È una grande sfida quella di ricostruire nel dettaglio le variazioni delle temperature di superficie e la composizione chimica dell'atmosfera del Precambriano, così come il pH e la chimica dell'oceano. Un'altra questione fondamentale è la natura del vincolo biofisico-biochimico sul limite superiore della temperatura per la crescita e lo sviluppo dei procarioti e degli eucarioti. Le HSP (Heat Shock Proteins) sono le prime di una lista di biomolecole candidate a essere investigate in virtù della grande varietà di ruoli che svolgono nelle cellule (facilitatori molecolari, coinvolgimento della sintesi delle membrane dei mitocondri ecc.). Si ritiene che le HSP si siano evolute per proteggere gli organismi dalle temperature molto elevate delle sorgenti idrotermali. Aggiungerei che i termofili, probabilmente, hanno bisogno anche di protezione da basse albedo locali che possono altresì indurre alte temperature. Cruciale è lo studio della termostabilità delle HSP, degli organelli e delle loro membrane (mitocondri, nucleo ecc.) e dei vari sistemi enzimatici, come quelli coinvolti nella formazione della blastula e la sintesi del collagene, una proteina strutturale chiave dei Metazoi. Infine, si dovrebbe tentare un approccio sperimentale per valutare la capacità di stabilizzazione e di dissoluzione dei suoli da parte dei termofili, un dato questo che sarebbe rilevante per delineare lo scenario della prima colonizzazione biotica della terra» (Schwartzman, 1999).

Modelli climatici e teoria dell'evoluzione

La teoria di Gaia porta a una nuova visione scientifica della Terra. Una visione che da un lato integra, in una sorta di metasintesi, la teoria neodarwiniana dell'evoluzione e dall'altro impone una revisione dei processi economici per renderli compatibili con le leggi di Gaia. Dire che «gli organismi meglio adattati hanno maggiori probabilità di avere una discendenza» non è più sufficiente se non si assume che la crescita di un organismo altera l'ambiente chimico-fisico che lo circonda. L'evoluzione delle specie e quella delle rocce sono un unico indivisibile processo. Gaia offre quindi una sponda per studiare quelle che potremmo definire così le diseconomie dell'evoluzione e rendere ragione di un gran numero di fenomeni evolutivisti che altrimenti resterebbero inspiegabili.

«I test diretti su Gaia sono difficili da eseguire – afferma Tim Lenton, un giovane studioso delle dinamiche evoluzionistiche applicate alla teoria di Gaia – a causa delle scale spaziali e temporali coinvolte. La modellizzazione di ecosistemi interagenti che competono per lo spazio in un ambiente planetario condiviso potrebbe essere utile per capire se davvero gli anelli di retroazione negativa stabilizzanti predominino. I modelli che abbiamo a disposizione indicano che la vegetazione influenza quasi sempre il clima a proprio vantaggio, rendendo il clima delle alte latitudini più caldo e aumentando ovunque le piogge continentali. Tuttavia questi modelli soffrono di un limite importante: sono ristretti a scale temporali piuttosto brevi. Un modello più semplice di anelli di retroazione tra la biosfera e il clima fornirebbe uno schema concettuale nel quale esplorare gli effetti su scale temporali più lunghe (per esempio quelli coinvolti nelle transizioni glaciale-interglaciale). In questo contesto gli anelli di retroazione che devono essere ancora implementati nelle simulazioni al computer, come quelli coinvolti nella produzione di dimetilsolfuro, potrebbero essere valutati quantitativamente e migliorare in modo considerevole la nostra capacità di previsione sugli eventi climatici» (Lenton, 1998).

Il programma EOS della NASA

Per approfondire le nostre conoscenze sul sistema Terra occorre raccogliere un'enorme quantità di dati per un adeguato periodo di tempo sui flussi di materia e di energia che si scambiano le quattro "sfere" principali del sistema: biosfera, atmosfera, pedosfera e idrosfera. Per rispondere a questa esigenza l'ente spaziale americano – la NASA – ha sviluppato un programma di osservazione sistematica della Terra, chiamato EOS (Earth Observing System) per raccogliere dati e misurazioni delle dinamiche della superficie e dell'atmosfera terrestre. Nella mitologia dell'antica Grecia, Eos era la dea dell'aurora, e l'omonimo programma della NASA promette di rivoluzionare metodologie e conoscenze: l'alba di una nuova era per la geofisiologia. Le misurazioni vengono eseguite e registrate da una serie fra loro coordinata di satelliti dotati di strumenti d'avanguardia per osservazioni globali a lungo termine del sistema Terra, e i dati vengono trasmessi a Terra dove una rete internazionale di scienziati si occupa di raccogliervi, analizzarli e integrarli. Il programma EOS si articola in tre missioni principali: *Terra*, *Aqua* e *Aura*, più un certo numero di supporto.

La fase operativa della missione EOS Terra ha avuto inizio nel dicembre del 1999 con il lancio del primo satellite del programma.

Aster, Ceres, Mopitt, Misr e Modis sono gli acronimi dei cinque gruppi di strumenti che a bordo dei satelliti consentiranno di registrare i cambiamenti ambientali globali fino al 2017. Ciascun gruppo di strumenti è stato progettato per fornire dati che verranno elaborati per offrire misurazioni sistematiche e continue nel tempo dello stato dei suoli, degli oceani e dell'atmosfera, consentendo ai ricercatori di migliorare in maniera significativa le nostre conoscenze sulle dinamiche del clima. Aster (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) è costituito da tre diversi telescopi per ottenere immagini ad alta risoluzione (fino a 15 metri), per misurare l'energia emessa dalla superficie terrestre. Ceres (Clouds and Earth's Radiant Energy System) è un rilevatore della radiazione assorbita e trasmessa dai sistemi nuvolosi e dalla Terra. Mopitt (Measurement of Pollution in the Troposphere) è un sensore della concentrazione di metano e monossido di carbonio negli strati bassi dell'atmosfera e permette di valutare il grado di inquinamento. Misr (Multi-angle Imaging Spectroradiometer) raccoglie da nove diversi angoli di vista la luce del Sole riflessa dalla superficie. E infine Modis (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer), costituito da quattro gruppi di rilevatori estremamente sensibili capaci di individuare le più piccole tracce di vita del pianeta, ivi compresa la debole luce emessa dal fitoplancton degli oceani, consente di stimare la produttività dei mari. EOS Terra permetterà quindi di raccogliere dati multiparametrici ottenuti contemporaneamente con strumenti differenti dell'atmosfera (proprietà delle nubi, flussi di energia radiante, chimica della troposfera, proprietà degli aerosol, temperatura e umidità dell'atmosfera), della superficie continentale (dinamica della urbanizzazione, dell'agricoltura e della vegetazione, temperatura, eventi vulcanici e incendi), dell'oceano (temperatura e attività del fitoplancton) e dei ghiacciai di terra e di mare.

La missione EOS Aqua è entrata nella fase operativa con il lancio del primo satellite il 4 maggio 2002. L'obiettivo di EOS Aqua è di migliorare la nostra comprensione del sistema dalla superficie dell'oceano e dall'atmosfera e di valutare i cambiamenti che vi accadono, attraverso il monitoraggio e l'analisi di un gran numero di variabili differenti tra cui l'evaporazione dagli oceani, il vapore acqueo nell'atmosfera, le nubi, le precipitazioni, l'acqua nei suoli, i ghiacciai e le coperture nevose, promettendo di chiarire in tal modo molti dettagli del ciclo dell'acqua sulla Terra. Inoltre EOS Aqua misurerà i flussi di energia radiante, la composizione chimica degli aerosol atmosferici, la copertura della vegetazione sulla Terra, il fi-

toplancton e la materia organica disciolta negli oceani, la temperatura dell'aria, dell'acqua e della superficie della Terra.

La missione EOS Aura è entrata nella sua fase operativa il 15 luglio 2004, con il lancio in orbita dell'omonimo satellite che raccoglierà dati sulla chimica della bassa atmosfera con una nuova serie di strumenti. Si prevede che la raccolta dati possa proseguire almeno fino al 2009, dati che serviranno agli scienziati per costruire mappe affidabili dell'aerosol e del vapore acqueo dell'atmosfera, variabili chiave per le valutazioni dei cambiamenti climatici globali.

Non dimenticate Gaia!

Il profondo legame mitologico che lega la metafora di Gaia alle idee religiose più antiche dell'umanità è sempre stato considerato con sospetto dalla comunità scientifica. Tuttavia è tra gli stessi scienziati che si sente la necessità di un richiamo emotivamente profondo alla Madre Terra, per il suo valore didattico (Barbiero, 2000) e per il suo valore euristico strettamente correlato a una metodologia sistemica (Barlow, 1997). Per questa ragione troviamo personalità prestigiose del mondo accademico – da Edward O. Wilson a Sir Crispin Thickell – fra il gruppo di scienziati che hanno tenuto a battesimo Gaia, una società scientifica internazionale dedicata alla promozione della ricerca e dell'educazione alle scienze del sistema Terra. E quando la combattiva Lynn Margulis (1998), dopo un lungo dibattito sul nome da dare alla nuova società scientifica, commenta «con mia grande soddisfazione Gaia

vive e la geofisiologia è morta», dà voce a quella corrente di scienziati maggiormente consapevoli della necessità di connettere la propria attività scientifica a un programma di educazione alla sostenibilità ambientale (Barbiero, 2002).

Naturalmente la teoria di Gaia è, e rimane, una teoria scientifica e come tale va presa, evitando di fondare su di essa improbabili costruzioni metafisiche (Scannerini, 1999). Tuttavia Gaia è altresì indispensabile per liberarci dal condizionamento meccanicistico e compartimentalizzante che ci è stato imposto fin dall'infanzia dalla nostra società. Secondo Harding, infatti, quasi tutti gli Occidentali (e specialmente i giovani ricercatori) sono esposti al concetto che la vita è emersa grazie all'operare di leggi fisiche e chimiche cieche, senza significato e che l'egoismo è alla base del comportamento e dell'evoluzione di tutti gli animali e vegetali. La mente di un bambino viene completamente intrappolata da questo atteggiamento mentale, per cui le qualità intuitive e di libera ispirazione della mente vengono totalmente ignorate. La capacità intuitiva della mente di vedere ogni parte della natura come un intero all'interno di interi più grandi viene compromessa da questo tipo di educazione. Il risultato è un'ecologia totalmente arida, puramente intellettuale, non una percezione genuina della potenza dinamica, della creatività e dell'integrazione della natura.

«Un approccio gaiano apre nuove porte di percezione ed estende la nostra visione dell'interdipendenza di tutte le cose all'interno del mondo naturale. Vi è una qualità sinfo-



Gaia è una teoria scientifica che ha avuto una forte presa anche sul grande pubblico. Il suo richiamo alla Madre Terra, vista come un grande e complesso organismo vivente, pur generando alcuni dubbi in una parte della comunità scientifica, è invece considerato molto importante da vari scienziati per il suo valore educativo, che contribuisce alla formazione di una coscienza ambientalista matura e consapevole.

nica in questa interconnettività, una qualità che comunica un'indicibile magnificenza [...]. Questa sensibilità altamente sviluppata, questa esperienza di una radicale interconnessione, è la caratteristica che contraddistingue i sostenitori del movimento dell'Ecologia profonda (*deep ecology*) ed è la base per l'elaborazione di qualunque filosofia ecologica, quale è stato il lavoro pionieristico del filosofo norvegese Arne Naess, che per primo propose il termine di *deep ecology*. Nessuno studente di ecologia viene mai introdotto a questa forma di disciplina mentale nelle nostre scuole e università. Non vi è la cultura del fare esperienza dell'essere tutt'uno con il mondo naturale. Tutto quello che si fa durante un'escursione ecologica è di raccogliere e misurare. La contemplazione profonda della natura è considerata una perdita di tempo o tutt'al più qualcosa da fare nel proprio tempo libero. Si può sostenere che gli scienziati veramente grandi avevano questa capacità di connessione, il senso di un tutto più grande di cui essi erano parte. Se non si educa questa sensibilità, facciamo emergere ricercatori senza filosofia, interessati unicamente alla loro disciplina, ma che non provano reale reverenza e rispetto per essa [...]. La percezione di Gaia aiuta a porre rimedio a questa calamità spirituale, una malattia che è nata in Occidente e che sta ora mietendo milioni di vittime, umane e non umane in tutto il mondo. La percezione di Gaia, ci connette con la natura stessa dell'esistenza, e offre un nuovo indirizzo alla ricerca scientifica basata sulle istituzioni scientifiche, indirizzo e visione che emergono dall'esperienza ecologica personale, profondamente soggettiva del ricercatore stesso» (Harding, 1998).

Parole chiave

Biosfera

l'insieme di tutti gli organismi viventi del pianeta e delle porzioni del sistema abiotico con cui gli organismi interagiscono (matrici gaiane).

Ciclo biogeochimico

il ciclo mediante il quale un nutriente si sposta nell'ambiente.

Gilda biochimica

gruppo di organismi che svolgono la stessa funzione biochimica nel metabolismo di Gaia. La gilda biochimica è uno strumento d'analisi tassonomico utile per la valutazione dei flussi degli elementi che caratterizzano i cicli biogeochimici.

Ipotesi Gaia

ipotesi scientifica avanzata da James Lovelock secondo la quale la Terra è una sorta di superorganismo, la cui fisiologia è capace di autoregolazione e di influenzare le dinamiche geochimiche in modo tale da stabilizzare il clima e rendere possibile la vita.

Nutriente

elemento o composto che gli organismi consumano o che è necessario alla loro sopravvivenza.

Omeorresi

è un tipo di sistema omeostatico in cui si innesta un anello a retroazione positiva che alimenta un processo a cascata, capace di spostare in modo irreversibile lo stato stazionario del sistema.

Omeostasi

è un tipo di sistema dove le parti instaurano e mantengono una relazione di stazionarietà fra loro – mediante anelli di retroazione negativa – che garantisce stabilità. Le reazioni alle perturbazioni sono tese a riportare continuamente il sistema alle sue condizioni iniziali.

Tasso di ricircolo

è il rapporto tra il flusso di un elemento che entra nel ciclo biologico – processato direttamente o indirettamente dalla fotosintesi – e quello che esce dal ciclo per finire seppellito in qualche pozzo geologico.

Bibliografia

- G. Barbiero, *Gaia: dal mito alla metafora e ritorno*, in «École», 76, 2000
- G. Barbiero, *La Teoria di Gaia. Strumenti razionali per uno studio globale della sostenibilità*, in *I volti della sostenibilità* (a cura di E. Camino-C. Ciminelli), Gruppo di ricerca in didattica delle scienze naturali, Università di Torino, Torino 2002
- C. Barlow, *Green Space, Green Time*, Copernicus, New York 1997
- E. K. Berner-R. A. Berner, *Global Environment. Water, Air, and Geochemical Cycles*, Prentice Hall Upper Saddle River, 1996
- P. G. Falkowski, *The Ocean's Invisible Forest*, in «Le Scienze», 410, 2002
- S. Harding, *Dalla teoria di Gaia all'ecologia profonda*, Gruppo di ricerca in didattica delle scienze naturali, Università di Torino, Torino 1998
- J. F. Kasting, *Quando il metano dominava il clima*, in «Le Scienze», 432, 2004
- J. F. Kasting-J. L. Siefert, *Life and the Evolution of Earth's Atmosphere*, in «Le Scienze», 296, 2002
- T. M. Lenton, *Gaia and Natural Selection*, in «Nature», 394, 1998
- J. E. Lovelock, *Hands Up for the Gaia Hypothesis*, in «Nature», 344, 1990
- J. E. Lovelock, *Omaggio a Gaia. La vita di uno scienziato indipendente* (2000), Bollati Boringhieri, Torino 2002
- J. E. Lovelock-L. Margulis, *Atmospheric Homeostasis by and for the Biosphere: the Gaia Hypothesis*, in «Tellus», 26, 1974
- L. Margulis, *Symbiotic Planet*, Basic Books, New York 1998
- S. Scannerini, *No Place for Man in Gaia*, in «Biology Forum», 92, 1999
- D. Schwartzman, *Life Temperature and the Earth. The Self-Organizing Biosphere*, Columbia University Press, New York 1999
- T. Volk, *Il corpo di Gaia: fisiologia del pianeta vivente* (1998), Utet, Torino 2001

nica in questa interconnettività, una qualità che comunica un'indicibile magnificenza [...]. Questa sensibilità altamente sviluppata, questa esperienza di una radicale interconnessione, è la caratteristica che contraddistingue i sostenitori del movimento dell'Ecologia profonda (*deep ecology*) ed è la base per l'elaborazione di qualunque filosofia ecologica, quale è stato il lavoro pionieristico del filosofo norvegese Arne Naess, che per primo propose il termine di *deep ecology*. Nessuno studente di ecologia viene mai introdotto a questa forma di disciplina mentale nelle nostre scuole e università. Non vi è la cultura del fare esperienza dell'essere tutt'uno con il mondo naturale. Tutto quello che si fa durante un'escursione ecologica è di raccogliere e misurare. La contemplazione profonda della natura è considerata una perdita di tempo o tutt'al più qualcosa da fare nel proprio tempo libero. Si può sostenere che gli scienziati veramente grandi avevano questa capacità di connessione, il senso di un tutto più grande di cui essi erano parte. Se non si educa questa sensibilità, facciamo emergere ricercatori senza filosofia, interessati unicamente alla loro disciplina, ma che non provano reale reverenza e rispetto per essa [...]. La percezione di Gaia aiuta a porre rimedio a questa calamità spirituale, una malattia che è nata in Occidente e che sta ora mietendo milioni di vittime, umane e non umane in tutto il mondo. La percezione di Gaia, ci connette con la natura stessa dell'esistenza, e offre un nuovo indirizzo alla ricerca scientifica basata sulle istituzioni scientifiche, indirizzo e visione che emergono dall'esperienza ecologica personale, profondamente soggettiva del ricercatore stesso» (Harding, 1998).

Parole chiave

Biosfera

l'insieme di tutti gli organismi viventi del pianeta e delle porzioni del sistema abiotico con cui gli organismi interagiscono (matrici gaiane).

Ciclo biogeochimico

il ciclo mediante il quale un nutriente si sposta nell'ambiente.

Gilda biochimica

gruppo di organismi che svolgono la stessa funzione biochimica nel metabolismo di Gaia. La gilda biochimica è uno strumento d'analisi tassonomico utile per la valutazione dei flussi degli elementi che caratterizzano i cicli biogeochimici.

Ipotesi Gaia

ipotesi scientifica avanzata da James Lovelock secondo la quale la Terra è una sorta di superorganismo, la cui fisiologia è capace di autoregolazione e di influenzare le dinamiche geochimiche in modo tale da stabilizzare il clima e rendere possibile la vita.

Nutriente

elemento o composto che gli organismi consumano o che è necessario alla loro sopravvivenza.

Omeorresi

è un tipo di sistema omeostatico in cui si innesta un anello a retroazione positiva che alimenta un processo a cascata, capace di spostare in modo irreversibile lo stato stazionario del sistema.

Omeostasi

è un tipo di sistema dove le parti instaurano e mantengono una relazione di stazionarietà fra loro – mediante anelli di retroazione negativa – che garantisce stabilità. Le reazioni alle perturbazioni sono tese a riportare continuamente il sistema alle sue condizioni iniziali.

Tasso di ricircolo

è il rapporto tra il flusso di un elemento che entra nel ciclo biologico – processato direttamente o indirettamente dalla fotosintesi – e quello che esce dal ciclo per finire seppellito in qualche pozzo geologico.

Bibliografia

- G. Barbiero, *Gaia: dal mito alla metafora e ritorno*, in «École», 76, 2000
- G. Barbiero, *La Teoria di Gaia. Strumenti razionali per uno studio globale della sostenibilità*, in *I volti della sostenibilità* (a cura di E. Camino-C. Ciminelli), Gruppo di ricerca in didattica delle scienze naturali, Università di Torino, Torino 2002
- C. Barlow, *Green Space, Green Time*, Copernicus, New York 1997
- E. K. Berner-R. A. Berner, *Global Environment. Water, Air, and Geochemical Cycles*, Prentice Hall Upper Saddle River, 1996
- P. G. Falkowski, *The Ocean's Invisible Forest*, in «Le Scienze», 410, 2002
- S. Harding, *Dalla teoria di Gaia all'ecologia profonda*, Gruppo di ricerca in didattica delle scienze naturali, Università di Torino, Torino 1998
- J. F. Kasting, *Quando il metano dominava il clima*, in «Le Scienze», 432, 2004
- J. F. Kasting-J. L. Siefert, *Life and the Evolution of Earth's Atmosphere*, in «Le Scienze», 296, 2002
- T. M. Lenton, *Gaia and Natural Selection*, in «Nature», 394, 1998
- J. E. Lovelock, *Hands Up for the Gaia Hypothesis*, in «Nature», 344, 1990
- J. E. Lovelock, *Omaggio a Gaia. La vita di uno scienziato indipendente* (2000), Bollati Boringhieri, Torino 2002
- J. E. Lovelock-L. Margulis, *Atmospheric Homeostasis by and for the Biosphere: the Gaia Hypothesis*, in «Tellus», 26, 1974
- L. Margulis, *Symbiotic Planet*, Basic Books, New York 1998
- S. Scannerini, *No Place for Man in Gaia*, in «Biology Forum», 92, 1999
- D. Schwartzman, *Life Temperature and the Earth. The Self-Organizing Biosphere*, Columbia University Press, New York 1999
- T. Volk, *Il corpo di Gaia: fisiologia del pianeta vivente* (1998), Utet, Torino 2001

T. Volk, *The Cycling of Materials by Living Systems*, in *Earth System Science. A New Subject for Study (Geophysiology) or a New Philosophy?* (a cura di S. Guerzoni et al.), CNR e Università di Siena 2001

A. Watson, *The Annual Gaia Society Lecture: Gaia, Goldilocks and the Anthropic Principle*, in «Gaia Circular», 2, 3, 1999

A. J. Watson-J. E. Lovelock, *Biological Homeostasis of the Global Environment: the Parable of Daisyworld*, in «Tellus», 35 1983

G. R. Williams, *The Molecular Biology of Gaia*, Columbia University Press, New York 1996

Sitografia ragionata

Si possono distinguere due filoni principali di studi e approfondimenti sull'ecologia globale. Il primo comprende i siti governativi ufficiali che offrono una grande quantità di dati "grezzi" ricavati da ricognizioni sul campo o da elaborazione di modelli. Fondamentale è, ovviamente, il NASA's Earth Observing System, il sito del Programma EOS (<http://eospso.gsfc.nasa.gov/>), molto ben curato e ricco di informazioni accessibili anche a non esperti. Merita una visita anche l'Earth Science Enterprise (www.earth.nasa.gov/), un altro sito della NASA dedicato allo studio della Terra come un sistema ecologico globale. Un altro sito molto importante è quello dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) il gruppo di ricerca internazionale che si occupa dei cambiamenti climatici globali

(www.ipcc.ch), fondato dall'UNEP (United Nations Environment Programme) e dal WMO (World Meteorological Organization) per integrare e valutare globalmente le informazioni scientifiche e socioeconomiche per la comprensione del cambiamento climatico, dei suoi potenziali impatti e delle diverse opzioni per mitigarne gli effetti.

Il secondo gruppo comprende i siti delle più autorevoli organizzazioni ambientaliste, le cui pagine scientifiche sono di solito curate da esperti del settore che espongono i dati selezionati in maniera accurata e comprensibile. Appartengono a questo gruppo il sito del Worldwatch Institute (www.worldwatch.org/), un ente di ricerca interdisciplinare indipendente il cui rapporto annuale *State of the World* è considerato un punto di riferimento per la comunità scientifica internazionale; quello del WWF (www.panda.org), un network internazionale che opera attraverso branche nazionali; quello del Sierra Club (<http://www.sierraclub.org/>), la più grande organizzazione ambientalista nordamericana; e quello di Greenpeace International (<http://www.greenpeace.org>), un'organizzazione ambientalista nota in tutto il mondo per le sue spettacolari azioni dirette.

Sulla teoria di Gaia esistono un gran numero di siti, ma pochi appaiono completi ed affidabili. Fra questi merita una visita il sito di «Resurgence» (www.resurgence.gn.apc.org/), rivista che costituisce una delle colonne del pensiero ambientalista più profondo e che dedica ampio spazio a Gaia, intesa non solo come teoria scientifica ma anche come modello filosofico globale per la ricerca e l'educazione scientifica e spirituale.