Biologia Ambientale

ISSN 2611-5182

rivista del Centro Italiano Studi di Biologia Ambientale

volume 36 **2022 (supplemento)**

I bioindicatori della crisi climatica e ambientale negli ecosistemi terrestri

Roberto Bargagli

Biologia Ambientale

ISSN 2611-5182

Pubblicazione del C.I.S.B.A., suppl. al vol. 36, 2022
Autorizzazione del Tribunale di Reggio Emilia n. 837 del 14 maggio 1993

PROPRIETÀ: **Daniela Lucchini**, Presidente del C.I.S.B.A.
DIRETTORE RESPONSABILE: **Pietro Genoni**
RESP. DI SEGRETERIA: **Roberto Spaggiari**

REDAZIONE (**biologia.ambientale@cisba.eu**):
Giuseppe Sansoni **Rossella Azzoni**
Gilberto N. Baldaccini **Francesca Bona**
Giovanni Damiani **Raffaella Zorza**

Autore: **Roberto Bargagli**, già Professore Ordinario e attualmente Professore Senior di Ecologia, presso l'Università degli Studi di Siena, Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente (Via P.A. Mattioli, 4 – 53100 Siena, E-mail: bargagli@unisi.it)

Curatori: Rossella Azzoni, Gilberto Natale Baldaccini, Giuseppe Sansoni

Citazione bibliografica suggerita:
Bargagli R., 2022. **I bioindicatori della crisi climatica e ambientale negli ecosistemi terrestri**. *Biologia Ambientale,* supplem. al n. **36**, 110 pag., DOI: 10.30463/ao221.005

Foto di copertina: i licheni sono affidabili bioindicatori degli inquinanti atmosferici e consentono il biomonitoraggio di quelli persistenti anche nell'Antartide continentale (foto Bargagli).

«Il lichene prospera dalla regione delle nubi agli scogli spruzzati dal mare. Scala le vette dove nessun altro vegetale attecchisce. Non lo scoraggia il deserto, non lo sfratta il ghiacciaio, non i tropici o il circolo polare. Sfida il buio della caverna e s'arricchisce nel cratere del vulcano. Teme solo la vicinanza dell'uomo.
Per questa sua misantropia, la città è la sola barriera che lo arresta. Se la varca, o va respirare in cima ai campanili o, con la salute, ci rimette i connotati.
Il lichene urbano è sterile, tetro,asfittico. Il fiato umano lo inquina ...»

Camillo Sbarbaro (L'opera in versi e in prosa)

Biologia Ambientale è la rivista dedicata ai soci del Centro Italiano Studi di Biologia Ambientale (C.I.S.B.A).
Per iscriversi o per informazioni: *Centro Italiano Studi di Biologia Ambientale, C.P. n- 5 Poste San Maurizio 42122 Reggio Emilia*
Segretario: *Roberto Spaggiari, tel. 334 9262826; e-mail: info@cisba.eu*

www.cisba.eu info@cisba.eu

Roberto Bargagli

I bioindicatori della crisi climatica e ambientale negli ecosistemi terrestri

SOMMARIO

Presentazione dell'Editore 5
Introduzione 7
Acronimi e abbreviazioni 11

1. La composizione dell'atmosfera terrestre e il clima sono sempre cambiati. 15
1.1 L'origine dell'atmosfera terrestre e l'effetto serra 15
1.2 Il ruolo dell'acqua e delle prime forme di vita nella formazione dell'atmosfera 19
1.3 L'atmosfera e il clima 21
1.4 Il sistema climatico 24
Bibliografia e letture consigliate 25

2. Gli eventi catastrofici del passato e l'impatto della nostra specie 27
2.1 Le estinzioni di massa 27
2.2 La rilevanza geologica delle attività antropiche e la proposta dell'Antropocene come nuova epoca 29
2.3 L'aria delle città è sempre stata di scarsa qualità 31
2.4. La globalizzazione dell'impatto antropico 34
Bibliografia e letture consigliate 38

3. L'inquinamento atmosferico e i suoi subdoli effetti 41
3.1 La biodisponibilità, la contaminazione e l'inquinamento 41
3.2 L'aumento delle forme reattive dell'azoto: una grave minaccia per la salute e per l'ambiente 43
3.3 Gli effetti biologici delle polveri sottili e di altri inquinanti atmosferici 45
3.4 Il rispetto dei valori soglia non sempre protegge dai possibili effetti degli inquinanti 47
Bibliografia e letture consigliate 49

4. I biondicatori della qualità dell'aria e il ruolo della *citizen science* 51
4.1 L'uomo ha sempre usato gli organismi per valutare la qualità del suo ambiente di vita 51
4.2 Le risposte degli organismi al degrado della qualità dell'aria 53
4.3 Il contributo dei cittadini al monitoraggio ambientale 55
4.4. Il biorilevamento dell'inquinamento da ozono troposferico e delle deposizioni di azoto 57
Bibliografia e letture consigliate 60

5. I cambiamenti climatici 63
5.1 L'emergenza climatica e ambientale 63
5.2 I fattori naturali e antropici della variabilità climatica 65
5.3 Le carote di ghiaccio dell'Antartide e il paleoclima 66
5.4 I cambiamenti climatici in tempi storici 69
Bibliografia e letture consigliate 71

6. Gli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi terrestri 73
6.1 Gli ecosistemi forestali 73
6.2 Gli ecosistemi montani 75
6.3 Gli ecosistemi coltivati e gli ambienti urbani 77
6.4 L'impatto del sistema agroalimentare sul clima e sull'ambiente non è sostenibile 79
Bibliografia e letture consigliate 83

7. Come rilevare le risposte dei bioindicatori del cambiamento climatico 85
7.1 La fenologia delle piante 85
7.2 La fenologia degli animali 87
7.3 La biodiversità e le specie aliene 89
7.4 Il monitoraggio delle specie aliene 93
Bibliografia e letture consigliate 95

8. La salute dell'uomo e dell'ambiente sono interdipendenti: occorre un approccio integrato 97
8.1. Gli effetti dei cambiamenti climatici e ambientali sulla nostra salute 97
8.2 La gestione adattiva degli ecosistemi terrestri 100
8.3 La mitigazione del cambiamento climatico e la decarbonizzazione 103
8.4 I concetti di "esposoma" e "*One Health*" per la cura integrata della salute del pianeta 105
Bibliografia e letture consigliate 108

Presentazione dell'Editore

Una delle prime iniziative intraprese dal Centro Italiano Studi di Biologia Ambientale è stata quella di istituire la pubblicazione di un periodico d'informazione destinato ai soci; esso, nel corso degli anni, si è evoluto fino all'attuale veste di rivista scientifica: Biologia Ambientale.

Ultimamente la rivista ha intrapreso iniziative editoriali di tipo divulgativo ospitando articoli e testi inerenti non solo agli habitat acquatici, argomento cardine dell'Associazione, ma concernenti anche temi ambientali di interesse più generale e in tale ambito si colloca la pubblicazione firmata dal Prof. Roberto Bargagli.

La pubblicazione di Roberto Bargagli è un valido esempio di come si possano trattare temi di estrema attualità mantenendo un taglio divulgativo e al contempo strettamente scientifico. L'Opera fornisce infatti l'opportunità di conoscere molti aspetti relativi al funzionamento della nostra atmosfera e al suo deterioramento, all'ecologia degli habitat terrestri e ai processi antropici che, reiterati nel tempo, hanno condotto ai cambiamenti climatici di cui ormai diffusamente si parla. Il lavoro di Bargagli è anche un incentivo all'approfondimento dei vari argomenti trattati grazie al supporto di una consistente letteratura, di volta in volta suggerita al termine di ciascun capitolo e in gran parte consultabile online grazie ai numerosi link inseriti nel testo.

Roberto Bargagli fa parte del Comitato Scientifico di Biologia Ambientale, affiancando il lavoro della redazione ormai da più di quattro lustri: ciò rende ancor più orgogliosi di questa sua collaborazione che consente di offrire ai lettori un valido strumento di conoscenza di temi di estrema attualità.

Certi che l'iniziativa susciterà il meritato interesse, non resta che augurare a tutti buona lettura.

Daniela Lucchini
Presidente CISBA

Introduzione

La Terra è un sistema chiuso con risorse limitate e il cui funzionamento dipende dall'equilibrio tra i flussi di energia e gli scambi di materia tra idrosfera, litosfera, atmosfera e biosfera. Ma per soddisfare i propri bisogni, spesso superflui, l'uomo e l'economia globalizzata stanno dilapidando le principali risorse naturali come il suolo, la biodiversità, i combustibili fossili e i minerali, mettendo a rischio il funzionamento del sistema Terra. Da molti anni ormai è stata superata la capacità della Terra di rigenerarsi e nel 2050, con questi tassi di consumo e di crescita demografica, saranno necessari due pianeti per soddisfare le esigenze di 9 miliardi di persone. L'eccessivo sfruttamento delle risorse naturali (rinnovabili e non) è causa di degrado ambientale, contribuisce al cambiamento climatico e nega a milioni di persone il diritto a beni essenziali come il cibo, l'acqua e la salute.

Con la sua drammaticità, la pandemia da COVID-19 ha riaffermato la fragilità della nostra specie e, a 60 anni dalla pubblicazione di "Primavera silenziosa", ci ricorda le parole profetiche di Rachel Carson: "L'uomo fa parte della natura e la sua guerra contro la natura è inevitabilmente una guerra contro se stesso". Infatti, la crescente diffusione e trasmissione delle zoonosi è dovuta alla distruzione degli habitat naturali, all'alterazione degli equilibri ambientali, alla perdita di biodiversità, all'espansione delle aree antropizzate e alle crescenti interazioni degli uomini e degli animali domestici con la fauna selvatica. La globalizzazione dello scambio di merci e persone favorisce l'introduzione (intenzionale o accidentale) di centinaia di specie aliene (piante, animali, batteri e virus) in nuovi territori. Le emissioni di gas serra e i conseguenti cambiamenti climatici favoriscono la diffusione di vettori come zanzare, flebotomi e zecche e il manifestarsi, anche nel nostro Paese, di malattie tropicali (o, come si diceva un tempo, malattie dei viaggiatori) quali malaria, dengue, lyme e leishmaniosi.

Per chi ha la responsabilità di programmare e gestire il futuro delle nostre società è il momento di cambiare i modelli di sviluppo, di mirare a una maggiore sostenibilità ambientale e di ridurre le disparità socio-economiche. Ciascuno di noi è chiamato ad assumere stili di vita più rispettosi dell'ambiente e dei bisogni delle future generazioni. Il capitale naturale va usato in modo responsabile: noi non ne siamo proprietari ma solo beneficiari e abbiamo il dovere di lasciarlo alle generazioni future nelle condizioni nelle quali ci è stato messo a disposizione. Negli ultimi anni, soprattutto tra i giovani, si sta diffondendo questa consapevolezza e la preoccupazione per il futuro del pianeta, ma parte dell'opinione pubblica appare disorientata e si assiste alla diffusione di movimenti "negazionisti" e di "teorie del complotto", proprio quando sarebbe necessaria una maggiore diffusione della cultura scientifica e la crescita dell'educazione per la sostenibilità.

Per molti anni mi sono occupato della rilevazione della qualità dell'aria, dell'acqua e del suolo utilizzando gli organismi come indicatori e ritengo che, per far acquisire consapevolezza e comportamenti più coerenti con lo sviluppo

sostenibile, sia indispensabile coinvolgere le persone nella lettura e nell'interpretazione delle risposte degli organismi ai cambiamenti climatici e ambientali ("leggere i segni della natura"). L'esperienza diretta e la conoscenza basata sull'osservazione/rielaborazione personale, infatti, sono importanti presupposti per la crescita dell'educazione per la sostenibilità.

Dalla mia lunga esperienza di ricerca in Antartide so che è più facile rilevare tali risposte negli ambienti estremi, dove le comunità biotiche sono meno complesse e la progressiva scomparsa dei ghiacciai consente di osservare la colonizzazione dei nuovi substrati in tempi relativamente brevi. Tuttavia i cambiamenti sono evidenti anche nei nostri ambienti. Io, per esempio, sono nato sul Monte Amiata e nel corso degli anni ho visto comparire animali estranei, come il geco o la zanzara tigre, e molti nuovi patogeni hanno aggredito quasi tutte le specie arboree, dall'olmo al cipresso, dal pino al castagno (albero, quest'ultimo, che con i suoi frutti ha contributo per secoli alla sopravvivenza della gente di montagna).

Nel valutare i cambiamenti ambientali e le risposte degli organismi è difficile stabilire se ciò che rileviamo sia il risultato della naturale evoluzione degli ecosistemi o se, invece, non rappresenti un'accelerazione o una deviazione conseguenti all'impatto delle attività dell'uomo e ai cambiamenti climatici. Le interazioni degli organismi con il loro ambiente, biotico e abiotico, sono influenzate da molteplici fattori e per interpretarne gli effetti è necessaria una conoscenza non superficiale delle comunità biotiche e del funzionamento degli ecosistemi. Quindi –in un periodo caratterizzato dalla diffusione di notizie false (*fake news*) e dai negazionisti– in questa pubblicazione vengono riportati i processi che regolano il funzionamento degli ecosistemi e del sistema Terra e le più recenti acquisizioni scientifiche sull'inquinamento atmosferico e i cambiamenti climatici, oltre alle procedure di biomonitoraggio. E ciò anche a rischio di scoraggiare alcuni lettori.

In Italia, come nel resto del mondo, stanno aumentando le persone coinvolte in progetti di *citizen science* (letteralmente, scienza dei cittadini) e uno dei principali obiettivi di questo libro è quello di fornire al lettore conoscenze e competenze utili per collaborare in modo corretto ed efficace al monitoraggio ambientale e alla gestione delle risorse naturali.

Mentre la Rivista *Biologia Ambientale* si occupa prevalentemente di biomonitoraggio, gestione e salvaguardia degli ecosistemi acquatici, questo libro si occupa esclusivamente degli ambienti terrestri.

Il testo è suddiviso in otto capitoli: i primi quattro sono dedicati all'impatto delle attività dell'uomo sulla composizione dell'atmosfera e agli effetti biologici degli inquinanti atmosferici; gli altri quattro sono dedicati ai cambiamenti climatici, ai loro effetti sugli ecosistemi terrestri e sulla salute dell'uomo.

Il primo capitolo riassume i principali eventi che hanno portato alla formazione dell'attuale atmosfera terrestre per far comprendere come la composizione dell'aria, le condizioni climatiche e le comunità biotiche siano strettamente interconnesse e, nel tempo, abbiano sempre subito dei cambiamenti.

Il capitolo successivo spiega come la specie umana, comparsa solo di re-

cente nella storia evolutiva della Terra, abbia assunto un ruolo sempre più rilevante nel modificare la composizione dell'atmosfera, il clima e l'ambiente, dando inizio a una nuova epoca: l'Antropocene. Con l'eccessivo sfruttamento delle risorse del pianeta, l'uomo ha alterato i flussi di elementi e composti naturali e nell'ultimo secolo ha immesso in aria, nelle acque, nel suolo e nel biota anche migliaia di molecole di sintesi, estranee al metabolismo degli organismi (xenobiotiche).

Il terzo capitolo introduce i concetti di biodisponibilità, contaminazione e inquinamento e spiega come sulla Terra non esistano più zone incontaminate. Le attività dell'uomo sono riuscite a modificare anche i cicli del carbonio e dell'azoto, due dei principali costituenti di ogni vivente; ma mentre il mondo si mobilita per ridurre le emissioni di anidride carbonica, per ora viene trascurato un problema ambientale altrettanto grave come l'aumento delle forme reattive dell'azoto. La maggiore biodisponibilità di questo nutriente, infatti, ha notevoli effetti negativi sulla biodiversità, sul funzionamento degli ecosistemi acquatici e terrestri, sul clima e sulla nostra salute. Nel descrivere l'impatto del particolato fine e dell'ozono troposferico sugli organismi viene riportato anche il rischio potenziale dell'esposizione ad inquinanti di interesse emergente come le microplastiche.

Il quarto capitolo ricorda come gli organismi siano da sempre stati utilizzati per valutare la qualità dell'ambiente e introduce alcune semplici procedure per rilevare autonomamente, mediante dei bioindicatori vegetali, l'impatto di alcuni inquinanti atmosferici. Cittadini, non afferenti ad accademie o società scientifiche, hanno sempre contribuito all'acquisizione di dati scientifici: viene perciò sottolineata l'importanza dei progetti di *citizen scienze* per il biomonitoraggio della qualità dell'aria.

Il quinto capitolo tratta i fattori naturali e antropici che influiscono sulla variabilità climatica; le variazioni riscontrate in tempi storici e quelle rilevate analizzando le bolle d'aria presenti nelle carote di ghiaccio prelevate in Antartide. Purtroppo, la conoscenza dei cambiamenti climatici del passato non consente di formulare previsioni attendibili su quelli futuri perché negli ultimi 800.000 anni nell'atmosfera terrestre non ci sono mai state concentrazioni di gas serra così elevate come quelle attuali.

Il sesto capitolo descrive gli effetti dei cambiamenti climatici sulle foreste, sugli ecosistemi montani, sull'agricoltura e sugli ambienti urbani e mette in rilievo l'insostenibilità ambientale e sociale dell'attuale sistema agroalimentare. Per monitorare gli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi terrestri, sono necessarie rilevazioni di lungo termine su vasta scala e il settimo capitolo enfatizza l'importanza della collaborazione dei volontari nel rilevare le variazioni nella fenologia delle piante, degli animali e della biodiversità. Con il degrado ambientale, la distruzione degli habitat e la globalizzazione, l'uomo favorisce la diffusione di specie aliene in nuovi territori, mettendo a rischio la sua salute, quella degli animali domestici e l'equilibrio degli ecosistemi. Le iniziative di scienza diffusa possono svolgere un ruolo molto importante nella sorveglianza del territorio e nella segnalazione della comparsa di specie invasive e di nuovi patogeni.

La maggior parte delle malattie croniche e infettive dell'uomo sono riconducibili a fattori ambientali; l'ultimo capitolo, pertanto, tratta dell'interdipendenza tra la nostra salute e quella dell'ambiente. Per prevenire altre pandemie e assicurare migliori condizioni di vita e di salute, occorrono approcci interdisciplinari che –all'urgenza della transizione energetica, alle misure di mitigazione e di adattamento al cambiamento climatico– affianchino anche adeguati provvedimenti per la salvaguardia delle risorse naturali, l'accesso all'acqua potabile e un'alimentazione più sana e sostenibile. Integrando i dati della medicina umana e veterinaria con quelli dell'ecologia, delle scienze ambientali, umanistiche e sociali, l'applicazione su scala globale del concetto di "esposoma" e della prospettiva "*One Health*" potrebbe assicurare una maggiore resilienza delle persone e degli ecosistemi ai cambiamenti in atto.

Ritenendo che, specialmente in un periodo di profonda crisi ambientale e sociale come quello che stiamo vivendo, siano molto importanti l'accesso e la diffusione delle conoscenze scientifiche, ringrazio il CISBA e la Redazione di *Biologia Ambientale* che hanno consentito la realizzazione e la libera diffusione di questo libro che mi auguro possa contribuire alla crescita della consapevolezza e al coinvolgimento dei lettori nelle iniziative per la salvaguardia della salute dell'uomo e dell'ambiente.

Roberto Bargagli

Siena, settembre 2022

Acronimi e abbreviazioni

ACE2	Enzima di conversione dell'angiotensina
ATP	Adenosintrifosfato
BBCH	*Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamat and CHemical industry*
CABI	*Invasive Species Compendium*
CBD	*Convention on Biological Diversity*
CCS	*Carbon Capture and Storage*
CE	Comunità Europea
CFCs	Clorofluorocarburi
CNR-ISE	Consiglio Nazionale delle Ricerche-Istituto per lo Studio degli Ecosistemi
COV	Composti Organici Volatili
CSMON-Life	*Citizen Science MONitoring*
CSR	Concentrazione Soglia di Rischio
DDT	DicloroDifenilTricloroetano
ECSA	*European Citizen Science Association*
EDCs	*Endocrine Disrupting Chemicals*
EEA	*European Environment Agency*
EEI	*Ecological Evaluation Index*
EFSA	*European Food Safety Authority*
ENSO	*El Niño Southern Oscillation*
EPA	*U.S. Environmental Protection Agency*
EPICA	*European Project for Ice Coring in Antarctica*
EPPO	*European and Mediterranean Plant Protection Organization*
ERA	*Environmental Risk Assessment*
ETS	*Emission Trading Scheme*
FAO	*Food and Agriculture Organization of the United Nations*
GIS	*Geographic Information System*
HCFCs	Idrofluorocarburi
HHRA	*Human Health Risk Assessment*
HRMS	*High Resolution Mass Spectrometry*
IAEA	*International Atomic Energy Agency*
IARC	*International Agency for Research on Cancer*
IPA	Idrocarburi Policiclici Aromatici
IPBES	*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change*

IPG	*International Phenological Gardens*
ISPRA	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
ISS	Istituto Superiore di Sanità
IUCN	*International Union for Conservation of Nature*
LIPU	Lega Italiana Protezione Uccelli
LPI	*Living Planet Index*
LTER	*Long Term Ecological Research*
MeHg	Monometilmercurio (CH_3Hg)
MIT	*Massachusetts Institute of Technology*
NNB	Network Nazionale sulla Biodiversità
NOAA	*National Oceanic Atmospheric Administration* (USA)
OGM	Organismi Geneticamente Modificati
OMS	Organizzazione Mondiale della Sanità
ONU	Organizzazione delle Nazioni Unite
OPAL	*Open Air Laboratories*
PAH_s	*Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*
PAN	PerossiAcetilNitrato
PANACEA	*Predicting And moNitoring the long-term behAvior of CO_2 injectEd in deep geological formAtions*
PIL	Prodotto Interno Lordo
PM_{10}	Particelle con diametro <10 µm
$PM_{2,5}$	Particelle con diametro <2,5 µm
$PM_{0,1}$	Particelle con diametro <0,1 µm
POPs	Persistent Organic Pollutants
ppb	Parti per miliardo
ppm	Parti per milione
ppt	Parti per trilione
PTS	Particolato Totale Sospeso
REDD	*Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation*
ROS	*Reactive Oxygen Species*
Smog	smoke+fog
SNPA	Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente
SPS	*Sanitary and Phytosanitary Measures*
UNCCD	*United Nations Convention to Combat Desertification*
UNECE	*United Nations Economic Commission for Europe*
UNEP	*United Nations Environment Programme*
UNFCCC	*United Nations Framework Convention on Climate Change*

USDA US-EPA	*United States Department of Agriculture*
US-EPA	*United States Environmental Protection Agency*
UV	Radiazione Ultravioletta (UV-A, UV-B, UV-C)
ZCIT	Zona di Convergenza Intertropicale

Prefissi (multipli e sottomultipli) delle unità di misura riportate nel testo

Simbolo	Prefisso	Fattore di moltiplicazione
P	Peta	10^{15}g
T	Tera	10^{12}
G	Giga	10^{9}
M	Mega	10^{6}
k	kilo	10^{3}
h	hecto (o etto)	10^{2}
µ	micro	10^{-6}
n	nano	10^{-9}
p	pico	10^{-12}

Capitolo 1

La composizione dell'atmosfera terrestre e il clima sono sempre cambiati

1.1 L'origine dell'atmosfera terrestre e l'effetto serra

La Terra primordiale, molto probabilmente, non aveva un'atmosfera; questa si formò successivamente con il contributo di elementi da parte di meteoriti, di vapore acqueo dalle comete e soprattutto con gli elementi, i gas e i vapori emessi dalla Terra stessa durante la differenziazione della crosta e del mantello. La temperatura sul pianeta in formazione doveva essere particolarmente elevata a causa del decadimento radioattivo che consentiva la fusione del ferro, del nichel e di altri metalli pesanti e la loro migrazione verso il nucleo. Con il progressivo raffreddamento della Terra, gli elementi più leggeri presenti sulla superficie cominciarono a solidificarsi formando una crosta costituita prevalentemente da alluminosilicati.

La Terra aveva una massa sufficiente a trattenere per gravità nella sua atmosfera composti volatili e sebbene il vapore acqueo si condensasse a formare gocce di pioggia, non appena queste raggiungevano la calda superficie del pianeta, venivano vaporizzate. Il calore latente di vaporizzazione contribuì al progressivo raffreddamento della crosta terrestre e quando, circa 4 miliardi di anni fa, la temperatura della superficie terrestre scese sotto i 100°C, le precipitazioni atmosferiche determinarono, in tempi relativamente brevi, la formazione di oceani con dimensioni piuttosto simili a quelle attuali.

Molti costituenti dell'atmosfera primordiale furono solubilizzati dall'acqua formando degli acidi che venivano neutralizzati da reazioni chimiche con i minerali presenti nelle rocce, determinando il trasferimento negli oceani degli ioni cloro, sodio e degli altri principali costituenti dell'acqua marina. A causa della scarsa solubilità in acqua, l'azoto diventò sin da allora il principale costituente dell'atmosfera terrestre, mentre l'ossigeno era assente.

Sebbene l'energia radiante del Sole, la principale risorsa energetica del pianeta, fosse inferiore a quella attuale, la temperatura della Terra non doveva essere molto bassa poiché negli ultimi 4 miliardi di anni sul nostro pianeta vi è sempre stata dell'acqua liquida. Rispetto a quanto si pensa avvenne su Marte, nella primordiale atmosfera terrestre erano presenti maggiori concentrazioni di anidride carbonica e metano e questi composti trattenevano parte della radiazione infrarossa riflessa dalla superficie del pianeta (effetto serra), impedendone la dissipazione nello spazio (Fig. 1).

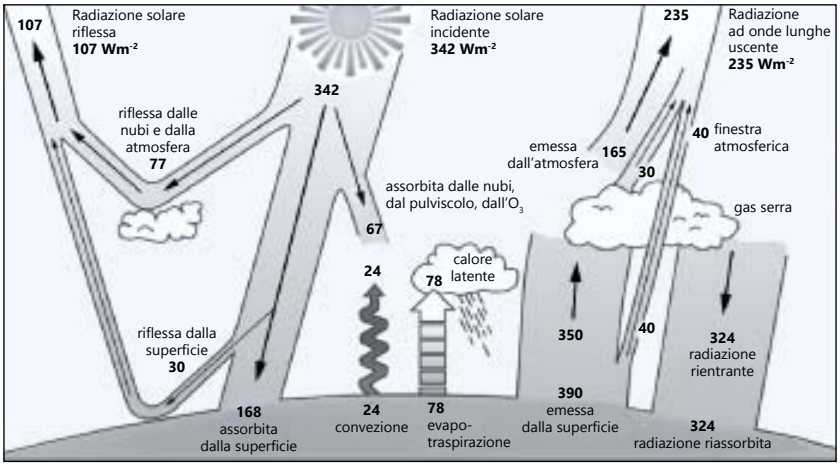

Fig. 1. I raggi solari assorbiti dalla superficie terrestre sono convertiti in calore e i gas serra ne impediscono la completa dissipazione nello spazio. (Bargagli, 2020).

Senza l'effetto serra la temperatura della Terra sarebbe più bassa di circa 33°C ed anche il nostro pianeta sarebbe completamente ghiacciato. Nell'attraversare l'atmosfera la radiazione solare subisce fenomeni di riflessione, rifrazione, assorbimento e diffusione e la Terra ne riceve circa la metà (radiazione netta). Questa radiazione contribuisce all'evaporazione delle acque ed è disponibile per gli ecosistemi, ma in quantità molto variabili in funzione della latitudine, altitudine, stagione e soprattutto della presenza di nuvole, che insieme ai gas e agli aerosol sono in grado di riflettere oltre il 20% della radiazione incidente (Fig. 1).

La quantità di radiazione infrarossa riflessa dalla superficie terrestre dipende dalle caratteristiche della superficie e nelle regioni coperte da ghiacci e neve il valore dell'albedo (rapporto tra energia radiante riflessa e quella incidente su una superficie) è particolarmente elevato (anche oltre il 90%). Per questo motivo, l'attuale riscaldamento del pianeta sta producendo le più marcate modificazioni climatiche e ambientali soprattutto nella Penisola Antartica, in Alaska e in Siberia, dove la riduzione della copertura nevosa e delle piattaforme marine di ghiaccio riduce l'albedo e aumenta l'assorbimento della radiazione solare, con conseguente scioglimento del permafrost e riscaldamento degli oceani.

Venere, Terra e Marte sono abbastanza simili per dimensioni e per composizione chimica. Tuttavia solo sulla Terra, grazie ad un "giusto" effetto serra, si realizzarono le condizioni per conservare l'acqua liquida e consentire l'evoluzione dei viventi. Infatti, a causa del debole campo gravitazionale e della maggiore distanza dal Sole, l'atmosfera su Marte è molto rarefatta (<1% di quella terrestre) e produce un limitato effetto serra, sicché le temperature sono troppo basse (-53°C) per consentire lo sviluppo di una biosfera paragonabile a quella terrestre. Ciononostante, la superficie del "pianeta rosso" presenta evidenti pro-

cessi di erosione e depositi di materiali verosimilmente dovuti a intense precipitazioni atmosferiche (forse dovute a incrementi transitori delle concentrazioni di gas serra causati da collisioni con asteroidi o comete). Recentemente è stata rilevata la presenza di un lago di acqua liquida e salata a 1,5 km di profondità sotto i ghiacci del Polo Sud di Marte (Paknazar, 2022) e vi sono indizi della possibile presenza di acqua anche sulla Luna (Ansa, 2021). Venere, invece, per l'enorme accumulo di anidride carbonica e altri composti volatili, ha una pressione atmosferica circa 100 volte superiore a quella della Terra e l'elevato effetto serra determina una temperatura (474°C) assolutamente incompatibile con la presenza di acqua liquida.

Quindi, le condizioni che si realizzarono sulla Terra circa 4 miliardi di anni fa furono determinate dalla concomitanza di molti fattori favorevoli, come la distanza dal Sole, le dimensioni del pianeta, l'intensità della forza di gravità, la formazione degli oceani, la solubilizzazione di gran parte dei gas presenti nell'atmosfera primordiale e il conseguente instaurarsi di un "giusto" effetto serra.

L'atmosfera è legata alla superficie terrestre dalla forza di gravità e la bassa atmosfera (troposfera, con altezza variabile tra 10 e 15 km, a seconda della stagione e della latitudine) contiene oltre l'80% della massa totale. La troposfera viene riscaldata dal basso, dalla radiazione infrarossa riflessa dagli oceani e dalla superficie terrestre, e la progressiva riduzione della temperatura e della pressione all'aumentare dell'altitudine determina la risalita delle masse d'aria più calde e meno dense che contribuiscono al trasporto e alla dispersione di gas, vapori, aerosol e particelle provenienti dalla superficie terrestre. Sopra la troposfera l'aria è molto più rarefatta, la temperatura di stabilizza (tropopausa) per aumentare nuovamente nella stratosfera, dove lo strato di ozono assorbe la radiazione ultravioletta (soprattutto UV-C con lunghezze d'onda comprese tra 220 e 280 nm, mentre parte degli UV-B e degli UV-A, i meno pericolosi per gli organismi, raggiungono la superficie terrestre) (Fig. 2) (ISS, 2002).

Gli scambi di elementi e composti tra troposfera e stratosfera sono piuttosto limitati, ma aumentano (stagionalmente) quando l'altitudine della tropopausa si riduce o in seguito a violente eruzioni vulcaniche o a esplosioni nucleari. Alcuni elementi e composti naturali, quali l'ossigeno, l'anidride carbonica e il metano, o sintetizzati dall'uomo, come i clorofluorocarburi, permangono per molti anni nell'atmosfera, assumendo una circolazione globale e producendo effetti su tutto il pianeta (vedi ad esempio, la distruzione dell'ozono stratosferico e la formazione primaverile del "buco dell'ozono" sopra l'Antartide). Altri composti, invece, come gli ossidi di azoto e dello zolfo, sono molto più reattivi, restano in aria per pochi giorni o poche ore ed hanno concentrazioni variabili nello spazio e nel tempo, con valori più elevati in prossimità delle sorgenti naturali o antropiche (Tab. 1).

Anche il vapore acqueo ha concentrazioni molto variabili e un tempo di permanenza in atmosfera di pochi giorni (si stima che ogni giorno oltre il 10%

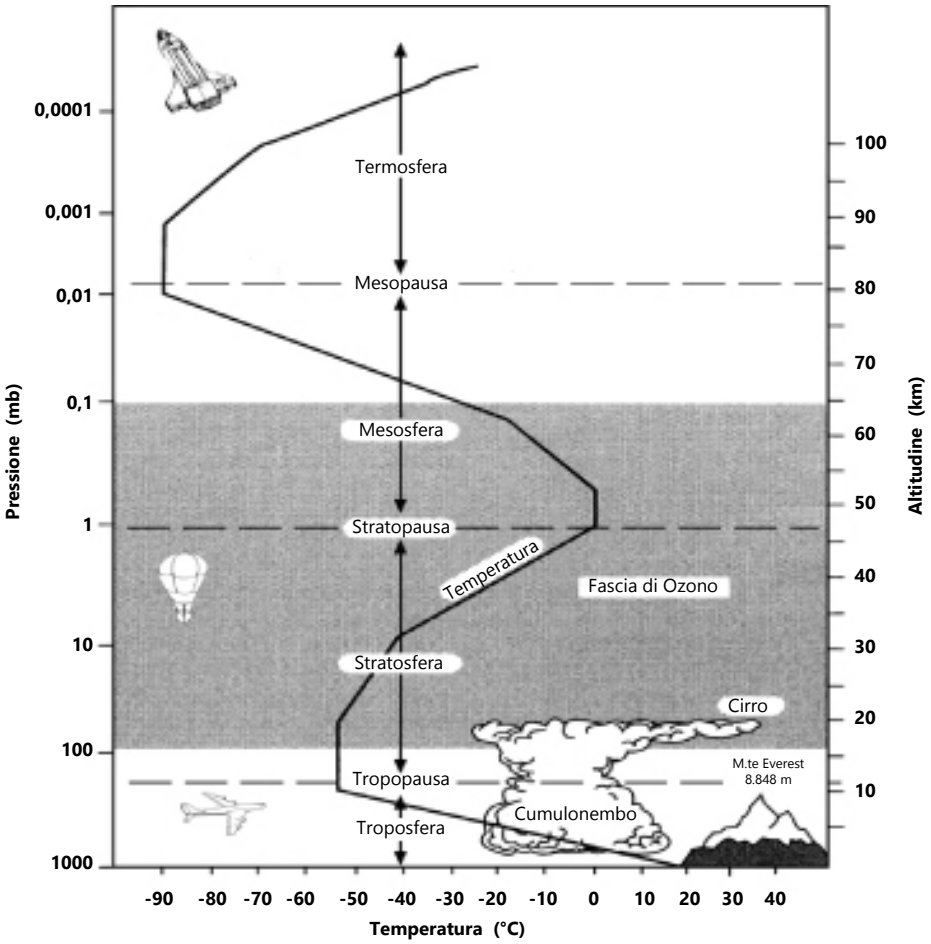

Fig. 2. Schema della struttura dell'atmosfera e del profilo altitudinale della temperatura. (Bargagli, 2020)

dell'acqua presente in aria, in gran parte evaporata dagli oceani e trasferita sui continenti dalle masse d'aria, venga depositata al suolo). Oltre ai gas sono presenti in atmosfera anche gli aerosol, ovvero particelle solide (es. polvere, fuliggine) o liquide (es. nebbia e caligine) rilasciate da oceani, deserti, eruzioni vulcaniche e incendi forestali o dalle attività dell'uomo (industriali, agricole ed energetiche). In aggiunta alle particelle di suolo o di sale marino, particolati di minori dimensioni si formano per reazioni tra i gas, specialmente sopra le aree urbane a maggior inquinamento atmosferico. Gli aerosol contenenti solfato giocano un ruolo importante nel riflettere la luce incidente, mentre sono poco efficaci nel trattenere quella riflessa, e quindi contribuiscono al raffreddamento delle aree ad elevato inquinamento atmosferico. Le particelle con diametro >0,1 μm costituiscono i nuclei di condensazione per la formazione delle gocce di pioggia nelle nubi (Le Scienze, 2016).

Tab. 1. Composizione dell'aria secca e tempo di residenza dei principali costituenti (Bargagli, 2020). (*: concentrazioni variabili nello spazio e/o nel tempo)

Costituente	Volume %	Massa Totale (g)	Tempo di residenza in Troposfera
N_2	78,10	$3{,}866\ 10^{21}$	10^7 anni
O_2	20,95	$1{,}185\ 10^{21}$	10^4 "
Ar	0,93	$6{,}59\ 10^{19}$	10^7 "
CO_2*	0,042	$2{,}45\ 10^{18}$	2-10 "
Ne	$1{,}82\ 10^{-3}$	$6{,}48\ 10^{16}$	10^7 "
He	$5{,}24\ 10^{-4}$	$3{,}71\ 10^{15}$	10^7 "
CH_4*	$1{,}7\ 10^{-4}$	$4{,}30\ 10^{15}$	4-7 "
Kr	$1{,}1\ 10^{-4}$		10^7 "
H_2	$5{,}3\ 10^{-5}$	$1{,}8\ 10^{14}$	4-8 "
N_2O *	$3{,}1\ 10^{-5}$	$2{,}3\ 10^{15}$	5-200 "
CO *	$2{,}2\ 10^{-5}$	$5{,}9\ 10^{14}$	0,2-0,5 "
Xe	$8{,}7\ 10^{-6}$		10^7 "
NH_3*	$1\ 10^{-6}$	$3{,}0\ 10^{13}$	5-14 giorni
NO_2*	$1\ 10^{-6}$	$8{,}1\ 10^{12}$	1-5 "
SO_2*	$1\ 10^{-7}$	$2{,}3\ 10^{12}$	0,5-14 "
H_2S *	$2\ 10^{-8}$	$1{,}2\ 10^{12}$	0,5-4 "
O_3*	$2\ 10^{-8}$	$3{,}3\ 10^{15}$	0,3-2 "

1.2 Il ruolo dell'acqua e delle prime forme di vita nella formazione dell'atmosfera

L'acqua è il principale costituente degli organismi viventi, rappresentando spesso oltre la metà del loro peso; si comporta come un "solvente universale" ed è essenziale per la vita perché tutti i processi metabolici si realizzano nel mezzo acquoso. Dalla combinazione degli elementi chimici solubilizzati nella crosta terrestre ebbero origine i composti costitutivi delle proteine (amminoacidi), degli acidi nucleici DNA e RNA (nucleotidi) e i primi microrganismi. La presenza di tali composti in alcuni tipi di meteoriti indica che acqua e molecole organiche si sono sempre formate nella galassia; pertanto le ricerche di eventuali forme di vita su Marte e altri pianeti (astrobiologia) si basano essenzialmente sulla ricerca dell'acqua. Gli studi più recenti indicano che le prime forme di vita della Terra si svilupparono in aree geotermali con la presenza intermittente di

acqua, ma non si può escludere che molecole organiche e/o microrganismi possano essere arrivati dallo spazio (ipotesi della panspermia) (Barzagli, 2018).

In alcune rocce dell'Australia aventi un'età di oltre 3 miliardi e mezzo di anni sono stati trovati resti di microrganismi fossili capaci di vivere in ambienti con elevate temperature e privi di ossigeno (estremofili). Microrganismi con le stesse caratteristiche sono tuttora presenti nelle sorgenti idrotermali e nelle dorsali medio-oceaniche. Queste forme di vita primordiali per il loro metabolismo utilizzavano l'energia chimica di molecole presenti nell'oceano primitivo, ma la selezione naturale, probabilmente, finì per favorire le specie di microrganismi capaci di sfruttare l'energia solare, la più importante e durevole fonte di energia disponibile sulla Terra. Rocce sedimentarie di circa 3,5 miliardi di anni fa, mostrano spessi strati di colore rosso contenenti ossidi di ferro, verosimilmente prodotti dall'ossidazione del metallo con l'ossigeno prodotto dai cianobatteri con la fotosintesi.

Questo processo, infatti, consiste nella produzione di molecole organiche e ossigeno a partire da anidride carbonica, acqua ed energia solare e gli organismi con pigmenti fotosintetici (fotoautotrofi) da oltre 3 miliardi di anni costituiscono la principale fonte di sussistenza per gli organismi eterotrofi (erbivori, carnivori e onnivori), fornendo loro energia ed ossigeno. Si ritiene che 4,5 miliardi di anni fa la durata del giorno fosse di sole 6 ore, ma le interazioni gravitazionali Terra-Luna ridussero progressivamente la velocità di rotazione della Terra e dopo circa un miliardo di anni, la maggiore disponibilità di luce favorì ulteriormente la fotosintesi e la conseguente produzione di ossigeno.

Una volta ossidato l'ambiente marino, il gas cominciò a diffondere nell'atmosfera fino a raggiungere l'attuale concentrazione del 20,95% (Tab. 1). Questa concentrazione è quella ottimale (se fosse superiore al 25% la materia organica umida brucerebbe spontaneamente, mentre se fosse inferiore al 15% non si avrebbe la combustione) e si è mantenuta piuttosto costante fino ai giorni nostri. Anche la temperatura media del pianeta si è mantenuta abbastanza costante, nonostante l'energia irradiata dal Sole sia aumentata di circa il 25%. In atmosfera, a oltre 20 km di altezza, l'ossigeno veniva trasformato da reazioni fotochimiche in ozono (O_3). Si formò così quello strato protettivo che, bloccando la radiazione ultravioletta del Sole, consentì (circa 500 milioni di anni fa) l'affermarsi della vita sulle terre emerse.

Per molti milioni di anni le concentrazioni dei principali costituenti dell'atmosfera terrestre (azoto 78,1% e ossigeno 20,9%) e dei gas nobili si sono mantenute piuttosto costanti, ma quelle di tutti gli altri costituenti, quali l'anidride carbonica, il metano, i composti dell'azoto e dello zolfo, essendo presenti in piccole quantità (< 0,05%; Tab.1) hanno sempre subito delle variazioni. Nella preistoria queste concentrazioni erano determinate soprattutto da eruzioni vulcaniche, dall'impatto di meteoriti e dal metabolismo degli organismi (Società Geologica Italiana, 2019).

Un imponente sviluppo degli autotrofi, infatti, riduce le concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica, contribuendo a mitigare l'effetto serra e il riscaldamento. La riduzione della vegetazione e la formazione di torbiere e pa-

ludi, invece, aumentano l'effetto serra perché, oltre alla ridotta cattura di anidride carbonica da parte dei vegetali, la degradazione della materia organica in ambienti privi di ossigeno (anossici) produce metano. Anche questo è un importante gas serra ed è molto più efficace dell'anidride carbonica nell'intrappolare la radiazione infrarossa riflessa dalla Terra. Quindi piccole variazioni nelle concentrazioni di alcuni costituenti minori dell'atmosfera possono innescare processi capaci di modificare le condizioni climatiche e ambientali sul nostro pianeta.

Nel Triassico-Giurassico, per esempio, si verificò un'estinzione di massa dovuta probabilmente all'eccessiva concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera e alla liberazione di metano dal fondo dei mari. La progressiva solubilizzazione dell'anidride carbonica negli oceani determinò l'acidificazione delle acque e la conseguente scomparsa di molte specie con guscio o scheletro di aragonite. Gli stessi processi stanno avvenendo anche ai giorni nostri e, a causa dell'aumento di temperatura e dello scioglimento dei ghiacciai sulle terre emerse, il livello dei mari aumenta di circa 3 mm all'anno.

Comunque, le estinzioni di massa del passato avvenivano in tempi relativamente lunghi e consentivano a nuove forme di vita di adattarsi agli ambienti in trasformazione. Con la caccia, l'uso di pesticidi, la distruzione e/o la frammentazione degli habitat e l'introduzione di specie alloctone (estranee alla flora e alla fauna di una regione, ma che possono entrare in competizione e prevalere sulle specie autoctone), l'uomo sta accelerando considerevolmente i processi di estinzione. Contrariamente al passato, la perdita di biodiversità causata dall'uomo è talmente rapida che difficilmente potrà essere bilanciata dalla comparsa di nuove specie perché il loro differenziamento, generalmente, richiede alcune migliaia di anni.

1.3 L'atmosfera e il clima*

L'atmosfera terrestre è in continuo movimento, sia per effetto della rotazione della Terra sia per il calore radiante riemesso dalla superficie terrestre che riscalda le masse d'aria dal basso e ne determina l'innalzamento (Zanichelli, 2010). Man mano che l'aria calda e meno densa sale, si raffredda (il raffreddamento adiabatico dell'aria umida è circa 6°C per km di salita). Nel corso dell'anno, la regione equatoriale riceve la maggior quantità di radiazione solare e il riscaldamento dal basso determina notevole evaporazione e risalita di masse d'aria umida. All'Equatore vi è anche la massima velocità di rotazione della Terra (da Ovest verso Est; 1674 km/h) e questa decresce all'aumentare della latitudine fino ai Poli, per il progressivo diminuire della circonferenza terrestre.

Secondo le leggi del moto angolare, il movimento di un oggetto dall'E-

* Paragrafo tratto da Bargagli, 2020.

quatore verso una latitudine superiore sarà deflesso dalla rotazione terrestre in senso orario nell'emisfero boreale, antiorario in quello australe (Effetto o Forza di Coriolis). Questa deviazione interessa anche le masse di aria calda e umida che risalgono all'Equatore e che contribuiscono al raffreddamento della superficie (calore latente di vaporizzazione) ed alla formazione di una zona di bassa pressione. Quest'ultima "richiama" masse d'aria da nord e da sud che si incontrano nella zona di convergenza intertropicale (ZCIT) per riempire il "vuoto" equatoriale. Le masse d'aria in quota – nel loro spostamento verso Nord e verso Sud – si raffreddano, diventano più dense e cominciano a discendere formando una fascia semipermanente di alta pressione nelle regioni subtropicali (cella di Hadley; Fig. 3).

L'aria discendente si comprime e si riscalda dando luogo a due distinte correnti d'aria sulla superficie, entrambe deviate dalla Forza di Coriolis: i venti occidentali (che da circa 40° di latitudine si dirigono verso i Poli) e i venti alisei di Nord-Est e di Sud-Est (diretti verso l'Equatore). Verso i 60° di latitudine Nord e Sud le masse d'aria spinte dai venti occidentali s'incontrano con quelle di aria fredda dei venti polari (zona di bassa pressione subpolare). Ai Poli l'aria è fredda e densa, sia per la scarsa irradiazione solare che per l'albedo della neve e dei ghiacci; quindi le regioni polari sono zone di alta pressione e vi si formano vortici e venti polari diretti da Est a Ovest (Fig. 3).

I venti prevalenti sulla superficie del pianeta determinano la formazione di

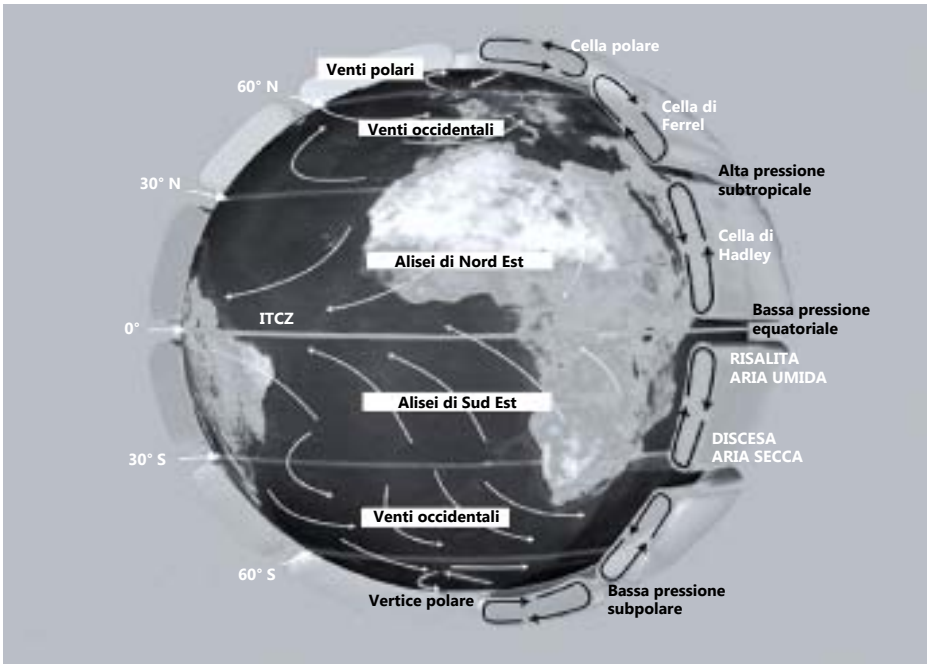

Fig. 3. La circolazione delle masse d'aria sulla Terra con i venti alisei, occidentali e polari (Bargagli, 2020).

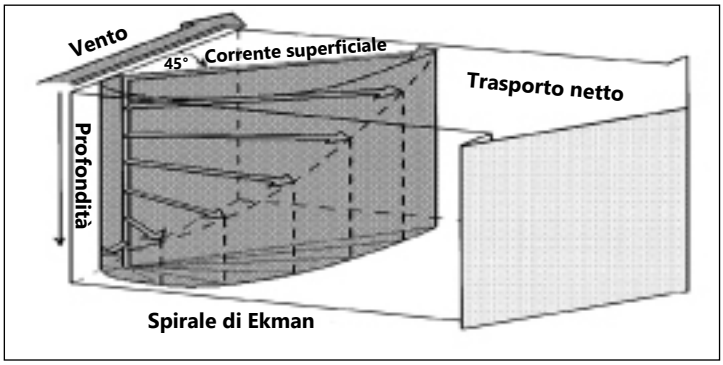

Fig. 4. Il trasporto delle acque oceaniche rispetto alla direzione del vento (Bargagli, 2020).

correnti oceaniche superficiali, le quali riflettono lo schema della circolazione atmosferica ma, a causa delle presenza delle masse continentali e della Forza di Coriolis (progressiva rotazione in senso orario nell'emisfero boreale ed antiorario in quello australe) nella colonna d'acqua, le masse d'acqua si spostano di 90° rispetto alla direzione del vento (spirale di Ekman; Fig. 4).

Al Polo Sud, diversamente da quello Nord, vi è una massa continentale (l'Antartide) e i venti occidentali danno luogo alla più grande corrente oceanica: la Corrente Circumantartica che ruota in senso orario intorno al continente. Da oltre 20 milioni di anni – cioè da quando si aprì il passaggio di Drake – all'estremità Sud dell'America meridionale, questa corrente con le sue acque fredde (-1,8°C) costituisce una barriera chimico-fisica che delimita l'Oceano Meridionale e contribuisce all'isolamento ed al raffreddamento dell'Antartide.

Dall'andamento delle temperature, dei venti e delle correnti marine dipende anche la distribuzione delle precipitazioni atmosferiche. Nel loro spostamento gli alisei acquistano umidità e in quota il vapore acqueo si condensa determinando abbondanti precipitazioni nelle regioni tropicali. La massa d'aria ascendente continua a raffreddarsi e, quando ha perso la maggior parte dell'umidità, comincia a discendere nelle zone sub-tropicali di alta pressione; durante la discesa l'aria si riscalda e sottrae il vapore acqueo prodotto sulla superficie terrestre. Si forma così la fascia dei deserti che circondano il pianeta a circa 30° Nord e Sud. A latitudini più elevate, le masse d'aria che si spostano verso i Poli si arricchiscono di vapore acqueo e quando raggiungono 50°-60° di latitudine Nord e Sud incontrano le masse d'aria fredda provenienti dai Poli e danno luogo a precipitazioni.

A scala locale e regionale le precipitazioni sono influenzate dalla topografia e quando una massa d'aria raggiunge una montagna sale, si raffredda e determina precipitazioni nelle zone più elevate del versante esposto al vento, mentre in quello sottovento l'aria fredda e asciutta discende, si riscalda e comincia ad arricchirsi nuovamente di vapore acqueo (ombra pluviometrica).

1.4 Il sistema climatico

Il clima è un sistema dinamico in cui le complesse interazioni e gli scambi di energia e di materia tra atmosfera, idrosfera e litosfera determinano i parametri (temperatura, precipitazioni, vento, pressione atmosferica, nuvolosità) che caratterizzano un determinato territorio, per lunghi periodi di tempo (Barone, 2014). L'energia del Sole (forzante esterna o esogena) è il motore del sistema e molte forzanti interne come la latitudine, l'effetto serra, le correnti marine, l'altitudine e la vegetazione contribuiscono a determinare la variabilità spazio-temporale delle condizioni climatiche.

Spesso "tempo meteorologico" e "clima" vengono confusi come sinonimi ma, mentre il clima si riferisce alle condizioni atmosferiche e ambientali, che con una relativa stabilità caratterizzano una zona per periodi di almeno alcuni decenni, con tempo meteorologico o atmosferico si intendono le condizioni meteo di una zona, generalmente soggette a notevole variabilità giornaliera, stagionale o annuale. Le variazioni stagionali del clima, invece, avvengono a intervalli di tempo piuttosto regolari e sono legate alla diversa inclinazione dei raggi solari. Durante gli equinozi di primavera e autunno i raggi sono perpendicolari all'Equatore, ma durante il solstizio d'estate boreale sono allo zenit sul Tropico del Cancro e nel solstizio d'estate australe sul Tropico del Capricorno.

Con l'incremento delle temperature superficiali anche la zona di convergenza intertropicale (ZCIT) tende a migrare: durante l'estate boreale si sposta verso il Polo Nord e invade la zona di alta pressione subtropicale, mentre in inverno si muove verso Sud determinando l'alternanza di stagioni secche ed umide nelle regioni tropicali. Il variare della radiazione solare con la latitudine e con le stagioni determina quindi la distribuzione delle fasce climatiche, dei principali biomi terrestri (foreste pluviali, deserti, zone temperate, steppe, taiga, tundra, banchisa e deserto polare), delle colture e delle economie dei popoli.

Gli studi sui meccanismi che regolano il clima terrestre e sui *trend* temporali dei parametri meteo-climatici indicano che, anche a causa dell'impatto delle attività dell'uomo, negli ultimi decenni gli incrementi delle concentrazioni dei gas serra e della temperatura dell'aria e degli oceani hanno subito una rapida accelerazione (Piffer, 2020).

Questi temi verranno ripresi nei prossimi capitoli, ma prima di affrontarli è doveroso ricordare che nel mondo esistono ancora vaste schiere di negazionisti climatici, alcuni dei quali sono chiaramente interessati a sfruttare i depositi di combustibili fossili fino al loro esaurimento (Trallori, 2018). Richard Lindzen, membro dell'Accademia delle Scienze degli Stati Uniti e già professore di Meteorologia presso il *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) è sicuramente una delle figure che maggiormente hanno contribuito alla diffusione del negazionismo climatico. Egli partecipò alla stesura di due rapporti dell'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) riconoscendo che l'anidride carbonica, inclusa quella prodotta dalle attività dell'uomo, costituisce un importante gas

serra, ma contestando gli effetti del riscaldamento del pianeta e l'attendibilità degli attuali modelli climatici. La maggior parte dei climatologi sostiene che il riscaldamento globale stia provocando un incremento di vapore acqueo nell'atmosfera e, quindi, un ulteriore incremento dell'effetto serra e della temperatura terrestre. Secondo Lindzen, invece, il riscaldamento farebbe aumentare la subsidenza delle masse d'aria e la conseguente riduzione dell'umidità atmosferica e dei cirri nei mari tropicali e provocherebbe una maggiore fuoriuscita di radiazione infrarossa dall'atmosfera terrestre. Questa teoria non è supportata da evidenze scientifiche e, laddove la riduzione dei cirri fosse provata, questa interesserebbe solo le regioni tropicali e non la sensitività globale del pianeta.

Di fatto, i dati sulle temperature medie dimostrano che stiamo vivendo alcuni degli anni più caldi tra quelli sin qui registrati. Nonostante il disaccordo con la maggior parte dei climatologi, il Prof. Lindzen presentò più volte le sue teorie al Senato e alla Camera degli Stati Uniti; nel 2001 raccomandò al Presidente Bush di non ratificare il Protocollo di Kyoto e nel 2017 inviò al Presidente Trump una petizione per il ritiro degli Stati Uniti dalla Convenzione ONU sui cambiamenti climatici (Inside Climate News, 2017). Queste iniziative ricevettero ovviamente grande risonanza nei mezzi d'informazione e le teorie di Lindzen furono riprese e diffuse anche da molti divulgatori come, ad esempio, Bjørn Lomborg che, con il libro "L'ambientalista scettico", ha contribuito non poco alla diffusione e alla crescita del negazionismo climatico. L'autore del presente volume ha condiviso e firmato il documento dell'Alleanza Mondiale degli Scienziati *"Scientists' Warning to Humanity"* e non insisterà ulteriormente sullo scetticismo dei negazionisti climatici, poco supportato da evidenze scientifiche.

Bibliografia e letture consigliate

Bargagli R., 2005. *Antarctic ecosystems. Environmental contamination, climate change, and human impact*. Springer-Verlag, Berlino.

Bargagli R., 2020. *Ecologia Applicata. Per un uso consapevole dell'aria, dell'acqua e del suolo*. Amon Ed., Padova.

Bridgam H.A., Oliver J.E., 2006. *The global climate system*. Cambridge University Press, Cambridge.

Carraro C., Mazzai A., 2015. *Il clima che cambia. Non solo un problema ambientale*. Il Mulino, Bologna.

Carli B., 2017. *L'uomo e il clima*. Il Mulino, Bologna.

Corigliano A., 2015. *Meteorologia. L'atmosfera: costituzione, struttura e proprietà*. Ronca Ed., Spinadesco (CR).

De Duve C., 2008. *Alle origini della vita*. Longanesi, Milano.

Di Mauro E., Saladino R., 2016. *Dal Big Bang alla cellula madre. L'origine della vita*. Il Mulino, Bologna.

Doglioni C., Peppoloni S., 2016. *Pianeta Terra*. Il Mulino, Bologna.

Fioravanti G., Fraschetti P., Lena F. *et al*., 2021. *Gli indicatori del clima in Italia*. ISPRA, Stato dell'Ambiente, Anno XVI., 96/2021.

Fry I., 2005. *L'origine della vita sulla Terra. Le ipotesi e le teorie dall'antichità ad oggi*. Garzanti, Milano.

I.P.C.C., 2018. *Global warming of 1.5°C*. Special Report Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.

Lomborg B., 2003. *L'ambientalista scettico. Non è vero che la Terra è in pericolo*. Mondadori, Milano.
Lovelock J.E., Whitfield M., 1982. Lifespan of the biosphere. *Nature,* **296**: 561-63.
Luisi P.L., 2013. *Sull'origine della vita e della biodiversità*. Mondadori Università, Milano.
Mastrojeni G., Pasini A., 2017. *Effetto serra, effetto guerra*. Ed. Chiarelettere, Milano.
Orosei R. *et al.* (2018) Radar evidence of subglacial liquid water on Mars. *Science*, **361**: 490-493.
Schlesinger W.H., 1991. *Biogeochemistry. An analysis of global change*. Academic Press, San Diego.

Link di approfondimento

http://isprambiente.gov.it
http://atmospheres.agu.org/
http://creativecommons.org/
http://www.esrl.noaa.gov/gmd
https://www.eea.europa.eu/themes/air
http://ec.europa.eu/clima/publications/
https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate

Capitolo 2

Gli eventi catastrofici del passato e l'impatto della nostra specie

2.1 Le estinzioni di massa

Nel precedente capitolo sono stati riportati i principali eventi che in 4 miliardi di anni hanno consentito l'affermarsi della vita sul nostro pianeta: la formazione degli oceani e il realizzarsi di "un giusto effetto serra", la comparsa di microrganismi capaci di sfruttare l'energia del sole per produrre molecole organiche e ossigeno e il ruolo di questo gas (secondo costituente dell'atmosfera dopo l'azoto) nel formare lo strato di ozono stratosferico che protegge gli organismi terrestri dalla radiazione ultravioletta.

Nonostante questa serie di eventi favorevoli, si stima che negli ultimi 500 milioni di anni oltre il 99% delle specie degli organismi si sia estinto in seguito a 5 eventi di estinzioni di massa e altri episodi ciclici di minore intensità (Belardinelli, 2022). Tali eventi furono causati sia da fattori esterni (meteoriti, comete, raggi ultravioletti e raggi gamma) che interni al sistema Terra, come le eruzioni vulcaniche o l'aumento delle concentrazioni di anidride carbonica e metano.

La prima estinzione di massa risale all'Ordoviciano-Siluriano, circa 450 milioni di anni fa, e fu probabilmente determinata da una glaciazione e dal conseguente abbassamento del livello dei mari e la scomparsa di molti organismi marini. Come nel caso delle altre estinzioni, non è escluso che vi sia stata una concomitanza di altri eventi: secondo alcuni ricercatori, per esempio, oltre agli squilibri climatici intervennero i danni biologici causati da lampi di raggi gamma prodotti dall'esplosione di una supernova, distante poche migliaia di anni luce dalla Terra.

Dopo circa 80 milioni di anni (Devoniano superiore) si verificò un'altra estinzione di massa, tra le cui possibili cause sono stati suggeriti gli impatti sulla Terra di asteroidi di grandi dimensioni; ma, dato che la perdita di specie proseguì per diversi milioni di anni, è stato ipotizzato anche un progressivo riscaldamento globale. La recente scoperta di danni da radiazione ultravioletta in alcuni fossili dell'epoca farebbe supporre anche una riduzione dello strato protettivo di ozono stratosferico.

Nel Permiano-Triassico (circa 250 milioni di anni fa) si verificò l'estinzione di massa più catastrofica, con la scomparsa di oltre il 90% delle specie marine.

Probabilmente, oltre al possibile impatto di asteroidi di grandi dimensioni, furono l'intensa attività vulcanica e l'enorme quantità di anidride carbonica emessa che determinarono il riscaldamento del pianeta, con acidificazione e anossia degli oceani, produzione di metano e di gas tossici, con eventuale riduzione dello strato protettivo di ozono stratosferico e danni da radiazione ultravioletta[1].

Anche la grande estinzione di rettili (Terapsidi), anfibi e bivalvi primitivi avvenuta al termine del Triassico (circa 200 milioni di anni fa) fu probabilmente dovuta al riscaldamento globale (aumento della temperatura media del pianeta di circa 5°C) e alla diffusa anossia e acidità degli ecosistemi acquatici.

In seguito, nel Cretaceo si verificò l'estinzione di circa il 75% delle specie viventi, incluse quelle dei dinosauri. Dopo molte ipotesi poco attendibili, il premio Nobel per la Fisica Luis Alvarez ed i suoi collaboratori, svolgendo ricerche in alcuni campioni di rocce raccolti vicino a Gubbio e risalenti al limite tra Cretaceo e Terziario, vi misurarono elevate concentrazioni di iridio, un elemento raro nella crosta terrestre ma piuttosto comune nelle meteoriti. L'ipotesi che l'estinzione di massa sia stata causata dall'impatto di asteroidi trovò ulteriori conferme con la scoperta di una enorme struttura circolare sotterranea nella Penisola dello Yucatan (Elidoro, 2019). Grazie alle moderne tecniche di datazione, oggi sappiamo che l'estinzione del Cretaceo avvenne 65,95 milioni di anni fa (con un margine di errore di appena 40.000 anni) e sembra che la Terra, grazie all'attività fotosintetica delle alghe, riuscì a riequilibrare le concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica in un tempo molto breve (circa 100 anni).

Altre importanti perdite di biodiversità sulla Terra sembrano manifestarsi con una certa ciclicità (ogni 26 milioni di anni) e si ipotizza che potrebbero essere dovute alla ciclica deviazione verso il sistema solare di asteroidi e comete oppure ad un periodico intensificarsi dell'attività vulcanica con accentuate emissioni di anidride carbonica, riscaldamento globale, acidità e anossia negli ecosistemi acquatici.

È stato stimato che con il sistema Terra in equilibrio, e in assenza di importanti cause di disturbo, il tasso di estinzione annuo dovrebbe aggirarsi su circa una spe-

---

[1] La solubilità dei gas nell'acqua dipende dalla loro pressione parziale e dalla temperatura dell'acqua. Un incremento delle concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica ne aumenta la dissociazione nell'acqua con produzione di acidi che possono danneggiare le strutture calcaree degli organismi. L'aumento di temperatura dell'aria e delle acque superficiali diminuisce la solubilità dell'ossigeno e sul fondo dei corpi d'acqua possono verificarsi condizioni di anossia (tutto l'ossigeno è consumato per la degradazione dei materiali organici che sedimentano). In queste condizioni si realizza una stratificazione delle acque con microorganismi anaerobi (che producono metano e solfuro d'idrogeno) nella zona sottostante il chemioclino e tutte le altre forme di vita aerobiche al di sopra di esso. Alcuni protobatteri anaerobi tipici di acque calde e stagnanti, si sviluppano in prossimità del chemioclino e per la loro fotosintesi utilizzano la luce proveniente dall'alto e come donatori di elettroni i composti dello zolfo prodotti dai sottostanti batteri anaerobi. Con il loro metabolismo questi batteri favoriscono il progressivo innalzamento del chemioclino perché consumano ossigeno per produrre granuli di zolfo elementare e questi possono essere ossidati a formare acido solforico. È stato ipotizzato che se la concentrazione di anidride carbonica in aria raggiunge concentrazioni intorno alle 1000 parti per milione (l'attuale concentrazione è circa 417 ppm) il chemioclino può raggiungere la superficie del mare liberando in aria composti gassosi con effetti deleteri sullo scudo protettivo dell'ozono stratosferico e sugli organismi terrestri.

cie ogni milione di specie esistenti (quindi, assumendo che sulla Terra ci siano 12 milioni di specie, dovremmo perderne 12 all'anno). Tuttavia, secondo l'ultimo rapporto dell'IPBES (*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*), attualmente oltre un milione di specie sono a rischio di estinzione (tra le quali, oltre il 40% di quelle degli anfibi ed 1/3 di quelle dei mammiferi marini) ed il tasso medio di estinzione è di alcune centinaia di volte superiore a quello degli ultimi 10 milioni di anni.

Larga parte della comunità scientifica ritiene che, con l'attuale perdita di circa 15.000 specie all'anno, sia in corso la sesta estinzione di massa (Ferraro, 2022). Molte specie stanno scomparendo prima di essere descritte e le cause non sono solo naturali, ma vi contribuiscono le azioni dell'uomo come l'agricoltura intensiva, la distruzione degli habitat naturali, l'incremento demografico, l'inquinamento ambientale e la globalizzazione. Come dimostrano le estinzioni del passato, un ulteriore rischio per la sopravvivenza di molte specie è il notevole contributo delle attività dell'uomo all'aumento delle concentrazioni atmosferiche di gas serra, all'acidificazione degli oceani e ai cambiamenti climatici.

2.2 La rilevanza geologica delle attività antropiche e la proposta dell'Antropocene come nuova epoca

La nostra specie è presente sulla Terra da soli 200.000 anni ma, grazie alla sua intelligenza, è diventata dominante e ha assunto una forza tale da plasmare la faccia del pianeta. La popolazione mondiale (oggi circa 7,6 miliardi) potrebbe raggiungere i 10 miliardi prima delle fine del secolo. Attualmente, ognuno di noi produce mediamente in una settimana una massa complessiva di materiali superiore al proprio peso e si stima che "la massa antropogenica" totale (la massa incorporata in oggetti solidi realizzati da esseri umani) corrisponda a quella di tutta la biomassa vivente.

Lo sfruttamento delle risorse naturali (rinnovabili e non) ha alterato i naturali flussi di elementi e composti tra atmosfera, idrosfera, pedosfera e biosfera e sta modificando la loro composizione. Nell'ultimo secolo sono state prodotte e utilizzate su vasta scala molte molecole di sintesi estranee al biota (xenobiotiche) (Centro di Medicina Biologica, 2022). Tracce di DDT e dei suoi metaboliti furono rilevate nei pinguini dell'Antartide già negli anni '60 del secolo scorso e l'introduzione di tecniche analitiche sempre più raffinate ha permesso di rilevare la presenza anche di molti altri composti organici persistenti (POPs, *Persistent Organic Pollutants*) e radionuclidi artificiali in tutti gli ecosistemi del pianeta, compresi quelli alle massime profondità oceaniche.

Di fatto, ogni organismo sulla Terra è contaminato ed espressioni come "aria pura" o "acqua pura" sono delle astrazioni. L'impatto delle attività dell'uo-

mo viene "registrato" nei sedimenti, nei ghiacci, nelle barriere coralline, nelle torbiere o nei cerchi di accrescimento del tronco degli alberi e in futuro saranno rilevabili nelle stratigrafie geologiche. Per questo motivo e per rimarcare che l'uomo, rispetto ad agenti naturali quali le eruzioni vulcaniche, è diventato il principale responsabile dei cambiamenti che avvengono sulla Terra, è stata proposta l'introduzione di una nuova epoca geologica: l'Antropocene (Giannetto, 2022).

Tale proposta è ancora oggetto di discussione nella comunità scientifica e prima di accettarla sarà necessario stabilire la sua data d'inizio e come inserire l'Antropocene nella gerarchia della Scala Geologica del Tempo. Secondo questa scala, l'epoca attuale (Olocene) è cominciata 11.650 anni fa, nel periodo Quaternario (iniziato 2.588.000 anni fa) e nell'era del Cenozoico (iniziato 65,95 milioni di anni, dopo la scomparsa dei dinosauri).

Ogni unità di tempo geologico inizia con un *marker* globale del cambiamento nel sistema Terra e con altri indicatori stratigrafici ausiliari (per esempio, la comparsa o la scomparsa di specie), rilevabili in sezioni di rocce o di carote di sedimento o di ghiaccio.

L'Olocene è iniziato con la transizione da un periodo glaciale ad un progressivo riscaldamento del pianeta, caratterizzato da un innalzamento del livello dei mari di circa 120 m. Per definizione l'Olocene include anche la storia evolutiva dell'uomo; occorre quindi stabilire se questa epoca sia ancora valida o se, invece, l'Antropocene sia da considerarsi identificabile con un suo specifico *pattern*.

Per la sua data d'inizio alcuni suggeriscono il 1784, anno in cui fu inventata la macchina a vapore e cominciò lo sfruttamento intensivo dei combustibili fossili. Altri propongono il 1945, anno delle prime esplosioni nucleari e del *fallout* di radionuclidi artificiali che determinò la formazione di un record stratigrafico permanente, facilmente identificabile su tutto il pianeta. Altre opzioni potrebbero essere la contaminazione da piombo (usato come additivo nei carburanti), l'avvento della plastica o degli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA; prodotti con le combustioni).

Comunque, anche in epoche precedenti sono rilevabili altri *marker* stratigrafici dell'impatto antropico. Per esempio, l'analisi di carote di ghiaccio prelevate in Antartide indica che le concentrazioni atmosferiche del metano cominciarono ad aumentare circa 5000 anni fa e, oltre alle emissioni naturali dalle paludi e dalle torbiere, probabilmente vi contribuì anche l'espandersi della coltivazione del riso e dell'allevamento dei ruminanti. I ghiacci della Groenlandia indicano che nell'emisfero boreale la contaminazione atmosferica da rame e altri metalli ebbe inizio con l'età del bronzo e del ferro.

Con la scoperta dell'America nel 1492, si verificò per la prima volta un intenso scambio di piante (mais, patate, pomodori, fagioli, frumento) e animali (domestici e non) tra l'Europa e il Nuovo Mondo. I pollini di mais, per esempio, costituiscono un buon *marker* e sono stati ritrovati in sezioni di molte carote di sedimenti marini e lacustri prelevate in Europa e risalenti al 1600. Per gli indigeni d'America l'arrivo degli europei fu causa di guerre, epidemie e carestie e le loro popolazioni subirono un drammatico declino (da circa 60

milioni nel 1492 a 6 milioni nel 1650); la conseguente riduzione delle attività agricole favorì un notevole sviluppo di foreste e savane e questo, probabilmente, contribuì alla riduzione di 7-8 parti per milione delle concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica (rilevata tra il 1570 e il 1620 nelle carote di ghiaccio dell'Antartide). Negli stessi anni si registrarono anche le minime temperature di quel lungo periodo freddo (la Piccola Età Glaciale) che caratterizzò il clima europeo dal 1400 fino al 1850.

Comunque, l'orientamento prevalente nella comunità scientifica sembrerebbe quello di contrassegnare l'inizio dell'Antropocene con riferimento ai cambiamenti globali conseguenti all'uso massiccio di combustibili fossili o alle esplosioni nucleari della seconda metà del secolo scorso.

2.3 L'aria delle città è sempre stata di scarsa qualità

Ad esclusione dell'azoto (78,1 %) e dell'ossigeno (20,95 %), tutti gli altri elementi e composti costituenti l'atmosfera sono presenti in concentrazioni minime (vedi Tab. 1, cap. 1) e risultano quindi facilmente modificabili da eventi naturali come le eruzioni vulcaniche o le attività dell'uomo.

Mentre l'anidride carbonica (0,041 %) e il metano (0,0018 %) permangono in aria per diversi anni e contribuiscono a determinare effetti globali quali i cambiamenti climatici, molti altri composti gassosi come l'ammoniaca o gli ossidi di carbonio, azoto e zolfo hanno concentrazioni nettamente inferiori e tempo di permanenza in aria di pochi giorni o ore.

Per questo motivo, con la scoperta e l'uso del fuoco e le prime attività agricole l'uomo era già in grado di modificare la composizione dell'atmosfera, soprattutto a scala locale. Molti insediamenti per la produzione di metalli, mattoni e manufatti in vetro e ceramica erano situati vicino alle foreste, che garantivano l'approvvigionamento del legname.

Anche allora, la peggiore qualità dell'aria si riscontrava soprattutto negli insediamenti urbani a causa dei fumi, dei reflui e dei rifiuti prodotti nelle abitazioni. Già Aristotele, nell'*Athenaion Politeia*, sosteneva la necessità di uno smaltimento ad almeno 2 km di distanza dalle mura della città e Seneca, essendo di salute cagionevole, riferisce a Lucilius che deve lasciare Roma a causa della pessima qualità dell'aria.

Il Senato Romano circa 2000 anni fa introdusse una legge "*Aerem corrompere non licet*" dove, per esempio, era fatto divieto ai produttori di formaggio di nuocere ai loro vicini con i fumi. Tuttavia, durante il massimo splendore nell'Impero Romano vi fu un enorme sviluppo delle attività minerarie e metallurgiche e l'inquinamento atmosferico cominciò a interessare tutto l'emisfero settentrionale (Fig. 5).

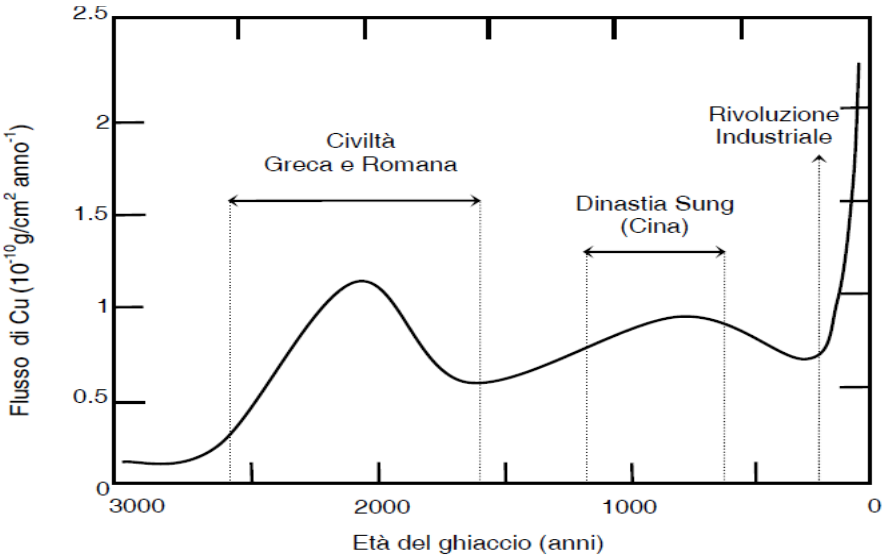

Fig. 5. Le deposizioni di Cu nelle nevi della Groenlandia nel corso degli ultimi 3000 anni (da Hong *et al.,* 1996).

Si stima che in quel periodo venissero prodotte circa 80.000 tonnellate all'anno di piombo e Strabone parla della necessità di costruire camini più alti per ridurre gli effetti tossici delle esalazioni nelle miniere spagnole di galena. Probabilmente fu anche questo accorgimento a favorire la dispersione dei contaminanti su larga scala, determinando la deposizione di piombo e rame perfino nei ghiacci della Groenlandia.

Ma, oltre alla salute degli addetti alle attività metallurgiche, anche quella della popolazione urbana era messa a rischio dalla tossicità dei metalli. Il piombo era impiegato per costruire manufatti, condutture, posate e vasellame e i cittadini assumevano il metallo per contatto e per ingestione con gli alimenti. L'intossicazione da piombo era talmente diffusa tra i patrizi romani che alcuni hanno ipotizzato un suo possibile coinvolgimento nel declino dell'Impero (la patologia è tuttora denominata "saturnismo", perché Saturno era il dio romano associato dagli alchimisti al piombo).

L'analisi delle carote di ghiaccio della Groenlandia indica che nei secoli successivi nell'emisfero settentrionale si ebbe una ridotta deposizione di metalli, ma negli ambienti urbani c'era ancora una cattiva qualità dell'aria e questa si deteriorò ulteriormente specialmente nelle città a elevata densità abitativa e con clima umido, come Londra, dove i fumi prodotti dalla combustione del carbone e la nebbia favorivano la formazione dello smog (*smoke+fog*).

Nel 1661, nel trattato *Fumifugium, or the Inconveniencie of the Aer and Smoak of London Dissipated*, lo scrittore Evelyn (1620-1706) riferisce un tasso di mortalità molto più alto in città che in campagna e che circa la metà dei decessi era dovuta a patologie polmonari. Per ridurre l'impatto dell'inquinamento at-

mosferico, egli raccomandava di spostare fuori città tutte le attività produttive e suggeriva di cingere la città con una fascia protettiva di alberi, ampia alcuni chilometri.

Negli anni successivi molti altri scrittori e naturalisti –tra i quali Erasmus Darwin, il nonno di Charles– si occuparono dell'inquinamento atmosferico e dei suoi effetti. In molti libri di testo, come esempio paradigmatico della selezione naturale, si riporta il caso della falena *Biston betularia*, la cui forma melanica divenne prevalente in Inghilterra sui tronchi delle betulle anneriti dalla fuliggine.

A Parigi, altra grande città europea, nel 1866 il lichenologo finlandese Nylander notò che sui tronchi degli ippocastani del Jardin du Luxembourg erano presenti solo 35 specie di licheni e molti esemplari erano poco sviluppati o sterili. Trent'anni più tardi non vi trovò più licheni e ne attribuì la scomparsa all'inquinamento atmosferico: "*Les lichens donnent à leur manière la mesure de la salubrité de l'air et constituent une sorte d'hygromètre très sensible*". Il "deserto lichenico" fu rilevato in molti altri centri urbani e fu dimostrata la (fito-)tossicità dei composti gassosi dello zolfo e dell'azoto, prodotti con la combustione del carbone. Nel 1909 a Glasgow fu messa in evidenza la correlazione tra l'inquinamento atmosferico e la mortalità della popolazione, ma i primi provvedimenti per migliorare la qualità dell'aria nelle città furono presi solo dopo 50 anni.

Come per i disastri ambientali provocati da altri inquinanti (vedi ad esempio, il metilmercurio e il cadmio in Giappone, il metilisocianato in India, o le diossine a Seveso) anche in quel caso, per prendere coscienza del problema, fu necessario il manifestarsi di un evento drammatico verificatosi tra il 5 e il 9 dicembre 1952: il grande smog di Londra che determinò oltre 4000 decessi nella settimana successiva e circa 13.000 entro il marzo 1953. L'evento fu determinato da particolari condizioni meteorologiche quali l'assenza di vento e l'inversione termica (aria più calda in quota e masse d'aria fredda e stagnante al suolo). Alle emissioni delle fabbriche e del traffico si aggiunsero i fumi della combustione del carbone (di pessima qualità) negli ambienti domestici; l'aria si arricchì di anidride solforosa e di particelle catramose di fuliggine e divenne irrespirabile. Lo *smog* era di colore scuro e la scarsa visibilità impediva gli spostamenti; gli anziani e i bambini pagarono il maggior prezzo in termini di vittime a causa di polmoniti, bronchiti e insufficienza respiratoria.

Nel 1956 fu approvato dal Parlamento del Regno Unito un provvedimento legislativo (*Clean Air Act*) per ridurre l'inquinamento atmosferico ricorrendo a combustibili più puliti del carbone e, come suggerito da Evelyn tre secoli prima, con il decentramento di molti impianti produttivi nelle aree extra-urbane. Il *Clean Air Act* costituì un importante documento per adottare/adeguare anche in altri paesi le normative contro l'inquinamento atmosferico e la progressiva introduzione del metano e altri combustibili con bassi tenori di zolfo impedì il ripetersi di gravi episodi di smog "tipo Londra".

Tuttavia, nonostante la progressiva riduzione dell'inquinamento atmosferico da composti dello zolfo, nelle città con clima caldo e asciutto gli ossidi di azoto prodotti dalle combustioni possono determinare la formazione di uno smog di tipo estivo (detto anche "tipo Los Angeles", città dove fu segnalato

intorno al 1940). Questo smog si manifesta come una leggera foschia di colore giallo-marrone e si forma in seguito all'irraggiamento solare che promuove reazioni fotochimiche tra gli ossidi di azoto e i composti organici volatili (COV, quali ad esempio i comuni solventi o i terpeni prodotti dalle piante), con la formazione di ozono e altri energici ossidanti come il perossiacetilnitrato (PAN).

Queste sostanze sono tossiche per tutti gli organismi (animali e vegetali) e contribuiscono al deterioramento delle superfici e dei materiali. Nonostante le normative e le innovazioni tecnologiche per ridurre le emissioni del traffico veicolare, l'esposizione a elevate concentrazioni di energici ossidanti costituisce ancora un grave problema per la salute dei cittadini e l'ambiente, soprattutto nelle giornate estive caratterizzate da stabilità atmosferica e forte insolazione (Minutolo *et al.*, 2021).

2.4 La globalizzazione dell'impatto antropico

Prima della Rivoluzione Industriale, l'uomo era arrivato a modificare la composizione dell'atmosfera soprattutto su scala locale e aveva determinato una leggera contaminazione da metalli nell'emisfero settentrionale. Quando poi cominciò a sfruttare massicciamente i combustibili fossili e i minerali presenti nel sottosuolo (*pool* di riserva), egli dette inizio al trasferimento in atmosfera (*pool* di scambio) di anidride carbonica e di molti altri elementi e composti in quantità superiori a quelle emesse da fonti naturali, cioè i vulcani, le sorgenti geotermali, gli incendi forestali o il metabolismo dei batteri, delle piante e degli animali. L'enorme sviluppo del traffico veicolare e dei sistemi di trasporto determinò una contaminazione globale da piombo (impiegato, sotto forma di piombo-tetraetile o tetrametile, come additivo antidetonante nelle benzine).

Sin dall'antichità l'uomo ha immesso nel *pool* di scambio e ha aumentato la biodisponibilità di metalli come argento, arsenico, rame, mercurio, piombo e zinco, ma recentemente, con l'introduzione dei convertitori catalitici (per ridurre le emissioni degli autoveicoli) e con la produzione di apparecchiature elettroniche e superconduttori, ha cominciato a diffondere nell'ambiente elementi chimici molto rari nella crosta terrestre e potenzialmente tossici, come. ad esempio, il platino, il palladio o gli attinoidi.

Oltre alle emissioni di elementi e composti presenti in natura, ciò che ha determinato una forte accelerazione verso l'Antropocene è stata la produzione di molecole di sintesi e di radionuclidi artificiali (con le esplosioni e gli incidenti nucleari). Dal 1930 a oggi sono stati prodotti oltre 2 milioni di composti chimici e circa 100.000 di questi sono stati commercializzati in notevoli quantità.

Il ciclo atmosferico dei contaminanti dipende essenzialmente dalle loro ca-

ratteristiche fisico-chimiche quali la volatilità e la stabilità chimica (persistenza), mentre per la loro dispersione e il trasporto a lunga distanza giocano un ruolo importante le turbolenze atmosferiche, l'altezza dei camini, l'energia di emissione e la morfologia del territorio. Nel caso delle esplosioni nucleari, la dispersione dei radionuclidi artificiali può interessare tutti gli oceani e i continenti, così come avviene per certe eruzioni vulcaniche.

L'Antartide, il luogo più remoto della Terra, è ulteriormente isolato dal resto del mondo dalla circolazione delle masse d'aria (vortice circumpolare) e delle fredde acque dell'Oceano Meridionale, che ruotano intorno al continente (Corrente Circumpolare Antartica). Tuttavia alcune decine di anni fa si scoprì che lo strato protettivo di ozono stratosferico sopra il continente si assottiglia al sorgere primaverile del sole, fino a formare il cosiddetto "buco". Si è poi scoperto che contribuivano alla distruzione dell'ozono i clorofluorocarburi (CFCs), composti contenenti cloro, fluoro e carbonio e dotati di eccezionali proprietà fisico-chimiche (ininfiammabili, atossici e con notevole stabilità chimica e termica). Questi composti furono prodotti e utilizzati in grandi quantità, soprattutto nell'emisfero settentrionale, come agenti refrigeranti, estinguenti e propellenti per aerosol. Come l'anidride carbonica e il metano, i CFCs hanno dei tempi di permanenza in aria di alcuni anni, si comportano da gas serra e possono raggiungere la stratosfera. A 20-30 km di altezza l'energia dei raggi solari è in grado di provocare la dissociazione fotochimica dei CFCs con la perdita di un atomo di cloro che, nelle fredde nubi stratosferiche polari, cattura un atomo di ossigeno dalle molecole di ozono e ne determina la progressiva distruzione, riducendolo a ossigeno molecolare. Alla fine della primavera le nubi stratosferiche scompaiono e si arrestano i meccanismi di distruzione catalitica dell'ozono.

Con l'applicazione nel 1987 del Protocollo di Montreal (esteso nel 2007 anche agli idrofluorocarburi, HCFCs) è stato vietato l'uso di questi composti e negli ultimi anni è stata rilevata una significativa riduzione del "buco" primaverile sopra l'Antartide. Ma, considerata la persistenza in aria delle molecole di CFCs e HCFCs, occorreranno ancora molti anni prima che si ristabilisca la situazione originaria.

Il processo di assottigliamento dello strato di ozono stratosferico sopra l'Antartide era iniziato probabilmente diversi anni prima della sua scoperta e non è escluso che i raggi ultravioletti avessero già provocato danni agli organismi antartici, esposti anche alle deposizioni atmosferiche di radionuclidi, metalli pesanti e composti organici persistenti (POPs) trasportati da lunghe distanze. Le comunità biotiche dell'Oceano Meridionale e del continente antartico sono tra le più vulnerabili ai composti organici di sintesi perché comprendono molte specie che si sono evolute per milioni di anni in isolamento e hanno acquisito specifici adattamenti biochimici e fisiologici per vivere in un ambiente estremo.

Molti composti organici persistenti sono difficilmente degradabili e, avendo affinità per i lipidi, attraversano facilmente le membrane cellulari, penetrano all'interno delle cellule e tendono ad accumularsi soprattutto nel tessuto adiposo. La detossificazione e l'eliminazione di questi composti da parte degli

organismi è particolarmente complessa e richiede molto tempo, quindi i POPs si accumulano nei produttori primari, da questi vengono trasferiti agli erbivori che, a loro volta, li cedono ai carnivori. Si realizza così un progressivo incremento delle concentrazioni di questi composti ai vari livelli delle catene trofiche (processo di biomagnificazione) (Magnone, 2021).

Generalmente negli ecosistemi acquatici molte specie animali si nutrono anche di detriti organici ed entrano a far parte di reti trofiche molto complesse e più lunghe delle catene trofiche terrestri (es. fitoplancton → fitoplancton eterotrofo → microzooplancton → macrozooplancton → invertebrati e pesci planctofagi → pesci predatori → uccelli e mammiferi marini). Quindi, i consumatori terminali ai vertici di queste reti trofiche (uomo incluso) sono in assoluto tra gli organismi più esposti all'accumulo e agli effetti tossici dei POPs.

La maggior parte delle terre emerse così come il maggior numero di sorgenti antropiche di composti xenobiotici sono localizzate nell'emisfero settentrionale e i monitoraggi condotti nelle regioni artiche dimostrano che l'orso polare e alcuni gruppi di popolazioni indigene di eschimesi (Inuit) che consumano carni di foca, narvalo e beluga sono particolarmente a rischio. Molti POPs interferiscono con il metabolismo degli ormoni e riducono le difese immunitarie; mentre gli orsi polari stanno manifestando disfunzioni riproduttive, tra i neonati degli Inuit vi è un'elevata incidenza d'infezioni dell'apparato respiratorio e uditivo.

Anche se in concentrazioni inferiori a quelle misurate negli organismi dell'Artico, da oltre 50 anni molti POPs sono stati rilevati anche nei tessuti dei pinguini, delle foche o nei muschi e nei licheni dell'Antartide. La maggior parte di questi composti non è mai stata utilizzata in questo continente, ma oggi conosciamo i processi che ne permettono il trasporto atmosferico a lunga distanza.

Molti composti organici persistenti sono volatili a temperatura ambiente e vengono trasportati con le masse d'aria (verso Sud nell'emisfero australe e verso Nord in quello boreale) fino a quando incontreranno temperature più basse che ne determineranno la condensazione e deposizione. Negli ecosistemi terrestri e acquatici delle regioni tropicali le temperature consentono ai POPs di passare nuovamente alla fase vapore e i cicli di volatilizzazione/condensazione/deposizione si ripeteranno molte volte fino a che, mediante successivi "salti" (effetto cavalletta), gli inquinanti saranno depositati a latitudini o altitudini dove le basse temperature non consentiranno ulteriori volatilizzazioni (*cold distillation*) (Fig. 6).

Anche il mercurio è un metallo che a temperatura ambiente è presente in aria soprattutto in forma di vapore (Hg°) e, avendo un tempo di permanenza media di circa un anno, può essere trasportato per lunghe distanze.

In natura, soprattutto nei sedimenti, gli ioni del mercurio possono essere trasformati da batteri in monometilmercurio (CH_3Hg), uno degli inquinanti di maggiore rilevanza tossicologica e ambientale. Infatti, come i POPs, anche il CH_3Hg ha affinità per i lipidi e viene biomagnificato nelle catene trofiche (Istituto Superiore di Sanità, 2021).

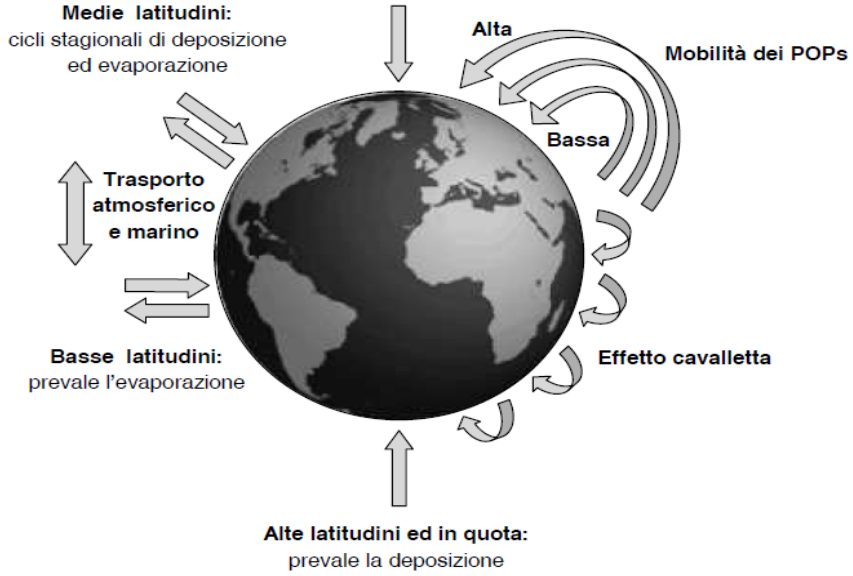

Fig. 6. Con successive evaporazioni/condensazioni i POPs si depositano a latitudini più elevate (Bargagli, 2020).

Negli anni '50 del secolo scorso, il metilmercurio accumulato nei pesci e negli invertebrati della Baia di Minamata (Giappone) provocò gravi patologie neurologiche irreversibili e la morte di numerosi pescatori e dei loro familiari che consumavano i prodotti della pesca. Recenti ricerche dimostrano che le regioni polari costituiscono trappole fredde anche per il mercurio gassoso emesso a latitudini inferiori da sorgenti antropiche (attività di estrazione artigianale dell'oro, produzioni metallurgiche ed energetiche, incenerimento dei rifiuti) o da vulcani, incendi forestali, degassamento dei suoli e dei corpi d'acqua.

Nel 1990 Bargagli *et al.* rilevarono notevoli accumuli di mercurio nei licheni e nei muschi raccolti in un'area costiera del continente antartico, di fronte alla Baia di Terra Nova (Mare di Ross) (Fig. 7). La mancanza di sorgenti locali di emissione del metallo non consentì di comprendere l'origine della contaminazione.

Alcuni anni dopo, in ecosistemi costieri dell'Artico furono rilevate a primavera, con il sorgere del sole, massicce e localizzate deposizioni di mercurio (*Hg depletion events*). Si scoprì che nelle masse d'aria sovrastanti aree marine costiere prive di ghiaccio durante l'inverno sono presenti elevate concentrazioni di molecole di bromo. I primi raggi del sole, dopo i bui mesi invernali, determinano la formazione di forme reattive del bromo capaci di ossidare e far depositare il mercurio gassoso.

Nella Baia di Terra Nova spirano con una certa continuità forti venti (catabatici) che, come confermato anche dalle osservazioni da satellite, durante l'inverno mantengono l'area marina costiera libera dai ghiacci, formando una polinia costiera. A distanza di alcuni anni, la presenza delle polinie consentì

di comprendere perché il mercurio, verosimilmente proveniente anche da altri continenti, venga depositato in uno degli ambienti più remoti del pianeta.

I cambiamenti climatici stanno determinando una forte riduzione della copertura invernale di ghiaccio nelle regioni costiere dell'Artico e della Penisola Antartica ed è verosimile che queste zone stiano assumendo un ruolo sempre più importante come luoghi di accumulo nel ciclo globale del mercurio.

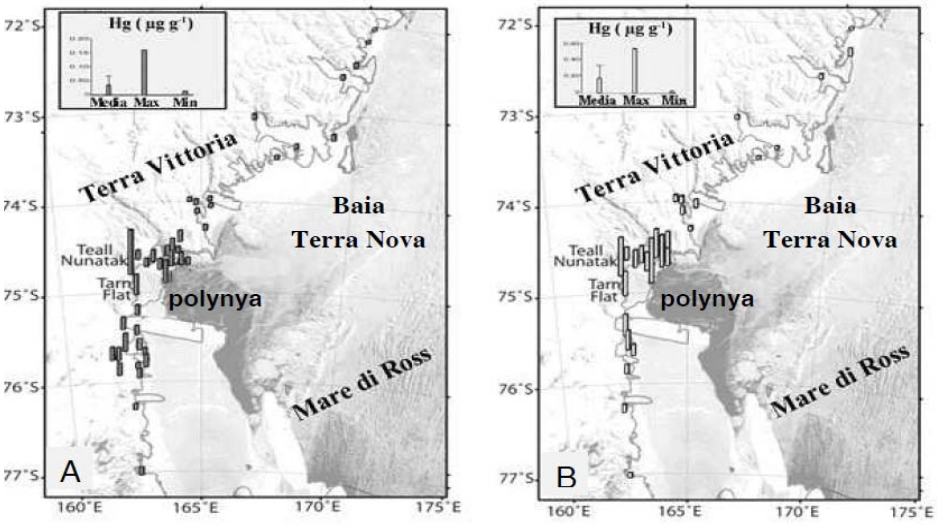

Fig. 7. La presenza della polinia costiera nella Baia Terra Nova e l'accumulo del mercurio nei licheni (A) e nei muschi (B). (Bargagli *et al.*, 2005).

Bibliografia e letture consigliate

A.M.A.P., 2016. *Influence of climate change on transport, levels, and effects of contaminants in northern areas*. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo.

Angus, I., 2020. *Anthropocene. Capitalismo fossile e crisi del sistema Terra.* Asterios Ed. Trieste.

Barbante C., Spolaor A., Cairns W.R.L., *et al.*, 2017. Man's footprint on the Arctic environment as revealed by analysis of ice and snow. *Earth Science Review*, **168**: 218231

Bargagli R., Agnorelli C., Borghini F., Monaci F., 2005. Enhanced deposition and bioaccumulation of mercury in Antarctic terrestrial ecosystems facing a coastal polynya. *Environmental Science & Technology*, **39**(2): 8150-5.

Bargagli R., Rota E., 2018. *Contaminant dispersal in the environment.* Oxford Bibliographies. Oxford University Press, Oxford.

Bargagli R., 2020. *Ecologia Applicata. Per un uso consapevole dell'aria, dell'acqua e del suolo.* Amon Ed., Padova.

Crutzen P.J., Stoermer E.F., 2000. The "Anthropocene". *Global Change Newsletters*, **41**: 17-18.

Giardullo P., 2018. *Non è aria*. Il Mulino, Bologna.

Hong S., Candelone J.-P., Soutif M., *et al.*, 1996. A reconstruction of changes in copper production and copper emissions to the atmosphere during the past 7000 years. *Science of the Total Environment*, **188**: 183-193.

Jacobson M.Z., 2002. *Atmospheric pollution: history, science, and regulation*. Cambridge University Press, Cambridge.

Kress J.W., Stine J.K., 2017. *Living in the Anthropocene: Earth in the age of humans*. Smithsonian Books, Washington D.C..

Leakey R., Lewin R., 2015. *La sesta estinzione. La vita sulla terra e il futuro del genere umano*. Bollati Boringhieri, Torino.

Nylander W., 1896. *Les lichens des environs de Paris*. Paul Schmidt, Paris.

Padoa-Schioppa E., 2021. *Antropocene. Una nuova epoca per la Terra, una sfida per l'umanità*. Il Mulino, Bologna

Risebrough R.W., Carmignani G.M., 1972. Chlorinated hydrocarbons in Antarctic birds. In: Parker B.C. (ed.), *Conservation problems in Antarctica*. Allen Press, Lawrence, Kansas.

Simonich S.L, Hites, R.A., 1995. Global distribution of persistent organochlorine compounds. *Science*, **269**: 1851-1854.

Zauli Sajani S., 2015. *Ma il cielo è sempre più blu: l'inquinamento atmosferico. Falsi miti, curiosità e dati*. Il Fiorino, Modena.

Link di approfondimento

http://www.isprambiente.gov.it/

https://www.who.int/health-topics/air-pollution/

http://www.cas.org/

https://www.eea.europa.eu/themes/air

https://www.epa.gov/

http://www.europa.eu/legislation_summaries/

https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/air-pollution/index.cfm

https://medlineplus.gov/airpollution.html

Capitolo 3

L'inquinamento atmosferico e i suoi subdoli effetti

3.1 La biodisponibilità, la contaminazione e l'inquinamento

Anche nell'atmosfera delle zone disabitate e più sperdute del pianeta sono presenti in minime concentrazioni (spesso ppb o ppt) metalli e composti xenobiotici di origine antropica e molti materiali di origine naturale come pollini, spore e polveri sospese, composti gassosi e aerosol prodotti dagli oceani, dai vulcani, dagli incendi boschivi e dal metabolismo degli organismi.

Nel corso della loro evoluzione i viventi si sono adattati a tollerare, entro certi limiti, variazioni climatiche e di composizione dell'atmosfera. I possibili effetti biologici delle sostanze assunte per inalazione, contatto o ingestione sono specie-specifici e le risposte di ciascun individuo dipendono dalla sua età, sesso, stato riproduttivo, condizioni di salute, dal tipo e dalla durata dell'esposizione e dalle caratteristiche fisico-chimiche delle sostanze assunte. Come nel caso dei farmaci e degli alimenti, infatti, non è importante la quantità totale di una sostanza con cui l'organismo viene in contatto ma quella che viene effettivamente assorbita, entra in circolo e interagisce con i processi metabolici (Intini, 2020). Se l'organismo è esposto a minime quantità di una sostanza potenzialmente tossica o se quest'ultima è presente in forme chimiche poco o affatto biodisponibili, possono non manifestarsi risposte biochimiche o fisiologiche e in questi casi è opportuno parlare di contaminazione anziché d'inquinamento.

Nelle reti di monitoraggio degli inquinanti atmosferici, per esempio, vengono misurate le concentrazioni delle polveri sottili, ma, se queste sono costituite solo da particelle inorganiche insolubili (ovvero non biodisponibili) come quelle di argilla, che hanno un diametro < 2 μm, non si rilevano effetti biologici e non si può parlare di inquinamento ambientale. Tuttavia, non è sempre facile distinguere se una sostanza o miscele di sostanze si comportano da contaminanti o

da inquinanti, perché le risposte degli organismi a livello biochimico o molecolare possono essere di difficile rilevazione. Inoltre, diversi elementi e composti possono determinare i loro effetti nella forma chimica in cui vengono rilasciati, mentre altri possono subire trasformazioni in atmosfera o all'interno dell'organismo; oppure gli effetti biologici rilevati possono essere dovuti all'azione sinergica e/o additiva d'inquinanti provenienti anche da fonti diverse. Sorgenti naturali come l'attività vulcanica o geotermale e gli incendi forestali possono immettere in aria metalli, diossine, Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) e altri composti potenzialmente tossici ed è difficile distinguere i contributi delle attività antropiche all'inquinamento atmosferico.

Sul Monte Amiata, per esempio, le centrali geotermoelettriche sono localizzate in aree con diffuse emanazioni naturali di mercurio gassoso e di composti dello zolfo e da molti anni si discute sull'effettivo impatto ambientale degli impianti per la produzione di energia elettrica. La messa al bando dei clorofluorocarburi (CFCs) è stata fortemente ostacolata dalle industrie che producevano e commercializzavano questi prodotti poiché veniva contestato il fatto che anche gli alogeni presenti negli aerosol marini possono contribuire ai processi di distruzione dell'ozono stratosferico.

Allo stesso modo, chi trae interesse dallo sfruttamento dei combustibili fossili cerca di negare il contributo antropico ai cambiamenti climatici e si oppone a qualsiasi iniziativa tesa a ridurre le emissioni di gas serra. Tra l'altro, a differenza dei CFCs, l'anidride carbonica è un composto naturale e, sebbene contribuisca al cambiamento climatico, non può essere considerata un inquinante. Infatti, essa è indispensabile ai vegetali per la fotosintesi clorofilliana e l'aumento delle sue concentrazioni (mediamente 1,5 ppm/anno) può favorire la produttività di molte piante tipiche dei climi temperati come querce, frumento, riso, orzo, girasole e tabacco (dette C3 perché il primo composto organico della fotosintesi contiene 3 atomi di carbonio)[2]. Comunque, il vantaggio per molte specie delle nostre latitudini probabilmente è solo temporaneo perché, a causa dei cambiamenti climatici (aumento della temperatura e probabile riduzione delle precipitazioni), di giorno le piante dovranno tenere chiusi gli stomi per prevenire la perdita d'acqua.

Nelle scienze ambientali e in ecotossicologia si usa il termine inquinamento quando la biodisponibilità, la persistenza e/o le combinazioni dei contaminanti sono tali da causare (direttamente o indirettamente) danni quantificabili

[2] Le piante C3 sono fotosinteticamente attive di giorno, soprattutto con temperature intorno a 20°C e con moderata intensità luminosa; di notte chiudono gli stomi e consumano ossigeno. Attraverso gli stomi l'anidride carbonica entra direttamente in una serie di reazioni (dette Ciclo di Calvin) che riducono il gas a carboidrati nelle cellule del mesofillo delle foglie. Le piante C4 –come mais, sorgo e canna da zucchero, tipiche dei climi caldi e con forte intensità luminosa– hanno un rendimento della fotosintesi più elevato e ciclo vegetativo più breve delle C3; fissano l'anidride carbonica mediante due diversi tipi di cellule: quelle del mesofillo e della guaina del fascio. Le piante degli ambienti desertici come l'agave e i cactus chiudono gli stomi di giorno per evitare la perdita di acqua e li aprono di notte per fissare l'anidride carbonica (fotosintesi CAM: *Crassulacean Acid Metabolism*). La loro efficienza fotosintetica è bassa, ma se aumenta l'umidità ambientale (es. dopo un temporale) anche le piante CAM di giorno possono svolgere il Ciclo Calvin come le piante C3.

(es. alterazioni metaboliche o morfologiche) in specie sensibili. Tuttavia, in altri campi il concetto d'inquinamento è spesso rapportato all'uso della risorsa. Per esempio, sono previste concentrazioni dei metalli più basse per definire lo stato di contaminazione o d'inquinamento dei suoli delle aree residenziali rispetto ai valori fissati per quelli delle zone industriali. Per le acque sono stati stabiliti specifici valori soglia per quelle potabili, irrigue o destinate ad altri usi. Sebbene in molti processi di potabilizzazione delle acque sia prevista la disinfezione con biossido di cloro gassoso, per diversi organismi acquatici questo composto è tossico anche in minime concentrazioni. Il legislatore usa opportuni criteri per prevenire possibili effetti sulla salute e nella giustizia civile e penale il giudice, per decidere se un evento è inquinante e per definire l'entità del danno, deve far riferimento a valori soglia stabiliti dalla legge, anche se non sempre il rispetto dei valori esclude possibili effetti biologici sugli organismi.

Per prevenire/ridurre gli effetti di potenziali inquinanti è necessario adottare strumenti predittivi come, ad esempio, lo studio della ripartizione delle molecole tra acqua, aria, suolo e organismi mediante modelli basati sulle loro proprietà fisico-chimiche (peso molecolare, densità, punto di fusione, tensione di vapore, solubilità in acqua o in solventi organici). Il destino ambientale delle sostanze dipende anche dalla persistenza, cioè dalla loro resistenza alla degradazione da parte di fattori fisici (fotolisi e reazioni fotochimiche), chimici (idrolisi, ossidoriduzione) e biotici (biodegradazione batterica o da parte di piante e animali). Nei paesi della Comunità Europea (CE), per prevenire effetti indesiderati dei composti chimici di sintesi, sono stati introdotti regolamenti come l'ERA (*Environmental Risk Assessment*) e HHRA (*Human Health Risk Assessment*), da aggiornare alla luce dei più recenti risultati delle ricerche di tossicologia ed ecotossicologia (European Chemical Agency, 2021).

3.2 L'aumento delle forme reattive dell'azoto: una grave minaccia per la salute e per l'ambiente

Mentre negli ultimi anni vi sono stati una forte mobilitazione popolare e accordi internazionali per ridurre le emissioni di anidride carbonica, troppo poca attenzione è stata posta a un problema ambientale di estrema gravità: l'enorme diffusione ambientale di forme biodisponibili dell'azoto (UFAM, 2022). Negli organismi questo elemento è un macrocostituente essenziale per la formazione delle proteine, degli acidi nucleici e della clorofilla ma, sebbene oltre il 78 % dell'atmosfera sia costituito da azoto (*pool* di riserva), questo è disponibile solo per i batteri azotofissatori. Le radici delle piante e il fitoplancton assorbono dall'ambiente circostante composti solubili come nitrati, nitriti e sali di ammo-

nio e la carenza di forme chimiche biodisponibili dell'azoto (e/o del fosforo) può costituire un fattore limitante la produzione di biomassa[3].

In un ecosistema in equilibrio la decomposizione dei materiali organici nei suoli e nelle acque fornisce forme biodisponibili dell'azoto agli organismi autotrofi e, con la riduzione dei nitrati ad azoto molecolare (denitrificazione), parte del gas ritorna in aria. Ma l'uomo –con l'uso intensivo di fertilizzanti chimici, dei combustibili fossili e con la zootecnia– ha aumentato a dismisura la presenza in aria di forme reattive dell'azoto e l'eccessiva disponibilità di nitrati, nitriti e ammonio sta provocando enormi danni negli ecosistemi acquatici (es. fioriture di alghe –anche tossiche– e ambienti anossici per l'eccessiva quantità di materia organica prodotta dagli autotrofi).

Negli ecosistemi terrestri le deposizioni atmosferiche di azoto biodisponibile prolungano il periodo vegetativo delle piante, le espongono agli effetti di eventuali gelate precoci e favoriscono lo sviluppo di specie opportuniste. In funzione delle condizioni di combustione del carbone, della legna e degli idrocarburi (soprattutto nei motori a combustione interna) vengono rilasciate in aria quantità variabili di ossidi di azoto (generalmente indicati come NO_x). Questi possono provocare effetti biologici diretti e indiretti sulla nostra salute. Mentre il monossido di azoto, analogamente al monossido di carbonio, si fissa all'emoglobina e interferisce con l'ossigenazione dei tessuti, il biossido –pur avendo una tossicità circa 10 volte inferiore a quella dell'ozono troposferico– è un ossidante capace di irritare gli occhi e le mucose e di causare specifiche patologie a carico dell'apparato respiratorio, specialmente nei bambini e negli anziani.

L'incremento delle concentrazioni di nitrati sta mettendo a rischio la potabilità di molte acque di falda. I nitrati, infatti, pur essendo relativamente non-tossici, nello stomaco possono essere ridotti a nitriti che ossidano l'emoglobina

---

[3] L'acqua è il principale costituente degli organismi e oltre a idrogeno e ossigeno essi contengono in concentrazioni > 0,1% macronutrienti come carbonio, azoto, fosforo, zolfo, potassio, calcio, magnesio, sodio e cloro. Molti altri elementi (es. cobalto, cromo, rame, fluoro, ferro, manganese, molibdeno selenio, silicio, vanadio e zinco) sono presenti in quantità nettamente inferiori (micronutrienti o elementi in tracce) e sono coinvolti in reazioni enzimatiche e altri processi essenziali al metabolismo delle piante e degli animali. Un elemento è essenziale per una specie se le sue specifiche funzioni non possono essere svolte da altri elementi e se i sintomi provocati dalla sua carenza scompaiono quando viene assunto in quantità adeguate. Tuttavia, un elemento essenziale può risultare tossico se la sua disponibilità è eccessiva rispetto alle esigenze e/o alla capacità di regolazione dell'organismo (es. la carenza di ferro provoca anemia e l'eccesso l'emocromatosi). Nel corso della loro evoluzione, tutte le specie si sono adattate a tollerare minime quantità di tutti gli altri elementi non essenziali del Sistema Periodico (che non svolgono nessuna funzione fisiologica e non determinano carenze), ma l'uomo immette nell'ambiente forme biodisponibili di metalli pesanti e piuttosto rari in natura e molti di questi (es. mercurio, piombo, cadmio, platino, palladio, rodio e tallio) sono molto tossici. Per lo sviluppo ottimale degli organismi autotrofi è necessaria un'adeguata biodisponibilità degli elementi essenziali, specialmente dei principali nutrienti della biosfera come azoto e fosforo (i principali fattori limitanti la produttività degli ecosistemi terrestri e acquatici). Anche i rapporti quantitativi tra questi elementi devono rientrare entro determinati valori, mentre le attività antropiche li stanno modificando. Dal 1980 il rapporto globale tra azoto e fosforo (su base molare) è passato da 19:1 a 30:1 e, anche a causa dell'aumento delle concentrazioni di anidride carbonica, nei tessuti vegetali stanno cambiando i rapporti del carbonio e dell'azoto rispetto a ferro, zinco, calcio e potassio.

e possono trasformarsi in sostanze potenzialmente cancerogene come le nitrosammine. Inoltre gli ossidi di azoto sono coinvolti nelle reazioni fotochimiche che portano alla formazione dell'ozono troposferico e delle deposizioni acide. Insieme all'ammoniaca (le cui concentrazioni in aria sono triplicate a causa dalle attività antropiche), i NOx contribuiscono all'effetto serra (il protossido di azoto è 300 volte più potente dell'anidride carbonica). Il fatto che l'uomo stia trasformando un elemento poco biodisponibile ed essenziale per la vita in una serie di composti reattivi con gravissimi effetti sulla salute e l'ambiente costituisce uno dei principali impatti dell'Antropocene.

3.3 Gli effetti biologici delle polveri sottili e di altri inquinanti atmosferici

Nell'aria che respiriamo sono presenti particelle (solide o liquide) con dimensioni variabili da 0,001 a oltre 100 µm. Molte di queste sono prodotte direttamente dalle attività dell'uomo e da sorgenti naturali (es. polveri, pollini, spore, batteri e virus), mentre molte altre (particolato secondario) si formano in aria da precursori gassosi come SO_2, NO_x e COV. L'acido nitrico e quello solforico per esempio, reagendo con l'ammoniaca liberata dai naturali processi di degradazione della materia organica, formano sali di nitrato e di solfato di ammonio che, con l'evaporazione dell'acqua, producono particelle solide di aerosol. Generalmente la maggior parte delle particelle aerodisperse di grandi dimensioni proviene da sorgenti naturali, mentre quelle con diametro ≤ 10 µm vengono emesse soprattutto dai processi di combustione.

Nelle aree urbane il traffico veicolare costituisce una delle principali sorgenti di particolato fine e ultrafine perché, oltre alla frazione incombusta dei carburanti, produce particelle per abrasione di freni, frizioni e pneumatici e per l'usura della carrozzeria e delle parti meccaniche. Autoveicoli, autocarri e autobus con motore diesel producono maggiori quantità di particolato perché impiegano un carburante più viscoso, che impedisce un'ottimale miscelazione con l'ossigeno.

Centrali termoelettriche, inceneritori e impianti metallurgici contribuiscono a innalzare i livelli del particolato fine e in inverno gioca un ruolo importante la combustione della legna nei caminetti e nelle stufe tradizionali. Per questi motivi –nonostante l'introduzione di provvedimenti legislativi e di innovazioni tecnologiche abbiano determinato una notevole riduzione delle concentrazioni in aria del piombo, del biossido di zolfo e di altri inquinanti– il particolato fine costituisce ancora uno dei principali rischi per la salute dei cittadini.

Mentre le particelle più grossolane e il PM_{10} (con diametro aerodinamico compreso tra 10 e 2,5 µm) vengono inalate e interessano le vie respiratorie superiori, quelle fini ($PM_{2,5}$; diametro <2,5 µm) ed ultrafini ($PM_{0,1}$) possono

raggiungere le zone più profonde dell'apparato respiratorio e penetrare nelle cellule e nei vasi sanguigni. Le particelle più fini sviluppano una notevole area superficiale per l'adsorbimento d'inquinanti come i metalli di transizione (responsabili della produzione di radicali liberi che danneggiano le membrane lipidiche, le proteine e il DNA) e i composti organici potenziali cancerogeni come gli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA). Studi su colture cellulari dimostrano che il particolato atmosferico può avere effetti mutageni, genotossici e cancerogeni; tuttavia, la maggior parte delle patologie associate all'esposizione a questi inquinanti è ad eziologia multipla e, di solito, non viene attribuita all'inquinamento atmosferico.

Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) la maggior parte della popolazione mondiale è esposta a concentrazioni eccesive di particelle fini e ultrafini e anche nei soggetti giovani, non fumatori e in buone condizioni di salute, si possono manifestare stress ossidativo, infiammazioni prolungate e sistemiche, iper-attivazione del sistema immunitario e accentuata produzione di citochine. Sempre secondo l'OMS, su scala globale l'inquinamento atmosferico determina ogni anno oltre 4 milioni di morti premature e una riduzione di 118 milioni di anni dell'aspettativa di vita per patologie respiratorie, cardiovascolari e neoplastiche. I risultati di recenti ricerche indicano che le particelle ultrafini possono danneggiare il sistema nervoso centrale sia indirettamente (mediante le citochine prodotte da processi infiammatori nell'apparato respiratorio), sia direttamente (penetrando nel cervello attraverso il bulbo olfattivo). Questi risultati sembrerebbero confermati da quelli di uno studio epidemiologico condotto in Canada che ha rilevato un incremento statisticamente significativo della probabilità di sviluppare demenza senile nei cittadini che vivono entro 50 m di distanza da strade trafficate rispetto a coloro che, nella stessa zona, vivono a 200 m di distanza.

Le particelle fini e ultrafini possono stimolare l'attività dei recettori ACE2 (enzima di conversione dell'angiotensina), situati nelle cellule dell'epitelio polmonare. Poiché questi recettori costituiscono anche la via d'ingresso del coronavirus, è stato ipotizzato che la loro attivazione possa aumentare la suscettibilità dell'organismo all'infezione virale. Infatti, sebbene non sia stata dimostrata una relazione diretta tra esposizione agli inquinanti atmosferici e tasso di mortalità della pandemia, il virus, legandosi ai recettori, probabilmente ne riduce l'espressione e, di conseguenza, anche la loro azione protettiva.

Anche l'ozono troposferico e il biossido di azoto causano infiammazione delle vie respiratorie, del parenchima polmonare e dei vasi sanguigni e, nelle persone esposte cronicamente, aumentano il rischio di malattie polmonari e del sistema cardiocircolatorio. Secondo l'OMS, nel 2019 su scala globale l'ozono troposferico avrebbe provocato 365.000 morti premature e la perdita di 6,2 milioni di anni di aspettativa di vita (Legambiente, 2019).

In molti ambienti di lavoro ed anche in quelli domestici sono presenti piccolissime sfere o fibre di plastica contenute, per esempio, nei pigmenti, nei cosmetici e nei tessuti. Come le particelle fini prodotte con i processi di combustione, anche le microplastiche sono persistenti e poco solubili e, se inalate

o ingerite, possono veicolare nell'organismo sostanze chimiche potenzialmente tossiche e microrganismi patogeni (Parker, 2022). Tuttavia non sono ancora disponibili metodologie per valutare i livelli di esposizione, le quantità effettivamente assorbite nell'apparato respiratorio o nel tratto gastrointestinale e le microplastiche presenti nei fluidi e nei tessuti corporei. Comunque, i risultati di ricerche condotte con colture cellulari e animali da laboratorio indicano che le microplastiche con dimensioni <0,1 µm possono attraversare la placenta e penetrare in qualsiasi organo o tessuto, incluso il sistema nervoso. I lavoratori delle industrie plastiche e tessili sono esposti a elevate concentrazioni di microfibre e studi epidemiologici dimostrano che sono soggetti a una maggiore incidenza di sindromi dell'apparato respiratorio, come infiammazioni, allergie e fibrosi polmonare.

3.4 Il rispetto dei valori soglia non sempre protegge dai possibili effetti degli inquinanti

Le innovazioni tecnologiche e normative sempre più stringenti hanno contribuito a ridurre i fenomeni acuti d'inquinamento atmosferico e le emissioni di molti elementi e composti "convenzionali". Ma la disponibilità di metodologie analitiche sempre più sensibili e i risultati di ricerche tossicologiche ed ecotossicologiche dimostrano che sta aumentando il numero di sostanze chimiche di sintesi potenzialmente tossiche, per le quali non esistono ancora specifici regolamenti per la tutela della salute e dell'ambiente.

Oltre a prodotti di recente commercializzazione, vi sono anche composti naturali o di sintesi già noti, per i quali vi sono (o stanno emergendo) evidenze di possibili danni alle difese immunitarie, al metabolismo ormonale e al sistema nervoso centrale. Queste sostanze vengono genericamente indicate come "inquinanti di interesse emergente" e comprendono le microplastiche, i residui dei farmaci a uso umano e veterinario, i detergenti, i composti perfluorati, gli ftalati, i prodotti per l'igiene della casa e della persona (Tartari *et al.*, 2020). Secondo alcune stime, negli ambienti chiusi (*indoor*) l'esposizione a ossidi di azoto, monossido di carbonio, ozono, particolato sospeso, benzene, formaldeide, idrocarburi policiclici aromatici, e molti contaminanti d'interesse emergente provoca oltre 2 milioni di morti premature all'anno.

Le principali misure per il controllo dell'inquinamento atmosferico consistono nella predisposizione di reti automatiche di monitoraggio (centraline fisse o mobili) che rilevano in continuo i dati meteo e le concentrazioni medie orarie di alcuni inquinanti come ossidi di azoto, zolfo e carbonio e l'ozono troposferico e li trasmettono a un centro di elaborazione. Per altri inquinanti come le polveri sospese (PM_{10} o $PM_{2,5}$) o il benzene le concentrazioni medie vengono rilevate manualmente. Quando i valori misurati dalle centraline superano i valori limite

stabiliti dalle normative, vengono messi in atto dei provvedimenti per ridurre le emissioni. Tuttavia questo approccio, generalmente, fa riferimento alla concentrazione di singoli inquinanti e non ai potenziali effetti di tutte le sostanze presenti nell'aria che respiriamo. Inoltre, i dati delle centraline sono di tipo puntiforme e può verificarsi il caso che i contaminanti abbiano concentrazioni superiori in aree della città diverse da quelle dove sono localizzate le postazioni automatiche di monitoraggio. Anche per questo motivo, probabilmente, nella maggior parte degli studi epidemiologici che fanno riferimento ai dati rilevati dalle centraline automatiche, di solito, c'è scarsa relazione tra le concentrazioni misurate, l'effettiva esposizione e i danni rilevati nei cittadini. Generalmente, i risultati sono più concordanti nei casi di esposizione nei luoghi di lavoro o in altri ambienti confinati.

Criteri di qualità sono stati definiti solo per una minima percentuale dell'enorme numero di potenziali contaminanti presenti in aria e, sebbene siano stati fissati dei valori soglia per il particolato ultrafine, l'ozono troposferico, il benzene e altre sostanze mutagene e cancerogene, secondo l'OMS per questi inquinanti non esistono concentrazioni di "non-effetto". La stessa Organizzazione, nelle più recenti linee guida per il controllo della qualità dell'aria, ha raccomandato di abbassare ulteriormente i limiti di concentrazione del PM_{10} (da 20 a 15 $\mu g/m^3$ per il valore annuale e da 50 a 45 $\mu g/m^3$ per quello sulle 24 ore), del $PM_{2,5}$ (da 10 a 5 $\mu g/m^3$ per il valore annuale e da 25 a 15 $\mu g/m^3$ per quello sulle 24 ore), di introdurre un valore sulle 24 ore per il biossido di azoto (25 $\mu g/m^3$) e di ridurne il valore annuale da 40 a 10 $\mu g/m^3$, nonché di introdurre per l'ozono troposferico un picco soglia stagionale di 60 $\mu g/m^3$ (ISS, 2021).

Prevedere i possibili effetti dell'esposizione cronica a una complessa miscela di contaminanti, molti dei quali in concentrazioni difficilmente rilevabili e molto variabili nello spazio e nel tempo, è praticamente impossibile. Generalmente, in tossicologia ed ecotossicologia si studiano gli effetti di breve-medio termine di singole sostanze e i modelli previsionali sul possibile impatto di miscele di sostanze debbono tener conto del fatto che, quantitativamente, l'effetto complessivo dei contaminanti può essere inferiore alla somma di quello prodotto da ciascuna sostanza, oppure di tipo additivo o sinergico, cioè superiore alla somma delle singole risposte.

Altrettanto difficile è prevedere mediante modelli la dispersione e la deposizione dei contaminanti atmosferici. Una volta immessi in aria –in funzione delle loro caratteristiche fisico-chimiche e delle condizioni meteorologiche– i contaminanti possono essere trasportati per distanze variabili da pochi metri a migliaia di chilometri e quelli più reattivi possono subire delle trasformazioni. La loro deposizione può avvenire per via umida (con la pioggia, la neve o la grandine), secca (in assenza di precipitazioni) o occulta (con la nebbia, la rugiada o la brina).

Mentre sono disponibili metodologie standard per la raccolta e la determinazione delle concentrazioni dei contaminanti nelle precipitazioni atmosferiche umide, non sono disponibili protocolli standardizzati per la raccolta e l'analisi delle deposizioni secche e occulte. Infatti, il campionamento mediante apparec-

chiature dotate di filtri o altri materiali non può riprodurre i processi d'intercettazione che hanno luogo sulle superfici esposte in natura (Bargagli, 2006). Nelle foglie delle piante, per esempio, i processi di adsorbimento superficiale o di assorbimento nei tessuti interni dipendono da molti fattori come le caratteristiche fisico-chimiche dei contaminanti (le sostanze lipoaffini, per esempio, possono reagire con le cere delle cuticole e i gas possono penetrare attraverso gli stomi), l'umidità superficiale e complessi effetti di superficie (es. forze elettrostatiche e di van der Waals). In ogni specie di pianta, a parità di superficie della lamina, le foglie possono avere un orientamento o una morfologia (nervature, peli, papille, cuticola cerosa, stomi) completamente diverse. Le leguminose, per esempio, intercettano più polveri e aerosol delle graminacee, ma in caso di pioggia queste ultime sono più efficienti nel trattenere i materiali adsorbiti.

Di solito, gli inquinanti adsorbiti sulla superficie delle cellule vegetali e animali (inclusi gli epiteli interni come, ad esempio, quello dei villi intestinali o degli alveoli polmonari) hanno una tossicità trascurabile rispetto alle sostanze che attraversano le membrane biologiche. L'assorbimento determina l'esposizione effettiva degli organismi e specialmente i contaminanti solubili in acqua possono essere trasferiti ad altri organi e/o tessuti mediante il circolo sanguigno negli animali e, nelle piante, con il floema o lo xilema (a seconda che siano stati assorbiti con le foglie o le radici). La membrana plasmatica è costituita da un doppio strato lipidico con struttura molto simile in tutti gli organismi, dai batteri ai mammiferi, e può essere facilmente attraversata dalle sostanze lipofile. Quindi, per valutare i possibili effetti degli inquinanti sugli organismi, è necessario conoscere le quantità effettivamente assorbite, mentre per stimare il trasferimento con il cibo di elementi e composti potenzialmente tossici agli erbivori è necessario conoscere le quantità totali (adsorbite e assorbite) intercettate dai vegetali.

Bibliografia e letture consigliate

Bell C.H., Gentile M., Kalve E., *et al.*, 2019. *Emerging contaminants handbook*. CRC Press, Boca Raton FL.

Caputo A. (a cura di), 2021. *Emissions trading scheme in Italy and in the biggest European countries*. ISPRA Rapporti 352/2021.

Chen H., Kwong J.C., Copes R., *et al.*, 2017. Exposure to ambient air pollution and the incidence of dementia: a population based cohort study. *Environment International*, **108**: 271-277.

Chen H., Kwong J.C., Copes R., *et al.*, 2017. Living near major roads and the incidence of dementia, Parkinson's disease, and multiples sclerosis: a population-based cohort study. *The Lancet*, **389**: 718-726.

Cimellaro A., Magli R., 2011. *Aria ed emissioni in atmosfera*. DEI Ed., Roma.

Du E., Fenn M.E., de Wries W., *et al.*, 2019. Atmospheric nitrogen deposition to global forests: Status, impacts and management options. *Environmental Pollution*, **250**: 1044-1048.

E.E.A., 2019. *Air pollutant emission inventory guidebook 2019. Technical guidance to prepare national*

emission inventories. European Environment Agency, Rep. n° 13/2019.
Han Y., Feng G., Swaney D.P., *et al.*, 2020. Global and regional estimation of net anthropogenic nitrogen inputs (NANI). *Geoderma*, 361: 114066.
Heather, L.A., Martin, J.M., van Velzen J.M., *et al.*, 2022. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, **163**: 107199.
Kilian J., Kitazawa M., 2018. The emerging risk of exposure to air pollution on cognitive decline and Alzheimer's disease – Evidence from epidemiological and animal studies. *Biomedical Journal*, **41**: 141-162.
Mannucci P.M., Fronte M., 2013. *Aria da morire. I danni dell'inquinamento alla salute e le buone azioni per ridurre il problema.* Dalai Ed., Milano.
Meo S.A., Al-Khlaiwi T., Ullah C.H., 2021. Effect of air pollutants $PM_{2.5}$ and PM_{10} on COVID-19 incidence and mortality: observational study. *European Revue for Medical and Pharmaceutical Sciences,* **25**(233): 7553-7564.
O.M.S., 2021. *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Executive summary.* World Health Organization, Ginevra.
Reich P.B., Hobbie S.E., Lee T.D., *et al.*, 2018. Unexpected reversal of C_3 versus C_4 grass response to elevated CO_2 during a 20-year field experiment. *Science,* **360**: 317-320.
Sarno G., Maio S., Simoni M., *et al.,* 2013. Inquinamento atmosferico e salute umana. *Epidemiologia e Prevenzione,* **37**(4/5): 1-88.
Yee M.S-L., Hii L-W., Looi C.K., *et al.*, 2021. Impact of microplastics and nanoplastics on human health. *Nanomaterials,* **11**(2): 496.
Zaghi C., Gaggi C., Finizio A., (eds.) 2007. *Valutazione del rischio ambientale applicata ai prodotti chimici*. Pitagora Editrice, Bologna.

Link di approfondimento

https://annuario.isprambiente.it/sys_ind/346)

http://www.ars.usda.gov/main/site

https://www.eea.europa.eu/themes/air

https://www.epa.gov/air/

https://www.epicentro.iss.it/ambiente/InquinamentoEscape2013

http://www.inchem.org/

https://www.isprambiente.gov.it

https://medlineplus.gov/airpollution.html

https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/air-pollution/index.cfm

https://www.who.int/health-topics/air-pollution/

Capitolo 4

I bioindicatori della qualità dell'aria e il ruolo della *citizen science*

4.1 L'uomo ha sempre usato gli organismi per valutare la qualità del suo ambiente di vita

Ogni specie ha un suo *range* di tollerabilità alle diverse condizioni climatiche e ambientali e l'uomo, fin da quando cominciò a raccogliere frutti e a coltivare la terra, comprese che la distribuzione delle piante dipendeva dalle condizioni climatiche e dalle caratteristiche del suolo. In Cina, durante la Dinastia Zhou (1045-256 a.C.), per sviluppare l'agricoltura nelle diverse zone del paese venivano rilevate le caratteristiche della vegetazione spontanea e furono descritte anche le specie tipiche delle aree con depositi minerali. Alcuni secoli dopo, durante la dinastia Ming, le piante furono usate per individuare i giacimenti di metalli (prospezioni geobotaniche) e per ottenere i metalli stessi, mediante l'incenerimento di alcune specie (ad esempio, il rame da *Oxalis corniculata*).

La storia della produzione dell'allume, un solfato di alluminio e potassio usato per secoli per la concia delle pelli e per fissare i colori dei tessuti, è strettamente legata all'uso di piante indicatrici. Il minerale veniva estratto in Turchia e per molti anni veneziani e genovesi ne gestirono il florido commercio, ma questa attività cessò con la caduta di Costantinopoli (1453). Giovanni da Castro, funzionario dello Stato Pontificio, notò nei Monti della Tolfa (nei pressi dell'attuale cittadina di Allumiere) una rigogliosa vegetazione di agrifoglio simile a quella che aveva osservato nelle aree minerarie di alunite della Turchia; egli eseguì dei saggi di scavo, trovò il minerale e, nel 1462, iniziò la produzione di allume. Lo Stato Pontificio, anche per finanziare le Crociate, ne impose l'uso a tutti i cristiani (pena la scomunica, non condonabile a pagamento) (Nebbia, 2009). Dopo qualche decennio, il naturalista inglese Thomas Chaloner visitò le miniere dei Monti della Tolfa e notò che le rocce e la vegetazione erano molto simili a quelle presenti in una sua proprietà nel North Yorkshire. In gran segreto vi trasferì alcuni minatori italiani e iniziò la produzione di allume. Non appena la quantità fu sufficiente a soddisfare le esigenze nazionali, anche l'Inghilterra impose il monopolio e il divieto d'importazione.

In un fondamentale trattato sull'attività mineraria e metallurgica "*De re metallica*" Agricola (alias Georg Bauer, 1494-1555) sosteneva che per individuare depositi metalliferi non servono le pratiche magiche o divinatorie, ma bisogna leggere "i segni della natura" perché sui filoni metalliferi crescono delle piante che mancano nelle zone circostanti. In seguito, furono identificate numerose specie indicatrici di suoli mineralizzati e le prospezioni geobotaniche costituiscono ancora oggi una valida metodologia di ricerca, specialmente in regioni vaste e scarsamente antropizzate come quelle del Canada settentrionale, dell'Australia o della Siberia. In quest'ultima regione fu rilevato che le naturali emanazioni dal terreno di elementi volatili come elio, radon e mercurio possono subire delle variazioni nelle zone con depositi di metalli o idrocarburi e queste possono essere individuate analizzando, per esempio, le concentrazioni del mercurio nei muschi, nei licheni o nelle foglie e nelle cortecce degli alberi.

Da alcuni decenni le zone forestali con "anomala" composizione della vegetazione possono essere rilevate anche mediante osservazioni da satellite o da aereo (telerilevamento). In Toscana vi sono diverse aree con suoli prodotti da rocce ignee ultrabasiche (serpentini) con bassi tenori di calcio, potassio e fosforo ed elevate concentrazioni di magnesio, ferro, nichel e cromo. Queste zone sono facilmente identificabili perché l'alterata disponibilità di alcuni elementi essenziali e di altri potenzialmente tossici non consente la crescita delle piante tipiche della macchia mediterranea, ma solo di specie (endemiche) che hanno acquisito particolari adattamenti come *Alyssum bertolonii, Armeria denticulata, Stipa etrusca ed Euphorbia spinosa* (aree protette ofiolitiche, 2006). Alcune piante possono indicare la qualità del terreno anche cambiando il colore dei loro fiori, specialmente quando nel terreno sono presenti elementi come ferro e alluminio che formano complessi stabili con le antocianine. Quelli dell'ortensia per esempio, sono di colore bianco nei terreni neutri, assumono colore rosa innaffiando le piante con acqua calcarea e quello azzurro aggiungendo al terriccio composti contenenti ferro o alluminio.

La scelta delle colture più appropriate nei diversi tipi di terreno è sempre stata suggerita dalle caratteristiche della vegetazione spontanea. Lungo le pendici del Monte Amiata, per esempio, sotto i 600 m di quota i substrati di natura calcarea sostituiscono quelli vulcanici e da molti secoli le popolazioni locali coltivano patate, segale, avena e fagioli nelle zone con piante acidofile come il castagno (*Castanea sativa*), la ginestra dei carbonai (*Cytisus scoparius*), la felce aquilina (*Pteridium aquilinum*) o il brugo (*Calluna vulgaris*); viceversa, i substrati calcarei, indicati dalla presenza della ginestra comune (*Spartium junceum*) e delle leguminose, sono destinate a frumento, vite e olivo.

Le piante non solo consentono di rilevare le caratteristiche del suolo o la presenza di depositi minerali e acqua nel sottosuolo, ma con la Rivoluzione Industriale sono diventate anche importanti indicatori della qualità dell'aria. A differenza degli animali, molte specie di muschi, licheni e di alberi sono ampiamente distribuite nel territorio, non compiono spostamenti e sono esposte per tempi lunghi agli effetti di contaminanti gassosi (fito)tossici come l'anidride solforosa, gli ossidi di azoto, fluoro, cloro e loro composti, che possono es-

sere assorbiti attraverso gli stomi. Nel secolo scorso furono pubblicati atlanti che illustravano i tipici quadri sintomatici nelle foglie di molte specie di piante coltivate e spontanee, sensibili ai principali inquinanti fitotossici. In Olanda fu addirittura creata una rete di rilevamento della qualità dell'aria basata sull'osservazione settimanale dei sintomi in piante mantenute in vaso e sensibili ai composti del fluoro (gladiolo e tulipano), all'ozono (tabacco e spinacio), al nitrato di perossiacetile o PAN (ortica e *Poa annua*), all'etilene (petunia e patata) e al biossido di zolfo (erba medica e grano saraceno). Sin dalla Rivoluzione Industriale è nota l'elevata sensibilità dei licheni a questo composto; nelle aree più inquinate questi organismi possono scomparire completamente formando dei veri e propri "deserti lichenici". I licheni sono costituiti da una associazione simbiotica tra un fungo ed un'alga, non hanno radici e cere protettive e sono particolarmente esposti agli effetti degli inquinanti atmosferici fitotossici perché per il loro metabolismo dipendono quasi esclusivamente dalle deposizioni atmosferiche.

Reazioni fotochimiche possono trasformare gli ossidi di zolfo e azoto in acido solforico e nitrico e le deposizioni acide, oltre agli effetti diretti sulla vegetazione, danneggiano le comunità biotiche del suolo e aumentano la disponibilità e l'assorbimento radicale di ioni potenzialmente tossici come quelli dell'alluminio, in sostituzione di elementi essenziali come calcio e magnesio. Il conseguente indebolimento delle piante le espone alle aggressioni da parte di agenti patogeni (Tibiletti, 2019).

4.2 Le risposte degli organismi al degrado della qualità dell'aria

Le caratteristiche fisico-chimiche dell'acqua e dell'aria sono molto variabili nello spazio e nel tempo, quindi i valori della temperatura o le concentrazioni della maggior parte dei costituenti sono sempre relativi al punto e al momento nel quale viene eseguita la misura "in situ" o prelevato il campione da analizzare in laboratorio. Per ottenere dati rappresentavi sui livelli di contaminazione delle due matrici ambientali in una stazione è necessario eseguire ripetuti campionamenti e costose determinazioni analitiche. Negli ultimi due decenni, con il recepimento di direttive della Comunità Europea, anche nel nostro Paese la valutazione dello stato di salute degli ecosistemi acquatici, pur prevedendo periodiche misurazioni dei principali parametri fisico-chimici, si basa soprattutto sull'analisi delle comunità biotiche e viene espressa come rapporti di qualità ecologica (EQR). Nel caso dell'aria, invece, le attuali normative non prevedono l'uso dei bioindicatori sebbene alcune specie di organismi, ampiamente diffuse nei nostri ecosistemi, consentirebbero di acquisire in tempi brevi e con poca spesa informazioni sugli effetti biologici integrati degli inquinanti atmosferici,

anche in aree molto vaste (Talamona, 2021). Le foglie e le cortecce degli alberi e le specie di licheni e di muschi più resistenti agli effetti degli inquinanti fitotossici possono accumulare in quantità facilmente determinabili e che riflettono quelle mediamente presenti in aria, i contaminanti atmosferici persistenti, inclusi quelli non misurabili nelle centraline automatiche di monitoraggio (Mazzella, 2020).

L'uso dei bioaccumulatori è l'unico approccio possibile per stimare le deposizioni di contaminanti persistenti nelle aree remote. Non a caso la metodologia basata sull'analisi chimica dei muschi fu introdotta negli anni '60 del secolo scorso nei paesi scandinavi, dove gli estesi ecosistemi forestali e delle acque interne erano interessati dall'importazione e dalla deposizione di radionuclidi artificiali, metalli e acidità provenienti dai paesi dell'Europa centrale. L'approccio con i bioaccumulatori si è diffuso rapidamente in tutto il mondo e consente di acquisire in tempi brevi informazioni sui trend spazio-temporali delle deposizioni di contaminanti persistenti a diverse scale spaziali.

Nelle aree urbane e industriali, se le condizioni climatiche o ambientali non consentono un campionamento ottimale del bioaccumulatore prescelto, si possono esporre per alcuni mesi muschi o licheni all'interno di reticelle di nylon (biomonitoraggio attivo). In molte città italiane sono stati eseguiti biomonitoraggi delle deposizioni di metalli e di Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) impiegando le foglie delle specie arboree più diffuse nei parchi e nei viali (Bargagli, 2006). Analizzando le foglie dei lecci, per esempio, si è visto che a Siena le concentrazioni di alcuni metalli e degli IPA sono circa la metà di quelle misurate nei campioni raccolti a Napoli e che, in seguito all'introduzione dei carburanti senza piombo, le concentrazioni del metallo sono diminuite di oltre un ordine di grandezza. L'introduzione d'innovazioni tecnologiche e di misure sempre più stringenti hanno ridotto in molti paesi i rischi di esposizione ad elevate concentrazioni di alcuni dei principali inquinanti atmosferici fitotossici come i composti dello zolfo. Quindi, molte delle metodologie con i bioindicatori potrebbero trovare un utile impiego soprattutto nei paesi in via di sviluppo, dove si usano ancora combustibili di scarsa qualità e/o le normative non impongono l'abbattimento dei principali contaminanti emessi dai camini.

In Europa, tra i principali inquinanti che possono determinare effetti macroscopici, facilmente rilevabili nella vegetazione, vi sono l'ozono troposferico e i composti reattivi dell'azoto.

Prima di fornire alcune indicazioni sugli organismi che possono essere utilizzati per rilevare la qualità dell'aria nei nostri territori, è necessario premettere che:

- l'uso dei bioindicatori è complementare e non sostitutivo del monitoraggio strumentale. Infatti, solo tramite le centraline automatiche si rilevano in tempo reale le concentrazioni dei principali inquinanti e si possono adottare eventuali misure tempestive per ridurre le emissioni;
- sebbene in questa pubblicazione si faccia principalmente riferimento all'uso degli organismi, in commercio esistono diversi sensori (portatili e non) per misurare le concentrazioni di alcuni inquinanti atmosferici, e molti di questi sono

utilizzati nei progetti di *citizen science* come, ad esempio, *AirCasting*. Nel sito web del progetto *HackAir* sono riportate addirittura le istruzioni per costruire sensori a basso costo (fai-da-te) per la misura del $PM_{2,5}$. Anche se queste misurazioni non sono molto precise, consentono ai cittadini di informarsi sui livelli d'inquinamento atmosferico nel loro ambiente di vita e, attraverso il coinvolgimento di molti volontari, è possibile tracciare mappe basate su molti punti di rilevamento;

- gli organismi forniscono informazioni indirette sulle concentrazioni degli inquinanti; le loro risposte non sono quasi mai immediate e non dipendono solo dalla qualità dell'aria, ma anche da molti altri fattori come le condizioni meteorologiche o la scarsa disponibilità di acqua o di nutrienti;
- in una comunità di organismi della stessa specie le risposte di ciascun individuo sono condizionate anche dal suo stato di salute, dall'età, dal ciclo riproduttivo, dall'alimentazione ecc.;
- pur impiegando lo stesso organismo e metodologie di biorilevamento standardizzate, non sempre è possibile eseguire confronti attendibili tra i risultati acquisiti in ecosistemi con diverse caratteristiche climatiche e ambientali;
- per rilevazioni che investono aree vaste occorre verificare la presenza e la distribuzione spaziale dell'organismo prescelto come bioindicatore, acquisire le informazioni disponibili sulle caratteristiche climatiche e ambientali dell'area di studio e selezionare una zona di controllo/riferimento, poco interessata dall'inquinamento atmosferico.

4.3 Il contributo dei cittadini al monitoraggio ambientale

Numerose esperienze condotte in Italia e nel resto del mondo dimostrano che il coinvolgimento dei cittadini nella rilevazione e valutazione di dati relativi al loro ambiente di vita contribuisce alla diffusione della cultura scientifica e all'educazione per la sostenibilità (Pisano, 2022). Con queste attività i cittadini possono partecipare attivamente alle scelte che riguardano il loro futuro, mentre per il mondo scientifico la loro collaborazione è utile perché i monitoraggi ambientali e quelli sui cambiamenti climatici richiedono raccolte di dati su aree vaste e per tempi lunghi e adeguate risorse umane e finanziarie, non sempre disponibili (Meschia, 2016). In passato anche le accademie, come quella del Cimento di Firenze, quella delle Scienze di San Pietroburgo o la *Royal Society* di Londra, si rivolgevano a semplici cittadini per ampliare le reti di rilevamento dei dati meteorologici. Molte delle collezioni di piante, animali e rocce conservate nei musei sono state fornite da appassionati naturalisti e non da ricercatori professionisti, così come nel secolo scorso molti sono stati i contributi di "non professionisti" all'acquisizione di conoscenze scientifiche sulle risorse naturali e sul clima. Ad esempio, da oltre un secolo migliaia di volontari partecipano

ai censimenti e agli studi di ornitologia promossi negli Stati Uniti dalla *Cornell University* o dalla *National Audubon Society* (Lucifredi, 2017).

Due importanti problemi ambientali come l'impatto delle deposizioni acide e quello dei pesticidi furono posti all'attenzione dell'opinione pubblica e della comunità scientifica dalle rilevazioni/intuizioni di "non esperti".

Già nel 1872, con il libro *Air and Rain*, Robert Angus Smith riportava elevati livelli di acidità nei campioni di pioggia raccolti in prossimità di città industriali come Glasgow. Nel secondo dopoguerra, per evitare l'impatto degli inquinanti nelle vicinanze degli impianti energetici e industriali, si cominciarono a costruire ciminiere sempre più alte e il maggior tempo di permanenza in aria dei contaminanti favoriva la loro trasformazione fotochimica e la deposizione degli acidi solforico e nitrico in aree molto distanti dalle sorgenti di emissione. I possibili effetti ambientali delle deposizioni acide furono trascurati per diversi decenni, fino a quando dei pescatori si accorsero che nei fiumi svedesi i salmoni erano sempre più rari e si pescavano solo esemplari di grandi dimensioni.

Si scoprì così che nelle aree con suoli di natura silicea e con scarsa capacità di tamponare l'acidità, come quelli della Scandinavia, i salmoni e molti altri organismi acquatici non potevano più riprodursi a causa dell'eccessiva acidità delle acque. L'acidità delle piogge portava in soluzione ioni di metalli tossici presenti nel suolo come quelli del mercurio e dell'alluminio con gravi effetti sugli ecosistemi terrestri e acquatici. Nel 1962 lo svedese Svante Oden dimostrò che il problema era di portata sovranazionale perché gran parte dell'acidità depositata nei paesi scandinavi proveniva dagli impianti industriali dell'Europa centrale e, con la Conferenza di Stoccolma del 1972, si cominciarono a gettare le basi per accordi internazionali finalizzati alla soluzione del problema. Analogamente, molti ecosistemi canadesi erano interessati dall'importazione di deposizioni acide dagli Stati Uniti e in questi paesi quasi trecento volontari collaborarono al monitoraggio dell'acidità delle piogge con un protocollo sperimentale piuttosto semplice, messo a punto dai ricercatori della *Princeton University* (l'espressione *citizen science* fu usata per la prima volta in quella occasione) (Lodola, 2018).

Pur non essendo esperta di chimica ed ecotossicologia, con la pubblicazione nel 1962 del libro *Primavera silenziosa*, Rachel Carson contribuì in misura straordinaria a diffondere nell'opinione pubblica e tra i decisori politici la consapevolezza dei gravi rischi per la salute e l'ambiente conseguenti all'uso dei pesticidi (Petralia, 2017). Con una laurea in zoologia, Rachel lavorò per diversi anni come biologa marina presso il Dipartimento Statunitense per la Pesca e pubblicò tre libri sul mondo marino. La scrittura era la sua grande passione e, quando si ritirò dal lavoro e si trasferì in campagna, si dedicò per alcuni anni alla stesura della *Primavera silenziosa* per denunciare l'uso eccessivo di pesticidi in agricoltura e gli effetti tossici di sostanze chimiche di sintesi come il DDT. Nonostante gli attacchi delle industrie chimiche, del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti e di molti scienziati che le rimproveravano la mancanza di specifiche competenze, riuscì a far pubblicare il libro, che divenne ben presto un *best-seller* internazionale. Purtroppo Rachel morì all'età di 56 anni senza poter

assistere al diffondersi delle sue idee, alla nascita di movimenti ambientalisti e alla definitiva messa al bando del DDT e di altri composti organici persistenti.

Attualmente, una rete di più di un milione di cittadini del Regno Unito collabora agli *Open Air Laboratories* (OPAL), coordinati dell'*Imperial College* di Londra. Tra i vari progetti portati avanti vi è il monitoraggio della qualità dell'aria su scala nazionale mediante l'osservazione dei licheni epifiti e delle macchie di catrame provocate dal fungo *Rhytisma acerinum* nelle foglie di acero; in collaborazione con agenzie nazionali e regionali viene inoltre valutato lo stato di salute degli alberi e l'eventuale presenza di nuovi patogeni; il servizio meteorologico nazionale, infine, coordina la raccolta da parte dei cittadini di dati sulle nubi e i venti. I progetti di *citizen science* si stanno diffondendo anche in Italia: università, musei, agenzie regionali e associazioni stanno promuovendo molte iniziative di scienza partecipata. La diffusione di Internet e dei sistemi mobili di comunicazione consente di acquisire e condividere enormi quantità d'informazioni e l'*European Citizen Science Association* (ECSA) intende promuovere anche iniziative transnazionali. Il funzionamento delle attività del progetto italiano CSMON-LIFE sulla biodiversità si basava su una *app* per *smartphone* e *tablet* scaricabile gratuitamente. Una volta controllate dagli esperti, le segnalazioni venivano riportate nel portale del progetto e archiviate nel database del Network Nazionale sulla Biodiversità (NNB).

I dati rilevati con procedure standard da migliaia di volontari consentono di realizzare mappe basate su elevate densità dei punti di rilevamento, la validazione e/o la messa a punto di modelli meteorologici e sui cambiamenti climatici. Con le mappe sugli effetti biologici degli inquinanti atmosferici è possibile ottimizzare la distribuzione spaziale delle stazioni automatiche di monitoraggio e di eventuali ricerche epidemiologiche, di verificare l'affidabilità dei modelli di dispersione e deposizione degli inquinanti e di acquisire informazioni su aree remote, dove la mancanza di energia elettrica non consente l'utilizzo di molte apparecchiature di monitoraggio.

4.4 Il biorilevamento dell'inquinamento da ozono troposferico e delle deposizioni di azoto

Nonostante una progressiva perdita di biodiversità causata dai disboscamenti, dall'espansione urbanistica e infrastrutturale, dagli incendi, dal pascolo eccessivo e dagli squilibri causati dall'arrivo di specie aliene, l'Italia resta uno dei paesi europei con il più alto numero di specie di piante e animali (WWF, 2020). La notevole estensione latitudinale del Paese (circa 10°), con marcate differenze climatiche tra nord e sud e la morfologia collinare e montuosa del territorio hanno favorito il proliferare di nicchie ecologiche, spesso vicine tra loro ma molto diversificate. Inoltre, durante il Pleistocene (la prima epoca del Quaternario, terminata 11.700 anni fa), buona parte del Paese rimase sgombro

dai ghiacci consentendo la sopravvivenza di un gran contingente della flora e della fauna autoctona.

Oggi, nelle zone pianeggianti e collinari, gli ecosistemi sono esposti agli inquinanti emessi dalle attività dell'uomo e ai composti chimici dell'agricoltura intensiva che stanno determinando la perdita d'insetti impollinatori e di risorse alimentari nelle catene trofiche terrestri.

Le comunità vegetali degli ecosistemi montani conservano molte più specie endemiche, ma queste sono esposte all'impatto d'inquinanti come l'ozono troposferico e la deposizione di forme reattive dell'azoto che, in sinergia con i cambiamenti climatici, possono modificare la composizione delle comunità di piante e animali.

Le concentrazioni di ozono troposferico sono aumentate di circa il 50% negli ultimi 100 anni con livelli che tra aprile e settembre, specialmente nelle prime ore pomeridiane, possono superare abbondantemente i valori di *background* (20-40 ppb; 1 ppb = 1,96 µg m^{-3}). Nelle zone collinari e montuose della penisola le particolari condizioni meteorologiche e i composti organici volatili (COV) emessi dalle piante favoriscono la formazione dell'ozono, e le precipitazioni atmosferiche contribuiscono alla deposizione di composti reattivi dell'azoto (in un anno, fino a oltre 10 kg per ettaro di superficie). Tuttavia, anche per la mancanza di stazioni automatiche di monitoraggio, è difficile prevedere i possibili effetti a lungo termine di questi inquinanti. È stato comunque rilevato che nelle comunità vegetali dei prati-pascolo molte graminacee tollerano concentrazioni alquanto elevate di ozono, mentre sono piuttosto sensibili alle deposizioni di azoto; viceversa, le leguminose tollerano i nutrienti ma non l'ozono troposferico.

Tutte le piante producono composti antiossidanti ma, quando le concentrazioni di ozono superano la loro capacità di neutralizzare le specie reattive dell'ossigeno (ROS), esse vanno incontro a perdita di vitalità e, specialmente nelle specie più sensibili, si manifestano sintomi fogliari osservabili a occhio nudo, come prematura senescenza, ingiallimento, bronzatura o la formazione di punti necrotici. La rilevazione di questi danni rappresenta da molti anni una metodologia diffusa di biomonitoraggio dell'inquinamento da ozono troposferico, sia attivo (esponendo delle piante sensibili in vaso) che passivo (osservando le diverse specie nel loro ambiente naturale). La cultivar Bel-W3 delle piante di tabacco è molto sensibile all'ozono e manifesta tipiche lesioni (necrosi bifacciali a contorno netto, con diametro di pochi mm) anche per esposizioni di poche ore a concentrazioni leggermente superiori a quelle di *background*. La superficie fogliare necrotizzata è correlata con la dose di ozono alla quale le piante sono esposte e la classe d'intensità del danno viene rilevata direttamente sul campo mediante il confronto con tavole iconografiche che mostrano la distribuzione delle aree necrotiche in foglie di diversa età. La procedura è standardizzata (EN 16789:2016), ma si possono eseguire biomonitoraggi attivi anche rilevando i danni in altre specie sensibili o misurando la crescita di due cultivar di trifoglio. Nei nostri orti e giardini spesso sono presenti diverse specie particolarmente sensibili all'ozono come il pomodoro, la patata, il fagiolo, lo spinacio o il lillà.

Con i satelliti non si possono misurare le concentrazioni di ozono al suolo, ma quelle dei suoi precursori (ossidi di azoto e composti organici volatili). Per questo motivo negli Stati Uniti, per mappare la distribuzione spaziale dell'ozono troposferico, la NASA ha promosso la creazione di giardini con piante indicatrici quali campanule, artemisia, aster, fagioli, viti, patate e sambuco.

In passato la NASA aveva valutato anche la capacità di ridurre l'inquinamento *indoor* con comuni piante da appartamento come l'aloe, il crisantemo, la dracena e il ficus, rilevando una certa efficacia di alcune specie nel ridurre le concentrazioni di benzene, formaldeide e tricloroetilene.

Nelle aree remote, per rilevare l'inquinamento da ozono, è preferibile impiegare specie di alberi, arbusti o piante erbacee particolarmente diffuse nei nostri territori (vedi, ad esempio, gli elenchi riportati nel sito dell'ICP *Forests*). L'uso di piante spontanee richiede una certa cura nell'interpretazione dei risultati perché la variabilità genotipica e fenotipica possono influire sulle risposte delle specie. Comunque, l'UNECE ha predisposto una procedura standardizzata (*International Cooperative Programme on Vegetation*) per rilevare i danni nella pianta erbacea spontanea *Centaurea jacea* (Gottardini, 2012).

Per la loro sensibilità specie-specifica al biossido di zolfo, i licheni sono stati per oltre un secolo i principali indicatori della qualità dell'aria. Le procedure di biorilevamento consistono essenzialmente nella rilevazione, con procedure standardizzate, della frequenza delle diverse specie epifite sui tronchi degli alberi. Le misure introdotte in molti paesi negli ultimi decenni del secolo scorso per ridurre le emissioni del biossido di zolfo hanno consentito a molte specie di licheni (che generalmente tollerano anche concentrazioni piuttosto elevate di ozono troposferico), di ricolonizzare molte aree urbane e industriali; è stato inoltre rilevato anche un incremento delle popolazioni di falene del gruppo *Lithosinae*, che si nutrono di licheni.

Le crescenti deposizioni atmosferiche di ossidi di azoto (emessi dai processi di combustione) e di ammoniaca (proveniente soprattutto dalle attività zootecniche e agricole) favoriscono lo sviluppo delle specie nitrofitiche a scapito di quelle che non tollerano l'eccessiva deposizione di nutrienti (oligotrofiche). I licheni sono tra gli organismi più sensibili alle deposizioni di forme biodisponibili dell'azoto e in molte foreste, anche in quelle con deposizioni atmosferiche di azoto inferiori a 10 kg/ha all'anno, è stato rilevato un significativo decremento delle specie più oligotrofiche e acidofile. In Inghilterra, nell'ambito delle attività dell'*Open Air Laboratories* (OPAL), i volontari partecipano al monitoraggio delle deposizioni di composti dell'azoto sul territorio nazionale rilevando la presenza di determinati generi di licheni (molto sensibili come *Usnea*, *Evernia* e *Hypogymnia*, mediamente sensibili come *Parmelia* e *Flavoparmelia* e tolleranti come, ad esempio, *Xanthoria* e *Physcia*) sui tronchi di querce, frassini e aceri. La procedura è piuttosto semplice e i generi da rilevare sono molto diffusi anche in Italia. Tuttavia poiché il nostro Paese è caratterizzato da una maggior variabilità delle condizioni climatiche e ambientali, per una corretta interpretazione dei risultati è opportuno considerare che la composizione delle comunità di licheni è influenzata anche dal regime delle precipitazioni, dell'umidità ambientale e

della temperatura; le specie sensibili ai composti dell'azoto prediligono ambienti umidi e non troppo caldi, mentre quelle tolleranti tendono ad aumentare nelle zone con minori precipitazioni atmosferiche. Dato che anche l'acidità delle scorze degli alberi influisce sulla colonizzazione dei licheni epifiti, nelle regioni del bacino del Mediterraneo –con clima più mite e asciutto rispetto a quello inglese– gli effetti delle deposizioni di azoto sull'acidità delle cortecce potrebbero essere attenuati dalla maggior presenza di polveri di suolo che tendono a tamponare l'acidità e a favorire la colonizzazione di specie nitrofile anche su cortecce normalmente più acide.

Tra le attività di *citizen science* dell'*Open Air Laboratories* vi è anche la rilevazione delle macchie di catrame (*tar spot*) sulle foglie di *Acer pseudoplatanus*, dovute all'infezione del fungo *Rhytisma acerinum*. Quando nelle aree urbane le concentrazioni di biossido di zolfo erano superiori a 80-90 µg/m^3 si riteneva che l'inquinante inibisse l'infezione, perché in primavera le macchie non comparivano. Ma, dopo la marcata riduzione dei tenori di biossido di zolfo, in alcune città come Edinburgo non si è avuto un aumento dell'infezione. È stato ipotizzato che ciò potrebbe essere dovuto alla mancanza di inoculo, per la continua rimozione delle foglie dei platani dalle strade e dai parchi. Tuttavia, i monitoraggi condotti nell'area urbana di Londra sembrerebbero indicare che concentrazioni di ossidi di azoto maggiori di 20 µg/m^3 possono ridurre la comparsa dei *tar spot*. Oltre 1000 rilievi eseguiti dai volontari sui platani delle città inglesi indicano che entrambe le ipotesi sono valide e che la riduzione delle infezioni dipende anche dall'aumento della temperatura e da ridotte precipitazioni atmosferiche.

Anche i muschi (specialmente quelli epifiti) e le piante superiori rispondono alle deposizioni di ossidi di azoto e ammonica, ma è difficile distinguere l'impatto degli inquinanti atmosferici rispetto agli effetti del cambiamento climatico. In generale, la perdita di biodiversità interessa specie rare, poco competitive e adattate ad ambienti acidi, molto umidi e con scarsa disponibilità di nutrienti.

Bibliografia e letture consigliate

Bargagli R., 1998. *Trace elements in terrestrial plants: an ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery*. Springer-Verlag, Berlino.

Bargagli R., Mikhailova I., 2002. Accumulation of inorganic contaminants. In: Nimis P.L., Scheidegger C., Wolseley P.A. (eds.) *Monitoring with lichens- Monitoring lichens*. Kluwer Acad, Publ. Amsterdam.

Bell J.N.B., Treshow M., 2002. *Air pollution and plant life*. John Wiley & Sons, Chichester.

Brunialti G., Frati L., Geri F., *et al.*, 2012. La biodiversità dei licheni epifiti nel monitoraggio di aree geotermiche. *Biologia Ambientale*, **26**(2): 104-111.

Carson R., 2016. *Primavera silenziosa*. Feltrinelli, Milano.

Conti M.E. (ed.), 2008. *Biological monitoring: theory and applications*. WIT Press, Southampton.

Cunningham M.M., Chloe L.T., McKee G., *et al.*, 2022. Honey bees as biomonitors of environmental contaminants, pathogens, and climate change. *Ecological Indicators*, **134**: 108457.

Giraudo A., 2019. Storie straordinarie delle materie prime. ADD Editore, Torino.

Hecker S., Haklay M., Bowser A., *et al*., 2018. *Citizen science: innovation in open science, society and policy*. London: UCL Press.
Loppi S., Munzi S., Paoli L., 2012. La bioindicazione mediante licheni: potenzialità, limiti e sviluppi. *Biologia Ambientale*, **26**(2): 3-15.
Lorenzini G., Nali C., 2005. *Le piante e l'inquinamento dell'aria*. Springer Verlag, Milano.
Kovalevski A.L., 1979. *Biogeochemical explorations for mineral deposits*. Amerind Publishing Co, New Delhi.
Markert B.A., Breure A.M., Zechmeister H.G. (eds.), 2002. *Bioindicators & biomonitors: principles, concepts, and applications*. Elsevier, Oxford.
Martellos S., 2017. Il ruolo dell'informazione e della Citizen Science. *Biologia Ambientale*, **31**: 147-150.
Root H.T., Jovan S., Fenn M., *et al*., 2021. Lichen bioindicators of nitrogen and sulfur deposition in dry forests of Utah and New Mexico. *Ecological Indicators,* **127**(4): 107727.
Seed L., Wolseley P., Gosling L., *et al.,* 2013. Modeling relationships between lichen bioindicators, air quality and climate on a national scale: results from the UK-OPAL air survey. *Environmental Pollution,* **182**: 437-447.
Serrano Sanz F., Holocher-Hertl T., Kieslinger B., *et al*., 2014. *White Paper on Citizen Science in Europe*. EU: Socientize Consortium.
Tretiach M., Adamo P., Bargagli R., *et al*., 2007. Lichen and moss bags as monitoring devices in urban areas. Part I: influence of exposure on sample vitality. *Environmental Pollution,* **146**: 380-391.
Yang J., Chang Y., Yan P., 2015. Ranking the suitability of common urban trees species for controlling $PM_{2.5}$ pollution. *Atmospheric Pollution Research,* **6**: 267-277.
Zerbi G., Marchiol L., 2013. *Il ruolo del verde urbano nella mitigazione dell'inquinamento atmosferico*. Forum, Udine.

Link di approfondimento

http://www.citizen-obs.eu/
http://www.citizenscience.org/
http://creativecommons.org/licenses/
https://ecsa.citizen-science.net/
https://www.icp-forests.org
https://nbn.org.uk/new/instant-indicia/
http://www.inaturalist.org/
http://www.opalexplorenature.org
http://www.unenvironment.org/

Capitolo 5

I cambiamenti climatici

5.1. L'emergenza climatica e ambientale

L'uomo ha creato l'energia nucleare con la quale è in grado di distruggere se stesso e ogni altra forma di vita e, almeno per ora, è riuscito a ridurre questo rischio con accordi tra le principali potenze mondiali. Anche l'accelerazione dell'Antropocene sta mettendo a rischio la sopravvivenza della nostra specie sulla Terra e da diversi anni importanti organizzazioni come l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2022) ne documentano gli effetti sui processi che regolano il funzionamento del sistema Terra e suggeriscono possibili azioni per ridurre i rischi. L'Alleanza Mondiale degli Scienziati ritiene che la crescita demografica (da circa 7,6 a oltre 9 miliardi di persone nel 2100), l'eccessivo sfruttamento di risorse non rinnovabili come il suolo, i minerali e i combustibili fossili, e la perdita di biodiversità costituiscano concrete minacce per il futuro dell'umanità (Alleanza Mondiale degli Scienziati, 2019). La biodiversità è essenziale per la fertilità dei suoli, l'impollinazione delle piante, la degradazione dei rifiuti, la purificazione dell'acqua e dell'aria ed è fortemente minacciata da deforestazione, incendi, urbanizzazione, attività agricole e zootecniche intensive. La frammentazione/distruzione degli habitat, gli inquinamenti e l'introduzione di specie aliene stanno provocando la perdita di circa 15.000 specie all'anno, un tasso di estinzione tale da far ritenere che sia in corso la sesta estinzione di massa.

Gli attuali modelli di sviluppo considerano l'ambiente e le risorse naturali come entità fisiche non prodotte dall'uomo, quindi da sfruttare se possono soddisfare esigenze materiali ed economiche. Confidando anche nei progressi della scienza e della tecnologia, si continua a perseguire la crescita dei consumi, dell'economia e del Prodotto Interno Lordo (PIL).

Tuttavia, anche se le innovazioni scientifiche e tecnologiche possono contribuire a ridurre gli impatti delle attività antropiche, se non si punta a un uso più sostenibile e a una più equa ripartizione delle risorse naturali non sarà possibile prevenire altre pandemie e la migrazione di intere popolazioni verso le zone dove le risorse sono ancora disponibili. Le emergenze sociali e ambientali sono ulteriormente acuite dai disastrosi effetti del cambiamento climatico (siccità, incendi forestali, scioglimento dei ghiacci e innalzamento del livello del mare) e dalle migliaia di vittime causate ogni anno da carestie, eventi meteorologici estremi, ondate di calore, diffusione di patogeni e dei loro vettori.

Con la Rivoluzione Industriale l'uomo ha cominciato a immettere nell'atmosfera enormi quantità di anidride carbonica e, da quando nel secolo scorso sono iniziate accurate misurazioni, sono stati rilevati incrementi delle concentrazioni dei principali gas serra, mai registrati negli ultimi 800.000 anni. Come documentano i periodici rapporti dell'IPCC, questi incrementi sono accompagnati da un progressivo riscaldamento dell'aria e degli oceani e da macroscopici fenomeni correlati come la riduzione dei ghiacciai e delle banchise polari, l'innalzamento del livello del mare, l'anticipo della fioritura di molte specie di piante e la modifica del comportamento di molte specie animali.

La composizione dell'atmosfera e il clima terrestre hanno sempre subito variazioni, ma lo studio e la ricostruzione degli eventi del passato non consentono di prevedere i futuri scenari perché non sono mai stati registrati cambiamenti così rapidi nel ciclo biogeochimico del carbonio e dell'azoto e nelle concentrazioni dei gas serra. Nonostante la continua implementazione di modelli matematici, è difficile tener conto di tutti i fattori coinvolti nelle complesse interazioni con scambi di energia e di materia tra atmosfera, idrosfera, litosfera e biosfera. Di fatto, anche i modelli più complessi e scientificamente accreditati sono concordi nel dimostrare l'impatto delle attività dell'uomo sulla variabilità climatica, ma non lo sono altrettanto nel definire i possibili effetti di tali variazioni. Con l'accordo di Parigi del 2015 molti Paesi membri della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC, 2021) hanno deciso di intraprendere misure urgenti per contenere l'aumento della temperatura media globale, possibilmente sotto 1,5 °C, rispetto ai valori pre-industriali. Tuttavia, alcune decine di Paesi, inclusi alcuni dei principali emettitori, non hanno ancora aderito alla Convenzione. Nonostante le forti limitazioni alle attività antropiche durante la pandemia da COVID-19, le emissioni hanno subito solo minime riduzioni e molti ricercatori ritengono che, in assenza di adeguati interventi, l'incremento di 1,5°C della temperatura media, probabilmente, sarà raggiunto entro 15-20 anni.

5.2 I fattori naturali e antropici della variabilità climatica

Per milioni di anni la composizione dell'atmosfera e il clima del nostro pianeta sono cambiati sia a causa di fattori interni (es. le eruzioni vulcaniche) che esterni alla Terra, come l'impatto di meteoriti, delle comete e dei raggi cosmici. Il Sole è il motore del sistema Terra e le relazioni del nostro pianeta con la sua stella, oltre che dai moti di rotazione e di rivoluzione, sono caratterizzate anche da variazioni pseudo-periodiche di lungo periodo dovute all'eccentricità dell'orbita, all'inclinazione dell'asse terrestre e alla precessione degli equinozi. Gli effetti cumulativi delle cicliche variazioni dei parametri orbitali modificano la quantità e la distribuzione della radiazione solare che raggiunge la Terra e danno luogo a glaciazioni all'incirca ogni 100.000 anni. Questi cicli, detti di Milanković, prendono il nome dal matematico e astronomo che all'inizio del Novecento studiò la rivoluzione della Terra attorno al Sole e per primo formulò la teoria secondo la quale i cambiamenti climatici del Pleistocene erano dovuti alle variazioni della quantità di radiazione che raggiungeva il nostro pianeta.

I possibili effetti delle variazioni irregolari e di breve periodo dell'attività solare sul clima terrestre sono ancora oggetto di discussione. Le misurazioni condotte negli ultimi 150 anni indicano che il numero delle macchie solari e i fenomeni magnetici a loro correlati sono aumentati rispetto al periodo preindustriale. In particolare, è aumentata di circa lo 0,08 % la quantità media di energia che arriva sulla Terra (*radiative forcing*); tuttavia, questo incremento sarebbe almeno dieci volte inferiore a quello necessario per spiegare il riscaldamento medio registrato sul nostro pianeta negli ultimi 150 anni. Sebbene le particelle cariche di energia provenienti dal sole e dalla galassia interagiscano con la formazione dell'ozono stratosferico e delle nubi, la maggior parte dei ricercatori ritiene che anche i raggi cosmici stiano giocando un ruolo marginale nel progressivo riscaldamento del pianeta. Sulla base dei dati e delle conoscenze disponibili si ritiene che il riscaldamento globale sia dovuto a fattori interni al sistema Terra e soprattutto alle attività dell'uomo. Le eruzioni vulcaniche sono sicuramente da escludere perché come successe nel 1883 con l'eruzione del Krakatoa in Indonesia, queste determinano abbassamento e non innalzamento della temperatura terrestre e le quantità di anidride carbonica immesse in atmosfera dai vulcani e dalle sorgenti geotermali sono circa l'1% di quelle prodotte dalle attività antropiche.

L'uomo cominciò a modificare la composizione dell'atmosfera alcune migliaia di anni fa quando da cacciatore/raccoglitore divenne agricoltore e allevatore, e il suo impatto sulle concentrazioni dei gas serra è aumentato considerevolmente con la Rivoluzione Industriale. Fino agli inizi del 1900 ogni anno venivano immessi in aria alcuni milioni di tonnellate (Mt) di carbonio e questi potevano essere assorbiti dagli ecosistemi terrestri e dagli oceani, ma questa quantità raggiunse i 3 miliardi di tonnellate (Gt) nel 1960 e attualmente ammonta a circa 40 Gt. Gli enormi incrementi delle emissioni antropiche hanno messo in crisi la capacità di omeostasi del pianeta, che può assorbirne solo il

40%, mentre altri meccanismi naturali di sottrazione dell'anidride carbonica, come i processi di *weathering* delle rocce silicee, agiscono su scale temporali di centinaia o migliaia di anni. Quindi l'anidride carbonica ha cominciato ad accumularsi in atmosfera e in circa un secolo le sue concentrazioni sono aumentate di quasi 100 ppm (in condizioni naturali un tale incremento avrebbe richiesto migliaia di anni!).

Si stima che, complessivamente, le emissioni antropiche di anidride carbonica, metano, protossido di azoto, CFCs e altri gas serra aggiungerebbero all'effetto serra naturale un *radiative forcing* di circa 3 W/m^2 (IPCC, 2021). Comunque, come molti processi naturali, anche le attività dell'uomo producono particelle di aerosol che riducono la radiazione solare incidente e, tenendo conto del loro potere raffreddante, il *radiative forcing* attribuibile ai gas serra emessi dalle attività dell'uomo è stimato in circa 1,6 W/m^2 (un valore 10 volte superiore al contributo al riscaldamento terrestre attribuibile all'incremento dell'attività solare).

5.3. Le carote di ghiaccio dell'Antartide e il paleoclima

Già agli inizi dell'Ottocento Langley aveva intuito che "l'atmosfera terrestre agisce selettivamente sui raggi solari come i vetri di casa" e che, se non ci fosse l'effetto serra, il nostro pianeta sarebbe molto più freddo. Nel 1896 Arrhenius (premio Nobel per la chimica nel 1903) stimò che, raddoppiando le concentrazioni di anidride carbonica in atmosfera, la temperatura dell'aria sarebbe aumentata di circa 3°C. Tuttavia i primi risultati sperimentali che dimostravano la relazione tra gli incrementi delle concentrazioni di anidride carbonica e quelli della temperatura dell'aria furono pubblicati solo nell'ottobre del 1987 (Orombelli, 2015).

Sebbene esistano diversi "archivi" naturali della storia climatica del passato, come i sedimenti marini o le barriere coralline, questo risultato fu ottenuto analizzando le carote di ghiaccio, una matrice ambientale costituita solo da molecole di acqua (idrogeno e ossigeno) che consente di individuare più facilmente la presenza di gas, particelle, radionuclidi e altri inquinanti persistenti. La neve, infatti, deposita tutto ciò che è presente in aria e, nelle regioni dove le basse temperature ne impediscono lo scioglimento, si accumula anno dopo anno, fino a sprofondare sotto il suo peso trasformandosi in ghiaccio. Nei ghiacci il rapporto fra il numero di atomi di ossigeno di massa 16 e massa 18 è funzione della temperatura dell'aria al momento della precipitazione. Dopo la fine della seconda guerra mondiale, non appena si resero disponibili apparecchiature scientifiche particolarmente sensibili come lo spettrometro di massa, iniziarono

le analisi di sezioni di carote di ghiaccio prelevate in Groenlandia per valutare le temperature dell'aria di migliaia o milioni di anni fa. Il luogo ideale per questo tipo ricerche è l'Antartide perché in quel continente ogni anno si depositano minime quantità di neve; pertanto, a parità di lunghezza delle carote, è possibile ricostruire storie climatiche molto più lunghe.

Nel 1965, dopo un'intensa giornata di carotaggi presso la stazione Dumont d'Urville, alcuni ricercatori francesi misero del ghiaccio prelevato in profondità nel loro bicchiere di whisky. Claude Lorius, notando che dal ghiaccio si liberavano delle bolle d'aria, intuì che la loro composizione doveva riflettere quella dell'atmosfera di migliaia di anni prima. Analizzando la composizione chimica delle bolle d'aria in una carota prelevata tra il 1974 e il 1977 (lunga 900 m e comprendente le vicende climatiche del pianeta negli ultimi 20.000 anni) fu effettivamente rilevata la correlazione positiva tra la temperatura dell'aria e le concentrazioni di anidride carbonica. Al centro del Plateau Antartico, presso la stazione Vostok, i russi riuscirono a estrarre una carota lunga oltre 2.000 m con informazioni sulle condizioni climatiche degli ultimi 420.000 anni. Lorius e i suoi collaboratori estrassero e analizzarono i gas contenuti nelle bolle d'aria nei laboratori di glaciologia francesi e i primi risultati, pubblicati nel 1987, non solo confermavano la relazione positiva tra i valori delle concentrazioni di anidride carbonica e quelli della temperatura, ma dimostravano che nei precedenti 420.000 anni non c'erano mai stati livelli di anidride carbonica e metano così elevati come quelli attuali. Successivi carotaggi, come quello condotto a Dome C nell'ambito del progetto europeo EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*) nella stazione italo-francese di Concordia, hanno consentito di ricostruire le variazioni del clima terrestre negli ultimi 800.000 anni (Fig. 8A). In questo intervallo di tempo le temperature medie dell'aria sono aumentate nei periodi interglaciali di circa 5-6 °C; le concentrazioni di anidride carbonica hanno oscillato tra 180 e 280 ppm e quelle del metano tra 0,4 e 0,7 ppm, mentre negli ultimi decenni hanno raggiunto rispettivamente valori di 417 ppm e 2,0 ppm. Inoltre, le analisi condotte nelle carote di Vostok e Dome C dimostrano che nei periodi glaciali sui ghiacci si depositano notevoli quantità di polveri, verosimilmente dovute all'abbassamento del livello dei mari e all'aridità delle masse continentali.

È stato rilevato che tra 900.000 e 1.200.000 anni fa la periodicità delle glaciazioni passò da 41.000 a 100.000 anni; allo scopo di acquisire ulteriori conoscenze su questa "transizione climatica" è in corso di realizzazione un progetto di carotaggio (*Beyond EPICA*) presso la stazione Little Dome C (a circa 40 km dalla stazione italo-francese di Concordia a Dome C).

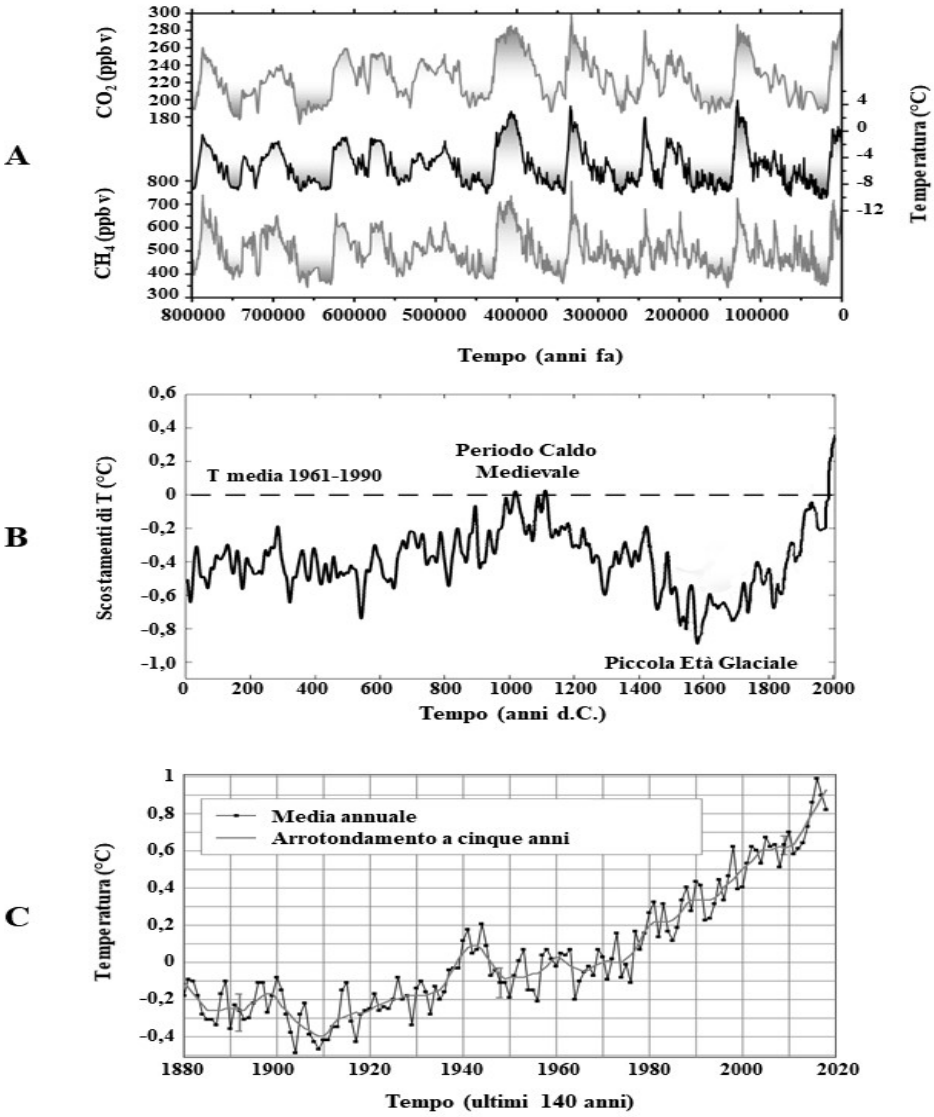

Fig. 8. Variazioni della temperatura e delle concentrazioni di gas serra negli ultimi 800.000 anni (**8A**, analisi delle bolle d'aria nelle carote di ghiaccio dell'Antartide); variazioni di T °C negli ultimi 2000 anni (**8B**, carote di ghiaccio, di sedimento e coralli) e negli ultimi 140 anni (**8C**, misurazioni dirette). (Bargagli, 2020).

5.4 I cambiamenti climatici in tempi storici

L'analisi di carote di ghiaccio provenienti da regioni dove le precipitazioni nevose sono più abbondanti ha consentito di acquisire informazioni più dettagliate sugli eventi climatici degli ultimi millenni. È stato compilato un inventario delle principali eruzioni vulcaniche e si è scoperto che, durante l'ultimo periodo glaciale, la Groenlandia e l'emisfero settentrionale hanno subìto anche incrementi di temperatura piuttosto rapidi, probabilmente dovuti a improvvisi cambiamenti nel trasporto di calore negli oceani.

Durante l'Olocene, che ebbe inizio circa 12.000 anni fa, le temperature sono rimaste relativamente stabili con variazioni comprese tra 1 e 3 °C. I dati rilevati con l'analisi di diverse matrici ambientali (ghiacci, sedimenti, coralli, anelli di accrescimento degli alberi e pollini), condotte soprattutto nell'emisfero settentrionale, indicano un aumento delle temperature medie tra il 250 a.C. e il 400 d.C. (Optimum Termico Romano) e un incremento di circa 0,6 °C nel Medioevo (Optimum Termico Medievale; tra l'800 e il 1300 d.C.) (Wikipedia, 2005) (Fig. 8B). In Europa il clima più mite favorì lo sviluppo demografico, l'espansione delle coltivazioni e degli ecosistemi forestali; in Gran Bretagna si produceva il vino, i Vichinghi colonizzarono la Groenlandia e raggiunsero le coste dell'America Settentrionale. L'incremento di temperatura interessò in tempi diversi le regioni che si affacciano sull'Atlantico settentrionale e in alcune di queste, come il Messico, la siccità probabilmente contribuì al collasso della civiltà Maya.

Sicuramente a quel tempo le attività dell'uomo avevano un impatto trascurabile sulla composizione dell'atmosfera e si ritiene che le variazioni delle correnti oceaniche e l'intensa attività solare manifestatasi tra il 1100 ed il 1250 d.C. siano state tra le più probabili cause dell'aumento di temperatura. Dopo il 1400 in molte regioni dell'emisfero boreale ebbe inizio un periodo freddo (Piccola Età Glaciale) che fino agli inizi del 1800 determinò un susseguirsi di fasi più fredde (temperatura media circa 1,0-1,5 °C inferiore a quella attuale; Fig. 8B) e un macroscopico avanzamento dei ghiacciai alpini. Spesso, in inverno, la Laguna di Venezia, il Tamigi e altri fiumi erano coperti dai ghiacci; la Groenlandia divenne inabitabile e in Inghilterra cessò la viticoltura.

Nel periodo di massimo raffreddamento (indicativamente tra la metà del '600 e gli inizi del '700), le macchie solari scomparvero quasi completamente dalla superficie della nostra stella (Minimo di Maunder, dal nome dei due coniugi astronomi che per primi rilevarono il fenomeno). Tuttavia, anche altri fattori come le variazioni delle correnti marine e l'attività vulcanica contribuirono al raffreddamento poiché questo era cominciato prima del Minimo di Maunder e si era manifestato dapprima nell'Oceano Pacifico, quindi nell'America settentrionale e in Europa (Sansone, 2021). Dopo il 1500 ci furono numerose eruzioni vulcaniche e il 1816 –uno degli anni più freddi, passato alla storia come "l'anno senza estate"– era stato preceduto nel 1815 dall'eruzione del vulcano Tambora in Indonesia.

Mentre l'Optimum Termico Medievale e la Piccola Età Glaciale si manifestarono nelle diverse regioni dell'Emisfero settentrionale in tempi diversi, il riscal-

damento provocato dalle attività dell'uomo nell'ultimo secolo sta interessando oltre il 90% del pianeta, con incrementi delle concentrazioni di gas serra e di temperatura mai registrati in passato. Assumendo come riferimento le temperature medie globali del periodo 1850-1900, quelle attuali sono di 1,2°C più elevate (+ 0,9°C dal 1970) e quelle del 2020 e dei cinque anni precedenti sono tra le più alte mai registrate in assoluto (Fig. 8C). Su scala globale continuano ad aumentare il contenuto medio di calore e il livello degli oceani, la frequenza delle precipitazioni atmosferiche intense, la quantità di pioggia nelle regioni equatoriali e subpolari e l'aridità in quelle subtropicali e nel bacino del Mediterraneo. La progressiva riduzione della copertura di ghiaccio marino riduce la capacità riflettente dell'Artico e, anche a causa delle occasionali intrusioni di masse d'aria calda e umida dai tropici, le regioni oltre il Circolo Polare Artico (66,6°N) si stanno riscaldando 4 volte più velocemente del resto del mondo (INGV, 2019).

Bibliografia e letture consigliate

Bagliani M., Pietta A., Bonati S., 2020. *Il cambiamento climatico in prospettiva geografica. Aspetti fisici, impatti, teorie*. Il Mulino, Bologna.
Barbante C., 2022. *Scritto nel ghiaccio. Viaggio nel clima che cambia*. Il Mulino, Bologna.
Behringer W., 2016. *Storia culturale del clima. Dall'era glaciale al riscaldamento globale*. Bollati Boringhieri, Torino.
Blom P., 2019. *Il primo inverno. La piccola età glaciale e l'inizio della modernità europea (1570-1700).* Marsilio Ed., Venezia.
Carraro C., Mazzai A., 2015. *Il clima che cambia. Non solo un problema ambientale*. Il Mulino, Bologna.
Fioravanti G., Fraschetti P., Lena F., *et al*., 2021. *Gli indicatori del clima in Italia*. ISPRA, Stato dell'Ambiente, Anno XVI,. 96/2021
Ghosh A., 2017. *La grande cecità. Il cambiamento climatico e l'impensabile*. Neri Pozza Ed., Vicenza.
Giddens A., 2015. *La politica del cambiamento climatico*. Il Saggiatore, Milano.
I.P.C.C., 2018. *Global warming of 1.5°C*. Intergovernmental Panel on Climate Change (Special Reoprt), Cambridge University Press, Cambridge.
I.P.C.C., 2021. *Climate change 2021: The physical science basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change (Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report). Cambridge University Press.
Mezzalama R., 2021. *Il clima che ambia l'Italia. Viaggio in un paese sconvolto dall'emergenza climatica*. Einaudi, Torino.
Nelles D., Serrer C., 2020. *La guida indispensabile al cambiamento climatico*. Rizzoli, Milano
Oliva M., Fernandez J.R., 2020. *Past Antarctica. Paleoclimatology and climate change*. Academic Press, New York.

Link di approfondimento

https://ec.europa.eu/clima/climate-change/causes-climate-change_en

https://www.changeclimatechange.it/

https://climate.nasa.gov/effects/

https://www.cmcc.it/

https://www.isprambiente.gov.it

https://www.ipcc.ch

http://www.esrl.noaa.gov/gmd
https://www.reteclima.it

https://www.snpambiente.it/

https://www.un.org.

http://www.unccd.int/

https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf

https://unric.org/en/bonn-climate-change-conference/

Capitolo 6

Gli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi terrestri

6.1 Gli ecosistemi forestali

Gli ecosistemi forestali ospitano un gran numero di specie endemiche e, oltre alla conservazione della biodiversità, svolgono altri servizi molto importanti come la mitigazione dei cambiamenti climatici (ogni anno assorbono circa il 30% delle emissioni antropiche di anidride carbonica). Secondo recenti stime della FAO, le foreste ricoprono circa il 30 % delle terre emerse (superficie totale di 4 miliardi di ha) e più della metà si trovano nei territori di Russia, Brasile, Canada, USA e Cina. Sebbene il tasso globale di deforestazione stia diminuendo (circa 4,5 milioni di ettari nell'ultimo decennio, rispetto ai 7,8 milioni di ha tra il 1990 ed il 2000), negli ultimi 30 anni sono stati persi oltre 20 milioni di ha di superficie forestata.

Molti ecosistemi forestali vengono distrutti o frammentati per fare spazio a terreni destinati all'agricoltura e alla zootecnia, a insediamenti urbani, infrastrutture viarie e attività minerarie. Particolarmente preoccupante è la situazione nelle regioni tropicali e subtropicali dove, oltre alla crescita demografica e all'urbanizzazione, giocano un ruolo importante altre attività: la produzione della soia e l'allevamento nell'America meridionale, la produzione di caffè, cacao, olio di palma, mais e bestiame in Africa e quella dell'olio di palma in Asia (Intini, 2022). Queste attività contribuiscono a ridurre anche la biodiversità e il sequestro dell'anidride carbonica, modificano il ciclo dell'acqua, il microclima e aumentano la vulnerabilità agli incendi.

Ogni anno gli incendi forestali emettono in aria circa 1,8 Pg di anidride carbonica, situazione aggravata dall'aumento delle temperature estive che sta prolungando la stagione degli incendi: in California, per esempio, è aumentata di oltre 70 giorni. La siccità riduce la produttività primaria e la cattura di anidride

carbonica da parte degli alberi e determina la morte di molti esemplari.

I cambiamenti climatici aumentano la frequenza di eventi atmosferici particolarmente intensi con lo sradicamento di alberi e frane, ma modificano anche il ciclo dell'acqua, la distribuzione e la composizione delle comunità biotiche e favoriscono la diffusione di specie aliene e le infestazioni. La distruzione e la frammentazione delle foreste facilitano le interazioni tra la fauna selvatica, l'uomo e gli animali domestici e contribuiscono alla diffusione delle zoonosi. L'impiego di mezzi pesanti compatta i suoli, favorisce il ristagno delle acque superficiali e lo sviluppo delle zanzare e di altri vettori di malattie. Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità i cambiamenti climatici sono responsabili ogni anno di un incremento di circa il 3% dell'incidenza della malaria, diarrea e dengue, specialmente tra i bambini.

A differenza di quanto accade in altri continenti, in Europa l'estensione delle foreste (oltre 200 milioni di ettari, circa il 33% del territorio) è in costante aumento. Le loro caratteristiche e la distribuzione dipendono essenzialmente dal gradiente climatico, con incremento delle precipitazioni e diminuzione delle temperature con l'altitudine e la latitudine e da ovest verso est (passaggio dal clima umido marittimo a quello continentale). Tuttavia la composizione di molte foreste boreali, atlantiche, continentali e mediterranee è stata modificata dall'uomo con l'introduzione di specie diverse da quelle che erano naturalmente presenti.

I cambiamenti climatici, gli incrementi delle concentrazioni di anidride carbonica e delle deposizioni di forme biodisponibili dell'azoto stanno determinando variazioni delle produttività e migrazioni altitudinali e latitudinali di molte specie. Le foreste europee sono minacciate da siccità, incendi, parassiti, eccessiva densità degli ungulati e da fenomeni atmosferici particolarmente intensi (Paknazar, 2021). Nell'ottobre 2018, la depressione Vaia causò lo schianto di circa 8 milioni di metri cubi di legname nelle foreste delle Dolomiti.

Gli studi sulla vulnerabilità delle foreste europee indicano che le maggiori perdite di biomassa (circa il 40%) sono da imputare al vento (specialmente in montagna) e agli incendi (il 34%). Gli incrementi di temperatura e le variazioni delle precipitazioni atmosferiche stanno aumentando le condizioni di stress di molte specie arboree, specialmente di quelle ai limiti del loro areale di distribuzione, inoltre le infestazioni da funghi e insetti causano una perdita di biomassa stimata intorno al 26%. Nella regione mediterranea, per esempio, i cambiamenti climatici stanno favorendo la sporulazione e la dispersione di funghi patogeni e gli abeti, in condizioni di stress a causa della siccità, sono sempre più minacciati dall'aggressione del fungo *Heterobasidion abietinum.* Con l'aumento della siccità, non solo molte specie di conifere, ma anche i faggi, i castagni e i cerri mostrano accentuata defoliazione e i dati di telerilevamento delle chiome degli alberi (in quasi 20.000 *plot* localizzati nelle foreste di 35 paesi europei) indicano che dal 1985 al 2018 la mortalità sta aumentando di circa l'1,5% all'anno.

In generale, è stato rilevato un progressivo rallentamento nell'invecchiamento delle foreste e che le specie meglio adattate a temperature più elevate e alla siccità come le querce e le piante della macchia mediterranea (termofile e

sclerofille) stanno progressivamente sostituendo le conifere. Per la "persistenza" delle foreste sono necessarie specie arboree con elevata plasticità fenotipica capaci di adattare le loro caratteristiche fisiologiche e morfologiche alle nuove condizioni climatiche e ambientali. A scala locale, l'isolamento genetico e le strategie di dispersione dei semi e del polline possono favorire la comparsa di nuovi genotipi. Negli Appennini, per esempio, alcune popolazioni di *Pinus sylvestris* hanno sviluppato particolari adattamenti per tollerare temperature elevate e siccità e potrebbero costituire valide risorse per mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici nei nostri ecosistemi forestali.

I cambiamenti climatici stanno avvenendo con tale rapidità che sono necessari l'intervento dell'uomo e adeguate pratiche colturali per favorire l'adattamento delle foreste alle nuove condizioni. Questi interventi sono particolarmente necessari nelle regioni tropicali: l'UNFCCC (la convenzione delle Nazioni Unite per combattere i cambiamenti climatici) con il programma REDD (*Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation*) sostiene economicamente azioni di mitigazione dei cambiamenti climatici nei paesi in via di sviluppo, mediante la riduzione della deforestazione e una gestione degli ecosistemi forestali che accresca la loro capacità di accumulare il carbonio.

La moderna silvicoltura industriale è nata in Germania ed era basata essenzialmente su piantagioni monocolturali, in file ordinate, di specie a rapida crescita come l'abete rosso o il pino. Ma negli ultimi anni queste foreste hanno subito sensibili riduzioni a causa della siccità, degli incendi, del vento e del progressivo deperimento degli abeti rossi, che ha favorito le aggressioni dei coleotteri scolitidi. Le monocolture, che per molti decenni hanno rappresentato una notevole risorsa, sono sempre più minacciate dal cambiamento climatico e tra i ricercatori è in corso un acceso dibattito tra chi sostiene la necessità di orientare la politica forestale verso un approccio più disinteressato –consentendo agli ecosistemi forestali di ricrescere naturalmente e di invertire secoli di perdita di biodiversità– e chi invece sostiene che il clima stia cambiando così rapidamente che anche molte specie arboree native non potrebbero sopravvivere ed è pertanto opportuno selezionare e piantare alberi di rilevanza commerciale e con maggiori probabilità di raggiungere la maturità (Oberpriller, 2019).

6.2 Gli ecosistemi montani

Molte delle piante che forniscono cibo all'umanità come patate, mais, sorgo, orzo, pomodori e mele si sono originate sulle montagne. Le biocenosi vegetali delle montagne comprendono oltre il 25% della biodiversità terrestre e sono tra quelle maggiormente esposte agli effetti delle modificazioni di composizione dell'atmosfera e dei cambiamenti climatici. Dalle montagne proviene la maggior parte dell'acqua dolce (circa il 60%) e anche nel caso di ridotte

emissioni di anidride carbonica e di un incremento di temperatura di solo 1,5°C, è prevista una perdita di circa il 50% dei ghiacciai e della copertura nevosa primaverile, con profonde modificazioni al ciclo idrologico e alla composizione chimica delle acque.

Nelle acque superficiali degli ecosistemi montani stanno diminuendo le concentrazioni dei composti dello zolfo (per la progressiva riduzione delle deposizioni acide), mentre stanno aumentando quelle dei composti dell'azoto; e questi cambiamenti potrebbero modificare anche le comunità degli ecosistemi acquatici, costituite da specie uniche per i loro adattamenti ad acque fredde, ben ossigenate e con pochissimi nutrienti.

I dati acquisiti nei siti della rete LTER (*Long Term Ecological Research*) delle Alpi e degli Appennini (tra 1300 e 3212 m di quota) indicano che negli ultimi 70 anni vi è stato un incremento medio delle temperature di 0,027°C/anno negli Appennini e 0,015°C/anno dei valori medi estivi nelle Alpi. È stata rilevata, inoltre, una generale tendenza a un inizio ritardato delle precipitazioni nevose e a un loro scioglimento anticipato. Queste condizioni e le temperature più miti influiscono sulle interazioni tra i microrganismi del suolo e le piante, modificano la funzionalità dei suoli e, insieme agli incrementi delle concentrazioni di anidride carbonica e delle deposizioni di nutrienti, promuovono lo sviluppo e la cattura di carbonio, soprattutto da parte delle specie invasive a rapido accrescimento. Tuttavia, è stato rilevato che nelle faggete degli Appennini la siccità estiva riduce considerevolmente la produzione di nuova biomassa, mentre il maggior tasso di degradazione della materia organica del suolo ad opera dei microrganismi sta aumentando le emissioni di anidride carbonica. Sulla base di dati genetici e fisiologici sono previsti un progressivo innalzamento del limite meridionale e una frammentazione delle faggete italiane.

In oltre 300 montagne europee le specie vegetali più termofile stanno migrando verso l'alto. Osservazioni dirette e da satellite hanno messo in evidenza minime modificazioni nelle comunità della fascia nivale e un incremento della copertura vegetale soprattutto nella fascia situata subito sopra la linea degli alberi. Negli ultimi 30 anni, in questa fascia si sono insediate mediamente 5 nuove specie ogni 10 anni, mentre tra il 1957 e il 1966 il tasso di colonizzazione era 5 volte inferiore.

L'accelerazione delle migrazioni verso l'alto è dovuta soprattutto all'aumento delle temperature medie e il conseguente incremento di biodiversità potrebbe essere solo temporaneo perché, trattandosi di piante più grandi, con foglie di maggiori dimensioni e meglio adattate alle nuove condizioni climatiche ed ambientali, in futuro potrebbero soppiantare le specie alpine endemiche. Generalmente, infatti, queste ultime sono piante a lenta crescita, con popolazioni circoscritte in piccoli habitat e con scarsa capacità di dispersione dei propaguli. Anche se la biodiversità dell'ecosistema misurata con il numero delle specie non cambia perché le specie che scompaiono vengono sostituite da quelle opportuniste, la perdita del patrimonio genetico delle specie endemiche costituisce un grave danno per la biodiversità dei biomi terrestri.

I rischi appaiono nettamente più elevati nelle montagne geograficamente

isolate dove le specie che crescono nelle zone sommitali non possono colonizzare areali a quote maggiori. In Italia centrale, per esempio, il Monte Amiata (1738 m d'altezza) rappresenta una vera e propria "isola orografica" e la sua vegetazione costituisce un'enclave di specie europee nella regione mediterranea. Alcune popolazioni relitte di piante sono in un precario stato di conservazione e, dopo la recente scomparsa di *Ribes multiflorum, Eriophorum latifolium* e *Vaccinium myrtillus*, i cambiamenti climatici potrebbero determinare la scomparsa anche di altre specie e modificare l'areale di distribuzione dei boschi di faggi e castagni. I cambiamenti climatici potrebbero mettere a rischio anche l'acquifero presente sotto i materiali vulcanici del Monte Amiata, che fornisce acqua potabile a migliaia di persone. Negli ultimi due decenni, infatti, le precipitazioni nevose e la persistenza del manto nevoso sono diminuiti considerevolmente, mettendo a rischio questa importante risorsa.

6.3 Gli ecosistemi coltivati e gli ambienti urbani

Come gli ecosistemi forestali, anche la filiera agroalimentare con l'uso intensivo dei combustibili fossili, l'allevamento animale e la risicoltura è legata da relazioni causa-effetto ai cambiamenti climatici. Si stima che le attività agricole e zootecniche immettano ogni anno in atmosfera quantità di composti dell'azoto, di metano e di anidride carbonica pari a circa il 33% delle emissioni globali e, secondo i più recenti rapporti dell'IPCC, concorrano ad aumentare i rischi della carenza di cibo per molte popolazioni.

Essenzialmente, l'impatto dei cambiamenti climatici sulle produzioni agricole può essere stimato mediante l'approccio ricardiano (stima della produzione agricola misurata in termini monetari, sulla base della medie annue della temperatura, delle precipitazioni e delle concentrazioni di anidride carbonica) oppure mediante modelli *crop* (costruiti su *database* con dati tra loro compatibili e relativi a siti agricoli con diverse caratteristiche climatiche, di precipitazioni atmosferiche e radiazione solare). Se testati su differenti scenari di cambiamento climatico, i modelli forniscono risultati piuttosto coerenti e –a parità di superficie coltivata– stimano, almeno inizialmente, un incremento delle produzioni solo nei paesi situati a latitudini più elevate, come quelli scandinavi. Nel bacino del Mediterraneo e nelle regioni tropicali, invece, è prevista una riduzione della disponibilità di risorse idriche, della quantità e qualità dei raccolti di grano, riso e mais. Infatti, in molte aree semi-aride questi cereali sono vicini ai limiti di tollerabilità delle temperature e ulteriori incrementi anche di solo 1,5-2°C potrebbero avere effetti macroscopici.

In Europa, nell'ultimo secolo, le temperature medie sono aumentate di circa 1°C e i massimi incrementi sono stati registrati nei paesi orientali per le temperature invernali e in quelli meridionali e occidentali per quelle estive. Secondo

la maggior parte delle proiezioni, la regione mediterranea sarà quella maggiormente interessata da ondate di calore estive. Nonostante la loro variabilità, le precipitazioni atmosferiche mostrano un trend in crescita nell'Europa centro-settentrionale e una diminuzione di circa l'1-2% ogni decennio nei paesi meridionali (EEA, 2021). Tra le regioni agricole europee, quella che si affaccia sul bacino del Mediterraneo ha la maggiore diversificazione delle produzioni (olio, vino, ortaggi, cereali e frutta) e lo stress termico e la ridotta disponibilità di acqua potrebbero ridurre l'efficienza fotosintetica e il periodo di crescita delle piante. Il loro sviluppo accelerato potrebbe avere conseguenze negative sulle quantità dei raccolti e anche sulla loro qualità come, ad esempio, un minor contenuto di proteine nei semi e nel foraggio.

Probabilmente, oltre alle perdite dovute alla siccità, aumenteranno anche quelle causate da gelate tardive e/o dalla maggiore frequenza di fenomeni meteorologici particolarmente intensi. Nonostante stia diminuendo la disponibilità di risorse idriche, per ridurre gli effetti dell'eccessiva evapotraspirazione sarà necessario un maggior ricorso all'irrigazione. Tuttavia in molte zone costiere, le ridotte precipitazioni atmosferiche, la cementificazione del territorio e l'eccessivo prelievo delle acque di falda stanno già determinando la penetrazione del "cuneo salino" e la progressiva salinizzazione dei suoli.

Con gli inverni più miti molti patogeni e i loro vettori potranno sopravvivere, completare un maggior numero di cicli riproduttivi ed espandersi verso nord e/o a quote più elevate. Da diversi anni questo tipo di espansione sta interessando anche le coltivazioni di frumento, mais, soia, girasole, colza e molte colture perenni come quelle della vite e dell'ulivo. Già oggi, in provincia di Sondrio (46°N), la coltivazione dell'ulivo si estende su una superficie di circa 100 ettari, fino a quote di 600-700 m; oltre il 50% della produzione nazionale di grano duro e pomodori, una volta prerogativa dell'Italia peninsulare e insulare, si realizza nella Pianura Padana.

Comunque, non è facile fare delle previsioni sul futuro delle coltivazioni e dei raccolti nel nostro Paese. Probabilmente, la coltivazione del mais e della soia sarà svantaggiata, mentre l'incremento delle concentrazioni di anidride carbonica potrebbe favorire, almeno per un po', quella di frumento, riso e di molti tuberi e radici (Damilano, 2022). In ogni caso, poiché l'agricoltura contribuisce alle emissioni di gas serra e al cambiamento climatico, e nel contempo ne subisce gli impatti negativi sia in termini di produttività che di sicurezza alimentare, è necessario mettere in atto delle strategie di mitigazione e di adattamento, riducendo le emissioni di gas serra e adottando nuovi metodi colturali e nuove varietà di piante.

Anche gli ambienti urbani sono particolarmente esposti agli effetti dei cambiamenti climatici. La maggior parte della popolazione mondiale vive nelle città ed è qui che l'aumentata frequenza di piogge e venti particolarmente intensi, di ondate di calore e trombe d'aria stanno provocando il maggior numero di vittime e di danni. Secondo un recente rapporto del Centro Euro-Mediterraneo sui cambiamenti climatici, le aree urbane italiane sono tra quelle più minacciate da ondate di calore e alluvioni. Nonostante l'inquinamento atmo-

sferico riduca in molti agglomerati urbani l'incidenza della radiazione solare, le temperature delle città sono sempre 4-6°C più alte ("isole di calore") di quelle nelle aree extraurbane. Dal 2014, nelle principali città italiane, le temperature medie sono aumentate di quasi 1°C e quelle notturne in estate quasi mai scendono sotto i 20°C, contribuendo ad un maggior tasso di mortalità nella popolazione anziana.

Nell'ultimo decennio, precipitazioni brevi ma intense hanno provocato un crescente numero di esondazioni e allagamenti: oltre 30 eventi a Roma, 26 a Milano, 14 a Genova, 12 a Napoli e Palermo (Causone, 2019). A causa dell'impermeabilizzazione delle superfici urbane, la pioggia scorre via velocemente determinando un minor raffreddamento rispetto agli ambienti naturali e la rapida evaporazione dell'acqua riduce l'umidità ambientale. Le condizioni microclimatiche delle città si avvicinano a quelle dei deserti e certamente, insieme all'inquinamento atmosferico, contribuiscono a determinare condizioni di stress negli alberi riducendo la loro capacità di contrastare le aggressioni da parte di agenti patogeni. Negli ultimi anni, in molte città si stanno manifestando morìe di olmi, platani, palme e pini. Spesso –come nel caso della *Xylella fastidiosa*, che sta decimando gli ulivi della Puglia– è l'uomo che accidentalmente trasporta materiale infetto nelle aree urbane indenni.

Le città sono responsabili di oltre il 60% delle emissioni di gas serra, e tra i vari interventi di mitigazione, oltre a quelli sul patrimonio edilizio e la mobilità, occorrerà investire anche sul verde urbano. La scelta delle specie autoctone da utilizzare non sarà facile: queste, infatti, dovrebbero essere in grado di resistere alle particolari condizioni climatiche e ambientali dell'ambiente urbano, alle infezioni e non dovrebbero produrre pollini allergenici e/o composti organici volatili, che in estate contribuiscono alla formazione dell'ozono troposferico (Ferrini, 2009).

6.4 L'impatto del sistema agroalimentare sul clima e sull'ambiente non è sostenibile

I problemi connessi ai cambiamenti climatici vanno affrontati sia riducendo drasticamente le emissioni di gas serra sia adottando adeguate strategie di adattamento per ridurre/minimizzare gli impatti. Nel caso degli ecosistemi forestali le principali strategie di mitigazione consistono nell'impedire la deforestazione e gli incendi e nel rimboschire le aree marginali, quelle degradate dal pascolo, dalle discariche e dagli incendi. Mediante adeguati sistemi di finanziamento e incentivi vanno sviluppati e promossi programmi per il ripristino e la gestione degli ecosistemi forestali, in modo da renderli meno suscettibili agli incrementi di temperatura e agli eventi atmosferici estremi e, nel contempo, aumentare la loro capacità di immagazzinare il carbonio (Legambiente, 2021).

Anche il settore agroalimentare necessita di profonde trasformazioni per ridurre le emissioni di gas serra, il consumo di acqua e per garantire il cibo ad una popolazione mondiale in continuo aumento. A questo riguardo è necessario considerare che, insieme agli oceani e alla biomassa vegetale, il suolo costituisce il principale serbatoio di carbonio della Terra e fornisce la maggior parte degli alimenti all'umanità. A causa dell'eccessivo sfruttamento per le colture intensive e il pascolo e a causa degli incendi e di eventi meteorologici estremi, molti suoli hanno un contenuto di materia organica insufficiente e vanno incontro a erosione, degrado e progressiva desertificazione (Romano, 2020). Negli ultimi 50 anni questi processi hanno interessato circa 2 miliardi di ha di suolo agricolo (cioè un'area maggiore di quella attualmente coltivata) e circa 8 milioni di ha di suolo sono stati persi definitivamente a causa di errate pratiche colturali, dell'espansione dei centri abitati, commerciali e industriali e delle attività minerarie, o per la costruzione di strade, discariche ed altre infrastrutture.

Nel corso dei secoli l'uomo aveva imparato a gestire il suolo in modo sostenibile; il progressivo abbandono delle tradizionali tecniche di coltivazione e di allevamento del bestiame è una delle principali cause della perdita di suolo e del dissesto idrogeologico. Per recuperare la biodiversità e la funzionalità dei suoli è opportuno tornare alla rotazione delle colture che, riducendo le lavorazioni del terreno, limita anche l'ossidazione della materia organica e favorisce la conservazione delle comunità biotiche del suolo (TuttoGreen, 2020).

In passato, la presenza in campagna di case coloniche con piccoli allevamenti di animali assicurava lo spandimento di letame e un completo riciclo delle biomasse senza produzione di rifiuti. Oggi, molti piccoli appezzamenti di terreno con siepi e terrazzamenti sono stati modificati per realizzare colture estensive, generalmente basate sull'impiego di grandi macchine agricole, carburanti, fertilizzanti, pesticidi e diserbanti. I piccoli allevamenti di bestiame, un tempo distribuiti sul territorio, sono stati sostituiti da grandi impianti con centinaia di capi, spesso concentrati nella stessa area. Tutto ciò ha contribuito ad aumentare la produzione di alimenti ma non la loro qualità; ha determinato perdita di biodiversità, degrado dei suoli e una crescente dipendenza della produzione di cibo dall'acqua e da risorse non rinnovabili come il petrolio. Applicando i concetti produttivi dell'industria alle attività agricole e zootecniche sono aumentati la produzione di rifiuti, l'inquinamento ambientale e il rapporto tra *input* esterni di energia e le calorie fornite dagli alimenti. Per arricchire il suolo di materia organica sarebbe opportuno lasciare sul terreno gli scarti delle colture, riciclare le biomasse e, ove possibile, ricorrere all'interramento di compost o *biochar*. Quest'ultimo viene ottenuto per pirolisi di biomasse di origine animale e vegetale e, se impiegato come ammendante del suolo, ne migliora la struttura, la capacità di scambio cationico e la biomassa microbica.

Anche il confezionamento, la conservazione e il trasporto di derrate alimentari –talvolta da un continente all'altro– hanno contribuito ad aumentare in misura esponenziale gli *input* energetici. Come consumatori, è necessario adottare comportamenti tali da ridurre lo spreco di risorse non rinnovabili e dell'acqua. Anche in questo caso si tratta di recuperare molte delle buone abi-

tudini del passato rispettando la stagionalità dei prodotti, la filiera corta e una dieta basata soprattutto su alimenti di origine vegetale. Ad esempio negli anni '50, soprattutto nella Pianura Padana, si produceva una quantità di mais che era circa un quarto di quella odierna e la maggior parte della produzione era destinata all'alimentazione umana. Da molti anni solo una minima frazione del raccolto totale non è usata come mangime per gli animali, sprecando così quasi 10 porzioni di alimenti per ottenerne solo una di carne, spesso prodotta in allevamenti intensivi, con l'impiego di integratori alimentari e farmaci.

Dal primo rapporto dell'IPCC del 1990, la produzione globale di carne, latte e uova è aumentata di circa 500 milioni di tonnellate e con questo tasso di crescita l'allevamento animale contribuirà sempre più all'effetto serra, all'inquinamento dei suoli, delle acque superficiali e di falda e alla diffusione dell'antibiotico-resistenza. Recenti ricerche condotte sui denti degli orsi bruni nel nord della Svezia, dimostrano che batteri antibiotico-resistenti erano presenti nel loro microbiota orale sin dalla introduzione di questi farmaci nel 1951. È necessario acquisire la consapevolezza che le attuali modalità di produzione degli alimenti non sono né ecologicamente né ambientalmente sostenibili e ledono il diritto fondamentale ai beni comuni essenziali (Romano, 2018).

L'uso di fertilizzanti azotati, la zootecnia e la coltivazione del riso comportano ogni anno l'emissione di alcuni miliardi di t di protossido di azoto e metano e questi gas serra hanno un potere riscaldante l'atmosfera nettamente superiore (da 80 a 300 volte) a quello dell'anidride carbonica. La produzione di cibo genera così tanti gas serra che, al ritmo attuale, anche riducendo a zero tutte le altre emissioni, sarebbe impossibile limitare l'incremento di temperatura a 1,5 °C. Il 30-50% delle emissioni è dovuto all'alimentazione degli animali e secondo la EAT-*Lancet Commission on Food, Planet and Health*, una dieta che tenga conto delle emissioni di carbonio, della perdita di biodiversità, del consumo di acqua dolce, terra, azoto e fosforo, dovrebbe essere costituita soprattutto da vegetali e solo occasionalmente da carne e pesce (Valesini, 2019).

Occorre inoltre ridurre l'uso dei pesticidi, che danneggiano gli insetti impollinatori. In passato, i nutrienti del suolo venivano reintegrati, almeno parzialmente, con il letame, con colture di copertura e intercalari e con il sovescio (la coltivazione e l'interramento di leguminose che, grazie ai batteri simbionti, immagazzinano l'azoto atmosferico). Per ridurre le lavorazioni e le emissioni di anidride carbonica bisognerebbe incentivare la ricerca volta a ottenere piante perenni a partire dalle attuali specie annuali (cereali, foraggere e piante oleaginose come il girasole).

Per la produzione di alimenti, mangimi e biocombustibili, bisognerebbe selezionare colture arboree in grado di sostituire, almeno parzialmente, i cereali che forniscono amido, proteine e oli. In passato, ai bordi e all'interno dei campi erano presenti molti più alberi; basti pensare ad esempio, alla coltivazione della vite "maritata". Questa tecnica fu introdotta dagli Etruschi e consiste nel far crescere la vite aggrappata a un albero da frutto o a pioppi, aceri e olmi. In questo modo si risparmia l'uso di pali e altre infrastrutture, la vite è molto più arieggiata e meno soggetta alla proliferazione di muffe o altre infestanti; si pos-

sono inoltre ottenere altri frutti, legname, protezione dal vento e lo stoccaggio di importanti quantità di carbonio.

La produzione e la commercializzazione su vasta scala di varietà vegetali e razze animali migliorate ha determinato la concentrazione a livello internazionale dei fornitori di sementi e di animali e ha contribuito alla scomparsa dei sistemi agricoli tradizionali e di molte varietà locali. Quest'ultime sono perfettamente adattate al tipo di suolo, al microclima e alle infestazioni presenti in un determinato territorio, sono fortemente eterozigoti ed hanno una base genetica molto ampia.

La perdita dei geni presenti nelle razze territoriali e la dipendenza da poche varietà selezionate aumentano la fragilità del sistema agroalimentare e riducono le possibilità di futuri miglioramenti genetici. L'agricoltura intensiva ha favorito i produttori di sementi selezionate, pesticidi, erbicidi, fertilizzanti e di macchine agricole e gli interessi di coloro che potevano realizzare coltivazioni su larga scala, mentre ha emarginato molti piccoli coltivatori. Ne è derivato un massiccio sviluppo di molti centri urbani. Anche l'introduzione degli Organismi Geneticamente Modificati (OGM) contribuisce alla perdita di biodiversità e alla dipendenza dell'agricoltura tradizionale da aziende che investono in ricerca e vendono sementi selezionate (Buiatti, 2017). Secondo la FAO, le risorse genetiche sono patrimonio comune e indivisibile dell'umanità, ma l'attuale economia globalizzata non riconosce il diritto fondamentale a beni comuni essenziali come la salute, l'acqua e il cibo e le nuove varietà colturali sono protette da brevetto come molti farmaci. È pur vero che l'agricoltura intensiva consente di ottenere maggiori raccolti rispetto ai sistemi agricoli tradizionali e che in Europa, nonostante l'incremento della popolazione, le superfici coltivate sono inferiori a quelle del passato. Ciononostante, sebbene molte delle aree agricole abbandonate siano state progressivamente sostituite da pascoli e boschi, su scala globale, le emissioni di gas serra sono aumentate e il consumo di risorse naturali non rinnovabili da parte dei metodi intensivi di coltivazione e di allevamento è diventato assolutamente insostenibile.

Occorre adottare metodi colturali che facciano un minor uso di energia ausiliaria e acqua, più rispettosi della biodiversità e della conservazione del suolo e del benessere degli animali, evitando l'uso d'integratori e tecniche di forzatura della crescita. Le rese dell'agricoltura organica o biologica sono inferiori del 20-40% rispetto a quelle dell'agricoltura intensiva e anche i prezzi dei prodotti sono leggermente superiori, ma i consumatori dovrebbero preferirli perché hanno minori ricadute sul clima, sull'ambiente e sulla nostra salute.

La carenza/mancanza di cibo per le popolazioni più povere dipende solo parzialmente dalla insufficiente produzione di derrate alimentari: nel mondo ci sono quasi 2 miliardi di obesi e ogni anno nei campi e nella filiera alimentare vengono sprecate o smaltite come rifiuto circa 300 milioni di t di alimenti. In Italia, per esempio, si stima che quasi la metà delle produzioni ortofrutticole resti nei campi e lo spreco complessivo (industrie alimentari, punti vendita, luoghi di ristorazione e famiglie) si aggiri sui 20 milioni di t all'anno.

Gran parte di ciò che viene buttato per mancanza di mercato, per prossimi-

tà alla data di scadenza o a causa del danneggiamento delle confezioni, potrebbe essere recuperato risparmiando il consumo di risorse naturali e le emissioni di gas serra (FAO/UNEP, 2021). Come consumatori, dovremmo acquistare ciò che effettivamente ci serve, valutando come e dove è stato prodotto, senza dimenticare che per ogni caloria fornita da prodotti importati da paesi lontani ne vengono consumate da 50 a 100 solo per il trasporto e la conservazione.

Altro aspetto insostenibile degli attuali modelli sviluppo è la produzione di energia elettrica e biocarburanti da colture alimentari. È vero che i biocarburanti contribuiscono a ridurre le emissioni di anidride carbonica da combustibili fossili, ma non bisogna produrre biodiesel da piante oleaginose come soia, palma e girasole o bio-etanolo da mais, canna da zucchero e frumento. L'uso di prodotti alimentari per scopi energetici, infatti, ha ridotto l'accesso al cibo per le popolazioni più povere aumentando le sperequazioni socio-economiche, i conflitti sociali e i flussi migratori. La distruzione di parte delle foreste tropicali a elevata biodiversità dell'Indonesia e della Malesia per la produzione dell'olio di palma si sta estendendo anche in Africa, America centro-meridionale e nei Caraibi. I biocarburanti vanno prodotti solo con rifiuti urbani, con le alghe, o con i residui di lavorazioni agricole e forestali o dell'industria agroalimentare (Sassi, 2015).

Bibliografia e letture consigliate

Bardgett R.D., van der Putten W.H., 2014. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, **515**: 505-511.

Basso F., 2014. *Impatto dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi agrari e forestali*. Editrice Ermes, Potenza.

Bellucci V., Piotto B., Silli V., (a cura di) 2021. *Piante e insetti impollinatori: un'alleanza per la biodiversità*. ISPRA, Serie Rapporti, 350/2021.

Bonora P., 2015. *Fermiamo il consumo di suolo. Il territorio tra speculazione, incuria e degrado*. Il Mulino, Bologna.

Brealey J.C., Leitäo H.G., Hofstede, T., *et al*., 2021. The oral microbiota of wild bears in Sweden reflects the history of antibiotic use by humans. *Current Biology*, **31**: 4650-4658.

Bressanini D., Mautino, B., 2016. *Contro natura. Dagli "OGM" al "bio", falsi allarmi e verità nascoste del cibo che portiamo in tavola*. Rizzoli, Milano.

Camerini G., 2018. Consumo di suolo, urbanizzazione e perdita di biodiversità. *Biologia Ambientale*, **32**(1): 1-15.

Caporali F., Campiglia E., Mancinelli R., 2010. *Agroecologia*. Città Studi, Milano.

Carlsson-Kanayama AS., Ekström M. P., Shanahan H., 2003. Food and life cycle energy inputs: consequences of diet and ways to increase efficiency. *Ecological Economics*, **16**: 1-15.

Carrada G., Frizza C., (a cura di) 2021. *Transizione ecologica aperta. Dove va l'ambiente italiano?* ISPRA, Roma.

Casa R., (a cura di) 2017. *Agricoltura di precisione. Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali*. Edagricole, Bologna.

F.A.O., 2019. *Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management*. Food and Agriculture Organization of the Unite Nations, Roma.

F.A.O., 2022. *The role of genetic resources for food and agriculture in adaptation of climate change*.

Food and Agriculture Organization of the Unite Nations, Roma.
Gold M., 1999. *Sustainable agriculture: definitions and terms*. National Agricultural Library, USDA, Beltsville.
Munafò M., (a cura di) 2019. *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici*. Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, SNPA 08/19, Roma.
Perini L., Sabbi A., Salvati L., *et al*., 2014. *Il degrado dei suoli e del paesaggio in Italia*. Patron, Bologna.
Pimentel D., Pimentel M., 2008. *Food, energy and society*. CRC Press, Boca Raton.
Porter J.R., Xie L., Challinor A.J., 2014. Food security and food production system. In: *Climate change 2014: impact, adaptation, and vulnerability*. IPCC Report, Cambridge University Press, Cambridge.
Sample V.A., Bixler R.P., Miller C., (eds.) 2016. *Forest conservation in the Anthropocene: science, policy, and practice*. University Press of Colorado, Boulder.
Selvi F., 1997. Rare plants on Mt. Amiata, Italy: vulnerability to extinction on an ecological «island». *Biological Conservation*, **81**(3): 257-266.
Stolte J., Tesfai M., Øygarden L., *et al*., 2016. *Soil threats in Europe: status, methods, drivers and effects on ecosystem services*. JRC Report, Luxemburg
Tagliapietra D., Magni P., Basset A., *et al*., 2014. Ecosistemi costieri di transizione: trasformazioni recenti, pressioni antropiche dirette e possibili impatti del cambiamento climatico. *Biologia Ambientale,* **28**(2): 101-112.
Trigila A., Iadanza C., Bussettini M., *et al.,* 2018. *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio*. ISPRA Rapporti 287/2018, Roma.
Vieri S., 2020. *Agricoltura e sostenibilità. Dall'equilibrio al conflitto*. Libreria Universitaria, Milano.
Wall D.H., Nielsen U.N., Six J., 2015. Soil biodiversity and human health. *Nature,* **528**: 69-76.
Willett W., Harvard, M.D., (eds.) 2019. *Food planet health.* EAT-Lancet Commission on Healthy Diet from Sustainable Food Systems.

Link di approfondimento

https://www.ars.usda.gov/
https://www.agroecology-europe.org
https://annuario.isprambiente.it
https://www.fao.org
https://www.eea.europa.eu/themes/soil
http://www.forestry.gov.uk/treealert
https://www.isprambiente.gov.it
https://www.iuss.org/
http://www.lter-europe.net
http://www.lteritalia.it
https://scienzadelsuolo.org/
http://www.thelancet.com/commissions/EAT
https://unfccc.int

Capitolo 7

Come rilevare le risposte dei bioindicatori del cambiamento climatico

7.1 La fenologia delle piante

Il ciclo vitale di ogni pianta è caratterizzato da un susseguirsi di eventi (fasi fenologiche) osservabili visivamente, come la comparsa delle gemme e delle foglie, la fioritura, la maturazione dei frutti e la caduta delle foglie.

Negli ultimi anni sempre più spesso le mimose sono già sfiorite quando arriva l'8 marzo e il biancospino, il sambuco o il sanguinello sono già in fase vegetativa a gennaio. Che sta succedendo? In ogni specie, la sequenza delle fasi fenologiche è predeterminata geneticamente e il loro manifestarsi dipende da fattori come l'entità del freddo invernale, la lunghezza del giorno rispetto a quella della notte (fotoperiodo), la temperatura, la disponibilità di acqua e nutrienti.

Le specie sensibili al fotoperiodo, come molti alberi delle nostre foreste, hanno lunghi cicli vitali perché sono maggiormente protetti da eventuali gelate tardive e da altri fenomeni meteorologici avversi. Faggi e querce trapiantati nelle regioni subtropicali mantengono il controllo genetico della ripresa del ciclo vegetativo a marzo e, se non compariranno nuovi genotipi di queste specie, è presumibile che i cambiamenti climatici avranno un minore impatto sulla loro fenologia. Le maggiori variazioni delle fenofasi interessano soprattutto le piante con ciclo vitale più breve e insensibili al fotoperiodo, come pioppi, ciliegi, cornioli, azalee, lillà e molte altre specie ornamentali provenienti dalle regioni più calde.

Leonardo da Vinci rilevò che lo spessore degli anelli di accrescimento nel tronco degli alberi può fornire informazioni sulle precipitazioni atmosferiche durante il periodo vegetativo; ma in Cina già nell'VIII secolo a.C., per motivi religiosi, era stato realizzato un calendario sulla fioritura del pesco e in Giappone a partire dal IX secolo fu acquisita una serie ininterrotta di dati su quella del ciliegio. Anche le civiltà che fiorirono lungo le sponde del Mediterraneo hanno lasciato tracce di osservazioni fenologiche e in Borgogna la data della vendemmia del Pinot nero è stata annotata sin dal 1370. Linneo predispose un protocollo per le osservazioni fenologiche e tra il 1750 e il 1752 in Svezia furono

istituiti 18 "giardini fenologici". Tuttavia solo nel corso dell'ultimo secolo questi "osservatori" si sono definitivamente affermati come strumenti di rilevazione indiretta dell'andamento meteo-climatico (Magri *et al.*, 2022).

La conoscenza dei dati fenologici è utile in agricoltura per la gestione delle colture, i trattamenti fitosanitari e le concimazioni ed è utile in medicina per individuare il periodo di emissione dei pollini che causano manifestazioni allergiche. Per esempio il cipresso, uno degli alberi più diffusi in molte regioni italiane, generalmente fiorisce da fine gennaio a marzo/aprile ma negli ultimi anni, con temperature piuttosto miti, alcune stazioni di aerobiologia hanno registrato la presenza dei suoi pollini allergenici sin dalla fine di dicembre.

La rilevazione delle relazioni tra le fasi fenologiche di piante coltivate o spontanee e il clima è una procedura standardizzata e accessibile a tutti e consente di constatare in prima persona gli effetti del mutare delle stagioni e del clima nel nostro ambiente di vita. Sin dal 1957 è attiva in Europa una rete dei giardini fenologici internazionali (IPG) dove vengono coltivati cloni di specie indicatrici a diffusione continentale, nazionale e locale. Alcune stazioni di rilevamento della fitta rete presente in Germania sono attive da oltre un secolo (nel caso della fioritura del melo, per esempio, la serie ininterrotta di dati iniziò nel 1896). A Ginevra, le osservazioni sulla fogliazione su un esemplare di ippocastano iniziarono addirittura nel 1808 e la serie dei dati mostra un progressivo anticipo delle date a partire dal 1900 fino al 28 dicembre del 2002. Questa tendenza è verosimilmente dovuta al riscaldamento globale, alla progressiva cementificazione e alla bolla di calore urbano. Purtroppo l'albero oggetto delle osservazioni è morto nel 2015 e i dati rilevati successivamente in un altro esemplare sembrerebbero indicare una inversione della tendenza (per il momento di difficile interpretazione).

Anche in Italia, negli ultimi decenni, sono stati istituiti alcuni giardini fenologici per rilevare le variazioni nelle fasi fenologiche di molte specie di interesse agronomico come la vite e l'olivo, ma anche di altre piante come sambuco, robinia, ligustro, nocciolo, biancospino, corniolo e salice (ReteRurale). La metodologia di monitoraggio è standardizzata e si basa sull'uso di chiavi interpretative internazionali (BBCH), dove ogni stadio di sviluppo fenologico principale e secondario viene indicato con un numero ed è definito con un codice di 2 cifre. Per la comparabilità dei risultati è necessaria la corretta rilevazione delle fenofasi e a questo scopo è utile l'impiego di manuali con immagini fotografiche. Come nel caso dei bioindicatori degli inquinanti atmosferici, nell'interpretare i dati fenologici è necessario ricordare che negli esemplari di una stessa specie presenti nella stessa stazione le risposte sono influenzate anche da differenze genetiche, di età o da malattie e altri fattori di stress. Quindi occorre rilevare con cadenza settimanale o decadale i dati medi su un numero rappresentativo di esemplari della specie (legnosa o erbacea) considerata.

Il numero e il tipo di specie vegetali da prendere in considerazione dipende dagli obiettivi del monitoraggio: per valutazioni di lungo termine vanno preferite specie perenni e longeve, ben conosciute dal punto di vista fenologico, mentre per la rilevazione di fluttuazioni periodiche dell'andamento meteorologico

si possono usare specie spontanee o d'interesse economico, possibilmente tra quelle presenti nei giardini fenologici e per le quali siano disponibili serie storiche di dati. La scelta delle specie può condizionare anche quella delle fenofasi da rilevare; nel caso della fioritura per esempio, alcune piante la compiono simultaneamente e per brevi periodi, mentre altre hanno una fioritura prolungata (es. molte specie erbacee e il sambuco) o estesa a quasi tutta la stagione vegetativa (es. il trifoglio o la parietaria). In questi ultimi casi sarà opportuno rilevare non la presenza dei fiori, ma il primo fiore o la prima foglia.

Lo scopo del monitoraggio fenologico è quello di osservare il comportamento naturale delle piante: occorre quindi limitare le cure colturali e acquisire i dati meteorologici (precipitazioni, temperatura e umidità), eventualmente facendo riferimento a quelli di una stazione meteorologica vicina. I dati possono essere riportati in una scheda di rilevamento come quella elaborata dal Gruppo di Lavoro per i Giardini Fenologici Italiani (Phenagri; Mandrioli, 1993). Le osservazioni di lungo termine richiedono notevoli impieghi di risorse e, come nel caso degli altri monitoraggi, anche per quello fenologico è importante il coinvolgimento dei cittadini per mantenere/ampliare le reti di biorilevamento. In Svizzera, per esempio, l'oneroso mantenimento della rete nazionale è in costante diminuzione; i dati acquisiti con progetti di *citizen science* come "*OpenNature*" (un portale gestito dall'Università di Berna) e "*PhaenoNet*" (che unisce il mondo della scuola e quello della ricerca), se confrontati con quelli di MeteoSvizzera, si sono dimostrati utili e di buona qualità (Lehmann *et al.*, 2018).

7.2. La fenologia degli animali

Come le piante, molte specie animali stanno ampliando il loro areale verso nord o a quote più elevate e, sebbene la loro fenologia sia più variabile di quella delle piante, molte specie stanno anticipando la ripresa delle attività dopo il letargo invernale, le fasi primaverili della riproduzione o quelle delle migrazioni. Queste variazioni delle fasi fenologiche possono alterare il sincronismo con la disponibilità di risorse alimentari e contribuire al declino delle popolazioni. Gli insetti giocano un ruolo fondamentale nelle catene trofiche terrestri e sono particolarmente esposti agli effetti dei cambiamenti climatici perché il loro ciclo vitale e il tasso di sopravvivenza dipendono soprattutto dalla temperatura.

Sebbene sia stato descritto circa un milione di specie d'insetti, secondo le stime più recenti sulla Terra ne dovrebbero esistere oltre 5 milioni, con una distribuzione che tende a diminuire all'aumentare della latitudine o della quota. Probabilmente, il riscaldamento globale e l'impatto delle attività dell'uomo stanno determinando ogni anno l'estinzione di molte specie e favorendo nel contempo l'espansione di quelle opportuniste e con ampi areali di distribuzione, inclusi molti parassiti delle piante e degli animali (Greenreport, 2022). In

Italia, per esempio, la processionaria del pino e il coleottero *Tomicus destruens* –che aggrediscono i pini mediterranei– si stanno espandendo verso quote superiori ad aggredire le specie continentali di questi alberi e anche la mosca dell'olivo, che è limitata dal freddo nella sua espansione, con il cambiamento climatico sta progressivamente espandendo i suoi attacchi a quote e latitudini superiori (Cinquemani, 2022).

Per le loro dimensioni, la relativa facilità di riconoscimento delle specie e la disponibilità di molti dati sulla loro ecofisiologia, le farfalle sono tra i migliori biosensori delle variazioni stagionali delle condizioni meteo-climatiche. In Italia ci sono quasi 300 specie di farfalle diurne distribuite in tutti gli ambienti terrestri fino a quote superiori ai 2500 m e, come accade nel resto d'Europa, molte popolazioni sono in forte declino. Anche per le farfalle le principali minacce sono rappresentate dalla trasformazione/perdita degli habitat e dalle pratiche agronomiche, ma anche i cambiamenti climatici giocano sicuramente un ruolo non secondario.

Il fatto che negli ultimi decenni sia stato rilevato un decremento soprattutto nelle popolazioni di farfalle igrofile, specialmente nelle estati molto calde come quella del 2003, suggerisce una possibile relazione con la riduzione delle precipitazioni e la siccità estiva, una ridotta attività di volo e l'eventuale asincronia tra la presenza di femmine adulte feconde e la disponibilità di piante nutrici. Il riscaldamento globale sta favorendo l'espansione delle specie termofile e alcune di queste, provenienti dall'Africa, si stanno diffondendo in tutta Europa, mentre le specie di lepidotteri autoctoni poco mobili e che necessitano di habitat specifici sono quelle a maggior rischio di sopravvivenza (Bonelli *et al.*, 2012).

Tra i vertebrati le maggiori serie di dati fenologici disponibili sugli ecosistemi terrestri –ambienti urbani compresi– sono sicuramente quelle relative agli uccelli. La sincronia delle fasi annuali del ciclo biologico di questi animali con la fenologia delle piante, degli insetti e di altri animali rende gli uccelli sensibili a qualsiasi modificazione indotta dai cambiamenti climatici o dall'inquinamento ambientale. Come è avvenuto per molte specie di piante che dal 1971 hanno anticipato la fase vegetativa mediamente di 2 giorni ogni decennio, anche alcune specie di uccelli stanno anticipando le date di arrivo e dei processi riproduttivi. Le serie di dati trentennali raccolti dall'ISPRA dimostrano che anche il codirosso risponde al cambiamento climatico anticipando la migrazione di circa 2 giorni ogni 10 anni; mentre altre specie come la cannaiola mostrano variazioni limitate e l'usignolo e il beccafico nessuna variazione (Spina e Volponi, 2008).

In Europa la primavera arriva sempre più spesso in anticipo, tuttavia le condizioni meteorologiche all'inizio della stagione sono molto variabili e gli sbalzi di temperatura possono determinare una scarsa disponibilità degli insetti necessari per l'alimentazione dei pulcini. Infatti, tra le popolazioni di uccelli che mostrano i maggiori decrementi vi sono specie migratrici e strettamente insettivore come quelle delle rondini. Nella nostra cultura le rondini hanno sempre rappresentato un simbolo della primavera e della rinascita della natura; per raggiungere le nostre regioni attraversano lo Stretto di Gibilterra, la Penisola Iberica e la Francia e compiono una migrazione di oltre 10.000 km, mentre per il viaggio di ritorno nei siti di svernamento del Sud Sahara si spostano verso Sud pressoché in linea retta. Negli ultimi decenni il loro arrivo non coincide più

con l'inizio della primavera e secondo alcune stime le loro popolazioni sono diminuite di circa il 40% (Buoniconti, 2020).

Probabilmente, il principale impatto dei cambiamenti climatici sulla fenologia degli animali è costituito dalla perdita di sincronia tra le fasi vegetative e riproduttive delle piante con quelle dei consumatori primari e dei loro predatori. Quindi, per comprendere gli effetti sulle catene trofiche terrestri e i possibili scenari futuri, è necessario sviluppare reti di monitoraggio di lungo termine e su aree molto vaste.

Nel caso degli uccelli migratori occorre adottare strategie di monitoraggio e di tutela condivise tra paesi e continenti (vedi ad esempio, la Direttiva 2009/147 della CE). Il contributo dei cittadini è sicuramente importante e a questo scopo l'ISPRA, nodo italiano per la rete di monitoraggio europea (EURING), mette a disposizione banche dati, cura la formazione di volontari per la raccolta di dati sui parametri demografici delle popolazioni nidificanti, sulle fasi fenologiche, gli usi dell'habitat, l'ecologia della sosta e i possibili effetti del cambiamento climatico. Oltre alle principali piattaforme, come quelle di EuroBirdPortal, di ISPRAAMBIENTE e della LIPU, i cittadini e le scolaresche possono far riferimento anche ad altri siti come spring alive per rilevare l'arrivo primaverile della cicogna bianca, del cuculo, del gruccione, della rondine e del rondone o ornitho che offre l'opportunità di riportare anche i dati fenologici di libellule, anfibi, rettili e mammiferi.

Il birdwatching è particolarmente diffuso nelle aree urbane e peri-urbane, ma esistono anche progetti come quello promosso dal WWF "Agri-Nature" che, mediante il monitoraggio delle rondini e dei balestrucci, mira a valutare la qualità ambientale degli agroecosistemi, nonché alla conservazione e al ripristino dei siti di nidificazione.

7.3 La biodiversità e le specie aliene

Sebbene i "servizi" derivanti dalla biodiversità come, ad esempio, i prodotti medicinali naturali o l'impollinazione delle piante, contribuiscano in misura sostanziale al prodotto interno lordo di tutti i paesi, in generale le misure per salvaguardare la biodiversità sono assolutamente inadeguate (Barbera *et al.*, 2021). A questo riguardo, oltre a ridurre l'impatto delle attività dell'uomo, come l'eccessivo sfruttamento delle risorse naturali, la distruzione degli habitat, l'agricoltura intensiva e l'inquinamento ambientale, è necessario e urgente adottare misure per mitigare l'effetto dei cambiamenti climatici. La valutazione di questi ultimi, di solito, si basa sulla rilevazione della temperatura dell'aria, ma, per preservare la biodiversità e il funzionamento degli ecosistemi, è necessario considerare anche altri parametri come il regime delle precipitazioni, la radiazione solare, il vento, l'evapotraspirazione e l'umidità relativa.

Sebbene la biodiversità comprenda la varietà e variabilità dei viventi a livello genetico, di specie e di ecosistema, essa viene generalmente misurata contando il numero di specie presenti in un determinato ambiente. Ma, anche

trascurando la variabilità genetica intraspecifica, non siamo ancora in grado di stabilire la diversità complessiva di un ecosistema. A oggi sono state catalogate meno di 2 milioni di specie mentre, secondo alcune stime, queste potrebbero essere 12 milioni. Comunque, nonostante le incertezze, la comunità scientifica è concorde nel ritenere che le attività dell'uomo e i cambiamenti climatici stiano accelerando la perdita di specie (Manzo, 2022). Secondo le stime dell'IPBES (*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*) le specie minacciate su scala globale sono circa un milione e le attività dell'uomo avrebbero già determinato la scomparsa del 20% delle specie di organismi terrestri. Analizzando oltre 27.000 popolazioni e 4.806 specie di vertebrati, il *Living Planet Index* (prodotto annualmente dal WWF, dalla Società Zoologica di Londra e altre organizzazioni) stima che dal 1970 al 2016 le popolazioni di pesci, anfibi, rettili, uccelli e mammiferi siano diminuite del 68%. Secondo l'Unione Internazionale per la Conservazione della Natura (IUCN) le specie minacciate di estinzione sono il 41% per gli anfibi, il 26% per i mammiferi e il 14% per gli uccelli, ma è impossibile stimare la situazione in tutti gli altri gruppi di animali, delle piante e dei funghi.

Tra l'altro, le specie animali e vegetali non sono distribuite in modo omogeneo sul pianeta, ma sono più concentrate in aree di particolare stabilità e ricchezza di habitat (*hotspot* di biodiversità), dove l'evoluzione ha avuto tempo e modo di occupare un ampio *range* di nicchie. Purtroppo non conosciamo neanche lontanamente il numero di specie presenti nei principali *hotspot*, come ad esempio le foreste tropicali, dove probabilmente è ospitata quasi la metà della biodiversità terrestre. Anche il nostro Paese è considerato un *hotspot* di biodiversità per la ricchezza di specie e l'importante quota di endemismi e, come nel resto del mondo, anche in Italia vi è un marcato rischio di perdita di specie autoctone vegetali e animali, e, tra questi ultimi, soprattutto di rettili e anfibi (Rondinini *et al.*, 2014). In teoria, il cambiamento climatico potrebbe creare le condizioni favorevoli per l'espansione delle specie mediterranee dalla fascia costiera verso le zone interne della penisola, ma tale processo potrebbe essere ostacolato dalla forte antropizzazione e dalla frammentazione degli habitat.

La maggior parte dei 20 obiettivi del piano decennale delle Nazioni Unite (2010-2020) per rallentare il declino delle specie e degli ecosistemi (*Aichi Biodiversity Targets*) non è stata raggiunta ed è in corso la definizione di nuovi obiettivi per un quadro globale della biodiversità post 2020.

Studiando i fossili è stato stimato che, mentre in passato la vita media delle specie di uccelli e mammiferi era di diversi milioni o migliaia di anni, oggi questa si sarebbe ridotta considerevolmente. Secondo l'IUCN l'attuale tasso di estinzione è circa 1000 volte superiore a quello di *background* ed entro 14.000 anni la sesta estinzione di massa potrebbe assumere le proporzioni di quella verificatasi 65 milioni di anni fa e che portò alla scomparsa dei dinosauri e di 3/4 delle specie viventi.

Il maggior numero di estinzioni si verifica negli ambienti insulari e l'esempio della Nuova Zelanda aiuta a comprendere come la perdita di biodiversità alteri in maniera irrecuperabile gli ecosistemi. In Nuova Zelanda non esistevano mammiferi predatori tanto che alcuni uccelli come il kiwi (lontano parente dello struzzo) e il kakapo (parente dei pappagalli) si sono evoluti vivendo a terra, avendo perso l'attitudine al volo. Con l'arrivo dell'uomo e l'introduzione di gatti,

cani, topi e altri mammiferi, è scomparsa la metà di queste specie endemiche di uccelli e molte altre, come il kiwi e il kakapo, hanno subito un grave declino e sono ormai limitate ad alcune aree ristrette. Una perdita molto grave per la biodiversità del pianeta e della Nuova Zelanda (dove sono scomparse anche 10 specie di piante native), anche se nei nuovi ecosistemi sono presenti 24 specie di mammiferi terrestri e molte specie vegetali provenienti da altre regioni. Processi analoghi avvengono anche nelle aree continentali: in Danimarca per esempio, negli ultimi 140 anni, 50 specie di piante hanno subito una notevole riduzione del loro areale, mentre 236 specie, meno specializzate, lo hanno ampliato.

Si stima che tra il 1500 e il 1800 nel mondo vi fossero circa 7 introduzioni di specie aliene all'anno e che nel secolo scorso questo dato sia aumentato progressivamente sino a raggiungere alcune centinaia di eventi all'anno. La progressiva invasione ed espansione di specie generaliste e opportuniste, facilitata dagli scambi di merci e persone e dai cambiamenti climatici, sta accentuando l'omogeneizzazione delle specie presenti negli ambienti urbani e nei sistemi naturali, sia terrestri che acquatici.

L'introduzione deliberata o accidentale di specie aliene e invasive ha impatti diretti o indiretti sulle comunità locali e spesso questi si manifestano dopo molto tempo, quando ormai le nuove popolazioni si sono stabilite su larga scala. Oltre ad influire sulla diversità genetica, sulla ricchezza e sull'abbondanza delle specie native, le specie aliene possono modificare il ciclo dei nutrienti e dell'acqua, le reti trofiche, il funzionamento e la produttività degli ecosistemi. Come per i repertori della biodiversità, anche per le specie invasive esistono *checklist* su scala nazionale, o *database* internazionali come il CABI (*Invasive Species Compendium*) o quello della FAO sugli organismi di acqua dolce, ma per molti taxa di invertebrati, batteri e funghi, i censimenti sono ancora insufficienti. Riguardo alle piante vascolari, si stima che nel mondo circa 14.000 specie aliene abbiano colonizzato almeno una nazione. I paesi dell'emisfero settentrionale sono stati i maggiori esportatori/importatori di specie, mentre i biomi a clima mediterraneo dell'emisfero australe, come quelli del Sud Africa o dell'Australia, hanno subito i maggior impatti.

Gli insetti sono protagonisti del maggior numero d'invasioni (solo in Nord America si stimano circa 3.200 specie aliene) ma, per le piccole dimensioni e le difficoltà tassonomiche, non è facile quantificare il loro numero. Tra i vertebrati, le invasioni più studiate sono quelle degli uccelli e, secondo i dati disponibili, alcune centinaia di specie hanno colonizzato nuovi ambienti insulari e costieri come quelli della Nuova Zelanda. Specie di piante e animali vengono introdotte deliberatamente per la coltivazione, l'allevamento o come animali da compagnia; altre introduzioni sono finalizzate al controllo biologico e all'eventuale eliminazione di specie indesiderate, oppure alcune specie vengono traslocate in regioni diverse per favorirne la conservazione. Comunque la maggior parte delle introduzioni è accidentale ed è aumentata considerevolmente con la globalizzazione degli scambi di merci e persone.

In Antartide, il continente più remoto e inospitale, sono presenti molte specie endemiche con caratteristiche ecofisiologiche uniche, acquisite attraverso lunghi processi evolutivi in isolamento. Nel continente è rigorosamente vietata

l'introduzione di specie animali e vegetali ma nella Penisola Antartica, dove il clima è relativamente più mite e il riscaldamento globale sta favorendo l'espansione delle aree costiere deglaciate e lo sviluppo delle comunità biotiche terrestri, è stata rilevata la presenza di specie aliene e invasive, come la pianta erbacea *Poa annua* e alcuni invertebrati del suolo. Spore e pollini hanno sempre raggiunto il continente antartico con le masse d'aria, gli uccelli e le correnti marine, ma negli ultimi decenni, con le attività logistiche, scientifiche e turistiche, hanno assunto un ruolo rilevante le introduzioni antropiche involontarie.

In passato l'Europa ha contribuito alla diffusione di alcune tra le specie più invasive al mondo come il pino nero dall'Austria, la ginestra dei carbonai dalla Scozia, il mollusco *Arion lusitanica* dalla Spagna e lo storno dal Regno Unito; ma negli ultimi decenni, nonostante l'adesione a convenzioni internazionali come la Convenzione sulla Diversità Biologica (CBD) o quella per l'applicazione di Misure Sanitarie e Fitosanitarie (SPS), il nostro continente ha importato alcune migliaia di specie aliene.

La politica della UE per la conservazione della natura si basa soprattutto sulle Direttive Habitat (92/43/CEE) e Uccelli (2009/147/CE) e il Regolamento n° 1143 del 2014 mira a prevenire e contrastare l'introduzione e la diffusione delle specie aliene e pubblica le liste, in continuo aggiornamento, delle specie animali e vegetali di rilevanza unionale (Tricarico *et al.*, 2018; JRC Digital Media Hub; Specie Invasive). Per tali specie aliene sono vietate l'introduzione e la detenzione e gli stati membri della Comunità debbono attivare misure di sorveglianza veterinaria e fitosanitaria ai confini nazionali. Le eventuali deroghe per ricerca scientifica o attività di conservazione della biodiversità vanno condotte in strutture capaci di impedirne la fuga. Delle 483 specie incluse nell'elenco di rilevanza unionale alla data del 31 dicembre 2018, 149 (54 di piante, 49 di invertebrati, 40 di vertebrati e 6 di funghi) sono ritenute di notevole impatto per la biodiversità e gli ecosistemi.

Tra le piante, per esempio, la *Pueraria*, una liana perenne proveniente dal sud-est asiatico capace di fissare l'azoto atmosferico grazie alla presenza di batteri simbionti nell'apparato radicale, si adatta a un ampio spettro di suoli e, con temperature estive elevate e inverni miti, si accresce rapidamente fino a ricoprire la vegetazione adiacente, impedendo la penetrazione della luce. Oltre a determinare la scomparsa delle specie vegetali presenti, lo sviluppo della pueraria comporta anche modificazioni nella geochimica del suolo e nelle comunità di artropodi con diminuzione degli acari, collemboli, carabidi e formiche e un incremento dei millepiedi che si nutrono della pianta. Tra gli invertebrati, l'acaro *Varroa destructor*, ectoparassita asiatico delle api, determina gravissime perdite negli alveari e conseguenze negative per l'impollinazione delle piante, mentre tra i vertebrati di maggiore impatto si annoverano le nutrie, i ratti e il topo muschiato. Alcuni funghi patogeni sono responsabili della morte di diverse specie arboree come gli olmi e gli aceri o causano il decadimento di altre (es. faggi e querce). Il fungo *Batrachochytrium dendrobatidis*, responsabile dell'infezione e del declino degli anfibi in tutto il mondo, è stato segnalato in Italia per la prima volta nel 2002.

7.4 Il monitoraggio delle specie aliene

Misure rigorose per impedire l'ingresso di specie aliene sono state adottate solo in alcuni paesi isolati, come la Nuova Zelanda, l'Australia e l'Irlanda. Secondo l'Annuario dei Dati Ambientali ISPRA, con 3.500 specie introdotte e 3.367 stabilizzate, l'Italia è tra i principali paesi importatori dell'UE e le previsioni per i prossimi decenni sono ancora più preoccupanti. Con il D.L. n. 203 del 2017 è stato implementato il Regolamento UE n. 1143 per proteggere la biodiversità e i servizi ecosistemici e sono state adottate le misure per le specie invasive di rilevanza unionale, come l'istituzione di un adeguato sistema di sorveglianza, la rapida eradicazione delle specie invasive (laddove possibile) o gli interventi di gestione per limitarne gli impatti. Ogni 6 anni gli stati membri debbono rendicontare le attività svolte e fornire informazioni sull'efficacia delle misure adottate.

Da un recente rapporto dell'ISPRA si rileva che, delle 48 specie oggetto di rendicontazione, nel territorio italiano sono presenti 17 specie animali e 14 vegetali, spesso introdotte nell'ambiente naturale per rilasci intenzionali o fuggite da ambienti confinati. La distribuzione spaziale delle specie animali supera quella dei vegetali e la tartaruga palustre americana (*Trachemys scripta*) è presente in tutto il territorio nazionale. In generale, le regioni dell'Italia settentrionale sono quelle maggiormente interessate dalle introduzioni, ma sono anche quelle che stanno attuando un maggior numero d'interventi gestionali (del tutto assenti in 7 regioni dell'Italia centro-meridionale). Gli interventi, finanziati soprattutto con progetti LIFE, riguardano le specie aliene più diffuse come la nutria (*Myocastor coypus*), il gambero della Luisiana (*Procambarus clarkii*) e la tartaruga palustre americana, ma solo per lo scoiattolo di Pallas (*Callosciurus erythraeus*, presente nella provincia di Varese) e il calabrone asiatico (*Vespa velutina nigrithorax*) sono interessate tutte le zone di presenza.

La nutria fu introdotta in Italia negli anni '50 del secolo scorso per la produzione di pellicce (castorino) ma, quando questa attività entrò in crisi, gli animali liberati o fuggiti dagli allevamenti cominciarono a colonizzare i corsi d'acqua della Toscana e successivamente quelli delle altre regioni italiane, incluse Sicilia e Sardegna. Oltre a causare danni all'agricoltura, le nutrie scavano gallerie negli argini dei corsi d'acqua compromettendone la tenuta e favorendo le esondazioni. Anche quattro specie aliene di scoiattoli (*Callosciurus erythraeus*, o scoiattolo di Pallas; *Sciurus carolinensis*, o scoiattolo grigio nord-americano; *Sciurus niger*, o scoiattolo volpe e *Tamias sibiricus*, o scoiattolo giapponese) sono invasori molto efficaci. Questi roditori hanno un elevato tasso riproduttivo, notevole capacità di adattamento (anche negli ambienti urbani) e competono con il nostro scoiattolo rosso (*Sciurus vulgaris*) minacciandone la sopravvivenza. In inverno scortecciano i tronchi degli alberi e in primavera predano le uova e i piccoli nei nidi degli uccelli, danneggiano le coltivazioni e le linee elettriche.

Gli artropodi costituiscono la componente animale aliena più numerosa e la vespa velutina è una delle specie più temute perché cattura in volo le api e i bombi, con gravi ripercussioni sull'impollinazione delle piante e sull'apicoltura, già in forte crisi a causa dei pesticidi e della varroa (Spano, 2015). Nel 2004 il calabrone asiatico arrivò accidentalmente a Bordeaux e cominciò a diffondersi in Francia con una velocità media di circa 100 km all'anno; nel 2012 fu segnalato

in Liguria e Piemonte e, successivamente, in Lombardia, Veneto e in Toscana (provincia di Massa Carrara).

Storicamente, l'introduzione accidentale d'insetti alieni nel nostro Paese ha quasi sempre determinato gravi danni alle foreste, al settore agricolo e florovivaistico, alla salute degli animali e dell'uomo. Basti pensare all'arrivo, nel secolo scorso, di specie di origine americana come la fillossera della vite, la dorifora della patata e, più recentemente, la diabrotica del mais (un coleottero che attacca le radici delle piante); oppure all'arrivo di quelle provenienti da oriente come il punteruolo rosso delle palme, il cinipide del castagno, la minatrice fogliare dell'ippocastano, la processionaria delle querce o la cimice asiatica, che si nutre di foglie e frutti di oltre 300 specie di piante. Con l'espansione dei commerci internazionali sono aumentate le introduzioni anche di coleotteri Cerambicidi, comunemente chiamati tarli asiatici del legno, capaci di attaccare e portare a morte molte specie di alberi da frutto e da legno e arbusti ornamentali. Per questi organismi è prevista la lotta obbligatoria ma, purtroppo, molti invertebrati e microrganismi patogeni sono difficili da individuare, alcuni sono ancora sconosciuti alla comunità scientifica oppure, come nel caso dei funghi che provocano la grafiosi nell'olmo o il cancro del castagno, i loro danni cominciano a manifestarsi solo dopo molto tempo dalla loro introduzione nei nuovi ambienti.

Per attuare tempestivi interventi di eradicazione o di contenimento servono reti di sorveglianza su tutto il territorio nazionale, ma il numero di esperti capaci di riconoscere e classificare nuove specie o le specie aliene di piante, animali, funghi e batteri è limitato. Purtroppo il numero degli specialisti è destinato a ridursi ulteriormente perché gli attuali sistemi di valutazione delle pubblicazioni scientifiche, largamente basati sul numero delle citazioni, penalizza il lavoro e le aspirazioni professionali dei ricercatori che studiano la sistematica delle piante e degli animali. Quindi, per rilevamenti su vasta scala e di lungo termine, sarà sempre più necessaria la collaborazione di volontari, favorita anche dalla diffusione di apparecchi elettronici portatili e dalla disponibilità di applicazioni come EU Hub CitizenSData, Life Asap, iNatForum o *IveGot1* e *EDDMpaS* su Google Play, che consentono di raccogliere, catalogare a vagliare le informazioni e i dati raccolti.

Nel Regno Unito, i volontari dispongono di manuali con ricca documentazione fotografica per il riconoscimento delle specie infestanti (già presenti in aree localizzate o potenziali immigranti) e delle malattie a carico di alcune delle più comuni specie arboree. Chi individua nelle querce, nei frassini o negli ippocastani i tipici quadri sintomatologici d'infestazione da insetti, batteri o funghi, è tenuto ad avvertire le autorità competenti (*TreeAlert App*) per le necessarie verifiche e controlli. Nell'ambito della Convenzione Internazionale per la Protezione delle Piante (IPPC), l'*European and Mediterranean Plant Protection Organization* (EPPO) provvede allo sviluppo di linee guida per l'applicazione di misure fitosanitarie, fornisce segnalazioni sulla comparsa di focolai di nuovi agenti parassitari e, sulla base delle conoscenze scientifiche disponibili, svolge analisi di rischio sul possibile arrivo di nuovi organismi nocivi.

In Italia –oltre alla sorveglianza delle malattie per le quali è espressamente prevista la lotta obbligatoria, come il cancro colorato del platano, la processionaria del pino, il cinipide galligeno del castagno o il cerambicide dalle lunghe antenne– sono attivi diversi progetti di *citizen science* per coinvolgere i cittadi-

ni nella rilevazione della perdita di biodiversità e nella diffusione delle specie aliene. La Regione Lazio, per esempio, nell'ambito del progetto CSMON-LIFE, ha pubblicato un manuale per il monitoraggio delle specie aliene, con schede descrittive delle specie più pericolose già presenti o che potrebbero arrivare nel territorio. Grazie alla collaborazione dei volontari, alcuni interventi vengono realizzati senza spese da parte delle amministrazioni pubbliche. In Piemonte, per esempio, il controllo della pianta dei pappagalli (*Asclepias syriaca*) è stato eseguito con il supporto dei pastori, mentre apicoltori e volontari di Piemonte, Liguria, Toscana e Veneto hanno contribuito al monitoraggio e agli interventi per limitare la diffusione della *Vespa velutina nigritorax* (Stop Vespa velutina; Stop vespa asiatica; Interreg ALIEM).

La nostra salute è minacciata soprattutto dalla diffusione di insetti alieni quali la zanzara tigre e altre specie di zanzare, vettori di agenti patogeni che possono causare malattie gravi come la malaria, la dengue e la febbre gialla. Nel caso del calabrone asiatico e di altri Imenotteri e Lepidotteri, non è escluso che loro puntura possa causare reazioni allergiche, anche con esiti mortali. I peli urticanti della processionaria, per esempio, contengono una tossina che determina danni piuttosto gravi sia per contatto che per inalazione. Anche alcune specie vegetali aliene sono da sorvegliare per il possibile impatto sulla salute umana. Il panace di Mantegazza (*Heracleum mantegazzianum*), per esempio, è presente in sette regioni dell'Italia settentrionale e con l'esposizione al sole la sua linfa determina tossicità cutanea e oculare. Nei centri abitati delle stesse regioni cresce anche *Ambrosia artemisiifolia*, una pianta che produce polline di piccole dimensioni responsabile di allergie e di sensibilizzazione nei confronti di altri pollini.

Bibliografia e letture consigliate

Aono Y., Saito S., Kazui K., 2010. Kyoto, Japan 1,200 year cherry flowering date and March temperature reconstructions. *International Journal of Biometeorology,* **54**(2): 211-219.

Azzoni R., 2015. Black list di specie esotiche invasive: un percorso interrotto. *Biologia Ambientale,* **29**(1): 57-61.

Azzoni R., 2018. Riflessioni sul monitoraggio e sulla valutazione della biodiversità in ambito VIA. *Biologia Ambientale,* **32**: 61-66.

Bellucci V., Piotto B., Silli V. (a cura di) 2021. *Piante e insetti impollinatori: un'alleanza per la biodiversità*. ISPRA, Serie Rapporti, 350/2021.

Borin, M., Bigon E., Caprera P., 2003. *Atlante fenologico. Il mutevole aspetto di alcune specie agrarie durante il loro ciclo biologico*. Edagricole, Bologna.

Carrada G., Frizza C., (a cura di) 2021. *Transizione ecologica aperta. Dove va l'ambiente italiano?* ISPRA, Roma.

Di Domenico M., 2022. *Clandestini. Animali e piante senza permesso di soggiorno*. Bollati Boringhieri, Torino.

Ercole S., Angelini P., Carnevali L., *et al.* (ed.), 2021. *Rapporti Direttive Natura (2013-2018). Sintesi dello stato di conservazione delle specie e degli habitat di interesse comunitario e delle azioni di contrasto alle specie esotiche di rilevanza unionale in Italia*. ISPRA, Serie Rapporti 349/2021.

Federici M., (a cura di) 2006. *Natura e biodiversità*. I Quaderni della Formazione Ambientale APAT.

Luisi P.L., 2013. *Sull'origine della vita e della biodiversità*. Mondadori Università, Milano.

Mancini C., 2020. *Educatori esperienziali in natura. Animali, piante, storie e attività per l'outdoor education*. 78Edizioni, Massanzago (PD).
Mayor S.J., Guralnick R.P., Tingley M.V., *et al*., 2017. Increasing phonological asynchrony between spring green-up and arrival of migratory birds. *Scientific Reports,* **7**: 1902.
Monaco A., (a cura di) 2015. *Alieni. La minaccia delle specie alloctone per la biodiversità del Lazio*. Palombi Editore, Roma.
Schwartz M.D., (ed.) 2013. *Phenology: An integrative environmental science.* Springer, Dordrecht.
Wohlleben P., 2017. *L'orologio della natura. Prevedere il tempo, comprendere le stagioni, capire gli animali e le piante, conoscere l'ambiente in cui viviamo*. Macro Edizioni, Cesena.
Yuan Y., Härer S., Ottenheym T., *et al*., 2021. Maps, trends, and temperature sensitivities- phonological information from and for decreasing numbers of volunteer observers. *International Journal of Biometeorology,* **65**: 1377-1390.

Link di approfondimento

https://www.agrar.hu-berlin.de/de/institut/departments/dntw/agrarmet/phenology
https://www.agroecology-europe.org
https://www.cabi.org
https://easin.jrc.ec.europa.eu/easin/
https://www.eppo.int
https://eurobirdportal.org
https://ias.eea.europa.eu/
https://ipbes.net
http://www.iucn.it
https://www.lanuovaecologia.it
http://www.lipu.it
https://www.livingplanetindex.org
https://www.mite.gov.it
https://www.naturaitalia.it
https://www.phaenonet.ch
http://www.reterurale.it/fenologia;
https://unaapi.it

Capitolo 8

La salute dell'uomo e dell'ambiente sono interdipendenti: occorre un approccio integrato

8.1 Gli effetti dei cambiamenti climatici e ambientali sulla nostra salute

Solo una minima percentuale delle malattie croniche dell'uomo dipende dal genoma e dalla familiarità; tutte le altre sono più o meno direttamente riconducibili a fattori ambientali. Già Ippocrate (circa 400 anni a.C.) aveva rilevato che la salute pubblica dipende dalla qualità dell'aria e dell'acqua e a metà del 1800 Virchow riconobbe le relazioni tra le patologie umane e quelle animali e introdusse il termine zoonosi per le malattie trasmesse dagli animali all'uomo (Belardinelli, 2022). Ogni giorno nei paesi in via di sviluppo diverse migliaia di morti sono dovute a carenze alimentari, di acqua potabile, di servizi igienici e a patologie infettive idrotrasmesse (virus, batteri, protozoi ed elminti).

L'uso e l'abuso di antibiotici (soprattutto in zootecnia e ittiocoltura) e la diminuita capacità di autodepurazione dei suoli e delle acque stanno favorendo la selezione e la diffusione di microrganismi antibiotico-resistenti (circa 30.000 morti/anno in Europa, 10.000 dei quali in Italia: Pantosti *et al.*, 2018). Le infezioni ospedaliere (che interessano circa il 6% dei ricoveri in Italia) sono ormai più importanti di molte malattie non infettive e si stima che nel 2050, su scala globale, i morti per infezioni antibiotico-resistenti potrebbero superare quelli per cancro.

I cambiamenti climatici e gli eventi atmosferici estremi influiscono direttamente o indirettamente sia sulle malattie non trasmissibili (es. effetti delle ondate di calore, delle inondazioni o dell'aumentata produzione di pollini allergenici e spore fungine), sia su quelle infettive. Ad esempio il batterio dell'antrace, sin dall'antichità responsabile di epidemie negli animali erbivori e nell'uomo, è tuttora presente con focolai in diversi paesi, vive nel suolo e si sviluppa durante periodi caldi e secchi preceduti da intense precipitazioni. Le sue spore sono molto resistenti al freddo e a condizioni ambientali avverse e il batterio può tornare a mol-

tiplicarsi anche dopo decenni, in condizioni favorevoli di umidità e temperatura. Nella Penisola di Yamal (Siberia nordoccidentale) il susseguirsi di alcune estati calde e secche favorì nel 2016 lo scioglimento del permafrost e la riattivazione delle spore di antrace presenti nelle carcasse di animali morti molti anni prima. L'epidemia causò la morte di migliaia di renne e di alcune decine di uomini.

Molte malattie infettive come Ebola, HIV, Zika, Marburg, MERS e SARS-CoV-2 sono trasmesse all'uomo dalla fauna selvatica. Diverse specie di uccelli, roditori, pipistrelli e scimmie sono dei serbatoi di zoonosi; pertanto la distruzione degli habitat, l'urbanizzazione, la caccia e il commercio hanno contribuito ad aumentare le loro interazioni con l'uomo e con gli animali domestici. Virus e batteri vengono trasmessi all'uomo con le punture di zecche, zanzare o altri vettori, oppure dal contatto tra animali selvatici e quelli domestici, dal consumo di carni, latte o acqua contaminati.

L'aumento della temperatura favorisce l'insediamento in aree temperate di vettori di malattie infettive tropicali –come malaria, schistosomiasi e lyme– e il prolungamento delle stagioni idonee alla loro trasmissione. La zanzara tigre, per esempio, è molto diffusa nelle nostre aree urbane e periurbane, è attiva soprattutto durante il giorno e nel 2007 ha causato nelle province di Ravenna, Cesena-Forlì e Rimini la prima epidemia di chikungunya verificatasi in Europa (Pagliani, 2021). Più recentemente, nell'area orientale del Nord Italia ha fatto la sua comparsa un'altra zanzara che sopravvive alla stagioni fredde e potrebbe fungere da vettore anche dell'encefalite giapponese.

Le zoonosi ci sono sempre state ma, a causa degli allevamenti intensivi di polli e suini, degli scambi globali (di uomini, merci e fauna selvatica) e degli uccelli migratori, sono sempre più frequenti e diffuse su larga scala. In passato, la maggior parte delle epidemie interessava soprattutto i paesi poveri; in quelli più avanzati, le vaccinazioni e le migliori condizioni igienico-sanitarie avevano consentito di debellare vaiolo, difterite, poliomelite e tetano e il sistema sanitario, ormai finalizzato al benessere e all'allungamento della speranza di vita, era focalizzato sulle malattie non trasmissibili come diabete, malattie cardiovascolari e cancro.

Negli ultimi decenni, l'unica pandemia in qualche modo paragonabile a quella da COVID-19, e che avrebbe dovuto costituire un campanello di allarme, fu quella da sindrome dell'immunodeficienza acquisita (AIDS) causata dal virus HIV. Oggi sappiamo che ceppi del virus (anch'esso a RNA e con elevato tasso di mutazione) erano presenti nelle scimmie dell'Africa occidentale sub-sahariana ed erano riusciti a compiere il salto di specie dall'animale all'uomo (*spillover*). In Africa il virus era già presente da molto tempo tra i cacciatori di scimmie e tra coloro che ne commerciavano le carni e le pelli ma, quando negli anni '80 l'infezione cominciò a diffondersi in Brasile, negli Stati Uniti e nel resto del mondo, colse tutti di sorpresa.

Nonostante gli effetti devastanti dell'infezione da HIV e la consapevolezza dei rischi connessi alla promiscuità dell'uomo con la fauna selvatica, abbiamo fronteggiato la pandemia da COVID-19 con la stessa sostanziale impreparazione e i ritardi di allora (in Italia, per esempio, la ricerca dell'HIV nelle donazioni di

sangue cominciò con circa 3 anni di ritardo). Sebbene, almeno per ora, non possa essere esclusa la fuoriuscita del virus SARS-CoV-2 da un laboratorio (riconfermando la necessità di prevenire gli incidenti nei laboratori di virologia e di bloccare certi tipi di esperimenti), molto probabilmente la pandemia ha avuto origine con un salto di specie dai pipistrelli e/o da altri animali vivi (o dalle loro carni) venduti nel mercato di Wuhan. Già nel 2003, il coronavirus della SARS era stato trasmesso all'uomo dalla civetta delle palme e dal cane procione, venduti nel mercato di Fushan (sud-est della Cina) e aveva provocato oltre 800 morti.

Il commercio legale e illegale di specie selvatiche è molto florido in tutto il mondo e non riguarda solo l'uso alimentare, ma anche il commercio degli animali da compagnia, dei trofei per i collezionisti (es. corna di ungulati, pelli o avorio) o la preparazione di rimedi per la medicina tradizionale cinese (es. il corno dei rinoceronti). Molte delle specie oggetto di mercato sono a rischio elevato di estinzione e tra queste i pangolini, anch'essi tra gli imputati della trasmissione del SARS-CoV-2. Infatti questi animali rappresentano una pietanza molto ricercata e le loro scaglie, inoltre, sono utilizzate per produrre rimedi della medicina tradizionale (Scillitani, 2020). Uno studio recentissimo su campioni prelevati da zibetti, cani procione, tassi, istrici e altre specie di animali in vendita presso i mercati cinesi ha rilevato la presenza di oltre 100 specie di virus, 21 dei quali potrebbero infettare altre specie, inclusa la nostra. Comunque, dopo la SARS, la Cina ha reso illegale la vendita di molti di questi animali.

Con la sua drammaticità, la pandemia da COVID-19 ha messo in secondo piano le malattie non trasmissibili e ha spostato l'attenzione del mondo intero su quelle infettive. Nella storia dell'umanità le epidemie hanno sempre determinato profonde trasformazioni demografiche, sociali ed economiche. La peste nera, per esempio, era un'infezione sostenuta dal batterio *Yersinia pestis*, trasmesso dai ratti all'uomo per mezzo delle pulci. Dall'Asia si diffuse verso occidente e nel 1347 arrivò a Venezia (probabilmente dalla Dalmazia), giunse nei porti di Messina e Genova e negli anni successivi interessò tutta l'Europa. Se prima, con l'Optimum Termico Medievale e lo sviluppo dei commerci, in Europa vi era stato un rapido incremento demografico, con l'inizio della Piccola Era Glaciale, con le carestie e l'arrivo della peste nera, la popolazione si ridusse di un terzo (Mark, 2020).

Dopo le pestilenze descritte nella Bibbia nonché quella che nel 541 d.C. decimò la popolazione di Costantinopoli e le ondate infettive che causarono milioni di morti nell'area del Mediterraneo, solo a partire dal secolo XIV furono individuate le contromisure necessarie per limitare la diffusione delle epidemie. Queste prevedevavo che al manifestarsi delle prime avvisaglie si limitassero i movimenti di merci e persone e si attivassero quarantene e segregazione domiciliare. In seguito, furono progressivamente migliorate le condizioni igieniche delle città e si costruirono i lazzaretti. Però nulla si sapeva di virus e batteri, la peste era ritenuta una punizione di Dio per i peccati degli uomini e proliferavano fanatismi ed eresie, quali il movimento dei Flagellanti (che con pellegrinaggi e processioni diffondevano il contagio) e la persecuzione degli ebrei. A distanza di secoli, reazioni irrazionali sono tuttora presenti: si vedano i negazionisti e i

sostenitori del complotto.

Ma le attuali conoscenze scientifiche in tema di virologia e infettivologia consentono di ridurre più efficacemente la diffusione e l'impatto delle pandemie e, fortunatamente, nel caso di quella da COVID-19 sono stati prodotti vaccini in tempi eccezionalmente brevi. Tuttavia i vaccini costituiscono una soluzione tampone e, al fine di evitare la diffusione degli agenti patogeni infettivi, occorre adottare strategie preventive. L'elenco delle malattie con elevato potenziale epidemico viene continuamente aggiornato dall'OMS (Martino, 2019). Oltre alla febbre del Congo-Crimea, quella di Lassa, della Rift Valley, la febbre emorragica di Marburg e quelle dei virus Ebola, Zika, SARS e MERS, l'elenco include anche la "malattia X", ovvero una possibile nuova epidemia originata da un patogeno al momento sconosciuto. Tale probabilità è piuttosto elevata perché, secondo alcune stime, mammiferi e uccelli ospitano oltre un milione di virus sconosciuti alla scienza e ogni anno nel mondo, in gruppi limitati di persone, si manifestano malattie che potenzialmente potrebbero dar luogo a nuove pandemie. I ricercatori dell'*EcoHealth Alliance* hanno analizzato la distribuzione geografica di 23 specie di pipistrelli portatori di coronavirus e, dagli anticorpi riscontrati nelle popolazioni locali, hanno stimato che ogni anno vengono infettate diverse migliaia di persone nel nord dell'India, in Cina e nel sud-est asiatico.

Per non farsi trovare di nuovo impreparati è necessario individuare e porre sotto sorveglianza le aree geografiche dove la probabilità del salto di specie è più elevata; occorre sviluppare la collaborazione e condivisione delle conoscenze tra ricercatori e organizzazioni internazionali come OMS, FAO e IUCN, eliminando gli ostacoli di natura politica che, fino ad ora, hanno rallentato/impedito di comprendere le origini della pandemia COVID-19. Tutti i paesi dovrebbero adottare misure adeguate per contenere drasticamente la deforestazione, i cambi d'uso del territorio e la perdita di biodiversità e controllare con maggior rigore l'introduzione di specie aliene, nonché la produzione e il commercio di alimenti di origine animale.

8.2 La gestione adattiva degli ecosistemi terrestri

Nel corso della loro evoluzione gli organismi si adattano ai cambiamenti climatici e ambientali modificando la forma e/o le funzioni, mentre l'uomo, da oltre 10.000 anni, sta modificando l'ambiente naturale con l'agricoltura, l'allevamento, le infrastrutture, le attività minerarie e metallurgiche, cercando di renderlo più confacente ai suoi bisogni. Anche dopo l'introduzione della moneta il commercio consisteva soprattutto nello "scambio di beni" cioè di prodotti utili per chi li acquistava; da molti anni, però, il valore d'uso è sempre più spesso sostituito dal valore di mercato, così come sono incentivate le rottamazioni e l'obsolescenza programmata dei prodotti (Lucarella, 2021).

Mentre parte dell'umanità lotta ancora per la sopravvivenza, in molti paesi

vi è un consumismo sfrenato che non tiene conto delle reali esigenze della vita. Il benessere di un paese viene misurato con il prodotto interno lordo (PIL), un indicatore che tiene conto essenzialmente della circolazione monetaria e non del rapporto tra domanda e offerta o dell'effettivo valore d'uso dei beni. Le risorse naturali, pur essendo vitali per la nostra sopravvivenza, non entrano nel calcolo del PIL e i disastri e le catastrofi non sono considerati come perdite, ma addirittura come fattori positivi perché le spese di ripristino fanno salire il valore del PIL.

Tuttavia la pandemia e l'emergenza sanitaria dovrebbero rendere la nostra specie più consapevole della sua fragilità e della necessità di cambiare il suo rapporto con la natura. In un pianeta con dimensioni e risorse limitate gli attuali modelli di sviluppo socio-economico, ancora largamente basati sull'idea della crescita illimitata, sono assolutamente insostenibili. La biodiversità, i combustibili fossili e i minerali sono un patrimonio non prodotto dall'uomo, che viene dilapidato dall'economia globalizzata per soddisfare bisogni spesso superflui. Occorre conciliare i bisogni di una popolazione mondiale in continuo aumento con lo sfruttamento sostenibile delle risorse naturali, riducendo gli sprechi, il degrado ambientale e la perdita di biodiversità. Sebbene le strategie e le scelte per assicurare a tutti il soddisfacimento dei beni comuni essenziali siano sotto la responsabilità dei governi (nazionali e internazionali), anche il ruolo e la responsabilità dei cittadini sono altrettanto importanti, sia nel proporre e richiedere adeguati provvedimenti, sia nell'adottare stili di vita più coerenti con la sostenibilità ambientale e sociale (Lazzari, 2020).

Gli approcci suggeriti in questo libro per il monitoraggio degli effetti biologici degli inquinanti atmosferici e dei cambiamenti climatici forniscono ai cittadini una conoscenza di base per contribuire alla definizione delle strategie necessarie per ridurre gli effetti ambientali e socio-economici degli attuali modelli di sviluppo. La partecipazione dei volontari nei monitoraggi di sorveglianza consente di estendere (nello spazio e nel tempo) le informazioni acquisite con le reti di monitoraggio e offre ai cittadini la possibilità di verificare in prima persona l'efficacia delle strategie eventualmente adottate. Il successo dell'accordo di Parigi sui cambiamenti climatici dipende dall'impegno di ogni cittadino nel ridurre le emissioni di gas serra e nel contribuire alle azioni necessarie per attenuarne gli impatti. Le strategie di mitigazione e adattamento non implicano necessariamente dei sacrifici, ma possono offrire anche delle opportunità, come la creazione di nuovi posti lavoro e una migliore qualità della vita.

Un ruolo importante dovrà essere svolto dall'educazione che, fornendo i necessari elementi motivazionali e conoscitivi, dovrà accompagnare le nuove generazioni nell'acquisizione di un nuovo modello culturale, dove il soddisfacimento dei bisogni individuali deve conciliarsi con quelli dell'ambiente e con una maggiore equità sociale. Senza questa presa di coscienza sarà impossibile ridurre/prevenire le dispute per l'accaparramento dell'acqua, del cibo, delle risorse minerali ed energetiche, o le migrazioni delle popolazioni più sfortunate e gli atti di terrorismo.

Nel caso degli ecosistemi terrestri, gli interventi di mitigazione e adattamento dovranno tener conto dei futuri scenari. È necessario favorire lo svilup-

po di habitat capaci di sequestrare notevoli quantità di carbonio, ripristinare il territorio e tutelare la biodiversità in modo da rendere i sistemi naturali più resilienti e capaci di adattarsi ai cambiamenti. Uno dei principali problemi da affrontare è quello dell'attuale frammentazione degli habitat che impedisce gli spostamenti degli organismi, isola e diminuisce le dimensioni (e la variabilità genetica) delle popolazioni rendendole più vulnerabili. Occorre ampliare il sistema delle aree protette e creare ampie zone di transizione e connessione in modo da favorire la migrazione delle specie con particolari esigenze ecologiche verso zone di rifugio e protezione (Stellini, 2021).

Come discusso nei primi capitoli di questo libro, anche l'inquinamento ambientale contribuisce alle condizioni di stress degli organismi riducendone la capacità di reagire ai cambiamenti climatici e alle aggressioni dei patogeni. L'esposizione cronica alla complessa miscela di composti presenti in aria, in acqua o nel suolo può alterare le difese immunitarie e l'equilibrio ormonale degli organismi, determinando effetti spesso subdoli e di difficile identificazione. Molti inquinanti atmosferici persistenti possono essere trasportati per lunghe distanze e vanno a interessare anche gli ecosistemi terrestri e acquatici delle regioni più remote.

L'uomo, gli uccelli e le masse d'aria e di acqua contribuiscono anche al trasferimento su scala globale di pollini e spore di specie aliene e queste possono determinare inquinamento genetico, competizione e/o estinzione di specie locali, destrutturazione delle comunità, delle catene trofiche e diffusione di agenti patogeni. Per il contenimento delle specie aliene è necessario vigilare, adottare misure più efficaci per impedire le introduzioni e provvedere all'eradicazione o al contenimento delle specie opportuniste che tendono a diffondersi nei nuovi ambienti.

Agricoltura e zootecnia sono state per secoli realtà naturali con completo riciclo dei materiali e senza impatto ambientale, ma hanno subito profonde trasformazioni alla fine della seconda guerra mondiale con la cosiddetta "Rivoluzione Verde". Con la convinzione che anche la produzione di alimenti, come quella industriale, sarebbe cresciuta in misura esponenziale grazie alle innovazioni scientifiche e tecnologiche, con la Rivoluzione Verde si cominciarono a selezionare geneticamente ibridi più produttivi di grano, mais e riso. In pochi anni l'uso di nuove sementi, di diserbanti, antiparassitari, fertilizzanti, la meccanizzazione e l'automazione delle attività agricole consentirono di aumentare notevolmente la produzione di cereali.

Ma l'applicazione dei concetti dell'economia e dell'industria alle coltivazioni e agli allevamenti non consentì di risolvere il problema della fame e della sottoalimentazione in una popolazione mondiale in continua crescita. Anzi, ben presto si rilevarono i gravi effetti negativi di queste innovazioni: perdita di funzionalità dei suoli e desertificazione, eutrofizzazione degli ecosistemi acquatici, eccessiva dipendenza dai combustibili fossili e dall'acqua, produzione di rifiuti, inquinamento ambientale, perdita di biodiversità e notevoli costi sociali. L'agricoltura e la zootecnia globalizzate e industrializzate dilapidano risorse senza garantire la sicurezza alimentare, danneggiano la nostra salute e l'ambiente, determinano la perdita di suolo e di varietà locali di piante e animali, contri-

buendo all'uniformità genetica e a una sostanziale riduzione della biodiversità.

Occorre riappropriarsi delle colture e dei sistemi produttivi locali, recuperando razze e varietà autoctone e producendo gli alimenti in modo sostenibile, riducendone il carico energetico, evitando la distruzione delle foreste e la progressiva desertificazione di molte regioni. Biodiversità, acqua, aria, suolo, cibo e salute sono dei beni comuni essenziali e debbono essere gestiti dalle comunità locali. Ogni singolo cittadino come produttore e consumatore ha delle responsabilità, dovrebbe evitare gli sprechi e orientare le proprie scelte soprattutto verso alimenti di origine vegetale e di produzione locale, ove possibile (De Schutter, 2019).

Per favorire l'affermarsi di comportamenti ecologicamente e socialmente più sostenibili è necessario un maggior collegamento tra il mondo della ricerca e quello delle conoscenze ed esperienze acquisite localmente, coinvolgendo i coltivatori, sempre più preoccupati per gli effetti dei cambiamenti climatici, la comparsa di nuovi patogeni, le storture della filiera alimentare e la scarsa remunerazione del loro lavoro. In Italia, fino al secondo dopoguerra, c'erano alcune migliaia di tipi di frumento; oggi, con l'obiettivo della quantità, se ne coltivano poche decine e si impiegano combustibili fossili e composti chimici per far crescere le messi e proteggerle dalle infestazioni. Si è creato un profondo distacco tra il territorio e ciò che vi si coltiva mentre, per superare il problema della fame nel mondo, è necessario assecondare la natura promuovendo in ogni zona il recupero delle antiche varietà di semi che, generalmente, sono più resilienti e meno esigenti, meglio adattati al territorio, con rese minori ma più stabili nel tempo (ReteSemiRurali, 2021).

Le risorse naturali sono limitate e lo sfruttamento antropico ha superato la capacità della Terra di rigenerarsi. I paesi ricchi usano le risorse di quelli poveri e il capitalismo finanziario trasforma i beni essenziali in un mercato globale dove tutto si vende e tutto si compra. Occorre ridurre gli sprechi di risorse e va impedita la produzione di biocarburanti o energia elettrica a partire da alimenti come soia, palma, girasole, mais, canna da zucchero o frumento.

8.3 La mitigazione del cambiamento climatico e la decarbonizzazione

Per ridurre l'impatto dei cambiamenti climatici e la perdita di biodiversità sono necessari il risparmio energetico, la sostituzione dei combustibili fossili con le energie rinnovabili, il ripristino e la creazione di ambienti naturali con elevata capacità di sequestrare il carbonio. Uno dei maggiori ostacoli per la transizione alle fonti di energia rinnovabili sono i sussidi ai combustibili fossili; nonostante i ripetuti impegni dei politici, le somme investite ogni anno per abbassare artificialmente il prezzo dei combustibili fossili sono superiori a quelle destinate alle energie rinnovabili.

L'Unione Europea si è impegnata a ridurre le emissioni di anidride carbonica di almeno il 40% rispetto ai livelli del 1990 entro il 2030 e a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Ogni Stato membro è obbligato a compensare l'aumento di emissioni di anidride carbonica conseguenti alla deforestazione e ai cambiamenti delle destinazioni d'uso dei terreni, con adeguata gestione e ampliamento delle aree boschive. Le industrie sono obbligate ad ottenere un permesso per ogni tonnellata di anidride carbonica emessa che deve essere acquistato nell'ambito del sistema di scambio di quote ETS (*Emission Trading Scheme*). Tuttavia oltre il 60% delle emissioni è dovuto ai trasporti, all'agricoltura e alla gestione dei rifiuti e questi settori non rientrano nel sistema ETS.

L'Assemblea Generale delle Nazioni Unite ha dichiarato gli anni 2021-2030 il "Decennio del ripristino dell'ecosistema" con lo scopo di prevenire, arrestare e invertire il degrado degli ecosistemi in tutto il pianeta e di migliorare la condivisione tra tutti i popoli dei benefici ottenuti. Secondo alcune stime, ripristinando 1 miliardo di ettari di territorio (una superficie equivalente a quella degli Stati Uniti) si otterrebbe un terzo della mitigazione dei cambiamenti climatici necessaria entro il 2030, e su scala globale, si ridurrebbero di circa due terzi le estinzioni di specie (Topi, 2019).

Con il termine "rinaturazione" viene indicato l'insieme degli interventi necessari per ripristinare la funzionalità ecologica dei sistemi naturali, in relazione alle caratteristiche climatiche, geopedologiche e alla loro storia naturale pregressa (D'Amico e Pratesi a cura di, 2021). Tuttavia, oltre a individuare le opportune metodologie, sarà necessario predisporre adeguati finanziamenti o incentivi per coinvolgere agricoltori, allevatori e forestali. Si stima che ogni euro investito nel ripristino e nel rimodellamento del territorio potrebbe generare circa 20 euro di benefici economici e che il costo per far assorbire dalla biosfera ulteriori quantità di anidride carbonica (10-15 euro per tonnellata) sarebbe 7-8 volte inferiore a quello attualmente necessario per trasferire, con processi tecnologici non ancora ben perfezionati, l'anidride carbonica nella geosfera.

I processi di rinaturazione comportano cambiamenti d'uso del territorio, eventuali limitazioni alle attività agricole, di allevamento o alla costruzione d'infrastrutture e, prevedendo incrementi della biomassa vegetale, comportano anche potenziali rischi (ad esempio, gli incendi). Tuttavia offrono indubbi vantaggi per la qualità della vita dei cittadini, favoriscono la conservazione della biodiversità, del suolo e delle risorse idriche. Per l'efficacia di questi interventi è necessaria la loro diffusione su larga scala e le organizzazioni internazionali, anche servendosi d'informazioni acquisite tramite i satelliti, dovrebbero mettere a disposizione dei paesi in via di sviluppo i necessari supporti scientifici ed economici per la pianificazione e la realizzazione dei progetti.

Gli approcci tecnologici per ridurre le concentrazioni in aria dell'anidride carbonica, comunemente indicati come CCS (*Carbon Capture and Storage*), consistono nella cattura del gas e nel suo stoccaggio nel sottosuolo (IPCC Italia, 2022). Alcuni processi prevedono il trattamento dei fumi della combustione per favorire l'assorbimento chimico dell'anidride carbonica, o per aumentarne la concentrazione, usando ossigeno puro (ossicombustione). Lo stoccaggio

può avvenire in miniere abbandonate, in acquiferi salini profondi, nei giacimenti esauriti di gas e petrolio, oppure l'anidride carbonica può essere iniettata nei pozzi di petrolio per favorirne l'estrazione.

Sebbene da diversi anni siano stati messi in funzione alcuni impianti, la maggior parte di questi è ancora in fase sperimentale e quasi tutti hanno costi molto elevati. Eventualmente queste tecnologie potrebbero costituire una soluzione transitoria per la decarbonizzazione di alcune industrie, in attesa che le energie rinnovabili sostituiscano i combustibili fossili. Alcuni progetti di ricerca, come PANACEA (*Predicting And moNitoring the long-term behAvior of CO_2 injectEd in deep geological formAtions*) cofinanziato dalla UE, sembrerebbero aver individuato procedure efficaci e sicure per lo stoccaggio permanente dell'anidride carbonica nel sottosuolo. Tuttavia non possono essere esclusi del tutto i rischi ambientali, specialmente se lo stoccaggio avviene in zone sismiche o con forte subsidenza come ad esempio la costa di Ravenna, dove è prevista la costruzione di un impianto dell'ENI.

La maggior parte del nostro pianeta è occupata dagli oceani e questi giocano un ruolo importante nella cattura dell'anidride carbonica; tuttavia, fino ad ora, scarsa attenzione è stata rivolta a possibili interventi per aumentare la loro capacità di sequestrare il carbonio come, ad esempio, il reimpianto di foreste di mangrovie o la coltivazione di macroalghe e fanerogame marine negli ambienti costieri. Grazie alle elevate concentrazioni di nutrienti in vaste aree oceaniche, il sequestro del carbonio potrebbe essere effettuato anche dal fitoplancton, ma il suo sviluppo è limitato dalla carenza di oligoelementi essenziali come il ferro. È noto che la fertilizzazione del mare con forme solubili di questo metallo favoriscono lo sviluppo del fitoplancton, ma mancano studi approfonditi sui costi e sull'impatto ambientale di questo tipo di interventi.

Quasi tutti i progetti per la mitigazione del cambiamento climatico mirano alla riduzione delle concentrazioni di anidride carbonica ma, nel corso dell'ultima Conferenza delle Nazioni Unite sul Cambiamento Climatico (COP26), oltre 100 paesi hanno firmato un accordo per ridurre anche le emissioni di metano del 30% entro il 2030. Questo gas concorre per circa un terzo al riscaldamento globale e ha concentrazioni e tempo di permanenza in aria (circa un decennio) nettamente inferiori a quelli dell'anidride carbonica. Riducendo le emissioni antropiche di metano nelle industrie petrolifere, nella zootecnia e nelle discariche di rifiuti, si potrebbero ottenere significative riduzioni delle sue concentrazioni in aria.

8.4 I concetti di "esposoma" e "One Health" per la cura integrata della salute del pianeta

L'incremento demografico, la globalizzazione e le attività energetiche, industriali, agricole e zootecniche stanno determinando un eccessivo sfruttamento delle risorse naturali, inquinamenti, degrado ambientale e contribuiscono

al cambiamento climatico e alla diffusione di malattie croniche ed epidemie. Come riportato nei capitoli 3 e 4, l'esposizione cronica ai molteplici contaminanti presenti in aria, nell'acqua e negli alimenti costituisce un serio rischio per la salute umana. Tuttavia la maggior parte delle ricerche epidemiologiche riguarda determinati gruppi di popolazione, come i lavoratori esposti professionalmente, o si concentra su singole sostanze o gruppi di sostanze chimiche, come ad esempio gli ftalati, trascurando il fatto che ognuno di noi è cronicamente esposto a un gran numero di contaminanti, con possibili effetti sinergici o additivi.

Nell'epidemiologia ambientale e nell'ecotossicologia vengono studiati gli effetti prodotti dalle combinazioni di singole sostanze o anche da miscele chimiche, ma questo approccio non è sufficiente per rilevare gli effetti dell'esposizione cronica a un insieme di composti organici ed inorganici, molti dei quali non sono noti. Nel mondo vengono prodotte e commercializzate oltre 350.000 sostanze chimiche e molte di queste possono contenere isomeri e impurità, oppure subire delle trasformazioni e generare prodotti di degradazione nell'ambiente. Altre trasformazioni possono aver luogo con la cottura dei cibi o all'interno del nostro organismo. Anche altri fattori di stress, come i rumori, le condizioni climatiche, gli stili di vita, fattori sociali ed economici, influenzano le risposte biologiche dell'individuo e possono interagire con le esposizioni ai contaminanti ambientali.

Con la consapevolezza che solo una minima percentuale delle malattie croniche dell'uomo può essere spiegata con la predisposizione genetica, da alcuni anni è stato introdotto il concetto di "esposoma" per studiare gli effetti dell'ambiente sulle nostre condizioni di salute o di malattia (Maritano *et al.*, 2020). Questo approccio si basa essenzialmente sull'integrazione dei fattori genetici con quelli ambientali tenendo conto dell'ambiente esterno generale (clima, qualità dell'aria, dell'acqua, educazione ambientale e sociale ecc.), dell'ambiente esterno specifico di ciascun individuo (dieta, fumo, attività fisica, attività di lavoro, infezioni ecc.) e del suo ambiente interno (metabolismo, microbiota, invecchiamento, stress ossidativo, infiammazioni ecc.). A differenza della tossicologia classica, dove si valutano gli effetti dell'esposizione a uno o pochi contaminanti in un determinato intervallo temporale, l'esposoma si propone di considerare l'esposizione combinata a tutti gli stress ambientali e lungo tutta l'esistenza, tenendo conto delle loro variazioni temporali.

L'acquisizione dei dati e la rilevazione delle possibili connessioni con la salute dell'uomo è una procedura complessa e richiede la collaborazione di esperti di scienze ambientali e sociali, biologi molecolari, tossicologi, epidemiologi e medici. Si tratta di una grande sfida scientifica perché, sebbene siano disponibili modelli, sistemi geografici informatici (GIS), sensori ambientali, dosimetri personali e campionatori passivi per stimare l'esposizione di un individuo, i dati vanno acquisiti per tutto il corso della vita e gli eventuali effetti vanno valutati in relazione ai cambiamenti fisiologici, biochimici e molecolari dell'organismo. L'elaborazione dell'enorme numero di dati è resa ancora più complessa dai possibili effetti sinergici o additivi tra i fattori considerati e dai cambiamenti

climatici che influiscono sulle ondate di calore, sulla formazione di contaminanti come l'ozono troposferico, sulla diffusione dei patogeni e dei loro vettori.

Essenzialmente, l'esposoma si può basare su un approccio di tipo *bottom-up* che valuta le esposizioni esterne generali (stress climatico, sociale e economico) e quelle specifiche (contaminanti in acqua, aria e alimenti, esposizioni professionali, stile di vita, farmaci ecc.) o su un approccio *top-down*, che valuta le risposte esogene internalizzate (molecole ambientali non nutritive entrate nell'organismo), quelle endogene (microbiota intestinale e metabolismo endogeno che riflettono l'esposizione, come la perossidazione lipidica e lo stress ossidativo), e analizza biomarkers di esposizione nel sangue, nelle urine o nei tessuti mediante metodi omici (epigenomica, metabolomica, proteomica, lipidomica ecc.). Mentre il primo approccio trascura di indagare gli effetti biologici, il secondo non tiene conto delle esposizioni che li hanno determinati. Tuttavia la combinazione delle rilevazioni consente di collegare tra loro esposizione esterna e dose interna, risposta biologica ed eventuali esiti negativi per la salute.

I profili chimici delle molecole nei biofluidi dell'individuo rilevati con la spettrometria di massa ad alta risoluzione (HRMS), per esempio, possono rivelare collegamenti tra l'esposizione esterna e la dose interna (biomarcatori di esposizione), la risposta biologica (alterazioni nelle vie metaboliche endogene) e le condizioni di malattia (cambiamenti nel metabolismo legati alla patogenesi della malattia). Queste informazioni possono essere collegate alla fonte di esposizione (ad es. inquinamento dell'aria o dell'acqua) per comprendere la relazione tra ambiente/esposizione e salute o esito della malattia. Il concetto di esposoma sta maturando rapidamente; il numero delle tecniche e delle metodologie volte a caratterizzare le esposizioni aumenta e stanno evolvendo i database per la compilazione e la condivisione dei dati e gli strumenti per analizzare insiemi di dati complessi. Recenti applicazioni nell'uomo e negli animali dimostrano che questo approccio non solo è utile per lo sviluppo della medicina di precisione, ma può svolgere un ruolo molto importante nella rilevazione degli effetti dei cambiamenti climatici sulla salute dell'uomo, sulla fauna selvatica e sugli ecosistemi.

Con una visione olistica, la prospettiva "*One Health*" (una sola salute) si pone l'obiettivo di assicurare su scala globale la salute e la resilienza delle persone e dell'ambiente (Lirussi e Ziglio, 2021). La pandemia da SARS-CoV-2 ha dimostrato che è miope concentrarsi solo sulla salute dell'uomo e che per evitare future catastrofi sanitarie causate dalle epidemie e/o dalla antibiotico-resistenza, è necessario acquisire la consapevolezza che sulla Terra la salute degli uomini, degli animali e delle piante sono strettamente interdipendenti. Quindi, anche in previsione dei possibili effetti dei cambiamenti climatici, l'obiettivo di *One Health* è quello di sviluppare approcci interdisciplinari capaci di integrare i dati della medicina umana e veterinaria con quelli dell'ecologia, della biologia, delle scienze ambientali, umanistiche e sociali.

Queste ultime, infatti, sono necessarie per promuovere nuovi stili di vita, maggiore equità sociale e sistemi sanitari più rispondenti all'esigenza di tutelare la salute delle persone e dell'ambiente. L'approccio interdisciplinare di *One*

Health si basa essenzialmente sui concetti di sostenibilità e interdipendenza e, per metterlo in pratica, sono necessari un miglior coordinamento e integrazione a livello internazionale nel campo scientifico, politico, economico, sociale e della formazione. I progressi nell'utilizzo dell'intelligenza artificiale e dei sistemi di elaborazione di notevoli quantità di dati ambientali e socio-economici consentiranno di individuare le azioni più appropriate per proteggere la salute e l'ambiente.

Le principali misure per ridurre il rischio di nuove pandemie (impedire la deforestazione, la perdita di habitat, il commercio della fauna selvatica e le introduzioni di specie aliene) sono in gran parte coincidenti con quelle necessarie per tutelare la biodiversità e la funzionalità degli ecosistemi. Nel fornire le raccomandazioni per la ripresa post-COVID-19, l'OMS ha posto come principali prescrizioni a tutti i paesi: la salvaguardia della natura, l'accesso all'acqua pulita, a cibi sani e sostenibili e una rapida transizione energetica. In questo periodo di crisi e di generale ridefinizione delle priorità, la scienza ha maggiori probabilità di farsi ascoltare dalla politica e lo sviluppo della prospettiva *One Health* dovrebbe essere uno dei principali obiettivi. Dato che dopo il COVID-19 potrebbe manifestarsi una malattia X, è necessario riunire le sfere umana, animale e ambientale per aumentare la sorveglianza, identificare e caratterizzare i nuovi patogeni, prevenire ulteriori pandemie e il diffondersi dell'antibiotico-resistenza.

I cambiamenti in atto sul nostro pianeta non consentono di predire gli sviluppi futuri dell'Antropocene ma per la scienza e i governi è il momento di agire subito per mitigare l'impatto delle attività antropiche sui delicati equilibri che assicurano il funzionamento del sistema Terra e per adottare adeguate strategie di adattamento ai cambiamenti in atto.

Bibliografia e letture consigliate

Bardgett R.D., van der Putten W.H., 2014. Belowground biodiversity and ecosystem functioning *Nature,* **515**: 505-511.

Camerini G., 2018. Consumo di suolo, urbanizzazione e perdita di biodiversità. *Biologia Ambientale,* **32**(1): 1-15.

Carlsson-Kanayama AS., Ekström M. P., Shanahan H., 2003. Food and life cycle energy inputs: consequences of diet and ways to increase efficiency. *Ecological Economics,* **16**: 1-15.

Carnevale P., Fasano S.G., Oneto F., *et al*., 2016. Biodiversità e pianificazione ambientale nelle aree protette: elaborazione della Carta della qualità naturalistica. *Biologia Ambientale,* **30**: 3-11.

Casa R., (a cura di) 2017. *Agricoltura di precisione. Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali*. Edagricole, Bologna.

De Maio F., De Maio E., (a cura di) 2021. *ISPRA per la salute*. Quaderni Ambiente e Società, ISPRA, Roma.

F.A.O., 2016. *The FAO action plan on antimicrobial resistance 2016-2020*. FAO, Roma.

F.A.O., 2019. *Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management*. FAO, Roma.

F.A.O. 2020. *Preventing the next zoonotic pandemic: strengthening and extending the One Health approach to avert pandemics of animal origin in the region*. FAO COVID-19 Response and Recovery

Programme: Europe and Central Asia. Budapest.
Federici M., (a cura di) 2006. *Natura e biodiversità*. I Quaderni della Formazione Ambientale APAT, Roma.
Giudice M., Minucci F., 2011. *Il consumo di suolo in Italia. Analisi e proposte per un governo sostenibile del territorio*. Sistemi Editoriali, Pozzuoli (NA).
He W.-T., Hou X., Zhao J., *et al.*, 2022. Virome characterization of game animals in China reveals spectrum of emerging pathogens. *Cell,* 12375: 1117-1129.
I.P.C.C., 2018. *Global warming of 1.5°C*. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
Lebov J., Grieger K., Womack D., *et al.*, 2017. A framework for One Health research. *One Health*, **3**: 44-50.
Pievani T., Varotto M., 2021. *Viaggio nell'Italia dell'Antropocene. La geografia visionaria del nostro futuro*. Aboca Edizioni, Sansepolcro (AR).
Romanello M., McGushin A., Di Napoli C., *et al.*, 2021. The 2021 report of the Lancet countdown on health and climate change: code red for a healthy future. *The Lancet,* **398**: 1619-1962.
Sing B., (ed.) 2018. *Soil carbon storage*. Academic Press, New York
Stolte J., Tesfai M., Øygarden L., *et al.*, 2016. *Soil threats in Europe: status, methods, drivers and effects on ecosystem services*. JRC Report, Luxemburg.
Wall D. H., Nielsen U.N., Six J., 2015. Soil biodiversity and human health. *Nature,* **528**: 69-76.
W.H.O., F.A.O., O.I.E., 2019. *Taking a multisectoral, One Health Approach: A tripartite guide to addressing zoonotic diseases in countries*. WHO: World Health Organization; FAO: Food and Agriculture Organization; OIE: World Organization for Animal Health, Ginevra.

Link di approfondimento

https://www.agroecology-europe.org
http://www.ars.usda.gov/main/site
https://www.ecohealthalliance.org
http://www.europa.eu/legislation_summaries/
https://asvis.it/goal15
http://www.inaturalist.org/
https://www.isprambiente.gov.it
https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/
http://www.ispotnature.org/communities/global
https://www.iuss.org/
https://www.mite.gov.it
https://www.onuitalia.com
http://www.panacea-co2.org
https://www.scienzainrete.it
http://www.unccd.int/
https://www.who.int/activities
https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate
https://www.who.int/activities

NOTE BIOGRAFICHE

Roberto Bargagli, già professore ordinario di Ecologia, Coordinatore del Dottorato di Ricerca in Scienze e Tecnologie Ambientali, Geologiche e Polari e Direttore del Dipartimento di Scienze Ambientali dell'Università degli Studi di Siena, continua la sua attività come Professore Senior. Per molti anni ha svolto ricerche sulle risposte degli organismi terrestri e acquatici ai contaminanti ambientali e ai cambiamenti climatici. Ha fatto parte di gruppi di lavoro della UE per la messa a punto di metodologie per il biomonitoraggio degli inquinanti atmosferici e, nell'ambito del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide, ha partecipato a otto spedizioni scientifiche nel continente antartico, occupandosi dell'impatto dei cambiamenti globali sugli ecosistemi polari. È autore di numerose pubblicazioni scientifiche, di due libri pubblicati da Springer-Verlag (Berlino): "*Trace elements in terrestrial plants. An ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery*" (tradotto anche in lingua russa) e "*Antarctic ecosystems. Environmental contamination, climate change and human impact*" (selezionato dall'American Library Association come "Choice Outstanding Academic Title 2005") e del libro di testo "*Ecologia Applicata. Per un uso consapevole dell'aria, dell'acqua e del suolo*" (Amon, Padova).