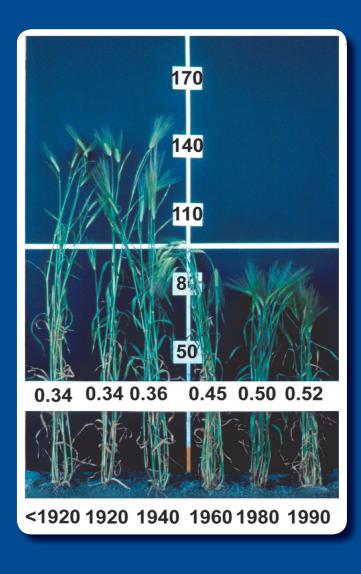
ANALYSIS Analysis - Riv. Quadrimestrale - Anno XIX n. 2 maggio/agosto 2017 - Poste Italiane S.p. A. - Sped. in Abb. Poste DL 353/2003 (conv. in Legge 27/02/2004 n. 46 Art. 1, Comma 1) - CN/BO - Pàtron Editore - Via Badini 12 - Quarto Interiore - 40057 Granarolo dell'Emilia (Bo)

Rivista di cultura e politica scientifica



2017

Roboetica (aspetti etici, legali e sociali della robotica)

Riflessione sui cambiamenti climatici tra scienza, filosofia e politica

GENETICA VEGETALE E ALIMENTAZIONE MONDIALE NEL 2050

ANALYSIS

Rivista di cultura e politica scientifica

Anno XIX - N. 2/2017

SOMMARIO

Antonio Baroncelli, Giovanni Dal Monte, Giovanni Gullà, Roberto Palaia, Emanuela Reale, Laura Teodori	Presentazione	p.	3
Gianmarco Veruggio	Roboetica (aspetti etici, legali e sociali della robotica)	*	5
Vincenzo Artale	Riflessione sui Cambiamenti Climatici tra scienza, filosofia e politica	»	9
A. Michele Stanca	La genetica vegetale sarà pronta per assicurare alimenti alla popolazione mondiale del 2050?	»	17

ANALYSIS - 2/2017

Direttore

Antonio Baroncelli

Comitato di Redazione

Giovanni Dal Monte, Giovanni Gullà, Roberto Palaia, Emanuela Reale, Laura Teodori

Segreteria

Marta Cascarano, Livia Steve e-mail: marta.cascarano@gmail.com marta.cascarano@analysis-online.net Internet: www.analysis-online.net International Standard Serial Number: ISSN 1591-0695 Direzione e Redazione: presso ANPRI Gli autori degli articoli sono responsabili delle loro opinioni. È obbligatorio citare la rivista in caso di riferimento al materiale pubblicato. Periodico trimestrale di proprietà dell'ANPRI, Associazione Nazionale Professionale per la Ricerca, aderente alla CIDA, Confederazione Italiana Dirigenti e Alte professionalità, Funzione Pubblica Via Tortona, 16 00183 Roma Tel. 06.7012656-Fax 06.7012666 e-mail: anpri@anpri.it Internet: www.anpri.it Autorizzazione del Tribunale di Roma N. 253/99 del 07.06.1999 Precedente Autorizzazione del Tribunale di Roma N. 465/94 del 17.10.1994 Precedente Autorizzazione del Tribunale di Torino N. 4132 del 24.01.1990 Stampa: LI.PE., Litografia Persicetana, S. Giovanni in Persiceto, Bologna, per conto della Pàtron Editore. In copertina: Riduzione della taglia della pianta di orzo dal 1920 ad oggi e miglioramento dell'Indice di raccolto HI (Harvest Index)

PRESENTAZIONE

Antonio Baroncelli, Giovanni Dal Monte, Giovanni Gullà, Roberto Palaia, Emanuela Reale, Laura Teodori

La robotica "inizia ad infiltrarsi nelle scuole e nelle case ... suscitando problemi e interrogativi che finora sembravano riservati al campo della fantascienza". Gianmarco Veruggio in "Roboetica (aspetti etici, legali e sociali della robotica)" propone una riflessione su recenti sviluppi della robotica che hanno un impatto crescente sul nostro modo di concepire la vita: macchine sempre più autonome ed in grado di prendere decisioni. Questo ridefinisce il concetto di responsabilità che ora investe non solo esseri umani ma anche macchine intelligenti, con risvolti particolarmente inquietanti nel caso di applicazioni medicali e militari. La Roboetica si occupa di questi problemi. Nel febbraio 2017 il Parlamento Europeo ha approvato con larga maggioranza una relazione che, tra altre raccomandazioni, propone la creazione di uno "status giuridico per i robot... un codice etico per gli ingegneri che si occupano della realizzazione di robot e. in prospettiva, il lancio di una Agenzia europea per la robotica e l'intelligenza artificiale". La Roboetica deve essere condivisa e accettata da diverse culture. sensibilità e basarsi su un linguaggio universale. La ricerca pone domande impensabili sino a poco tempo fa: quanto permetteremo che i robots somiglino agli uomini? "che cosa succederà quando ...la nostra vita dipenderà da loro?", cosa succederà nel mondo del lavoro quando i robots verranno coinvolti sempre più in attività ripetitive e pericolose? "In ultima analisi, uno dei settori che saranno maggiormente chiamati in causa sarà il Diritto. Chi sarà ritenuto responsabile delle azioni dei robot? Il progettista? L'utente? Il robot?" Un aspetto delicatissimo riguarda possibili applicazioni militari: la grande domanda è "se sia cioè umanamente ammissibile concedere ad un'entità autonoma non umana la licenza di uccidere un essere umano". Il mercato delle armi investe un potenziale economico così grande da mettere in discussione e condizionare perfino la libera iniziativa di governi

democraticamente eletti. La "roboetica è solo ai suoi inizi, ma ritengo estremamente positivo che possa svilupparsi di pari passo con lo sviluppo della robotica stessa, nella speranza che questo possa effettivamente guidarne il cammino nella direzione di un vero progresso umano".

Vincenzo Artale nell'articolo "Riflessione sui Cambiamenti Climatici tra scienza, filosofia e politica" affronta un tema di grande attualità con spunti di riflessione molto originali, che portano, apparentemente, anche molto lontano dall'originario punto di partenza. Con alcuni cenni descrittivi del sistema climatico e dei suoi meccanismi, Artale conduce il lettore a intuire come il clima sia un sistema fisico non deterministico ma estremamente complicato e caotico, tanto che, afferma l'Autore, "per quanto possa sembrare paradossale, oggi abbiamo una migliore comprensione del nucleo atomico che non di un centimetro cubo di atmosfera turbolenta". Sui cambiamenti climatici in particolare, l'Autore afferma che non ci possono essere dubbi sul fatto che esistano, essendo dimostrati da una ampia letteratura e dall'esperienza quotidiana. Artale, inoltre, ritiene che sia necessario considerare le politiche di adattamento/mitigazione ai cambiamenti climatici come un'opportunità di sviluppo tecnologico e sociale, in grado, se correttamente orientate, di influire positivamente sia su povertà e diffusione dei diritti umani sia su uno sviluppo molto più sostenibile. Artale però è "da un punto di vista non solo scientifico, contrario nel considerare il clima come il punto cruciale dello sviluppo umano, quello in cui si decide il percorso dell'umanità nei prossimi decenni, o perlomeno questo non è il solo. È invece una delle tante complesse problematiche con cui la società si deve confrontare." Non si può non notare qui la netta contrapposizione con quanto sostenuto da Facchini

et al. ("Il problema del cambiamento del clima è IL PROBLEMA del nostro secolo") nelle conclusioni del loro articolo nel numero 1/2016 di Analysis: un motivo in più per leggere con attenzione l'articolo di Artale e magari andare a rileggersi quello di Facchini et al. L'Autore¹, infine, avanza il dubbio che la discussione sui cambiamenti climatici sia diventata così accesa e divisiva perché l'"emergenza clima", insieme anche all'"emergenza migrazioni" e all'"emergenza economica", contribuisce ad alimentare un continuo stato di eccezione, che piace molto a chi detiene il potere – soprattutto economico – perché rende più facile, anche nel settore della ricerca, imporre un pensiero unico, che marginalizza gli "eretici": anche nel settore dei cambiamenti climatici, essendo legato a importanti interessi economici, è a rischio l'autonomia dello scienziato che ci lavora. Estremamente aperta e ad ampio respiro la conclusione di Artale: "Il problema dei cambiamenti climatici è un problema enorme e non solo da un punto di vista della fisica, ma è diventato un problema filosofico, sociale e politico e, dato che uno scienziato al giorno d'oggi non può esimersi dal riconoscere questo intreccio, si trova nel dubbio da cui non riesce mai ad emergere, ma tuttavia non fa che alimentare la sua curiosità e le domande da cui siamo partiti ancora vagano nell'etere".

Nell'articolo "La genetica vegetale sarà pronta per assicurare alimenti alla popolazione mondiale del 2050?" A. Michele Stanca prima passa in rassegna le principali tappe della storia della genetica vegetale e poi, attraverso l'illustrazione delle più recenti tecniche che la ricerca ha messo a disposizione dei genetisti, spiega perché non ritiene irrealistico l'obiettivo di riuscire a nutrire i dieci miliardi di persone che si prevedono per il 2050. L'agricoltura nasce quando la specie umana sviluppa le conoscenze sufficienti per coltivare le piante che prima si limitava a raccogliere. Successivamente inizia l'addomesticamento, cioè l'intervento umano sulle specie vegetali utili, per selezionare e propagare gli individui con le caratteristiche più vantaggiose, in particolare quelli con il frutto di dimensioni maggiori. L'azione dell'uomo, combinata con la selezione naturale, ha portato al costituirsi di popolazioni

(denominate landraces) adatte ai diversi ambienti di coltivazione. Solo la riscoperta delle leggi di Mendel, avvenuta all'inizio del XX secolo, ha reso possibile la vera e propria attività di miglioramento genetico, con lo sviluppo di nuove varietà sempre più produttive e adatte alle nuove esigenze che via via si sono presentate: grazie all'opera di Strampelli e Borlaug in particolare, per i cereali si sono ottenuti aumenti di produzione tra i 20 e i 50 Kg * Ha⁻¹ per anno. In anni più recenti, consistenti aumenti di produzione si sono avuti sfruttando il fenomeno (per il quale, comunque, non esiste tutt'ora una spiegazione pienamente convincente e condivisa) dell'eterosi degli ibridi e i progressi della genomica. Su queste basi, quali sono le prospettive per il 2050? La sfida ora non è solo produrre di più ma anche rispettare ulteriori vincoli: la messa a coltura di nuove terre non è quasi mai possibile, è necessario puntare a ridurre gli input tecnologici, preservare la biodiversità, rispettare l'ambiente. Comunque gli spazi per agire ci sono, visto che è ancora consistente, a causa dei numerosi ed eterogenei "stress" a cui le piante sono sottoposte. lo scarto che c'è tra le produzioni potenzialmente possibili e quelle effettivamente ottenute in campo. Secondo l'Autore la chiave di tutto sta nello sfruttare le acquisizioni più avanzate della ricerca e in particolare nella conoscenza sempre più approfondita del genoma delle piante, che apre diverse possibilità di sviluppo di nuovi genotipi che siano altamente produttivi anche in situazioni di "stress". Tra le nuove biotecnologie molecolari vengono citate la Marker Assisted Selection (MAS), la GAS Genomic Assisted Selection e la trasformazione genetica, oltre al recente "Editing del Genoma - CRISPR/Cas9". L'Autore conclude affermando "che la genetica vegetale, punto focale della strategia della "Systems Biology" rappresenterà la base per garantire cibo a sufficienza e di qualità ai dieci miliardi di esseri umani previsti per il 2050, senza turbare l'equilibrio ambientale".

Note

¹ http://www.analysis-online.net/wp-content/uploads/2016/06/ cop21 laccordo mondiale sul clima.pdf.

ROBOETICA (ASPETTI ETICI, LEGALI E SOCIALI DELLA ROBOTICA)

Gianmarco Veruggio

Riassunto

La Robotica è una nuova scienza che sta nascendo dalla convergenza di gran parte delle attuali discipline, sia tecnicoscientifiche che umanistiche e che sta iniziando a svelare il proprio reale potenziale al grande pubblico, finora abituato a considerarla soltanto un effetto speciale nei film di fantascienza. Però, come in ogni altro settore del progresso, sta emergendo il classico problema del doppio uso. Cioè, accanto alle innumerevoli applicazioni utili e benefiche, sono possibili altrettante applicazioni malevole e dannose che, data la potenza della robotica, potrebbero far precipitare l'umanità in uno dei tanti futuri distopici che proprio la fantascienza ha dipinto. Ma anche senza immaginare tali esiti catastrofici, qualunque applicazione della robotica e dell'intelligenza artificiale sollevano questioni etiche, legali, psicologiche e sociali. Per questo, data la complessità dell'argomento, è importante approfondire il dibattito in campo roboetico, ormai attivo da una quindicina di anni.

Parole chiave: Robotica, Etica, Intelligenza artificiale.

Keywords: Robotics, Etics, Artificial intelligence.

L'invasione robotica è iniziata in modo strisciante, prima nelle fabbriche, poi negli impianti, nella grande distribuzione e negli ospedali. Ed ora, grazie a giocattoli e piccoli elettrodomestici, inizia ad infiltrarsi nelle scuole e nelle case, anche grazie ad Internet che ne moltiplica le possibilità, suscitando problemi e interrogativi che finora sembravano riservati al campo della fantascienza.

Infatti, la tecnologia applicata alla vita degli umani suscita sempre problemi etici. Due dei campi più avanzati della scienza e della tecnologia, la Fisica Nucleare e l'Ingegneria Genetica, sono stati costretti ad affrontare le conseguenze delle applicazioni delle loro ricerche sotto la pressione di eventi drammatici e complessi. In molti paesi, l'opinione pubblica, preoccupata da alcuni di questi effetti, ha chiesto di fermare le applicazioni di entrambi i settori, o di controllarli strettamente.

La stessa robotica è una nuova scienza ancora allo stato nascente, nata dalla fusione di molte discipline appartenenti al campo delle scienze umane e di quelle naturali. Chiunque, anche da amatore, si avvicini a essa, ne potrà intravedere e poi immaginare le mille strade e rivoli che questa disciplina e le sue applicazioni potranno percorrere, invadendo campi tradizionali del sapere e aprendo problemi nuovi e complessi di natura etica, filosofica, sociale, legale. Infatti, a differenza di altri sistemi tecnologici, seppure sofisticati – come l'energia nucleare – o di altre discipline - come la bio-ingegneria - la robotica realizza macchine intelligenti ed autonome, che non sono soltanto oggetti tecnologici ma, sempre più, soggetti dotati di capacità decisionali. A questo punto, la domanda classica sulla titolarità della responsabilità (chi è il responsabile/i dell'errore o del danno commesso o provocato da una macchina? il progettista? il produttore? l'utente finale?) vedrà l'emergere di un altro "responsabile": il robot.

Sono soprattutto le ricerche e applicazioni nel settore della robotica di servizio applicata al medicale, alla biorobotica, alla robotica per assistenza e alla robotica militare a sollevare inquietudini e perplessità. Ci poniamo domande: "Potrà un robot fare 'il bene' o 'il male'?", "I robot potranno essere pericolosi per l'umanità?", "Dovremmo investire risorse e intelligenze su altri problemi?".

A quindici anni dalla sua nascita, la Roboetica l'etica applicata agli aspetti etici, legali e sociali della robotica e delle sue delle applicazioni – si sta dimostrando un utile strumento culturale per stimolare una maggiore sensibilità dei ricercatori robotici nei confronti delle loro responsabilità verso la società. La dimostrazione è il crescente numero di autorevoli scienziati che si mostra interessato e partecipe, e il fiorire di iniziative, leggi e progetti sul tema.

A tal proposito è significativa la risoluzione approvata nel Febbraio 2017 dal Parlamento Europeo (396 voti favorevoli, 123 contrari, 85 astenuti) in materia di «Norme di diritto civile sulla robotica». La relazione. firmata dalla vicepresidente della Commissione giuri-

dica ed eurodeputata socialista Mady Delvaux, insiste su alcuni pilastri: la creazione di uno status giuridico per i robot; una vigilanza continuativa delle conseguenze sul mercato del lavoro; investimenti necessari per evitare una crisi occupazionale; un codice etico per gli ingegneri che si occupano della realizzazione di robot e, in prospettiva, il lancio di una Agenzia europea per la robotica e l'intelligenza artificiale che sia «incaricata di fornire le competenze tecniche, etiche e normative necessarie».

Date le caratteristiche di questa nuova scienza le problematiche suscitate sono estremamente complesse; per questo nel 2002, dopo un decennio di riflessioni sul rapporto fra robotica e società, ho proposto il concetto e il termine di Roboetica, per indicare il rapporto positivo che dovrebbe intercorrere tra progettista/produttore/utente di robot e queste macchine intelligenti. Non solo norme negative, dunque, ma la complessa relazione che collega gli umani ai loro artefatti intelligenti e autonomi.

Nel gennaio 2004 ho organizzato il Primo Simposio Internazionale di Roboetica, convocando a Villa Nobel, a Sanremo, filosofi, giuristi, sociologi, antropologi e moralisti, insieme con scienziati robotici, da Europa, Giappone e Stati Uniti per contribuire a gettare le basi di un'etica della progettazione e dell'impiego dei robot.

Si discusse di etica artificiale, ma il punto chiave furono le riflessioni sull'etica umana.

Infatti vorrei sottolineare che, prima ancora di affrontare il problema dell'etica artificiale di cui saranno dotate le nostre macchine intelligenti, dobbiamo sviluppare l'etica umana di chi queste macchine progetta, produce e impiega. In questo contesto, noi robotici dobbiamo assicurare il nostro impegno per aumentare la consapevolezza del pubblico circa le problematiche della robotica, affinché la società possa prendere parte attiva nel processo di creazione di una coscienza collettiva, in grado di individuare e prevenire un uso errato della tecnologia.

L'obiettivo che guida il mio impegno è che si possa giungere a un'etica condivisa da tutte le culture, tutte le nazioni e le religioni, così che la costruzione e l'impiego di robot contro gli esseri umani sia considerato un crimine contro l'umanità.

A seguito del Simposio di Sanremo, la IEEE-Robotics&Automation Society ha dato vita a un Comitato Tecnico per la Roboetica e il Network della Ricerca Europea sulla Robotica ha finanziato un Atelier sulla Roboetica che si svolse a Genova nel 2006 e produsse la prima Roadmap sulla Roboetica. Obiettivo della Roadmap è stato di sviluppare un linguaggio comune della Roboetica tra gli studiosi e gli stakeholders; di affrontare problemi in discipline contigue; di condividere idee; di dare inizio a un'indagine globale sui principali paradigmi dell'etica applicata alla tecnologia robotica nelle diverse culture, religioni e fedi.

Avendo come riferimento la Carta dei Diritti Fondamentali dell'Unione Europea, la Roadmap sulla Roboetica ha inteso raccogliere riflessioni ed esperienze dei gruppi di discussione nati in molte università e dipartimenti di ingegneria a livello mondiale.

Un punto che è apparso immediatamente critico, data l'estrema interdisciplinarietà della robotica, è la mancanza di un glossario condiviso. Questo perché ogni disciplina coinvolta ha una propria tradizione di terminologie e formalismi. Inoltre, l'internazionalizzazione della ricerca e la globalizzazione economica fanno sì che gli scienziati provengano da paesi e culture assai lontane. Se pensiamo al dibattito millenario sui concetti fondamentali che contraddistinguono la specificità dell'essere umano, non v'è da stupirsi che, in una disciplina giovane come la robotica, termini come intelligenza, autonomia o coscienza siano ben lungi dall'essere univocamente intesi. Si può quindi facilmente immaginare quanto sia difficile universalizzare concetti sensibili come la dignità dell'individuo o il rispetto della privacy. Sulla base della nostra concezione di persona umana, della sua dignità e rispettabilità, e dei suoi rapporti con i prodotti del proprio ingegno, deriviamo una serie di regole e comportamenti che riteniamo accettabili e da favorire, e da qui le leggi.

Vi sono culture, anche tecnologicamente ricche, dove i diritti delle donne e dei bambini non sono considerati secondo le prescrizioni della Carta dei Diritti Fondamentali dell'ONU. Eppure, queste culture sono dotate di tutte le innovazioni tecnologiche immaginabili. Vi sono altre culture – come la società giapponese – dove i concetti di etica e di responsabilità individuale non sono vissuti e concepiti come in Europa, per esempio.

L'analisi del problema da molti punti di vista, letterario, sociale, psicologico, ha evidenziato un certo numero di domande ricorrenti: fino a che punto di imitazione dell'essere umano si dovrebbe arrivare nel progettare la forma dei robot? Oppure: di quale grado di autonomia robotica dovremmo dotare i robot? E anche: che cos'è l'intelligenza umana e che cos'è una macchina intelligente? E, inoltre: quanto è etico sostituire esseri umani con macchine intelligenti nell'assistenza e cura di altri umani che, proprio perché in condizioni difficili, avrebbero bisogno di un sostegno emotivo? E d'altra parte: non è maggiormente etico fornire a esseri umani in condizioni di disagio un'assistenza non emotivamente coinvolta, permettendo a personale umano di dedicarsi ad attività nobili come la compagnia e un'assistenza affettuosa? E così via...

Nella Roadmap sulla Roboetica, occorreva pertanto cercare di distillare questi problemi essenziali declinandoli nei vari ambiti applicativi della robotica.

Per far questo si sono presi in considerazione i principali settori applicativi della robotica e, in questi, solo i problemi nuovi, originali e urgenti, applicando una sorta di tecnica di triage. Nuovi e originali perché la Roboetica condivide questioni di generale interazione umano-tecnologia con altre etiche applicate (bioetica, neuroetica, computer etica), mentre vi sono problemi che specificatamente riguardano i robot. Urgenti, perché se alcuni ricercatori hanno posto problemi relativi ai diritti dei robot, o ai problemi futuri di macchine che esibiranno comportamenti coscienti e auto-coscienti, fino ad arrivare ad ipotesi di robot che evolveranno verso nuove forme di vita, i redattori della Roadmap sulla Roboetica hanno considerato questi problemi troppo oltre la portata delle nostre attuali conoscenze - mentre vi sono questioni assai urgenti da affrontare relativamente ad alcune applicazioni sensibili di robotica ormai disponibili.

I settori che la Roadmap sulla Roboetica ha preso in considerazione sono stati quelli contenuti nella Euron Robotics Roadmap (2005-2006): umanoidi, intelligenza artificiale, corpo artificiale; sistemi di produzione avanzati; robotica industriale; assistenti robotici adattativi; domotica; robot di servizio in ambienti chiusi; robot ubiqui; robotica networked; Internet Robotics; Robot ecology; Outdoor Robotics; robotica in ambiente marino, aero, robotica spaziale; robotica medica e qualità della vita; robotica chirurgica; biorobotica; robot per assistenza; robotica militare; armi intelligenti, soldati robotici, superumani; edutainment; robot educazionali, giocattoli robotici, arte robotica.

Per ogni settore, sono stati elaborati i possibili problemi etici, sociali e legali collegati. Per esempio, nel caso degli umanoidi, le classi dei problemi evidenziati sono state:

- Affidabilità dei sistemi di valutazione interna dei
- Difficoltà e anche impossibilità predittive relativamente al loro comportamento;
- · Necessità della tracciabilità e della valutazione delle azioni e procedure;
- Necessità della identificazione di ogni robot;
- · Necessità di affidabilità, sicurezza, dependibi-

La Roadmap sulla Roboetica ha proposto anche alcuni suggerimenti, per esempio, quello relativo alla tracciabilità. Infatti, in un sistema così complesso come quello di un robot autonomo dotato di capacità di apprendimento risulterebbe difficile risalire al

sistema ove si sia verificato l'errore o il malfunzionamento. Per questo, analogamente agli aeroveicoli, bisognerà inserire nei robot una o più scatola/e nera/e che registri i dati relativi alle operazioni e li conservi integri anche nei casi di rotture gravi.

Per quanto riguarda gli effetti nella società, ci si chiede, per esempio, che cosa succederà quando questi robot intelligenti saranno i nostri aiutanti e maggiordomi e quando la nostra vita dipenderà da loro. La dipendenza dai robot potrebbe diventare più pericolosa e devastante di quella dalla tv. da Internet e dai videogame.

Certamente, maggiore sarà il grado di abilità dei robot di cooperare con gli umani, maggiore sarà la loro adattabilità al nostro ambiente e quindi permeabilità nella nostra società. Questo non significa necessariamente che essi dovranno avere aspetti umanoidi: per esempio, un robot che sostituisse i minatori in ambienti pericolosi e nocivi non sarà realizzato a forma umana. Tuttavia, la inevitabile crescita dell'interazione umano-robot richiederà interfacce operative sempre più a misura d'uomo. Questo è un aspetto della robotica che è studiato dalla Human Robotics Interaction. Certamente, qualora i robot abbiano compiti di assistenza diretta di umani (nel caso di assistenza di anziani, disabili) o di operatività di collaborazione con umani, la forma antropomorfica aiuterà sotto vari aspetti. Anche qui, abbiamo elementi di roboetica, sia positiva, vale dire progettare forme e abilità robotiche adatte agli umani; sia di attenzione, ovvero, lo studio delle implicazioni psicologiche e sociali relative al circondamento di umani da parte di robot umanoidi. Problemi a venire, ma non da sottovalutare.

Un tema molto più attuale è quello del lavoro. Infatti un settore dove i robot hanno già determinato dei cambiamenti, anche drammatici, è il settore industriale, dove la sostituzione del personale umano con robot ha iniziato a creare problemi di disoccupazione, problemi che potranno solo aumentare, man a mano che i robot diventeranno sempre più efficienti ed autonomi. La questione ha enorme rilevanza economica, sociale e politica, poiché per affrontarla occorre rimettere in discussione la struttura del mercato del lavoro e del welfare e, in prospettiva, la stessa organizzazione della vita quotidiana.

L'applicazione dei robot al campo della sanità avrà risultati senza dubbio positivi; ma occorre sorvegliare gli abusi. L'Etica Medica dovrà studiare questioni che riguardano la robotica chirurgica – per esempio la deviazione collegata allo spostamento dell'attenzione dal paziente alla tecnologia. Un altro settore fondamentale è la Bio-robotica, ovvero la progettazione ed applicazione di protesi robotiche e sistemi bionici ibridi. In questo contesto, la Robotica sta incontrando problemi affrontati da un altro punto di vista dalla Bioetica.

In ultima analisi, uno dei settori che saranno maggiormente chiamati in causa sarà il Diritto. Chi sarà ritenuto responsabile delle azioni dei robot? Il progettista? L'utente? Il robot?

Negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi progetti internazionali con lo scopo di affrontare tutti gli aspetti problematici della rivoluzione robotica, basti citare il progetto europeo Robolaw "Regulating Emerging Robotic Technologies in Europe: Robotics facing Law and Ethics".

Per promuovere una corretta informazione su questi problemi e favorire una partecipazione alla elaborazione di soluzioni socialmente condivise, nel 2010 è nata, grazie ad alcuni giovani ricercatori con base alla Università di Vancouver, la Open Roboethics Initiative (ORI), per iniziativa della giovane robotica AJung Moon e ora con un bel seguito di giovani ricercatori. ORI è un progetto internazionale il cui obiettivo è di realizzare una rete di discussione e sostegno alla Roboetica, dal basso.

Recentemente, a seguito dell'aumentata sensibilità a livello mondiale sulla Roboetica, si è aperta una forte campagna contro i robot militari. Infatti la guerra al "terrorismo" lanciata dal governo degli Stati Uniti contro le basi di al Qaeda in Pakistan e Yemen, Afganistan e Somalia ha reso abituale l'impiego di droni armati controllati da basi negli Stati Uniti, che però hanno fatto numerose vittime tra i civili innocenti, a causa della difficoltà di individuazione e selezione dei bersagli, in remoto.

In realtà fin dall'inizio gli studiosi della Roboetica avevano sottolineato la loro preoccupazione per le applicazioni della robotica al settore militare e nel 2011, nella conferenza Science for Peace ideata da Umberto Veronesi, ho lanciato un appello affinché non fosse concessa la "licenza di uccidere ai robot militari ("No Licence to Kill to Robots"): "I robot militari sono già utilizzati in combattimento e miliardi di dollari sono spesi da oltre quaranta nazioni del mondo per lo sviluppo di macchine belliche sempre più micidiali. Si tratta di un fenomeno di enorme portata, che sta avvenendo all'insaputa del grande pubblico e che viene al più descritto come una normale, persino benefica, evoluzione tecnologica, nonostante molti esperti mettano in guardia sui problemi impliciti ai robot militari e sul fatto che questi possono violare le convenzioni di Ginevra e le leggi di guerra vigenti. A monte di tutte queste problematiche tecniche e legali, occorre tuttavia sottolineare una ineludibile questione etica di principio: se sia cioè umanamente ammissibile concedere ad un'entità

autonoma non umana la licenza di uccidere un essere umano. Io credo che l'umanità dovrebbe essere informata e messa nelle condizioni di decidere consapevolmente su questioni che coinvolgono in modo così profondo aspetti fondamentali per la sopravvivenza della nostra specie. Sarebbe folle non aver appreso nulla dall'esperienza delle armi nucleari o dalle problematiche ambientali planetarie".

Questo movimento di opinione si è concretizzato con la fondazione nel 2012 della Campagna Stop Killer Robots, una coalizione internazionale per arrivare al bando delle armi completamente autonome.

La campagna è sostenuta da numerose NGO attive sul fronte della pace e dei diritti umani e ha già conseguito il risultato di portare il tema all'attenzione delle Nazioni Unite. L'obiettivo non è semplice, per l'ovvia opposizione di un mercato delle armi in continua crescita e con una potenza economica sovranazionale in grado di esautorare di fatto governi democraticamente eletti.

Un segnale incoraggiante viene però dall'approvazione da parte delle Nazioni Unite, il 7 luglio 2017, del "Trattato per la messa al bando delle armi nucleari", il primo trattato internazionale legalmente vincolante per la completa proibizione delle armi nucleari.

In conclusione il cammino della roboetica è solo ai suoi inizi, ma ritengo estremamente positivo che possa svilupparsi di pari passo con lo sviluppo della robotica stessa, nella speranza che questo possa effettivamente guidarne il cammino nella direzione di un vero progresso umano.

GIANMARCO VERUGGIO

Gianmarco Veruggio è uno scienziato robotico sperimentale, nonché uno studioso delle implicazioni etiche, legali e sociali della robotica e un visionario divulgatore degli scenari futuri conseguenti all'invasione robotica della società. Dirigente di Ricerca del CNR, ha progettato robot sottomarini e nel 2002 ha esplorato entrambi i poli con un robot controllato via satellite per la prima volta al mondo tramite Internet. Nel 2000 ha fondato l'Associazione Scuola di Robotica. Nel 2002 ha creato il termine Roboethics (Roboetica) e proposto il concetto di un'etica applicata allo sviluppo della robotica per il progresso umano e sociale. Nel 2009 ha ricevuto l'Onorificenza di Commendatore dell'Ordine al Merito della Repubblica Italiana.

Contatti:

Director of Research, Responsible for the Genoa Branch of IEIIT Istituto di Elettronica e di Ingegneria dell'Informazione e delle Telecomunicazioni

Consiglio Nazionale delle Ricerche

CNR-IEIIT, Via De Marini, 6 - 16149 Genova, Italia

Tel. +(39)010.6475616

Fax+(39)010.6475200 - Mobile +(39)338.9431561

Email: gianmarco@veruggio.it

http://www.veruggio.it; https://it.linkedin.com/in/veruggio

RIFLESSIONE SUI CAMBIAMENTI CLIMATICI TRA SCIENZA, FILOSOFIA E POLITICA

Vincenzo Artale

Riassunto

Questo breve lavoro vuole spingere il lettore, anche non specialista del settore, a riflettere sulle problematiche relative ai cambiamenti climatici, non solo come un complesso problema fisico, ma anche come un complesso, problema sociale, economico e filosofico. L'autore intendere spingere il lettore in un campo ancora poco esplorato tra incertezza e necessità di progettare un futuro che salvaguardi la natura umana e l'ambiente che ci circonda. In questo contesto si discute come la tecnologia, declinata nel senso più ampio, può essere favorevole a produrre nuove prospettive all'umanità mai esplorate in precedenza. Si discute la difficoltà di realizzare concretamente questo obiettivo, tentando di rendere il lettore consapevole delle difficoltà del problema scientifico che abbiamo di fronte e delle difficoltà di accettazione delle future regole di convivenza, che dovranno essere necessariamente basate su nuovi paradigmi di comportamento di tutti gli attori che recitano sul palcoscenico dell'umana società.

Parole chiave: Cambiamento climatico, Tecnologia, Comportamento umano

Keywords: Climate Change, Technology, Human behavior

Parte 1: La complessità del sistema climatico

Il sistema climatico fu definito, in un documento prodotto dal Global Atmospheric Research Programme (GARP) del World Meteorological Organization nel 1975, come "un sistema composto da: atmosfera, idrosfera, criosfera, litosfera e biosfera"; successivamente nel 1992, la Framework Convention on Climate Change delle Nazioni Unite (FCCC) definisce il sistema climatico come "l'insieme dell'atmosfera, dell'idrosfera, della biosfera e della geosfera, e le interazioni tra di esse".

Queste due definizioni sono simili, a meno di una semplice parola: "interazioni". L'impatto di questo termine ha innescato un processo tecnologico e scientifico cruciale per la comunità scientifica climatologica, la quale si è resa conto che per comprendere la variabilità climatica occorre rappresentare, in modo interattivo, tutte le componenti del sistema climatico nello stesso contesto metodologico. Per cui il modello numerico climatico, da considerare alla stregua di un laboratorio sperimentale, dalla fine degli anni '70 in poi non sarà più un semplice modello atmosferico, ma una enorme e via via sempre di più complicata macchina numerica (General Circulation Model). Questi GCM tentano di considerare, in modo sempre più approfondito e dettagliato, le interazioni non-lineari tra tutte le componenti del sistema climatico e i processi che li guidano, oltre ovviamente a risolvere più in dettaglio le loro scale spaziali e temporali.

Per cui, per affrontare il problema dei cambia-

menti climatici, è necessario essere pienamente consapevoli che si tratta di un "problema di fisica molto complicato": per quanto possa sembrare paradossale, oggi abbiamo una migliore comprensione del nucleo atomico che non di un centimetro cubo di atmosfera turbolenta.

Il concetto di Cambiamento Climatico non si deve confondere con quello di variabilità climatica o ancor peggio con le previsioni meteorologiche. Per variabilità climatica s'intende la fluttuazione di una specifica grandezza climatica (ad esempio la temperatura media della superficie terrestre) intorno al suo valore medio, ottenuto dalle rilevazioni di lungo termine del parametro climatico considerato (in genere per un tempo maggiore di trenta anni). Più specificatamente, le fluttuazioni sono legate alle variazioni anno per anno (inter-annuali e stagionali) e alle oscillazioni decennali, che si sovrappongono al valore medio della grandezza. La variabilità climatica viene definita come lo spostamento dalla media, mentre il cambiamento climatico si definisce statisticamente come lo spostamento della media. Attualmente abbiamo osservato uno spostamento medio della temperatura della terra di circa 0.7 °C.

Il sistema climatico non è, pertanto, un sistema deterministico ma, al contrario, è un sistema caotico e fortemente dipendente dalle condizioni iniziali: è sufficiente anche una piccola incertezza o una lieve perturbazione alle condizioni di partenza per far sì che il comportamento del sistema climatico tenda a divergere in modo irregolare, secondo quello che il famoso meteorologo Edward Norton Lorenz definì "effetto farfalla". La profonda alterazione dell'attuale stabilità del sistema climatico non è dovuta necessariamente ad ampie perturbazioni, ma anche disturbi di entità relativamente lieve hanno la potenzialità di raggiungere i "punti deboli" (tipping points) del sistema e, pertanto, incidere direttamente nella sua complessa dinamica.

Più in dettaglio il sistema climatico terrestre è costituito, oltre che dal sole che gli fornisce l'energia, dall'atmosfera, dall'oceano, dalla criosfera (i ghiacci) e dalla biosfera (il mondo vivente). Il clima terrestre è determinato dagli scambi termodinamici interni e dagli scambi di acqua all'interno di questi settori. L'atmosfera e l'oceano sono i principali responsabili del trasporto e della distribuzione del calore sulla terra. Si stima che il trasporto di calore dalle regioni tropicali verso i poli si distribuisca in parti uguali tra l'oceano e l'atmosfera. Per esempio nell'Oceano Atlantico il calore immagazzinato negli strati superficiali delle zone tropicali è trasportato verso nord attraverso grandi correnti oceaniche (e.g. la Corrente del Golfo), il cui principale effetto è di mitigare il clima dell'Europa Occidentale. Queste correnti durante il loro percorso verso nord non cessano mai d'interagire con l'atmosfera, attraverso scambi di massa e di calore. Lo stesso fenomeno si produce nell'Oceano Pacifico, ma con un trasporto di calore sud-nord (meridionale) meno efficiente, il calore arriva a latitudini minori, tanto da produrre in media una differenza di circa 4°C in meno, rispetto alla regione più settentrionale del Nord Atlantico. I processi d'interazione tra l'oceano e l'atmosfera sono estremamente complessi. In media l'atmosfera fornisce all'oceano il 43% della sua energia interna, il resto proviene direttamente dal sole (35%) e dagli scambi con i continenti (22%). In seguito, il calore assorbito dall'oceano è acquisito e ridistribuito orizzontalmente e verticalmente all'interno delle diverse masse d'acque oceaniche ed infine restituito all'atmosfera. I tempi di risposta alle perturbazioni esterne del sistema oceanico sono circa due ordini di grandezza maggiori di quelli atmosferici. La Corrente del Golfo, sempre attraverso misure sperimentali, che purtroppo sono state eseguite in modo sistematico solo negli ultimi cinquanta anni, ha mostrato una notevole variabilità dal 1950 in poi, parte di questa variabilità si può spiegare con la variabilità e l'avvezione dei "gyres" (vortici oceanici) subtropicali. Alcuni suggeriscono che questa variabilità può essere associata alla variabilità climatica in generale, ed un indicatore climatico molto potente specialmente per l'area del Nord Atlantico, ma funziona bene anche per il Mediterraneo, è il NAO (North Atlantic Oscillation Index). Tuttavia questo meccanismo ha dei punti critici (*tipping points*), sorpassati i quali la circolazione termoalina incomincia ad oscillare tra diversi stati d'equilibrio, tra cui è compreso quello compatibile con un suo eventuale blocco.

Il riscaldamento superficiale, che si sta osservando negli ultimi venti anni e causa lo scioglimento dei ghiacci, non solo quelli marini del Polo Nord, ma anche terrestri in particolare quelli della Groenlandia, può innescare questo tipo di oscillazioni (del tipo di Hopf)¹.

Infatti, l'immissione di acqua dolce proveniente dallo scioglimento dei ghiacciai comporterà un indebolimento dei complessi meccanismi che sono alla base del trasporto di calore dall'Equatore alle alte latitudini (50°-60° N), attualmente solo accennati, come si desume dalla letteratura scientifica recente. In particolare, è possibile che questa immissione di acqua dolce condizioni fortemente i processi di convezione nel Labrador Sea e nei mari della Groenlandia e dell'Islanda, che si possono considerare come il "volano" dell'intera circolazione oceanica. A tale proposito vale la pena di ricordare che, nel lungo periodo, tra i vari comparti del sistema climatico, l'oceano è quello più decisivo per definire il tipo di clima che si instaura. Non a caso Broecker (1997), in un suo famoso articolo su Science, definì l'insieme di questi processi il "tallone d'Achille" del sistema climatico terrestre e, all'interno di questa problematica, anche il nostro piccolo mar Mediterraneo gioca un ruolo "positivo" di contrasto in quanto, tramite lo Stretto di Gibilterra, immette alla profondità di circa 1000 metri un'acqua relativamente calda e salata che contrasta l'effetto di indebolimento della circolazione termoalina dovuto allo scioglimento dei ghiacci polari (Artale et al., 2006).

Se la circolazione termoalina si bloccasse completamente, nelle aree del Nord Atlantico la temperatura si abbasserebbe di più di 10°C. Cosa che, infatti, è già successo nel passato, come si può constatare dalle analisi sui sedimenti oceanici e dalle carote di ghiaccio in Groenlandia, dalle quali si è evidenziato che la circolazione termoalina si è interrotta bruscamente diverse volte a causa di flussi anomali d'acqua dolce provocando dei lunghi periodi freddi, in Europa Nord Occidentale, per centinaia d'anni (*Heinrich events*). L'ultimo di questi eventi è accaduto circa 12000 anni fa (cfr i numerosi articoli di Broecker sull'argomento).

Lo studio di questi eventi, pur non dando nessuna indicazione certa sul clima futuro, è importante perché ci dà la consapevolezza che eventi catastrofici nella circolazione oceanica con fortissimi impatti sulla variabilità climatica globale possono avvenire indipendentemente da fattori antropici, ossia possono essere considerati come delle instabilità non-lineari insite al sistema climatico, come discusso sopra.

Tuttavia il riscaldamento globale, dovuto per esempio ai gas-serra, può contribuire ad aumentare sia la temperatura superficiale dell'oceano che la piovosità alle alte latitudini ed entrambi i fattori danno un contributo negativo sulla densità superficiale, riducendo così il motore della circolazione termoalina (Bindoff et al., 2007).

Se la temperatura superficiale, recando la 'firma' quasi istantanea delle interazioni con l'atmosfera, è per sua natura soggetta ad una grande variabilità, l'analisi della variabilità del contenuto di calore e di sale nell'intero volume della massa d'acqua fornisce sicuramente un indice climatico più adatto a monitorare eventuali variazioni su tempi lunghi. Possiamo definire l'andamento spaziale e temporale di questo indice come uno dei segnali più robusti ai fini climatici. Ed è abbastanza robusto il calcolo che stabilisce che l'accumulo di calore nei primi 700 m dell'oceano globale, ossia la parte più direttamente connessa con i processi atmosferici, è in costante aumento (Bindoff et al., 2007).

Parliamo più in dettaglio del nostro mare.

Il Mediterraneo mostra un trend positivo in temperatura e salinità per i primi 700 m, a cui sono sovrapposte numerose oscillazioni positive e negative, ossia fasi di riscaldamento/raffreddamento e salinificazione/desalinificazione. Il quadro generale che ne consegue mostra che, nel corso del XX secolo, le acque intermedie e profonde nel Mediterraneo Occidentale hanno subito un riscaldamento ed aumento della salinità che può essere diviso in tre diverse fasi. Infatti, l'iniziale tasso di crescita osservato nei primi anni del secolo subisce un incremento intorno al 1960, passando da circa 0.5 10⁻³ °C/anno a 2-4 10⁻³ °C/anno per la temperatura e da circa 0.5 10⁻³ psu/anno a 1-2 10⁻³ psu/ anno per la salinità. Parallelamente, il tasso di crescita di temperatura e salinità per le acque intermedie risulta essere comparabile e leggermente superiore. Dopo il 1990 tali tassi di crescita aumentano di più di un ordine di grandezza e le acque profonde nel Mar Tirreno e nel Mar Ligure mostrano un aumento della temperatura e della salinità pari a qualche centesimo di grado e psu per anno. Tale improvviso aumento è dovuto alla produzione di acque di fondo con caratteristiche fisiche completamente diverse, provenienti dal Mar Egeo invece che dal Mar Adriatico, così come era avvenuto normalmente almeno negli ultimi 50 anni, quindi i cambiamenti climatici legati all'apporto umano non dovrebbero aver dato nessun contributo.

I dati analizzati sopra pongono immediatamente una domanda: quello che stiamo osservando è da interpretare come l'inizio di un cambiamento climatico, con un forte contributo umano, che in questo secolo potrebbe essere ben più robusto spostando la media da 1 fino a 5 °C secondo gli scenari peggiori o può essere ascrivibile invece all'interno della variabilità climatica che sempre è stata osservata da milioni di anni? Molti propendono per la prima ipotesi e pochi lo interpretano, ridimensionando molto il contributo umano, come una fluttuazione del sistema climatico.

Ma tutti riconoscono che almeno negli ultimi 50 anni, da quando si hanno serie strumentali spazialmente ben distribuite, è in atto un riscaldamento del pianeta, con sovrapposte notevoli fluttuazioni positive/negative che possono durare anche alcuni anni: per esempio durante intense eruzioni vulcaniche si osservano fluttuazioni negative intorno a 1-2 °C e con una durata di alcuni anni. Inoltre nulla fa presupporre che tale tendenza al riscaldamento tenda a diminuire, anche se dal 2001 (circa) si è osservato uno *hiatus*, ossia una sosta dei trend superficiali di temperatura, ma l'accumulo di calore negli strati profondi non fa che aumentare.

Tutti riconoscono che, come conseguenza di tali variazioni molti aspetti della nostra vita stanno cambiando, per esempio un aumento del rischio di subire eventi naturali drammatici come le alluvioni o l'estremo opposto come periodi siccitosi, incendi incontrollabili (in Russia nel 2010, in California quest'anno ed in anni precedenti), la diffusione di malattie o di cambiare la bellezza e varietà della natura che ci circonda, riducendone la biodiversità, con un evidente enorme danno economico principalmente nei settori dell'energia, trasporto, agricoltura e turismo.

Per cui si pone il problema di adattarsi attuando azioni di mitigazione, il che significa sviluppare piani di azioni integrate al fine di sviluppare la capacità di resistenza del sistema naturale ai cambiamenti climatici presenti e futuri (resilienza).

L'adattamento si deve sviluppare a scala regionale e locale, coinvolgendo tutti i livelli decisionali, da quello municipale a quello delle organizzazioni internazionali. Le problematiche relative all'adattamento pongono delle sfide enormi, ma allo stesso tempo affascinanti,: un Grand Challenge scientifico e politico.

Il problema è apparentemente semplice nella sua enunciazione: si parte da una necessità, ossia che nessun essere umano può o vuole rinunciare allo sviluppo ed al progresso delle sue condizioni umane e che questo è un diritto di tutta l'umanità che deve essere acquisito concretamente da tutti i popoli, dall'Africa all'India, Cina e tutti gli altri Paesi in via di sviluppo, inclusi anche i Paesi con un notevole tasso di industrializzazione.

Da questa imprescindibilmente ne deriva un'altra: necessità di fare in modo che tale acquisizione di diritti sia duratura e non avvenga a scapito dell'ambiente, di non distruggere ciò per cui ha senso vivere. In tal

senso si viene ad instaurare una relazione a due vie tra sviluppo e cambiamenti climatici. Da una parte l'incremento incessante del PIL globale, ma ricordiamo con una sua distribuzione globale senza robuste regole condivise a livello internazionale, che solo apparentemente sembrano rendere più ricca la moltitudine globale e dall'altra la sempre maggiore vulnerabilità del pianeta ai cambiamenti climatici.

Invece sarebbero auspicabili iniziative coerenti e condivise che mettano insieme lo sviluppo tecnologico, gli investimenti finanziari e il commercio globale con la povertà, la salvaguardia dell'ambiente e i diritti umani, per evitare come sta accadendo in alcune regioni dell'Africa, una seconda e ancor più tragica colonizzazione di questo continente in forte espansione e più in generale l'accaparramento incondizionato delle risorse naturali del pianeta (non rinnovabili in tempi brevi).

Le politiche sociali e di governance condivise, possono avere un profondo impatto sulla limitazione delle emissioni di gas serra (e di tutti i gas inquinanti) o sul rapporto costi benefici delle azioni di mitigazione necessarie e in generale sul benessere politico e sociale della moltitudine umana. È necessario considerare il cambiamento climatico e le politiche di adattamento/ mitigazione come una opportunità per l'intera umanità, e ciò può avvenire solo attraverso un cambio drastico dei paradigmi su cui è basato l'attuale sviluppo tecnologico.

Una prima conclusione può essere tratta: i cambiamenti climatici, esistono, sono dimostrati da una ampia letteratura e dalla nostra esperienza quotidiana. Sopra si sono dati solo alcuni cenni sulla complessa tematica dei Cambiamenti Climatici, d'altronde non è l'obiettivo di questo lavoro approfondire tutti gli aspetti scientifici, per questo rimandiamo alla letteratura scientifica di settore e alla bibliografia. Però, due elementi sono emersi prepotentemente: "complessità" ed "incertezza", tra di loro fortemente connessi. Elementi che la scienza del clima condivide con tante altre scienze, per esempio come quella della vita e dell'economia. Gli scienziati che si occupano di clima stanno perseguendo con rigore obiettivi scientifici ampi e complessi in un settore fondamentale per il futuro dell'umanità, obiettivi che mirano a comprendere i segreti della variabilità climatica che tutti noi osserviamo e di cui rimane traccia in tutto l'ambiente che ci circonda. Nei fatti il paesaggio che "viviamo" tutti i giorni è stato modellato, generato, modificato dal clima che cambia per una sua natura intrinseca che spesso ci appare incomprensibile proprio perché "impredicibile e caotico". Pertanto il "problema climatico" non puo' essere considerato come il punto cruciale dello sviluppo umano, quello in cui si decide il percorso dell'umanità nei prossimi decenni, o perlomeno questo non è il solo. È invece una delle tante complesse problematiche con cui "l'umanità" si deve confrontare. È sbagliato quindi porre solo il clima al centro di un programma politico, investendo solo su questo per il proprio destino politico: è demagogico e fuorviante come verità scientifica. Tuttavia attribuire la responsabilità dei cambiamenti climatici alle attività umane è, nella attuale situazione, un non-problema: perché l'uomo si è completamente intrecciato con il sistema climatico, perché è partecipe nel determinarne i destini, seguendo Aldo Schiavone in "Storia e Destino", non si deve procedere più per conflitti, ma per sintesi tra natura umana e sviluppo tecnologico. Su questo non possono esistere più delle ambiguità. La moltitudine umana, che occupa il pianeta, deve avere ora consapevolezza delle proprie azioni e agire collettivamente per poter continuare ad abitare il pianeta. Il problema dei Cambiamenti Climatici impone scelte globali, per cui l'adattamento è un settore transfrontaliero, è una questione che richiede una completa integrazione di politiche settoriali a livello globale e nazionale, perché è fondamentale la riduzione a lungo termine della vulnerabilità degli ecosistemi e del paesaggio, cruciali per diversi settori economici (pesca, agricoltura, etc.) ed evitare "pericolose" modifiche irreversibili al sistema climatico. Le buone pratiche di adattamento dovrebbero essere appropriate e proporzionate alle necessità regionali, con piani di azione a lungo termine, cercando di accelerare lo sviluppo tecnologico in modo che sia anche conveniente economicamente; questo si può ottenere collegando le politiche di adattamento a quelle di mitigazione. Un lavoro sostanziale è necessario per meglio valutare i costi di adattamento per sostenere un ulteriore processo decisionale integrato.

Riguardo alla mitigazione, i vari report dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), danno autorevoli informazioni su tutti gli aspetti delle tecnologie e le politiche socio-economiche, tra cui le misure efficaci per controllare le emissioni di gas a effetto serra (GHG) e una comprensione completa sulle future emissioni di GHG e loro driver, mettendo a disposizione diverse opzioni di mitigazione, i potenziali di mitigazione e i costi associati, i quali sono particolarmente importanti per sostenere i negoziati sulle riduzioni future delle emissioni di GHG a livello globale. Si ricorda anche, indipendentemente dalla scala di mitigazione ed adattamento, che queste misure nei prossimi dieci o venti anni sono necessarie a causa dell'inerzia nel sistema climatico. Infatti i Cambiamenti Climatici stanno già oggi causando, con aumenti di temperatura inferiori a 1° C, elevati problemi allo sviluppo economico e sociale in molti paesi in via di sviluppo e non solo.

Parte 2: Analisi dei soggetti attivi oggi sulla questione dei cambiamenti climatici e del perché il dibattito sui cambiamenti climatici è così acceso e divisivo

Per rispondere alla domanda sul perché il dibattito sui Cambiamenti Climatici è così acceso, a mio avviso occorre fare una premessa storica su alcuni principi socio-filosofici del mondo occidentale, in quanto il cambiamento climatico mette a dura prova proprio le basi su cui è cresciuta ed evoluta la nostra società. E vedrete che, alla fine, dopo questa premessa tutto vi sembrerà più chiaro.

Viviamo un periodo storico in cui si tende a svalorizzare la scienza (si prenda ad esempio il recente dibattito sui vaccini) e quindi anche chi ci lavora: lo scienziato. Lo scienziato è ormai considerato un soggetto sociale inadeguato, forse perché è ancora troppo impregnato della cultura del XX secolo ed è poco propenso ad abbracciare la "modernità" del XXI secolo. Emergono domande cruciali quali le seguenti, a cui occorre dare delle risposte.

- · Questa figura ingombrante è ancora necessaria? O è forse inadeguata alle esigenze sempre più opprimenti della globalizzazione?
- · Quanto il rischio della sua sopravvivenza come libera espressione del pensiero umano può essere considerato un sintomo recente delle debolezze della democrazia, debolezze amplificate dalla crisi economica e dalla globalizzazione?
- In poche parole la domanda ultima è: quali sono le figure dominanti di questo periodo storico, lo scienziato è una di queste?

Ed ancora vi invito a riflettere sulla seguente questione, a prima vista ovvia. Cosa si può nascondere dietro le apparentemente innocue affermazioni, ormai usuali, tanto da apparire dei luoghi comuni, tipo: "la ricerca deve sostenere la crescita e le attività industriali e produttive"?

Nasce il dubbio che qui si celi la volontà di ingabbiare la creazione della conoscenza, creazione troppo libera, per la sua stessa natura, da schemi e costrizioni di qualunque genere, una creazione che tuttavia ci regala, molto spesso quasi involontariamente, straordinarie scoperte e rotture di paradigmi. Questo unico indirizzo viene "imposto", porto ad esempio l'H2020 che ha visto la maggior parte dei finanziamenti concentrati su pochi mega-progetti, dando poco spazio alla creatività di gruppi di ricercatori meno supportati. Forse, questo pensiero unico è legato ad una tendenza ad imporre, non come un tempo con la abiura o la galera ma più semplicemente con i soldi, una figura "moderna" di scienziato, una figura imposta soprattutto facendo leva sul generare una sorta di senso di colpa per il fatto di non essere utili alla società e quindi la paura di essere considerati dei parassiti, portando come diretta conseguenza ad una "pulsione di annullamento".

Ouesto approccio ha, curiosamente, un impatto straordinario, che piace molto a chi detiene il potere soprattutto economico, obbliga tutti a stare sulla stessa strada, sullo stesso cammino, costringe a condividere lo stesso progetto politico, ad adattarsi al conformismo, all'a-criticismo, realizzando una omologazione ideologica (economica) su grande scala (fenomeno iniziato da lungo tempo, vedi la Trilaterale del 1973, costituita da circa 300 membri provenienti da Europa, Giappone e Stati Uniti. Tra le cose interessanti che a suo tempo emersero, quello che più mi interessa è il concetto di "affaticamento" dei governi occidentali nel sostenere le politiche sociali, massimo esempio il welfare").

Allora mi domando: esiste veramente un concreto rischio, in questo nostro modello di società moderna, senza che noi stessi ce ne rendiamo conto, di elementi di fascismo e di autoritarismo diffuso, di pensiero unico ed omogeneo, addirittura a livello globale? E questo non solo nello specifico settore "scientifico", infatti se allarghiamo la nostra analisi anche a ciò che sta avvenendo nel nostro Paese, includendo anche l'apparato educativo nel suo complesso, ecco che il panorama si tinge di ombre sempre più inquietanti, che lasciano pochi dubbi su quanto questa società omologata alla produzione di soldi, PIL etc., paradossalmente finisca per marginalizzare sempre più intellettuali, scienziati, critici, considerati appunto eretici, così come tutti gli esseri umani che non sono interessati a diventare esclusivamente soggetti economici (homo oeconomicus), ma desiderosi di valorizzare la propria natura umana. Tutto questo è giustificato da varie emergenze, da quella economica alla migrazione. Imponendo un continuo stato di eccezione. Ed il cambiamento climatico sviluppa quasi naturalmente un intreccio forte tra crisi economica e migrazione, intesa anche come convivenza tra modi di esistere molto differenti tra loro. La moltitudine umana, stressata dalla questione della migrazione e dalla richiesta di sicurezza per arginarla, è capace di sopportare in futuro anche lo stress legato ai Cambiamenti Climatici, che richiedono piani di adattamento e mitigazione globali ancora più impegnativi? Una via di uscita dalle emergenze climatiche impone scelte profonde, un cambio forte di paradigma che stravolge anche la nostra vita quotidiana, i cui comportamenti risiedono su elementi fondamentali anche di tipo giuridico.

In tale ambito è utile approfondire il concetto di stato di eccezione (Agamben, 2003): "Il sistema giuridico dell'Occidente si presenta come una struttura doppia, formata da due elementi eterogenei e, tutta-

via coordinati: uno normativo e giuridico in senso stretto, che possiamo iscrivere per comodità sotto la rubrica potestas (è una manifestazione di un potere socialmente riconosciuto), e uno anomico e metagiuridico, che possiamo chiamare col nome auctoritas (è una manifestazione di un sapere riconosciuto socialmente). Lo stato di eccezione è il dispositivo che deve, in ultima istanza, articolare e tenere insieme i due aspetti della macchina giuridico-politica, istituendo una soglia di indecidibilità fra anomia e nomos, fra vita e diritto, fra auctoritas e potestas, una contrapposizione tra senato e popolo nella Roma repubblicana o nella Europa medievale tra potere spirituale e potere temporale. In genere questo sistema può funzionare, ma, quando tendono a coincidere in una stessa persona, quando lo stato di eccezione, in cui essi si legano e si indeterminano, diventa la regola, allora il sistema giuridico-politico si trasforma in una macchina letale. La finzione che governa questo arcanum imperii per eccellenza del nostro tempo. Ciò che l'arca del potere contiene al suo centro è lo stato d'eccezione ma questo è essenzialmente uno spazio vuoto, in cui una azione umana senza rapporto col diritto ha di fronte una norma senza rapporto con la vita. Ciò non significa che la macchina, col suo centro vuoto, non sia efficace; al contrario, quel che si vuole mostrare è precisamente che essa ha continuato a funzionare quasi senza interruzione a partire dalla prima guerra mondiale, attraverso fascismo e nazionalsocialismo, fino ai nostri giorni. Lo stato di eccezione ha anzi raggiunto oggi il suo massimo dispiegamento planetario." Il discorso di Agamben prende le mosse analizzando la figura dell' "Homo sacer" (Uomo Sacro: a questo proposito ricordo che l'aggettivo Sacro deriva da una parola indoeuropea che significa "separato") che viene definito nel II secolo dopo Cristo dal grammatico latino Festo "colui che il popolo ha giudicato per un delitto; e non è lecito sacrificarlo, ma chi lo uccide, non sarà condannato per omicidio". Si tratta, quindi, di una vita umana che si può uccidere ma che non è sacrificabile, che trascende tanto l'ordinamento del diritto umano quanto le norme del diritto divino. Se qui sacro è il vivente giudicato come assassino, allora nel momento in cui la vita viene dichiarata sacra in sé, ciò equivale a dichiararla colpevole. Da ciò si evince la violenza connaturata del diritto: la nuda vita è portatrice del bando sovrano, ovvero del nesso tra violenza e diritto perché è in quanto tale colpevole. Si tratta della "nuda vita", secondo l'enigmatica espressione adottata da Walter Benjamin in "Per la critica della violenza". L'homo sacer è la figura originaria della vita presa nel bando sovrano. Il potere sovrano in quanto produzione di un corpo bio-politico è produzione di homines sacri, consacrazione del vivente, è quel processo che rende la vita propriamente sacra, cioè uccidibile e non sacrificabile. Questo discorso è ripreso da Agamben anche nel suo lavoro più recente: "Stato di eccezione". La vita, infatti diviene sacra solamente nell'eccezionalità propria del diritto. Ma, come è ben verificabile oggi (basti pensare alla politica degli Stati Uniti o quella della Turchia in cui si tollera l'eliminazione dell'intellighenzia pur di frenare l'immigrazione e lo status quo). L'eccezione tende ad estendersi nel tempo fino a diventare la regola; quello che dovrebbe essere uno stato d'emergenza (e quindi di eccezione) temporaneo, diventa lo stato normale delle cose. Agamben segnala anche il particolare rapporto che effettivamente sussiste tra homo sacer e sovrano: "sovrano è colui rispetto al quale tutti gli uomini sono potenzialmente homines sacri e homo sacer è colui rispetto al quale tutti gli uomini agiscono come sovrani".

Ecco che la figura di scienziato che può sussistere oggi non è più quella figura privilegiata a cui la storia ci ha abituato, ma la includerei tra tutte quelle figure enigmatiche che vivono e prosperano in quella terra di tolleranza le cui dimensioni cambiano molto con i tempi: l'HOMO SACER di cui parla Agamben? Da qui la difficoltà di tenere il punto, la propria dignità di uomo libero quando la storia ci costringe a vivere tempi particolari e complessi come quelli di oggi. I Cambiamenti Climatici sono, come abbiamo dimostrato, troppo intrecciati con le scelte di potere e quindi sono per loro natura divisivi e la libertà dello scienziato che ci lavora rischia che la sua autonomia possa essere sacrificata a causa di uno stato di eccezione permanente.

Occorre ora sottolineare un altro elemento, che rafforza quanto detto in precedenza, ed è il concetto di "incertezza" con cui il problema dei cambiamenti climatici deve convivere. Pertanto lo scienziato che si occupa di clima è difficilmente inquadrabile in un pensiero unico predefinito, in quanto deve convivere con l'impossibilità di dare risposte precise. Questo non ci puo' sorprendere, la fisica moderna mostra molti esempi in cui il concetto di incertezza entra in ballo pesantemente, mettendo in imbarazzo persino Einstein, è molto nota la sua famosa frase riguardo la meccanica quantistica: "Dio non gioca a dati con l'universo" (nota: L'affermazione di Einstein non ha a che vedere con la religione, come invece alcuni credono di intendere. La cosa avvenne infatti così: in fase di formulazione del principio di Heisenberg, Albert Einstein, convinto che ogni fenomeno fosse deterministico purché fosse possibile conoscere tutte le condizioni iniziali ed ogni forza coinvolta, se ne uscì con la famosa frase: "Dio non gioca a dadi con l'universo". A questa asserzione, Niels Bohr rispose: "Einstein, smettila di dire a Dio cosa deve fare". La dose

fu ulteriormente rincarata da Richard Feynman che aggiunse. "Dio non solo gioca a dadi con l'Universo, ma li getta anche dove non li possiamo vedere". Alla fine sembra proprio che Einstein avesse torto. Gran parte delle teorie fisiche attuali, non ultime le ipotesi cosmologiche più recenti, si basano sull'accettazione del criterio che molti fenomeni fisici, per esempio un rubinetto che gocciola, sono indeterministici e possono essere espressi solo in termini di probabilità). Il concetto di probabilità, è stato ampiamente applicato nella meccanica quantistica (vedi principio di indeterminazione di Heisenberg), nei sistemi dinamici e modelli caotici, come ad esempio gli studi di. Poincarè (1854-1912) alla fine del XIX secolo e Lorenz (1993), che sono alla base di concetti fondamentali per le previsioni meteorologiche (vedi concetto di predicibilità di I e II tipo) o nei fondamenti della teoria della turbolenza di Kolmogorov negli anni '40 (per maggiori dettagli vedi l'articolo del suo allievo Yaglom, 1994).

Convivere con l'incertezza non significa non prendere decisioni. Qui si apre, come abbiamo tentato di descrivere precedentemente una questione etica e sociale molto complessa, legata a mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici. Occorre progettare un mondo nuovo, una moltitudine umana basata su nuove regole. A questo proposito è illuminante la frase di Agamben (2011), che rappresenta davvero uno sguardo laico sul monachesimo e in particolare sul suo aspetto cruciale, cioè la regola e la comunità che la adotta: "In questione, nelle regole monastiche, è, dunque, una trasformazione che sembra investire il modo stesso in cui si concepisce l'azione umana, che dal piano della prassi e dell'agire si sposta a quello della forma di vita e del vivere. Questa dis-locazione dell'etica e della politica dalla sfera dell'azione a quella della forma di vita costituisce il lascito più arduo del monachesimo, che la modernità non è riuscita a delibare. Come intendere, infatti questa figura di un vivere e di una vita, che, affermandosi come formadi-vita, non si lascia, però, ricondurre né al diritto né alla morale, né a un precetto né a un consiglio, né a una virtù né a una scienza, né al lavoro né alla contemplazione e che, tuttavia, si dà esplicitamente come canone di una perfetta comunità? (Qualunque sia la risposta che si dà a questa domanda, è certo che il paradigma dell'azione umana che in essa è in questione ha esteso progressivamente la sia efficacia ben al di là del monachesimo e della liturgia ecclesiastica in senso stretto, penetrando nella sfera profana e influenzando durevolmente tanto l'etica che la politica occidentale...".

La novità fondamentale della regola è posta dal ripensamento - pratico e operativo - del rapporto tra azione e norma all'interno di una comunità liberamente formata che si oppone all'anarchia e all'assenza di regole. Quasi fosse una nuova polis, o emergesse dallo «stato di natura», il monastero è il luogo dove la regola – che, per quanto ispirata, è comunque scritta dagli esseri umani - sgorga da una «forma di vita» (quella apostolica) prima ancora che da un principio; il monastero è un luogo dove si sta insieme e dove si vive in un certo modo. Un indizio interessante, ad esempio, si trova nella terminologia dell'habitatio, da cui discende l'abitare, inteso come residenza e stabilità, l'abito come veste uniforme e l'abito come abitudine, modo di vita regolare. (Tra l'altro, nota Agamben, "è solo dopo che il monachesimo ebbe trasformato la veste in un habitus, rendendola indiscernibile da un modo di vita, che la Chiesa (a partire dal concilio di Macon, 581) dà inizio al processo che porterà alla chiara differenziazione tra abito clericale e abito secolare".

In conclusione, si può criticare la modernità, la globalizzazione, l'uso della tecnologia contro la natura umana, il "nuovo scienziato" emergente senza apparire conservatore? c'è ancora spazio per "dire di no" senza fare la fine dei "12" e senza essere sacrificati? (Giorgio Boatti, 2010).

Il problema dei cambiamenti climatici è un problema enorme e non solo da un punto di vista della fisica, ma è diventato un problema filosofico, sociale e politico. Pertanto sia lo scienziato sia il cittadino comune è necessario che assumano un atteggiamento aperto e non settoriale, consapevoli della sfida complessa e profonda da affrontare.

Abbiamo infine tentato di dimostrare che, al di là dei ragionevoli dubbi ed incertezze, altresì strutturali alla questione climatica, ci sono delle strade nuove che la moltitudine umana deve intraprendere, senza nessuna "incertezza", riguardanti nuove "forme di vita" che implicano principalmente la sostituzione del paradigma del possesso con quello della condivisione.

Riferimenti bibliografici

- 1. Agamben G. (2003), Stato di eccezione, Homo sacer II, 1, Bollati Boringhieri.
- 2. Agamben G. (2011), Altissima povertà, regole monastiche e forme di vita, Homo sacer IV, 1, Neri Pozza.
- 3. Artale V., and Coauthors (2006), The Atlantic and Mediterranean Sea as connected systems, Mediterranean Climate variability, P. Lionello, P. Malanotte-Rizzoli and R. Boscolo, Eds., Elsevier, 283-323.
- Bindoff N., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quere, S. Levitus, Y. Nojiri, C. K. Shum, L. Talley, A. Unnikrishnan (2007), Observations: oceanic climate change and sea level, Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

- Change, S. Solomon, Ed., Cambridge Univ. Press, New York,
- 5. Boatti G. (2010), Preferirei di no, le storie dei dodici professori che si opposero a Mussolini, Einaudi.
- 6. Broecker W.S. (1997), Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: Will man-made CO, upset the current balance?, Science 278 (5343), 1582-1588.
- 7. Lorenz E. (1993), The essence of chaos, University of Washington Press.
- 8. Poincaré J.H. (1989), La Scienza e l'ipotesi, Ed. Dedalo.
- 9. Schiavone A. (2007), Storia e destino, Einaudi, Collana: Vele,
- 10. Yaglom A. M. (1994), A. N. Kolmogorov as a fluid mechanician and founder of a school of turbulence research, Annu. Rev. Fluid Mech., 26, 1, 22.

Note

¹ Le biforcazioni di Hopf, avvengono quando il sistema (dinamico) incomincia a perdere la sua stabilità ed oscilla nervosamente senza rompersi: è la fase di transizione tra un ciclo limite ed un altro, tipicamente queste fasi avvengono nell'inter-glaciale dove si manifestano forti instabilità del sistema climatico (DANSGAARD-OESCHGER (D/O) eventi caldi, o eventi freddi come gli HERICH EVENTS) con un ciclicità intorno ai mille anni.

VINCENZO ARTALE

Laurea in Fisica presso l'Università di Roma "La Sapienza" in data 29/3/1979, discutendo una tesi in modellistica oceanografica, ha svolto attività di ricerca all'estero, negli Stati Uniti (NCAR) ed in Francia (Università di Grenoble). Svolge attività di ricerca in Enea dal 1984, in ambito geofluidodinamico ed in particolare nello studio

della variabilità climatica, con un particolare interesse per la modellistica oceanografica globale e a scala di bacino (Mediterraneo), per il calcolo avanzato, l'implementazione di codici numerici su macchine parallele e vettoriali; studio della circolazione termoalina dell'oceano, della sua variabilità, stabilità e processi oceanografici connessi, attraverso lo sviluppo di modelli analitici e numerici; studio di fenomeni di diffusione e trasporto in fluidi geofisici attraverso lo sviluppo di modelli analitici e numerici e confronto con dati osservati da satellite e in situ, in particolare per applicazioni oceanografiche in fluidi stratificati (e.g. stretti di mare, onde interne e solitoni); sviluppo di metodi statistici per l'analisi di dati idrologici e langrangiani. Ha assunto in Enea, per molti anni, incarichi di responsabilità di strutture scientifiche anche complesse. Ha assunto numerosi incarichi internazionali, per esempio come Lead Author IPCC-AR4, Nobel per la Pace 2007) o Chairman e/o responsabile scientifico di progetti internazionali in particolare finanziati dalla comunità europea o nazionali. Svolge attività di referee delle principali riviste internazionali in ambito climatico e geofisico incluso Nature o in ambito nazionale come valutatore ANVUR-VQR, è autore di numerose pubblicazioni su riviste internazionali e capitoli di Libri, editor di numeri speciali di riviste internazionali e di un libro sui cambiamenti climatici. È invitato frequentemente a far parte di commissione di valutazione di personale scientifico a livello nazionale ed internazionali. È stato advisor di studenti di dottorato, assegni di ricerca o di laureandi in discipline scientifiche, tiene regolarmente corsi di oceanografia e cambiamenti climatici presso l'Università di Roma3 e Tor Vergata.

Contatti.

ENEA C.R. Frascati - Via Enrico Fermi, 45 00044 Frascati (Rome), Italy cell: +39 3209224133 phone: +39 06 94005639 http://www.enea.it/ http://utmea.enea.it/people/artale/

LA GENETICA VEGETALE SARÀ PRONTA PER ASSICURARE ALIMENTI ALLA POPOLAZIONE MONDIALE DEL 2050?

A. Michele Stanca

Riassunto

L'agricoltura non è mai stata tanto importante per l'umanità come all'inizio del XXI secolo. Basti pensare che attualmente circa 800 milioni di persone sono cronicamente malnutriti e che per 2 miliardi di esse non vi è sicurezza di approvvigionamento alimentare. A ciò si deve aggiungere la necessità di incrementare la produzione agricola per far fronte alla produzione di biomasse destinate alla produzione di energia rinnovabile. Il raggiungimento di questi obiettivi dovrà essere ottenuto senza convertire ad uso agricolo nuove superfici, visto che la risorsa "suolo" è in diminuzione a causa della continua urbanizzazione, dell'erosione, della salinità e dell'impellente necessità a livello mondiale, di proteggere le foreste. La crescente sensibilità dell'opinione pubblica verso la sicurezza e la salubrità degli alimenti e verso una maggiore compatibilità tra agricoltura e ambiente, nonché le preoccupazioni che derivano dal crescente fabbisogno energetico, dalle variazioni climatiche e dalla conseguente limitazione delle risorse idriche, mettono in luce una serie di problematiche la cui soluzione dipende dalle conoscenze che saremo in grado di accumulare sulle piante attraverso lo studio della struttura e funzione dei genomi vegetali (ricerca genomica). Lo sviluppo di un'agricoltura sostenibile è strettamente legato alla riduzione dell'uso dei pesticidi e a una maggior

efficienza nell'uso dei fertilizzanti, dei fitofarmaci e delle risorse idriche. Ciò richiede lo sviluppo di nuove varietà di piante con minori esigenze di fertilizzanti e dotate di resistenze genetiche verso gli agenti patogeni e i fattori di stress ambientale. Con le tecniche proprie dell'analisi genomica (uso estensivo di marcatori molecolari, sequenziamento dei geni e genomi, analisi globale dell'espressione genica, analisi del proteoma e delle sue modificazioni, analisi globale dei metaboliti) è possibile studiare i genomi, intesi come insieme di geni e proteine che interagiscono tra loro, e comprendere i meccanismi che regolano il metabolismo cellulare sino a determinare l'espressione fenotipica che rappresenta, in ultima analisi, il valore agronomico ed alimentare delle piante coltivate. Proprio la capacità della genomica di risalire alle basi genetiche dei caratteri agronomici rende questa scienza strategica per il miglioramento delle specie vegetali e per adattarle alle mutate esigenze del consumatore (alimenti più sicuri, di maggiore valore qualitativo e nutrizionale ecc) e della società (piante come fonti energetiche ed altri prodotti non-food).

Negli ultimi anni si è assistito ad un incremento esponenziale delle conoscenze relative ai genomi delle piante (globalmente definite con il termine "genomica"). Attraverso l'uso di marcatori molecolari sono stati studiati i rapporti filogenetici tra le specie, è stata descritta la biodiversità, sono stati localizzati sul genoma geni utili al fine di un loro trasferimento guidato nelle varietà coltivate.

Parole chiave: Genetica vegetale, Miglioramento genetico, Genomica, Editing genomico, Potenzialità produttiva.

Abstract

Domesticated plants have been crucial to the development of mankind providing a regular staple source of food compounds – carbohydrates, proteins, fat and secondary metabolites – since their domestication 12,000 years ago. Historically, genetic studies have their foundations in Mendelian mutants, characterized by altered physiology and/or morphology. In this regard there are examples of morphological mutations described in the past for which the gene/genes responsible have been recently cloned, characterized and used. An example is the Rht-Blb gene that controls plant height in wheat, which induces semidwarf plants due to the effect of a single nucleotide mutation capable of converting the majority of sugar into grain starch. With this model the source-sink relationship has been studied in depth and new varieties based on the concept of "Improved Harvest Index" have been released with an impressive grain yield enhancement in a wide range of environments. The question is: "Can we produce and supply sufficient food in the next 40 years without consuming more land?" On the basis of modern plant science, particularly by the introduction of genomic studies, the answer is positive. Selection is specifically directed to create highly tolerant and/or resistant genotypes to increase the "High Yield Potential and Stability of Yield" and to reduce the gap between high yield potential and the actual yield.

Keywords: Plant Genetics and Breeding, Genomics, Genome Editing, Yield Potential.

Nota per il lettore:

Per facilitare la lettura del presente lavoro si è preferito organizzarlo in due parti distinte ma fortemente concatenate. Nella prima si segue il percorso che va dall'addomesticamento delle piante alla loro utilizzazione da parte dell'uomo, per la produzione di alimenti e l'ottimale utilizzazione del suolo da coltivare, fino all'applicazione delle leggi di Mendel. Nella seconda parte viene descritto il ruolo che la genetica vegetale e le tecnologie genomiche oggi disponibili potranno giocare per garantire all'uomo e agli animali in allevamento il fabbisogno alimentare ed energetico per i prossimi 40 anni.

Introduzione

Sul Pianeta Terra attualmente circa 1 miliardo di persone – 15 milioni in Nazioni industrializzate, 53 in America Latina, 42 in Medio Oriente e Nord Africa, 265 nell'Africa Sub-Sahariana, 642 in Asia e Pacifico – sono cronicamente malnutrite, e per altri 2 miliardi non vi è sicurezza di approvvigionamento alimentare (Nature Biotechnology, 2012). A ciò si deve aggiungere la necessità di incrementare la produzione di biomasse da destinare ad energia rinnovabile. Il raggiungimento dell'autosufficienza alimentare dovrà avvenire senza dover convertire ad uso agricolo nuove superfici, anzi la risorsa "suolo" è in diminuzione a causa della continua urbanizzazione, dell'erosione, della salinità e dell'impellente necessità, a livello mondiale, di proteggere le foreste. La produzione di cibo in regime di sostenibilità è strettamente legata alla riduzione dell'uso dei pesticidi e ad una maggiore efficienza nell'uso dei fertilizzanti, dei fitofarmaci e delle risorse idriche. Ciò richiede lo sviluppo di nuove varietà di piante rispondenti a queste caratteristiche e dotate di resistenze genetiche verso gli agenti patogeni e i fattori di stress ambientale. L'ottenimento di piante resistenti alle malattie costituisce anche un mezzo per la riduzione sistematica dell'uso di fitofarmaci e, nello stesso tempo, del rischio di accumulo di sostanze tossiche (micotossine).

La crescente sensibilità dell'opinione pubblica verso la sicurezza e la salubrità degli alimenti e verso una maggiore compatibilità tra produzione di alimenti e ambiente, nonché le preoccupazioni che derivano dal crescente fabbisogno energetico, dalle variazioni climatiche e dalla conseguente limitazione delle risorse idriche, mettono in luce una serie di problematiche la cui soluzione dipende dalle conoscenze che saremo in grado di accumulare sulle piante attraverso la genetica vegetale e le discipline ad essa collegate.

La storia evolutiva dell'uomo mette in evidenza come queste strategie sono state perseguite a partire dagli albori della nostra civiltà. Le piante, infatti, direttamente o indirettamente, hanno garantito il cibo per l'uomo e gli animali domestici quando da cacciatore-raccoglitore impara ad addomesticare le piante e 12.000 anni or sono realizza la più importante rivoluzione della storia: quella neolitica.

Addomesticamento, formazione delle popolazioni vegetali e biodiversità

La selezione di specie sottratte alla selezione naturale e introdotte in coltivazione viene definita Addomesticamento ed ha rappresentato il primo

intervento dell'uomo verso la nascita dell'agricoltura.

È noto, infatti, che in cinque grandi centri di origine, 12000 anni or sono, intorno a orzo, frumento, mais e riso, la specie umana inventa la più importante attività che ci ha accompagnato nella nostra storia evolutiva e ci accompagnerà all'infinito: l'agricoltura. Cosa era successo in quel preciso momento? C'è stato un passaggio di era, dal tardo paleolitico (uomo cacciatore-raccoglitore) al Neolitico, durante il quale l'uomo/donna mette a punto la tecnologia per coltivare piante che già usava nella sua dieta, perché presenti nell'ambiente circostante, si nutre dei loro prodotti ed evita così di esercitare esclusivamente l'attività pericolosa della caccia (Stanca, 2015).

Da cacciatore ad agricoltore: la conoscenza della semina, della raccolta e della conservazione viene applicata con l'obiettivo preciso di procacciarsi il cibo senza correre rischi per sé, la sua famiglia, la sua tribù. È interessante che questa innovazione si sia sviluppata indipendentemente nei diversi centri di origine e probabilmente determinata da un unico evento: si stava concludendo l'ultima glaciazione. Mano a mano che i ghiacciai si ritiravano, nuove specie erbacee e arboree si svilupparono e le abitudini alimentari cambiarono radicalmente. Le graminacee progenitori di orzo, frumento, mais e riso diventarono le più frequenti nella flora spontanea e vennero usate dal cacciatore-raccoglitore tal quali prima e coltivate poi. La disponibilità di cibo e di nuove terre a seguito del ritiro di ghiacciai favorirono l'espansione della popolazione umana, che raggiunse circa 5.000.000 di persone su tutto il pianeta.

Tutto ciò si realizza, per noi europei, nella Mezzaluna Fertile, regione nella quale la nostra civiltà compie i primi passi intorno a frumento e orzo e in cui nello stesso tempo vengono applicate tutte le tecnologie innovative via via sviluppate. Nella aree circostanti la Rivoluzione Neolitica non si è ancora diffusa. È stato messo in evidenza che l'assenza di progenitori selvatici di orzo e frumento in Europa ha fatto sì che l'agricoltura raggiungesse i paesi scandinavi con un ritardo di 4000 anni. La diffusione di questa tecnologia, partendo dalla Mezzaluna, è stata calcolata pari a 1,1 km/anno. Anche l'Italia non ha conosciuto un Neolitico indigeno, ed è stata colonizzata seguendo due principali percorsi: il Mediterraneo e il Danubio, attraverso la Svizzera (Cavalli Sforza, 2005).

La diffusione dell'agricoltura dalla Mezzaluna Fertile percorse tre grandi strade: mediterranea, danubiana e nord asiatica. Si può ipotizzare quindi che siano stati gli agricoltori più evoluti a muoversi e a disseminare queste tecnologie, colonizzando nuove terre, oppure che, attraverso la diffusione delle conoscenze e delle tecniche, gli europei abbiano importato e adottato dai loro vicini l'agricoltura che mano a mano si andava sempre più estendendo. L'abbondanza di alimenti stimolò nell'uomo del Neolitico la ricerca di un sistema di conservazione dei prodotti agricoli: l'uomo impara a cuocere l'argilla e a costruire i primi grandi vasi di terracotta proprio per la conservazione delle granaglie e dei liquidi. Questa tecnologia, benché nata in ritardo di qualche millennio rispetto all'agricoltura, si sviluppò molto più velocemente tra le diverse popolazioni. Proprio in questa seconda fase si scoprono, casualmente, anche i primi prodotti trasformati: birra e pane. Questa "tranquillità" alimentare favorì ulteriormente l'incremento demografico, che a sua volta ha favorito le migrazioni verso nuove terre sino alla formazione delle prime città.

L'orzo e il frumento selvatici a quel tempo coltivati avevano la caratteristica di disperdere i semi: la spiga a maturazione si disarticolava ad ogni nodo del rachide, lasciando cadere i singoli chicchi in posizioni diverse sul terreno, così favorendo la crescita e maturazione delle nuove piante, avvantaggiate in ecosistemi naturali nella competizione con altre specie. Se dal punto di vista evolutivo questa strategia sviluppata dalla pianta rappresentava una valvola di sicurezza per la sopravvivenza della specie, dal punto di vista della produzione di cibo costituiva un



Fig. 1. Spiga fragile di *Hordeum spontaneum*. È evidente la disarticolazione, a maturazione, delle singole spighette, che facilita la dispersione dei semi.

punto debole, portando alla perdita totale del raccolto nel caso di improvvise calamità naturali (vento, pioggia). Il più grande salto scientifico-tecnologico si ebbe quando tra le piante di orzo selvatico si scoprì e si coltivò una spiga non fragile. Fu la prima trasformazione genetica utile registrata nella storia (Fig. 1) (Stanca, 2017).

La genetica che sottende questo carattere fondamentale della domesticazione è stata recentemente chiarita. In orzo, i due geni responsabili del carattere "spiga non fragile" sono Btr1 e Btr2, strettamente associati sul cromosoma 3H, mentre in frumento svolgono un ruolo maggiore brittle rachis 2 (Br-A1) e brittle rachis 3 (Br-B1), rispettivamente posizionati sul braccio corto dei cromosomi 3A e 3B. Nell'insieme, sembra che in tutte le Triticeae siano presenti questi geni che controllano la disarticolazione in diversi punti della spiga. Un altro esempio è il gene sh4 di riso, che codifica per un fattore trascrizionale responsabile della formazione del tessuto di abscissione alla base del peduncolo che regge il granello sulla pannocchia di riso. Nel riso coltivato la mutazione di un singolo nucleotide, che determina la sostituzione di una Lisina con una Asparagina, è sufficiente per ridurre lo sviluppo del tessuto di abscissione in modo tale da impedire la caduta spontanea dei semi, consentendo tuttavia il distacco dei semi a seguito di sollecitazione meccanica

Nel processo di addomesticamento una caratteristica tenuta in gran conto è stata la dimensione dei frutti. Uno degli esempi più significativi è quello dell'olivo, con la transizione dalla forma selvatica – oleastro – ad olivo coltivato da olio, che si caratterizza per l'incremento notevole delle dimensioni del frutto (drupa), processo verosimilmente controllato da poche mutazioni semplici (Fig. 2).

Una profonda modifica dell'architettura della pianta e della morfologia della spiga del mais è stata causata dal gene *Teosinte branch1* (*Tb1*) che controlla lo sviluppo delle gemme laterali, determinando nel progenitore selvatico del mais (il teosinte) lunghe ramificazioni laterali terminanti con una infiorescenza maschile e numerosi germogli basali, caratteristiche assenti nel mais coltivato. *Tb1* codifica per un fattore trascrizionale che agisce da repressore dello sviluppo dei germogli laterali, imponendo una dominanza apicale.

Anche in specie orticole è stato molto evidente l'effetto di singole mutazioni su caratteristiche fondamentali dell'architettura della pianta e qualità dei frutti. In pomodoro, significativi sono stati gli effetti di alcuni geni, tra cui *self proning*, che trasforma lo sviluppo della pianta da indeterminato (ininterrotta crescita dell'apice vegetativo) a determinato (la crescita

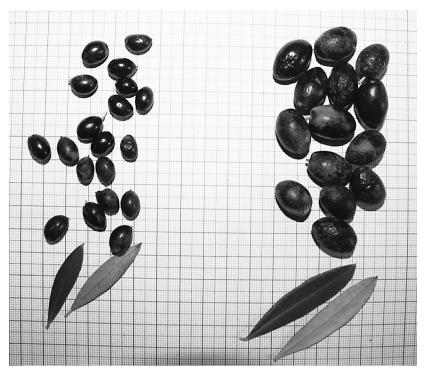


Fig. 2. Diversa dimensione della drupa e delle foglie di oleastro (Olea europaea sbsp sylvestris, a sinistra) e di olivo (Olea europaea sbsp sativa, a destra). Cortesia L. Stanca

dell'apice vegetativo viene bloccata, ottenendo piante a sviluppo contenuto) e jointless, che controlla il sistema di disarticolazione della bacca dal peduncolo.

La bacca di pomodoro può assumere una varietà di colorazioni, che vanno dal giallo pallido al viola intenso, sino alla più recente scoperta dei mutanti a bacca nera: responsabili di questo fenomeno sono mutazioni in geni singoli, quali yellowflesh (giallo), dark green (rosso intenso), green flesh (viola), u (uniformemente verde), sun black (nero), quest'ultimo regolato da due geni, Aft e Atv (Bai e Lindhout, 2007; Gonzali et al., 2009).

Negli agrumi quasi tutta la variazione naturale nella pigmentazione da antocianine, causata da mutazione puntiforme, delezioni e inserzioni di elementi trasponibili, può essere spiegata da differenze nell'attività del gene Ruby (Butelli et al., 2017). In pisello una mutazione puntiforme al gene af determina la trasformazione delle foglie in cirri.

La fase di addomesticamento continuò portando in coltura altre specie come lenticchia, fico, e parallelamente si cominciarono ad addomesticare gli animali come pecora, capra, bovini, suini e successivamente il cavallo. Con l'addomesticamento degli animali, la dieta si diversifica completamente e si completa. I binomi cereali-leguminose, cereali-latte e cereali-carne rappresentano la migliore combinazione nutritiva. Oggi sappiamo perché: la cariosside di un cereale mediamente è composta dal 65-75% di amido, 8-20% di proteine, 3-8% di grassi. La proteina però ha un valore biologico scarso perché carente di due aminoacidi, lisina e triptofano, motivo per cui anche nella dieta moderna i cereali si complementano con altri alimenti ricchi di proteine nobili.

Queste innovazioni tecnologiche provocarono un aumento della quantità di cibo e conseguentemente la crescita della popolazione sulla Terra.

La formazione delle popolazioni vegetali

Dopo la fase iniziale di addomesticamento, l'interazione tra la selezione naturale e una selezione antropica empirica ha portato allo sviluppo di popolazioni adattate ai diversi ambienti di coltivazione, note come landraces.

Una volta che la coltivazione è stata stabilita, altri adattamenti si sono evoluti in risposta alla raccolta ed alla competizione tra piante. Si sono selezionate popolazioni con frutti e semi di dimensioni maggiori, vigore dei culmi, sincronizzazione dei tempi di germinazione e maturazione. Si è stabilito quindi un continuum tra le nuove landraces e i loro progenitori selvatici, che ha favorito eventi di introgressione, derivati da incrocio casuale e conservazione di caratteri favorevoli, con specie selvatiche imparentate, ma anche eventi di ricombinazione frequenti o sporadici a seguito di incroci casuali. Tutte le mutazioni accumulate durante la storia evolutiva delle specie selvatiche e addomesticate rappresentano la biodiversità disponibile oggi sul pianeta e quindi un salvadanaio di geni utili. L'importanza della conservazione e valorizzazione del germoplasma vegetale, quale fonte naturale per il mantenimento della biodiversità, è stata definita strategica per il futuro dell'umanità a partire dalla Conferenza Internazionale sulla Biodiversità, tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992. In realtà l'uomo è da sempre "cacciatore di piante": lo dimostrano le prime spedizioni egiziane datate tra il 3000 e il 1500 a.C. alla ricerca di piante medicinali e aromatiche; lo confermano le spedizioni botaniche che hanno cambiato il mondo agricolo degli ultimi secoli. Grandiosa è stata l'opera di Teofrasto, che ha descritto il mondo vegetale in nove volumi. L'Impero Romano ha contribuito in modo determinante alla diffusione di un imponente patrimonio biologico nei territori controllati ed ha affinato una moderna tecnologia agronomica di base ed applicata, i cui effetti sono ancor oggi di riferimento (Columella, trad. 1977); ma è stata la relazione con i Paesi dell'Estremo Oriente prima e la scoperta dell'America poi a determinare il più importante flusso di specie vegetali a livello planetario che, gradualmente,

hanno provocato un radicale cambiamento nella dieta degli europei (mais, patata, pomodoro, fagiolo, ecc.).

L'uomo ha inoltre sempre portato con sé nei suoi spostamenti le piante che coltivava, determinandone quindi gli areali di diffusione. Il tema della biodiversità è perciò da sempre al centro delle attenzioni del mondo scientifico. Il bilancio attuale stima che circa 220000 siano le specie vegetali rilevanti presenti sul pianeta (mono e dicotiledoni), di cui 5000 usate dall'uomo per i propri fabbisogni e 1500 addomesticate. Solo 150 vengono oggi impiegate in modo significativo, ma ciò che colpisce è che 4 sole specie cerealicole forniscono il 60% delle calorie alimentari (Fig. 3). Di queste quattro specie si dispone presso diversi laboratori di centinaia di migliaia di ecotipi, landraces, varietà. L'Italia contribuisce a questo patrimonio naturale con 6700 specie vegetali. La variabilità naturale e le risorse genetiche rappresentano il deposito di geni da cui attingere per raggiungere ulteriori progressi attraverso l'accumulo di alleli utili. Con la conservazione in situ (cioè negli ambienti naturali dove può essere possibile l'alloincrocio tra la specie addomesticata con le specie selvatiche), on farm (cioè mantenendo in coltivazione le varietà locali) e/o ex situ (cioè in ambienti controllati, in cui non esistono gli ancestrali) l'accumulo di geni è valorizzato, in quanto fonte di caratteri utili per il miglioramento varietale (http://www.bioversityinternational.org/). È chiaro

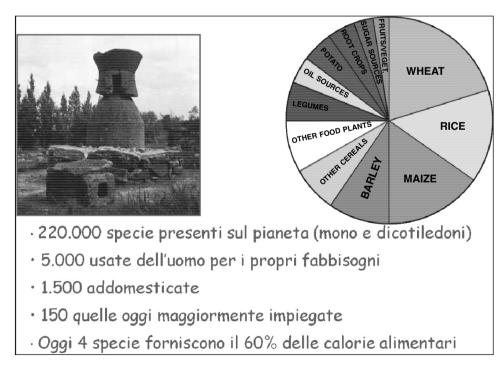


Fig. 3. A sinistra: molino per cereali del periodo romano. A destra: specie che vengono utilizzate dall'uomo per i propri fabbisogni. Frumento, riso, mais e orzo forniscono il 65% delle calorie e il 50% delle proteine.

come la conservazione ex situ sia processo statico, in cui non c'è ricombinazione genica, mentre nella conservazione in situ è assicurato un processo dinamico di flusso genico.

La conservazione ex situ (soprattutto di semi, ma anche di tuberi, polline, parti di pianta, spore ecc.) deriva dalla constatazione che la sola conservazione in situ non riesce ad evitare la perdita di biodiversità, a causa delle pressioni antropiche, del degrado ambientale, dei cambiamenti climatici, della competizione con specie più invasive. Deriva inoltre dalla necessità di una raccolta e conservazione dei genotipi e organizzazione dei dati relativi nel modo più razionale, così da consentire un facile accesso per chi opera nei campi della genetica vegetale e della ricerca in generale. È questa la forma di conservazione più diffusa: si stima infatti che, a livello mondiale, poco meno del 90% del germoplasma di specie agrarie sia conservato ex situ. Recentemente si sono avviate anche attività di conservazione della flora rara, minacciata, endemica e protetta. A questo proposito sono nate e cresciute banche e associazioni per la conservazione del germoplasma insieme a collezioni particolari disponibili presso vari enti. Veramente rilevante è il numero di genotipi presenti nelle diverse collezioni a livello mondiale: si stima infatti che la cifra globale sia di circa 7,4 milioni di accessioni, comprendendo specie coltivate e specie selvatiche, affini o non affini alle coltivate. A livello europeo i maggiori enti deputati alla conservazione delle risorse genetiche si sono consorziati nell'ECPGR (European Cooperative Programme for Plant Genetic Resources) con lo scopo di promuovere azioni comuni e armonizzare gli

Tab. 1. Specie vegetali per le quali sono disponibili le maggiori collezioni di germoplasma a livello mondiale. (Dati FAO 2010).

Pianta	Genere	Numero di accessioni
Frumenti	Triticum	856.168
Riso	Oryza	773.948
Orzo	Hordeum	466.531
Mais	Zea	327.932
Fagiolo	Phaseolus	261.963
Sorgo	Sorghum	235.688
Soia	Glycine	229.944
Avena	Avena	130.653
Arachide	Arachis	128.435
Cotone	Gossypium	104.780

approcci di conservazione e descrizione (http://www. ecpgr.cgiar.org/) (Tab. 1).

I punti critici della conservazione di semi sono la temperatura e l'umidità. Molte specie presentano infatti semi "ortodossi", che tollerano la deumidificazione fino a livelli del 3-7% e possono essere conservati a temperature basse (tra 0 e -20 °C). Recentemente è stata attivata una nuova struttura per la conservazione "long term" a bassa temperatura nelle isole Svalbard (Norvegia) (Fig. 4) (Westengen et al., 2013).

Circa l'1% delle risorse genetiche è invece conservato in vitro, tecnica utilizzata per specie a propagazione vegetativa o caratterizzate da semi "non ortodossi", impossibili da essiccare e conservare efficacemente a basse temperature. Ancora più rare sono le collezioni conservate a bassissime temperature (-196 °C), incluse le banche di DNA. Per le diverse specie agrarie sono conservate quindi sia "collezioni di base", che comprendono la maggior parte della variabilità genetica esistente a livello mondiale, sia Core Collections, "collezioni di lavoro" immediatamente

La gestione di queste collezioni prevede la determinazione della dimensione minima di un campione, l'ottimizzazione delle tecniche di conservazione (ovviamente differenti nel caso di semi, tuberi, di piante autogame o allogame, erbacee o arboree) e la definizione dei passaporti descrittivi.

Tra le diverse collezioni di germoplasma presenti sul territorio italiano, spicca senz'altro l'olivo, specie allogama di grande interesse per gli ambienti mediterranei, caratterizzata da una variabilità genetica molto elevata legata al fatto che la specie non ha subìto ero-



Fig. 4. Tunnel della Banca del Germoplasma nelle isole Svalbard (Norvegia) per la conservazione a lungo termine di specie vegetali e varietà entro-specie.

sione genetica specifica, e che si tratta di una pianta longeva e resistente.

Si stima che il numero totale delle varietà di olivo coltivate nel mondo sia di circa 1300, a cui si aggiungono oltre 3000 ecotipi locali e le popolazioni di olivo selvatico presenti lungo tutta l'area subcostiera mediterranea. L'Italia ha uno straordinario patrimonio genetico di questa specie e raccoglie più del 40% dell'intero germoplasma coltivato, oltre a centinaia di varietà minori, ecotipi locali ed esemplari millenari (Fig. 5), oggi minacciati nel Salento dal batterio *Xylella fastidiosa*.

Altre importanti collezioni di germoplasma sono relative alla vite, con più di 1500 vitigni, ai cereali e alle leguminose da granella, ospitate presso il CNR-Istituto del Germoplasma di Bari. Le collezioni di mutanti dello sviluppo rappresentano una sorgente inesauribile per studi di genetica di base e miglioramento genetico (Fig 6) (Pozzi *et al.*, 2000, Terzi *et al.*, 2017).

Attualmente la genomica utilizza in modo nuovo le risorse genetiche, tant'è vero che le banche del germoplasma spesso affiancano alle loro collezioni banche del DNA. Gli avanzamenti della genomica hanno aperto infatti nuove prospettive alla genotipizzazione delle diverse popolazioni, per l'identificazione di geni che controllano caratteristiche fenotipiche semplici o complesse.



Fig. 5. esemplare di olivo secolare a Soleto (Lecce). Cortesia L. Stanca

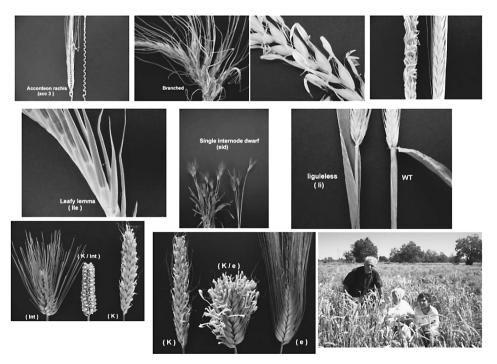


Fig. 6. Mutanti della spiga e del culmo di orzo.



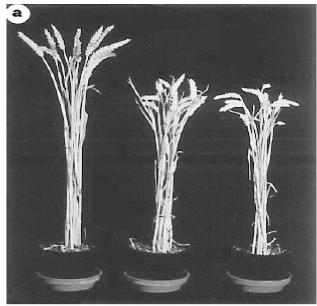


Fig. 7. Variazione dell'altezza della pianta di frumento: a sinistra varietà pre-mendeliane, a destra varietà a bassa taglia oggi in coltivazione.

L'identificazione di geni singoli, ma soprattutto di QTL (Quantitative Trait Locus: una regione di DNA associata ad un particolare carattere quantitativo), richiede una popolazione di piante geneticamente variabile per il carattere in esame, sistemi di marcatori per la genotipizzazione della popolazione, metodologie di fenotipizzazione efficaci e precisi, approcci metodologici e statistici appropriati per gli studi di associazione.

La fenotipizzazione del germoplasma e di materiali genetici particolari rappresenta probabilmente una fase critica nel processo di valorizzazione e utilizzo di risorse genetiche. Grande e rinnovata attenzione viene riservata a questa attività, anche attraverso lo sviluppo di sistemi automatizzati – piattaforme – per la valutazione di diversi parametri fisiologici e morfologici in condizioni di alta standardizzazione. Oggi i singoli genotipi sono dotati di passaporti morfologici, fisiologici e molecolari. Il tentativo per valorizzare il germoplasma "d'epoca" (genotipi pre-Mendel e sino al 1950), è considerato ormai superato dal punto di vista scientifico. Infatti la reintroduzione in coltivazione di questi genotipi, specialmente nel settore cerealicolo, ha confermato quanto già noto: scarsa produttività e nessun vantaggio qualitativo rispetto alle varietà moderne. Come già detto, le varietà "d'epoca" conservate nelle banche del germoplasma, saranno sempre impiegate come fonti di resistenza alle malattie, per caratteri qualitativi o nutrizionali e per metaboliti secondari per alimenti funzionali.

La nascita della genetica

Nella fase premendeliana, l'interazione tra la selezione naturale e una selezione antropica empirica ha portato, come già detto, allo sviluppo di popolazioni adattate ai diversi ambienti di coltivazione note come *landraces*. Tuttavia queste *landraces*, dal periodo romano agli inizi del '900, non hanno provocato significativi incrementi produttivi per unità di superficie. Con la riscoperta delle leggi di Mendel, le prime conoscenze sulla genetica dei caratteri quantitativi e la scoperta dell'eterosi, si è affermata una vera attività di miglioramento genetico, che nel giro di pochi decenni ha radicalmente modificato la capacità produttiva e le caratteristiche qualitative delle piante coltivate (Fig. 7).

La genetica vegetale, madre di tutte le genetiche, ha consentito di approfondire le conoscenze sulla definizione dell'ereditarietà dei caratteri e nello stesso tempo ha permesso di sviluppare tecnologie nelle piante coltivate capaci di accumulare geni utili, originariamente dispersi nelle popolazioni, in genotipi superiori. Si avvia così un'intensa attività di miglioramento genetico, all'inizio del secolo scorso, che ha portato in tutte le specie coltivate allo sviluppo di nuove varietà sempre più produttive e sempre più rispondenti alle esigenze della moderna società. In generale, nell'ultimo secolo nella maggior parte dei Paesi si sono registrati, per tutte le specie coltivate ed in particolare per i cereali, incrementi produttivi sorprendenti: grazie all'italiano Strampelli prima e

all'americano Borlaug dopo, i guadagni produttivi attribuibili al progresso genetico sono compresi tra 20 e 50 kg ha⁻¹ per anno (Fig. 8). Questi cambiamenti sono associati ad importanti modificazioni dell'architettura e della fisiologia della pianta, come evidente in orzo e frumento, in cui la riduzione dell'altezza della pianta,

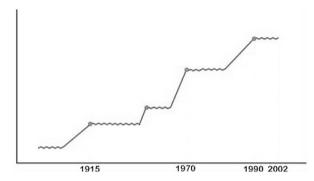


Fig. 8. Modello del progresso genetico in specie vegetali a partire dal 1900 fino ai giorni nostri. I cerchi indicano le varietà rappresentative del momento storico.

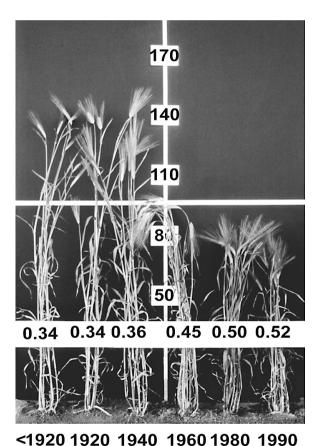


Fig. 9. Riduzione della taglia della pianta di orzo dal 1920 ad oggi, e miglioramento dell'Indice di raccolto HI (Harvest Index).

accompagnata da una maggior efficienza nell'assorbimento e nel trasporto, si è rivelata indissolubilmente collegata all'aumento dell'*Harvest Index (indice di* raccolto HI = biomassa utile/biomassa totale) (Fig. 9).

Per ridurre l'altezza della pianta e quindi limitare o eliminare le perdite dovute al fenomeno dell'allettamento (perdita della posizione verticale del culmo in seguito ad avversi eventi meteorici) si fece ricorso ai geni della bassa taglia del frumento.

Questo grave fenomeno aveva sempre danneggiato le produzioni di granella non solo dal punto di vista quantitativo, ma anche qualitativo. Le varietà coltivate sino all'inizio del XX secolo erano di taglia elevata (180 cm o più) e quindi facilmente soggette all'allettamento. Quando questo fenomeno si verificava precocemente, la pianta di frumento non aveva la capacità di recuperare la posizione eretta, e per diversi motivi tutta la fisiologia della relazione source (fotosintesi)-sink (accumulo dei fotosintati nel frutto) era alterata, con la conseguente produzione di cariossidi striminzite e malate. Comunque la potenzialità produttiva di quel modello di pianta era molto bassa: nelle condizioni migliori e in assenza di malattie non superava 2 t/ha.

Nel 1911 Nazareno Strampelli per primo introdusse il carattere bassa taglia – dwarf – nei frumenti usando nei suoi incroci il genotipo giapponese AKAGO-MUKI, portatore del gene Rht8 sensibile alle gibberelline. Lo sviluppo di nuovi genotipi a bassa taglia rappresenta il grande successo italiano nel mondo. Le varietà di Strampelli sono state impiegate in quasi tutti i programmi di breeding in tutto il mondo sino a pochi anni or sono. Anche Cesare Orlandi utilizzò un'altra varietà a taglia bassa – SAITAMA 27 – portatrice del gene Rht-Bld insensibile alle gibberelline. Successivamente un'altra varietà giapponese, NORIN 10(6x), portatrice di un altro gene di bassa taglia Rht-Blb insensibile alle gibberelline, isolata per la prima volta nel 1932, fu introdotta nel 1946 da Orville Vogel nella Washington State University, e nel 1948 fu eseguito il primo incrocio. Norman Borlaug utilizzò Norin 10 nel 1955 per gli incroci, e nel 1964 avviò il nuovo programma di miglioramento genetico presso il CIMMYT (Messico), dal quale origina e si realizza la "Rivoluzione Verde", che gli porterà nel 1970 il premio Nobel per la pace.

Va chiarito che il successo di questi nuovi genotipi a bassa taglia non derivò soltanto dall'eliminazione dei danni da allettamento, ma anche dagli effetti pleiotropici di questo gene. In pratica la presenza di *Rht-B1b* permette alla pianta di aumentare l'apparato fotosintetico, migliorare la fertilità della spighetta, il numero di spighette per spiga, il numero di spighe/m² e la dimensione della cariosside. Tutto ciò ha portato a

un aumento della produzione pari a 4-5 volte il potenziale delle varietà pre-Strampelli (fino a 10-12 t/ha). Nel mondo l'incremento produttivo è stato notevole e si prevedono ancora progressi sostanziali sia in ambienti fertili che in ambienti stressati.

Con il gene *Rht-B1b* fu possibile programmare un nuovo ideotipo di pianta, basato sull'Harvest Index. Di fatto la potenzialità di biomassa totale non è cambiata tra i genotipi non *dwarf* e *dwarf*. È solo cambiato l'HI e ciò dimostra che tutta la genetica dei *dwarf* ha migliorato la relazione *source-sink* ed ha equilibrato il rapporto assorbimento/fotosintesi e trasporto/accumulo dei fotosintati nei siti definitivi.

Il modello di pianta, il cosiddetto "Ideotipo", nel quale deve instaurarsi un ottimale rapporto tra sorgente di energia "fotosintesi" e siti di accumulo (frutto) è stato esportato ed applicato in altre specie vegetali. Al miglioramento genetico classico si è affiancata la mutagenesi sperimentale per l'ottenimento di nuove varietà. La mutagenesi indotta nel settore vegetale ha un ruolo di rilievo non solo per lo studio delle funzioni geniche, ma anche, soprattutto in un recente passato, per indurre variabilità genetica da cui selezionare nuovi genotipi di potenziale interesse agrario. Con questa tecnologia, negli anni '60-'70 sono state rilasciate diverse nuove varietà di specie erbacee, arboree e ornamentali.

Eterosi in Piante Allogame e Autogame

L'eterosi è definita come la superiorità fenotipica dell'ibrido rispetto ai genitori, per caratteri come il tasso di crescita, il successo riproduttivo e la resa. Nel richiamare alla mente un'evidente eterosi si pensa generalmente all'incrocio tra due linee pure di mais, o all'incrocio tra razze di cani. Eppure le prime osservazioni di eterosi risalgono a Charles Darwin, che nel suo libro del 1876 descrisse come le piante di Linaria vulgaris derivanti da impollinazione incrociata fossero più vigorose di piante da autoimpollinazione. Darwin studiò sistematicamente il fenomeno in ben 60 specie di vegetali, e arrivò a concludere che l'effetto dell'autoimpollinazione era generalmente deleterio (anticipando ciò che successivamente venne chiamata depressione da inbreeding, cioè la riduzione del vigore come conseguenza dell'omozigosi, fenomeno evidente prevalentemente nelle piante allogame), mentre l'impollinazione incrociata risultava favorevole al vigore delle progenie. Il problema della base genetica dell'eterosi è stato dibattuto per oltre un secolo, senza raggiungere un punto fermo, ed è anzi stato accantonato per decenni dopo i fervori iniziali fino ai giorni nostri quando è stato ripreso perché la disponibilità

di strumenti genomici sta aggiungendo tessere importanti al complesso *puzzle*. Diverse ipotesi tra cui dominanza, sovradominanza e pseudo-sovradominanza sono a disposizione per spiegare il fenomeno del vigore ibrido. Secondo il modello della dominanza, proposto da Jones nel 1925, i genitori *inbred* contengono alleli inferiori o deleteri a diversi *loci* che impediscono nel complesso buone prestazioni per importanti caratteri quantitativi, mentre nell'ibrido questi alleli inferiori di un genitore sono affiancati da alleli dominanti e superiori dell'altro genitore. Secondo il modello della dominanza si verificherebbe nell'ibrido una complementazione genetica degli alleli recessivi o deleteri dai rispettivi genitori.

Il limite dell'ipotesi sta nelle sue stesse premesse. In teoria, il genitore che contiene alleli dominanti, o superiori, omozigoti a tutti i loci dovrebbe superare gli ibridi, ma la lunga storia della genetica del mais ci ha indicato diversamente. Lo stesso Shull nel 1948 elaborò il modello della sovradominanza, secondo il quale le nuove interazioni alleliche eterozigoti per ciascuno dei molti loci genetici portano a funzioni superiori alle condizioni omozigoti presenti nei genitori inbred. L'effetto positivo (stimolo fisiologico allo sviluppo) dell'incrocio tra due linee pure geneticamente lontane è tanto maggiore quanto più diversi erano i parentali coinvolti nella fecondazione (Fig. 10). Questo modello spiega perché gli ibridi (F1) superino sempre i genitori inbred, che sono stati comunque selezionati e quindi contengono molti loci genetici superiori o dominanti in fase omozigote. Inoltre, è la combinazione allelica negli ibridi che determina i livelli di eterosi: la composizione genetica dei genitori inbred non è necessariamente predittiva dei livelli di vigore ibrido. Uno studio più recente suggerì un modello alternativo, la pseudo-sovradominanza. La pseudo-sovradominanza è associata alla complementazione di due o più alleli dominanti e recessivi legati in repulsion (in trans), in cui gli alleli dominanti e recessivi si trovano in omologhi opposti, agendo nell'ibrido, dove vengono riuniti, come in una sorta di sovradominanza dovuta al linkage (Barcaccia et al., 2006).

Nell'era genomica tutti i modelli di eterosi sono stati ritrovati in diversi riscontri sperimentali, ma nessuno di essi è ritenuto sufficiente a spiegare tutte le osservazioni. Per esempio, è stata documentata una sorta di complementazione nell'ibrido di geni assenti alternativamente in una delle due *inbred* di mais. L'i-potesi di una complementazione molecolare dovuta a geni in emizigosi nelle *inbred*, limitata alla scoperta in mais, potrebbe essere verificata nei prossimi anni grazie ai grandi progetti di risequenziamento di diversi genotipi. Differenze di espressione su scala genomica sono state individuate nell'ibrido rispetto ai

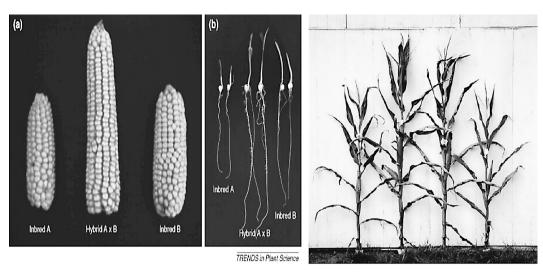


Fig. 10. Manifestazione dell'Eterosi nella spiga, radichette e pianta intera di mais: confronto tra la F1 e i due parentali inbred.

genitori *inbred*. Molti geni sono cioè differenzialmente espressi nell'ibrido rispetto alla *inbred*. Tali differenze di espressione, scoperte in diverse specie e con diverse metodologie genomiche, sono legate all'"orologio" molecolare circadiano interno alle piante. L'"orologio" (i ritmi circadiani) capta segnali di luce e temperatura e li integra in vie molecolari che determinano una crescita e adattamento superiori nelle piante F1 rispetto ai parentali.

Sulla base di molte e diverse osservazioni, provenienti anche dal regno animale, una recente ipotesi molecolare prevede che un meccanismo cellulare di controllo qualità individui e reprima nell'ibrido l'espressione di alleli che codificano per proteine instabili. La repressione degli alleli dettata da questa semplice regola darebbe agli ibridi un vantaggio di accrescimento dovuto a una maggiore conservazione dell'energia e a un maggiore ritmo di divisione cellulare. Ciò spiegherebbe sia una componente di dominanza sia di sovradominanza, quando la stabilità delle proteine derivate dai due alleli fosse diversa in funzione dell'ambiente, quindi fornendo una più ampia adattabilità ambientale all'ibrido. Inoltre essa sarebbe anche compatibile con le osservazioni di depressione da inbreeding e di accresciuta eterosi nell'allopoliploide, dove la scelta degli alleli in funzione della stabilità proteica sarebbe ancora più ampia.

L'eterosi si è dimostrata strategia di grande interesse applicativo non solo nelle Allogame (nel mais si sono raggiunte 17 t/ha in pieno campo), ma anche nelle piante autogame. Particolarmente rilevante è l'esempio del pomodoro (specie autogama), in cui lo sfruttamento di questo fenomeno ha spostato le produzioni, negli ultimi 50 anni, dagli iniziali 300

q/ha agli attuali 1200 q/ha in pieno campo e 2200 q/ha in serra. L'interesse verso lo sfruttamento dell'eterosi si è spostato anche su specie cleistogame come frumento e orzo. In un secolo di applicazioni scientifiche nelle piante coltivate si sono raggiunti risultati straordinari. Agli esempi sopra riportati si può aggiungere la barbabietola da zucchero, che è passata negli ultimi 40 anni da una produzione media di radici di 30 t/ha ad oltre 100t/ha con un indice zuccherino del 15%.

Abbiamo raggiunto il plateau?

Feeding Ten Billion: con i risultati fin qui raggiunti si può pensare di alimentare il pianeta nei prossimi 40 anni, quando la specie umana supererà i 9 miliardi di individui?

La scienza e la tecnologia hanno fornito in questi ultimi decenni risultati straordinari: un esempio significativo è rappresentato dai cereali con una produzione mondiale di granella passata da 600.000 tonnellate nel 1950 a 2.5 miliardi di tonnellate nel 2015.

In considerazione del fatto che non possiamo più applicare la regola della messa a coltura di nuove terre, ma che dobbiamo risparmiare il terreno dalle continue razzie antropiche, nasce l'imperativo di dover chiedere all'unità di superficie l'ulteriore sforzo di ospitare, in perfetto equilibrio, nuove piante capaci di garantire il cibo per 10 miliardi di persone. Alla domanda se ciò sia possibile, la risposta è stata positiva, ma dobbiamo disegnare nuove strategie.

La genetica ha visto crescere intorno a sé diverse discipline che hanno contribuito ad approfondire le conoscenze sulla ereditarietà dei caratteri, ma è con l'avvento della genomica che si comincia ad avere una visione molto più ampia e precisa della struttura e funzione di singoli geni, dei genomi, e di come questi possano essere assemblati in genotipi superiori.

Gli obiettivi attuali sono rivolti a convogliare gli sforzi delle diverse discipline scientifiche verso lo sviluppo di tecnologie mature per l'agricoltura del futuro, a garanzia di produzione di alimenti per tutti.

Se si analizza lo sviluppo e la crescita di una pianta addomesticata, si evidenzia che anche nelle migliori condizioni ambientali non si è riusciti a ridurre in modo consistente il *gap* esistente tra la produzione potenziale e quella effettiva raggiunta in azienda. Questo è il primo problema da affrontare.

Il secondo è quello di disegnare nei prossimi anni un nuovo modello di pianta capace di innalzare ulteriormente la potenzialità produttiva. Se consideriamo il frumento, risulta evidente che le nuove varietà e le nuove tecniche agronomiche, in alcuni Paesi Europei, hanno permesso di raggiungere una media nazionale superiore a 8 t/ha con una potenzialità di 12-14 t/ha, cioè sono stati ottenuti circa 20.000 semi/m² di terreno senza intensificare l'uso di prodotti di sintesi (Fig. 11). Oggi si può dire che teoricamente è possibile raggiungere 30.000 semi/m² e superare la barriera delle 15 t/ha. Tuttavia, come noto, eventi sfavorevoli durante il ciclo biologico riducono drasticamente lo sviluppo, la crescita, la fertilità, l'allegagione dei fiori e la dimensione dei frutti.

La sfida è di ottenere una nuova pianta capace di far fronte alle cause avverse durante tutto il ciclo biologico. Oggi conosciamo in modo approfondito la tappa metabolica di risposta all'insulto; disponiamo della sequenza del genoma di molte specie; presso le banche del germoplasma sono disponibili i passapor-

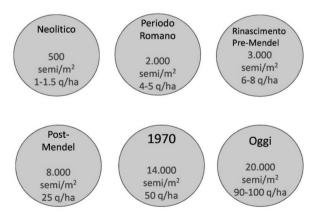


Fig. 11. Incremento del numero di semi/m² e produttività dell'orzo a partire dal Neolitico, con *Hordeum spontaneum*, e dal periodo Romano ad oggi con *H. vulgare*.

ti delle singole varietà con la descrizione fenotipicomolecolare delle loro caratteristiche peculiari; sono state disegnate nuove architetture di piante arboree (ad es. il portamento colonnare del melo (Wolters *et al., 2013*); con l'aiuto della genomica nuove strategie di *breeding* sono state messe in opera per incorporare più geni in un genotipo superiore (*Pyramiding, GAS, GWAS*) e nuove tecniche agronomiche saranno via via disponibili per appiattire sempre più la curva degli *in-put* di sintesi.

Come già detto, tutti questi sforzi dovranno seguire un percorso di compatibilità ambientale. Per alcuni aspetti della destinazione d'uso della biomassa, si comincia a sperimentare la coltivazione di piante perennanti al fine di ridurre gli input tecnologici (Fig. 12).

Nuovamente, alla domanda se la scienza e la tecno-

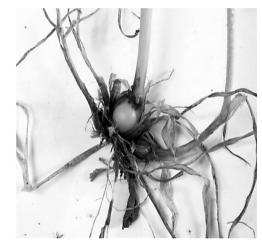




Fig. 12. Hordeum bulbosum: pianta perennante mediante riproduzione agamica per bulbilli (sinistra) e sessuata (allogama) per seme. A destra sono evidenti le antere dopo antesi. Ha colonizzato un ampio habitat dall'Uzbekistan al Bacino del Mediterraneo sino al Salento e cresce tra i muri a secco e negli incolti- Pianta raccolta in una popolazione a Soleto (LE).

logia abbiano gli strumenti per produrre alimenti per 10 miliardi di individui nei prossimi 40 anni, la risposta non può essere che positiva, – tenendo in mente di ridurre gli sprechi – perché abbiamo già oggi, rispetto a qualche decennio fa, strumenti di conoscenza assolutamente nuovi: la base di tutto risiede nella conoscenza del genoma delle piante.

L'analisi dei genomi è stata la maggiore conquista della genetica moderna per lo studio della struttura e funzione dei singoli geni e dell'intero genoma degli esseri viventi, fondamentale anche per comprenderne le dinamiche evolutive e sviluppare ulteriori biotecnologie al fine di migliorare specie vegetali per caratteri utili. Sono oggi disponibili le sequenze genomiche ad alta qualità di specie modello quali *Arabidopsis* e *Brachypodium*, oltre a quelle di specie di elevato interesse

agronomico quali riso, mais, vite, melo, pioppo, caffè, patata, pomodoro, carciofo, orzo, frumento tenero e *dicoccoides*. I genomi del riso e del *Brachypodium* sono particolarmente importanti perché servono anche da modello per lo studio dei genomi degli altri cereali, appartenenti alla famiglia delle *Poaceae*. I ricercatori italiani hanno contribuito in maniera determinante all'ottenimento di questi risultati.

Tra i genomi di maggiore complessità si annovera quello del frumento tenero (*Triticum aestivum*, 2n = 6x = 42-AABBDD) (Tab. 2), stimato in 17 miliardi di bp, pari a cinque volte il genoma umano e a circa quaranta volte quello del riso. È caratterizzato dalla presenza di elementi ripetuti per circa l'80%. Si stima che soltanto nel cromosoma 5A siano contenuti da cinque a seimila geni. (Vitulo *et al.*, 2011).

Tab. 2. Dimensione dei Genomi di alcune specie vegetali e di un fungo micotossigenico (Fusarium).

Specie	Dimensione Genoma (milioni di bp)*	Numero di geni	Rivista	Anno
Arabidopsis	125	26.500	Nature	2000
Mais	2.000	32.000	Science	2009
Riso	430	37.544	Science	2002
Vite	475	30.434	Nature	2007
Pomodoro	900	35.000	Nature	2012
Patata	844	39.031	Nature	2011
Frumento tenero	17.000	124.000	Science	2014
Frumento dicoccoides	10.500	67.185	Science	2017
Orzo	5.000ww	39.734	Nature	2017
Arancio	300	25.000	Nature Bioth.	2014
Pesco	265	27.852	Nature Gen.	2013
Melo	742	57.386	Nature Gen.	2010
Quinoa	1.450-1.500	33.365	Nature	2016
Fusarium langsethiae	37.5	12.232	I.J. Food. Microbiol.	2016
Pioppo	520	41.000	Science	2006
Melanzana	833	38.498	DNA Research	2014
Melone	450	27.427	PNAS	2012
Brachypodium	220	36.477	Nature	2010
Soia	1.100	46.430	Nature	2010
Carciofo	1.084	38.726	Nature	2016
Barbabietola	714-758	27.421	Nature	2013
Asparago	1.300	27.334	Nature comm.	2017

^{*} Paia di basi.

La storia evolutiva del frumento, pianta poliploide, è affascinante perché per la sua nascita c'è stata la partecipazione di tre differenti specie.

Il primo importante incrocio avvenne tra la specie portatrice del genoma A (Triticum urartu AA) e quella portatrice del genoma B (Aegilops speltoides BB), incrocio che diede origine a Triticum turgidum (AABB), da cui derivò il grano duro tetraploide che utilizziamo per fare la pasta; successivamente, questa specie, attraverso incroci spontanei, unì il proprio genoma con quello di Aegilops tauschii (DD) dando origine al frumento tenero Triticum aestivum (AABBDD) destinato alla panificazione. Le analisi suggeriscono una datazione più antica rispetto a quanto ritenuto finora (approssimativamente 600-800.000 anni fa per il primo evento di poliploidizzazione e 230-430.000 anni fa per il secondo evento) (Marcussen et al., 2014). Sequenziare il genoma del frumento è stato un po' come completare un puzzle di migliaia di pezzi, tutti molto simili tra loro. Infine, c'è un ultimo aspetto critico da tenere in considerazione: Triticum aestivum è infatti un organismo esaploide, essendo composto da tre sottogenomi, a loro volta formati da sette coppie di cromosomi. Riuscire a leggere un genoma complesso come quello del frumento è stato sicuramente un grande risultato, ma si tratta solo del primo passo. Per dare un significato a quelle A, C, G e T – adenina, citosina, guanina e timina, le quattro basi azotate che costituiscono i mattoni fondamentali del DNA - occorre un lungo lavoro di interpretazione dei dati, occorre cioè annotare la sequenza genomica. Per prima cosa si può ad esempio valutare la percentuale di sequenze ripetute, che nel caso del frumento sfiora l'80%. Un dato di non immediata utilità forse, ma che potrebbe essere

comunque interessante dal punto di vista evolutivo. Ma quando si annota un nuovo genoma, gran parte del lavoro è dedicato alla ricerca dei geni che codificano per proteine. Sono questi gli attori principali all'interno delle cellule: dal loro funzionamento dipende il modo in cui la pianta cresce, si riproduce, utilizza i nutrienti e si difende dalle minacce esterne. Considerando la qualità dell'assemblaggio, i ricercatori stimano che Triticum aestivum possieda qualcosa come 106.000 geni codificanti per proteine, un numero elevatissimo se rapportato ai 25.000 geni umani, ma perfettamente in linea con le dimensioni considerevoli di questo genoma (Fig. 13). Ciò che rende davvero speciale il genoma di Triticum aestivum è il fatto che esso sia in realtà costituito da tre distinti genomi, costretti dall'evoluzione a convivere all'interno della stessa specie. Cosa è accaduto ai tre genomi dal momento in cui si sono incontrati? Hanno mantenuto la stessa sequenza, hanno conservato le stesse funzioni oppure uno di essi ha preso il sopravvento sugli altri due? Nel genoma del frumento si trovano moltissime tracce di questi esperimenti evolutivi: si contano infatti migliaia di geni che mostrano differenze rispetto alla versione originale presente nelle piante selvatiche. Generalmente si tratta di mutazioni senza effetti particolari, ma in alcuni casi l'impatto sulla funzionalità della proteina è stato rilevante. Da queste sequenze ridondanti potrebbero ad esempio originarsi i microRNA (di 20-24 nucleotidi), una categoria di molecole fondamentali per la resistenza agli stress ambientali e agli agenti patogeni. Nelle piante, questi sono particolarmente attivi durante lo sviluppo, ma non mancano esempi di microRNA che controllano la risposta agli stress ambientali, quali la siccità o la

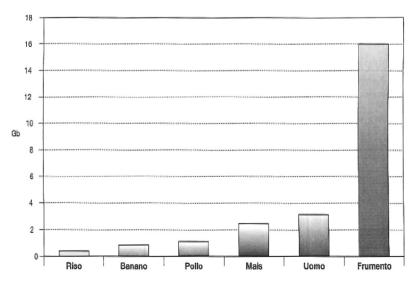


Fig. 13. Comparazione della dimensione di diversi genomi (Gb: gigabasi, miliardi di paia di basi nucleotidiche).

carenza di nutrienti nel terreno, e all'attacco di agenti patogeni. Agiscono spegnendo altri geni in modo mirato, controllando in questo modo la sintesi di nuove proteine. Ogni microRNA colpisce un particolare set di geni bersaglio, e gli effetti di questa regolazione possono amplificarsi notevolmente, perché spesso i geni target sono fattori di trascrizione, molecole che a loro volta controllano l'espressione di altri geni. Complessivamente, questi risultati suggeriscono che il frumento possiede un enorme "serbatoio" di microRNA al momento poco utilizzato, che potrebbe però essere attivato a seconda delle necessità. Un ulteriore dato molto interessante emerso dall'analisi ha a che fare con l'evoluzione di questo raffinato sistema di regolazione. I microRNA identificati (270) si trovano in zone del genoma caratterizzate dalla presenza di elementi trasponibili (o trasposoni), sequenze ripetute capaci di spostarsi o duplicarsi sul genoma, e molti di questi trasposoni sono gli stessi che si ritrovano anche in corrispondenza dei rispettivi geni target. Questi dati sembrano dare supporto a una teoria secondo la quale sono proprio i trasposoni che, spostandosi sul genoma, danno origine sia ai potenziali microRNA sia ai siti di riconoscimento sui geni bersaglio. (Mayer et al., 2014; Avni et al., 2017).

Altri genomi vegetali il cui sequenziamento è stato già completato comprendono il caffè, la Medicago truncatula, la fragola, l'arancio, nonché specie cosiddette orfane, di minore rilevanza economica rispetto alle grandi colture, ma comunque con utili destinazioni d'uso, ad es. la quinoa.

Tra le piante da frutto più diffuse, è noto il genoma del melo (Malus domestica) varietà Golden Delicious, tra le più diffuse al mondo. I 17 cromosomi (2n = 34)contengono 742 milioni di basi e oltre 57.000 geni, tra cui spiccano i fattori di trascrizione (oltre 4.000), e i geni correlabili alle resistenze ai patogeni (circa 1.000), oltre quelli che regolano il portamento colonnare della pianta. Sono inoltre rappresentati in numero estremamente elevato i geni MADS coinvolti nello sviluppo del frutto, e i geni del metabolismo basale del pomo, quali ad esempio quelli legati alla sintesi del sorbitolo o glucitolo, lo zucchero tipico delle Rosaceae.

Parallelamente si sta procedendo al sequenziamento del genoma di diversi funghi fitopatogeni, la cui analisi apre la possibilità di meglio comprendere quali siano i meccanismi evolutivi che determinano la patogenicità (Lisoe et al., 2016).

Il genoma della vite (Vitis vinifera), varietà Pinot Noir, è formato da 475 milioni di basi, tre volte più grande di quello di Arabidopsis e sei volte più piccolo di quello dell'uomo, e contiene 30.434 geni codificanti per proteine. Una peculiarità di questo genoma è rappresentata dalla presenza di famiglie di geni legati alle caratteristiche organolettiche del vino.

L'analisi comparativa delle sequenze genomiche ha consentito di delineare i processi evolutivi dei genomi in senso più ampio, non legato a singoli geni, ma all'intero corredo genetico. I genomi vegetali cambiano più rapidamente di quanto non facciano i genomi animali, portando così a una maggior variazione tra specie anche strettamente correlate e anche all'interno di una stessa specie. Il motivo di questa estrema plasticità è da ricercarsi nelle diverse condizioni di vita e di strategie di sopravvivenza delle piante rispetto agli animali, che sembrano dunque richiedere per le prime la presenza di genomi più "flessibili".

Un'importante caratteristica delle piante è che vaste porzioni dei loro genomi sembrano essersi duplicate, ossia interi segmenti di cromosomi con tratti di sequenze geniche quasi identiche si ritrovano in molteplici posizioni del genoma. Ciò suggerisce che, a un certo punto dell'evoluzione, questi genomi siano andati incontro a duplicazione (interamente o in parte) e che in seguito le sequenze duplicate (e quindi ovviamente sia geni che regioni regolative) siano andate in parte perdute e in parte si siano diversificate. I processi di duplicazione genomica implicano dunque molto più che la semplice fusione di due genomi, determinando un intero spettro di regolazioni molecolari e fisiologiche. Il raddoppiamento del genoma altera infatti in modo significativo anche l'espressione dei geni, che possono poi essere espressi a livelli uguali o ineguali o subire processi di silenziamento di una copia (principalmente mediato da meccanismi epigenetici). Sebbene gli studi classici, basati sul conteggio cromosomico, avessero stimato in 30-50% la frazione di angiosperme poliploidi, in realtà gli attuali avanzamenti della genomica suggeriscono come praticamente tutte le angiosperme siano evolutivamente derivate da fenomeni di duplicazione del genoma. Ci sono forti evidenze infatti che indicano come la duplicazione del genoma abbia importanti conseguenze morfologiche, ecologiche e fisiologiche, con effetti sui processi fotosintetici della pianta, sul suo sistema riproduttivo, sulla sua interazione con gli erbivori e gli impollinatori, sulla speciazione.

Durante l'evoluzione, la formazione di poliploidi ha giocato probabilmente un ruolo di primo piano nella diversificazione delle angiosperme ed è stata molto rilevante anche nella genesi di importanti piante coltivate, quali il frumento, brassicacee e alcune rosacee.

Il sequenziamento del genoma della vite ha suggerito come questa pianta, considerata diploide dalla genetica classica, sia in realtà derivata dalla fusione di tre genomi. Questo arrangiamento ancestrale è condiviso da molte altre dicotiledoni e assente in riso, che è una monocotiledone. La conclusione è, quindi, che questa triplicazione non fosse presente nell'antenato comune alle mono- e dicotiledoni.

Il sequenziamento del genoma del pomodoro coltivato e del suo antenato selvatico, Solanum pimpinellifolium, ha evidenziato il fenomeno della poliploidizzazione. Come noto, il pomodoro appartiene alla famiglia delle Solanaceae, che comprende sia piante agrarie, quali patata e melanzana, che piante ornamentali e medicinali, quali la petunia, il tabacco, la belladonna e la mandragola. Una peculiarità delle Solanaceae è la loro diffusione in ecosistemi molto differenziati. La sequenza del genoma ha fatto nuova luce sulle basi molecolari di questo adattamento. Si è infatti dimostrato che il genoma di pomodoro si è "triplicato" improvvisamente circa 60 milioni di anni fa, in un momento vicino alla grande estinzione di massa che ha portato alla scomparsa dei dinosauri. Successivamente, la maggior parte dei geni triplicati sono stati persi, mentre alcuni di quelli superstiti si sono specializzati e oggi controllano caratteristiche importanti della pianta, comprese quelle della bacca, come il tempo di maturazione, la consistenza e la pigmentazione rossa e nera nonché il profilo organolettico (D'Esposito et al., 2017). Anche nelle orchidee si è avuta una duplicazione genomica e recentemente sono stati individuati geni che controllano processi

dello sviluppo (Zhang et al., 2017). Lo sviluppo della genomica delle piante coltivate sta cambiando profondamente le strategie di ricerca nell'ambito della genetica vegetale e avrà un forte influenza sull'agricoltura moderna. L'avvento dei marcatori molecolari ha consentito di definire la base genetica dei caratteri qualitativi e quantitativi (QTL), di stabilire le relazioni di sintenia tra i genomi (quota del genoma condiviso tra specie vicine o lontane), di verificare i meccanismi genetici che controllano l'eterosi in specie quali il mais. La selezione assistita con marcatori molecolari (Molecular Assisted Selection - MAS) per caratteri qualitativi è una realtà ormai diffusa anche presso le grandi ditte sementiere private (Fig. 14). Lo sviluppo di una nuova classe di marcatori molecolari (Single Nucleotide Polymorphism SNP) consentirà di automatizzare ed estendere più di quanto sia stato fatto finora le applicazioni basate sui marcatori molecolari, ad e sempio sviluppando approcci di Whole Genome Association Mapping.

Genoma e adattamento all'ambiente

Il cambiamento del clima e le sue conseguenze stanno emergendo come una delle principali sfide con cui il genere umano dovrà confrontarsi nel prossimo

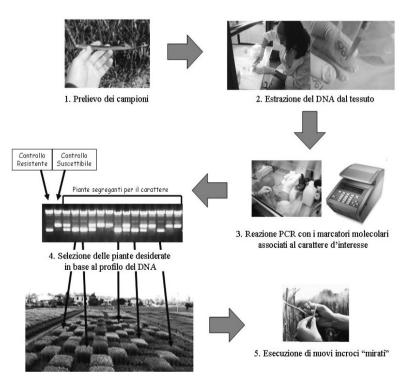


Fig. 14. Piattaforma per la selezione assistita con marcatori molecolari (MAS, Molecular Assisted Selection). Cortesia di E. Francia e V. Terzi.

futuro, un argomento ormai al centro del dibattito internazionale, sia in sede politica che scientifica. Variazioni anomale delle temperature e delle precipitazioni e la sempre maggiore frequenza ed intensità di siccità da una parte e di inondazioni dall'altra, avranno implicazioni di lungo periodo sulla capacità produttiva, se non sull'esistenza stessa, degli agro-ecosistemi del pianeta (www.fao.org/climate-change/). L'agricoltura è infatti il settore che più risente di questi cambiamenti, e sarà sempre più vulnerabile in futuro, specialmente in settori marginali di agricoltura di sussistenza, delle regioni semiaride e sub-umide. Pertanto, l'incremento delle produzioni agricole insieme alla stabilità di produzione e la qualità dei prodotti rappresentano l'obiettivo cruciale per l'economia e la sicurezza alimentare di tutti i Paesi.

Nel complesso, le riduzioni quali-quantitative delle produzioni causate da avverse condizioni dell'ambiente colturale sono ingenti, tanto che si stima che soltanto il 10% della superficie coltivata nel mondo può essere classificata nella categoria 'non stress' (crescita in condizioni ambientali ottimali), mentre il restante 90% può essere soggetta a stress singoli o combinazione di stress, con diversa intensità, che limitano l'estrinsecazione del potenziale genetico della pianta (Guerra et al., 2009). Gli stress vengono distinti in biotici (determinati da organismi viventi in grado di infettare o competere con la pianta) e abiotici (dovuti a fattori chimici e fisici). Fra questi ultimi si collocano gli stress da alta o bassa temperatura, da carenza o eccesso di acqua, da radiazioni (infrarosse, IR; visibili, VIS; ultraviolette, UV; ionizzanti), da sali (principalmente sodio), da carenze o eccesso di nutrienti, da inquinanti organici e fitofarmaci, da metalli pesanti, da vento e da luce (alta o bassa intensità, fotoperiodo non corretto). I danni arrecati dall'agente stressante alla pianta possono essere diretti o indiretti, primari o secondari. Ad esempio, un danno diretto primario è quello subito da una pianta sottoposta ad un rapido congelamento che provoca in pochissimo tempo la formazione di cristalli di ghiaccio nelle cellule e la loro morte. Allo stesso modo le elevate temperature portano per sé danno alla pianta (stress primario) ma, potendo causare collateralmente carenza idrica, possono indurre ulteriori danni (stress secondario).

Come può una pianta adattarsi a condizioni ambientali avverse? A livello di 'crop' l'adattamento o hardening è stato interpretato come la capacità di raggiungere elevati livelli di produzione anche in situazioni sfavorevoli. Selezionando per elevate produzioni, i breeders hanno indirettamente incrementato anche il rendimento in condizioni limitanti, per cui le varietà moderne, dotate di elevata potenzialità produttiva, spesso si comportano meglio rispetto a varietà

antiche o accessioni locali direttamente selezionate in tali ambienti (Rizza *et al.*, 2004).

A livello fisiologico, la resistenza di una pianta allo *stress* viene invece intesa come la sua capacità di sopravvivere, crescere e generare progenie in presenza del fattore sfavorevole (Levitt, 1980). Essa può essere ottenuta mediante tre differenti strategie così definite:

- EVITARE L'AVVERSITÀ. In realtà si è di fronte ad una forma di falsa resistenza: la pianta ha un ciclo di sviluppo che la porta a non intercettare l'avversità o ad intercettarla in fasi fenologiche non a rischio. È questo il caso delle varietà precoci di frumento duro e di orzo che sfuggono la stretta da caldo nell'Italia meridionale.
- EVITARE LO STRESS. Caratteristica di quelle piante che possiedono barriere stabili morfologiche e/o funzionali che consentono di prevenire o ridurre lo stress prodotto dall'avversità. Ad esempio, in caso di stress anossico, alcuni meccanismi consentono il trasferimento dell'ossigeno dalle parti ben aerate della pianta verso quelle che ne hanno a disposizione in quantità sub-ottimale (Perata e Alpi, 1993).
- TOLLERARE LO STRESS. Le piante sono in grado di attivare meccanismi fisiologici/molecolari in grado di alleviare gli effetti dovuti allo stress e/o riparare i danni subiti. Dato l'elevato numero di caratteri fisiologici implicati nella tolleranza, è probabile che non esista un unico pattern di risposta ma, al contrario, specie diverse possono raggiungere simili livelli di tolleranza utilizzando differenti meccanismi.

A livello cellulare, infatti, le piante hanno un complesso sistema di percezione e risposta agli *stress* che può essere schematizzato in quattro fasi distinte (Fig. 15):

- PERCEZIONE DEL SEGNALE. Il fatto che le piante attivino una serie di processi molecolari in risposta alle variazioni ambientali implica necessariamente l'esistenza di recettori, situati sulla membrana plasmatica delle cellule, che agiscono da sensori rilevando tali cambiamenti. Alcuni studi suggeriscono, ad esempio, un ruolo centrale della fluidità delle membrane nella percezione di alte e basse temperature.
- ATTIVAZIONE DI MESSAGGERI SECON-DARI PER LA TRASDUZIONE DEL SEGNA-LE. Ormoni come l'acido abscissico (ABA), ioni come Ca²⁺, proteine MAPK (*Mitogen-activated* protein Kinase) e altre molecole partecipano ad una serie di eventi che, come una vera e propria cascata, trasportano il segnale di stress fino al nucleo, dove viene attivata la trascrizione di geni di risposta.

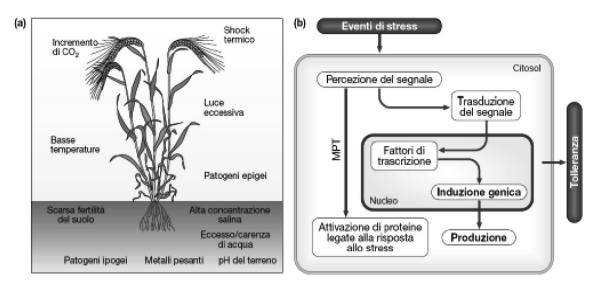


Fig. 15. (a) Eventi di stress con effetti negativi sulla parte ipogea ed epigea della pianta. (b) Risposte cellulari agli stress e attivazione di meccanismi di tolleranza. (MPT = meccanismi post-traduzionali)

- ATTIVAZIONE DI PROTEINE REGOLATRI-CI DELLA TRASCRIZIONE. I fattori trascrizionali, piccole proteine in grado di legare il DNA in regioni specifiche dei promotori e di regolare la trascrizione di molti geni, rappresentano l'ultimo anello della catena di trasduzione del segnale: essi inducono l'espressione dei geni effettori della risposta allo stress. A questo livello la regolazione si fa più fine, cosicché per ogni condizione ambientale affrontata sarà possibile avere una risposta specifica e adeguata. L'analisi funzionale di questi fattori di trascrizione dovrebbe chiarire la complessa rete di regolazione dell'espressione di molti geni, responsabile dell'adattamento delle piante all'ambiente.
- ESPRESSIONE DI PROTEINE LEGATE ALLA RISPOSTA. Differenti tipologie di proteine possono essere sintetizzate, a seconda del tipo di *stress* cui la pianta è sottoposta. In risposta a condizioni di siccità, basse temperature o alte concentrazioni saline, fenomeni riconducibili alla disidratazione cellulare, si ha ad esempio l'espressione di geni che consentono l'accumulo di osmoliti quali prolina, poliammine, glicin betaina, zuccheri e di ioni come il potassio o il sodio, tutti utili per contrastare la perdita di acqua.

Lo studio della tolleranza agli *stress* abiotici e biotici e la conoscenza dei processi fisiologici e molecolari responsabili della risposta della pianta a tali *stress*, rappresenta una premessa fondamentale per lo sviluppo di nuovi genotipi altamente produttivi anche in condizioni limitanti.

Studi volti all'analisi dell'espressione genica in condizioni di stress e basati su svariate tecnologie di screening hanno permesso l'isolamento di numerosi stress-related genes, e permettono di avere un quadro preliminare, ma al contempo globale, dei geni coinvolti nei processi metabolici più complessi del ciclo vitale delle piante (sviluppo e crescita, resistenza al freddo, al caldo, alla siccità, alle malattie, maturazione dei frutti, ecc.). Tuttavia l'aspetto fondamentale per la comprensione dei processi molecolari complessi è costituito dall'analisi dei meccanismi di signal transduction. L'identificazione dei recettori dei segnali ambientali o ormonali, dei messaggeri secondari, dei fattori di trascrizione coinvolti nei processi cellulari complessi, nonché lo studio delle interazioni di questi elementi tra loro e con l'ambiente rappresenta la chiave per comprendere il funzionamento globale della cellula e quindi la base molecolare del fenotipo. Un ruolo fondamentale in queste ricerche è rappresentato dalla disponibilità di mutanti per caratteri utili.

Negli ultimi anni, studi e ricerche hanno portato all'identificazione e descrizione di un enorme numero di geni coinvolti nei meccanismi di risposta delle piante a *stress* fisici e chimici. L'analisi su larga scala del trascrittoma ha infatti evidenziato che centinaia di geni sono attivati o repressi in risposta agli *stress*. I diversi geni individuati, oltre ad avere un ruolo diretto nella protezione delle cellule dai danni causati da *stress* osmotico, sono coinvolti nell'attivazione di circuiti di regolazione che controllano l'intero *network* della risposta. Tali geni sono, quindi, generalmente divisi in due categorie: geni funzionali, che includono

quelli implicati nella sintesi di molecole e proteine con ruolo protettivo di processi cellulari cruciali (proteine protettive, enzimi detossificanti, osmoliti compatibili ed altri), e geni regolatori, codificanti proteine regolatrici coinvolte nella percezione e trasduzione del segnale di *stress* (putativi recettori, calmoduline, *calcium-binding proteins*, fosfolipasi, chinasi e fosfatasi, fattori di trascrizione), che modulano l'espressione dei geni appartenenti alla prima categoria. I fattori di trascrizione sono considerati ottimi *targets* per rendere una pianta tollerante a *stress*.

La vita della pianta, oltre gli stress abiotici, viene tormentata da attacchi anche massicci di parassiti vegetali ed animali. Durante la loro crescita le piante sono costantemente attaccate da patogeni che cercano di invaderle. Questi patogeni accedono all'interno dei tessuti vegetali della pianta tramite meccanismi di penetrazione attivi che forzano gli strati esterni e la parete cellulare, attuati da funghi e nematodi, o attraverso aperture naturali (stomi, idatodi, lenticelle) e ferite nel caso dei batteri, o veicolati da insetti e funghi e da operazioni meccaniche che causano ferite. I patogeni possono invadere tutti gli organi della pianta, a partire dal seme in fase di germinazione, fino alle radici, ai fusti, alle foglie e ai frutti. Per rispondere alla presenza di patogeni che cercano di invaderle, le piante non possiedono un sistema immunitario adattativo, come quello presente negli animali, ma hanno a disposizione meccanismi di resistenza basati su un sistema immunitario innato che consente di riconoscere e rispondere all'azione di patogeni specifici. La cosiddetta "immunità" delle piante dipende da eventi dotati di autonomia cellulare: una singola cellula che subisce un tentativo di invasione è in grado di attuare tutti i processi che portano a una risposta di resistenza. Alla base di questa serie cruciale di eventi è stato individuato un repertorio molecolare di riconoscimento molto esteso, ed è proprio grazie a quest'ultimo che gli organismi vegetali sono in grado di sopperire alla già menzionata mancanza di un sistema immunitario adattativo (Baldwin, 2017).

A valle dei fenomeni di riconoscimento le piante infettate possono attivare geni che determinano la sintesi di un'ampia varietà di molecole, tra cui le fitoalessine, piccole molecole ad ampio spettro antimicrobico sintetizzate dalla pianta in tempi brevissimi, e le proteine PR (pathogenesis related), a più lenta azione, ma dotate di molteplici funzioni. Queste, e altre molecole ancora, rientrano in meccanismi di notevole complessità, quali la risposta ipersensibile e la resistenza sistemica acquisita. La risposta ipersensibile attiva la produzione massiccia di specie reattive dell'ossigeno, associata all'induzione di fenomeni di morte cellulare programmata, che determinano lesioni necrotiche. Questo fenomeno

di morte programmata di alcune cellule della pianta ha il ruolo fondamentale di contenere e isolare l'invasione microbica. La pianta innesca inoltre la produzione di metaboliti aromatici secondari, sia a livello locale che, attraverso la sintesi e la diffusione di segnali chimici, a livello sistemico. È noto, inoltre, che le piante possono segnalare la presenza di un patogeno attraverso la produzione di composti volatili, in modo da allertare i sistemi di difesa delle foglie/piante vicine. Nella risposta ipersensibile rientrano numerosi altri fenomeni, quali la sintesi di composti fenolici direttamente tossici per il patogeno – come è il caso delle fitoalessine – oppure il rinforzo delle pareti cellulari vegetali attraverso lignificazione e deposizione di callosio. Una forma di immunità a lungo termine è invece la resistenza sistemica acquisita: in presenza di acido acetilsalicilico endogeno – una delle molecole prodotte nella risposta ipersensibile - si attiva una cascata di segnali genici che risultano in una massiccia produzione di proteine PR, che assicurano un incremento generale della resistenza della pianta ai patogeni.

Molti funghi e batteri che infettano le piante producono una grande quantità di enzimi che degradano la parete cellulare come, per esempio, le poligalatturonasi, le pectinmetilesterasi, le endoglucanasi e le xilanasi. Le piante, a loro volta, hanno sviluppato una serie di risposte di difesa tra cui gli inibitori proteici di questi enzimi, come le PGIP (polygalacturonase-inhibiting protein), le PMEI (pectinmethyl esterase inhibitor), che inibiscono enzimi che degradano la pectina e gli inibitori delle xilanasi, che inibiscono enzimi che degradano le emicellulose. Il coinvolgimento di questi inibitori nella risposta di difesa della pianta è stato dimostrato attraverso la produzione di piante transgeniche sovraesprimenti questi inibitori, sottoposte ad infezione con determinati patogeni (Tundo et al., 2016). Piante transgeniche di frumento sovraesprimenti l'inibitore AcPMEI di kiwi, PvPGIP2 di fagiolo o il TAXI III sono risultate più resistenti al patogeno fungino Fusarium graminearum rispetto al controllo wild type.

Quanto sin qui descritto indica che è possibile tracciare oggi strategie genetico-molecolari per l'identificazione e l'introgressione dei geni di resistenza nel germoplasma coltivato come un valido strumento per costituire nuove varietà resistenti e conseguentemente limitare le perdite produttive imputabili ai patogeni e l'uso di fitofarmaci in agricoltura, con indubbi vantaggi in termini economici e ambientali. Tuttavia, l'efficacia della resistenza della pianta è sovente limitata nel tempo perché alcuni ceppi patogeni evolvono la capacità di superarla: si tratta di geni resistenza razzaspecifica che agiscono in tempo limitato. Da una parte, si sta percorrendo la strada della rincorsa verso la scoperta di nuovi alleli utili nel germoplasma anche

selvatico, e dall'altra dell'introduzione della "durable resistance" come fonte di difesa che conferisce resistenza completa verso tutti gli isolati del patogeno. Tutto sarà possibile perchè alle tecniche di genetica "convenzionale", poco efficienti e costose, per l'ottenimento di una varietà resistente, si è affiancata la tecnologia molecolare basata sulla Marker Assisted Selection (MAS), la GAS Genomic Assisted Selection e sulla trasformazione genetica. La MAS si basa sul principio che i marcatori molecolari strettamente associati ai geni R eliminano la necessità di complesse analisi fenotipiche per identificare gli individui resistenti anche nelle prime generazioni delle popolazioni segreganti. In più, la MAS permette una più rapida risposta a un crollo della resistenza, una veloce introgressione di geni multipli derivanti da diversi germoplasmi attraverso il "gene pyramiding" e la selezione di rari ricombinanti tra geni di resistenza strettamente associati.

Uno degli aspetti di particolare interesse riguarda la genomica per la qualità e sicurezza alimentare. La qualità delle produzioni agroalimentari rappresenta un parametro particolarmente complesso, coinvolgendo le esigenze spesso differenti dei diversi attori delle filiere, quali i produttori, gli stoccatori, i trasformatori ed infine i consumatori. Innumerevoli sono gli esempi di applicazioni biotecnologiche al miglioramento della qualità in piante agrarie, così come ampie sono le prospettive delle biotecnologie applicate alle richieste mutevoli del settore. L'uso di marcatori molecolari associati a caratteri di pregio per il loro trasferimento attraverso la MAS o la Genomic Assisted Selection viene praticato ormai routinariamente con l'obiettivo di associare alle elevate produzioni anche le caratteristiche qualitative, incluse le qualità organolettiche di un prodotto.

Sono stati identificati nelle diverse collezioni di germoplasma genotipi portatori di caratteristiche specifiche dell'aroma e di composti funzionali di cui si conosce il sicuro benefico effetto sulla salute umana. Tutto ciò però deve essere dimostrato in qualsiasi tappa della filiera e pertanto il processo necessita di strumenti inequivocabili di tracciabilità. Con il termine tracciabilità molecolare vengono indicate metodiche genomiche, proteomiche e metabolomiche capaci di dare indicazioni su diverse caratteristiche di una produzione agraria o di un prodotto agroalimentare, quali sicurezza e qualità, origine geografica, valore nutrizionale, autenticità. Il fingerprinting molecolare è applicabile a tutti i livelli delle filiere di produzione agroalimentare, partendo dalla caratterizzazione della diversità genetica fino ad arrivare alla tracciabilità delle materie prime nelle fasi di trasformazione, confezionamento e distribuzione degli agro derivati. È oggi possibile utilizzare tecniche di DNA profiling per verificare la presenza in un prodotto finito di specie vegetali potenzialmente allergeniche, ma anche verificare la composizione di una pasta alimentare sia in termini di specie cerealicole presenti che in termini di varietà (Terzi *et al*, 2004). A questo si aggiunga l'importanza di avere a disposizione anche approcci proteomici per la diagnostica di proteine ed enzimi responsabili di caratteristiche desiderabili o, al contrario, indesiderabili.

Grande attenzione è inoltre rivolta alla verifica della qualità microbiologica delle produzioni agroalimentari: tecniche di tracciabilità molecolari sono usate per la valutazione della presenza di microrganismi pericolosi nei diversi passaggi della filiera di produzione, partendo dai possibili contaminanti in campo ed arrivando ai patogeni veicolati dagli alimenti. Una necessità è, ad esempio, il miglioramento delle strategie di controllo, monitoraggio e riduzione della presenza di micotossine. Queste sono molecole prodotte da funghi filamentosi, quali Fusarium, Penicillium, Aspergillus e Alternaria, che possono contaminare vari segmenti della filiera produttiva dell'alimento, portando all'accumulo di tricoteceni, aflatossine, ocratossine, fumonisine, etc. ad effetto devastante sulla salute. I problemi connessi alle micotossine vanno dal fatto che queste molecole sono attive nell'alimento anche quando la muffa che le ha prodotte è stata uccisa, fino al rischio di "carry over", con il loro trasferimento all'uomo attraverso i derivati dell'industria zootecnica. Un'efficace strategia di controllo del problema micotossine ha bisogno di sistemi innovativi di identificazione e quantificazione degli agenti contaminanti e in questo senso la tracciabilità molecolare rappresenta una via particolarmente promettente.

Una nuova metodologia di caratterizzazione chimica in fase di affinamento, prevede l'uso di elementi in traccia e marcatori isotopici per identificare zone di produzione di prodotti agricoli e processi di trasformazione.

Nonostante il grande effetto di singoli geni sulla potenzialità produttiva, gran parte delle diversità di produzione tra varietà delle specie coltivate è attribuibile a fattori quantitativi (QTL), spesso caratterizzati da una forte interazione con l'ambiente. La definizione delle basi molecolari dei QTL, particolarmente di quelli che mostrano la maggior stabilità nei vari ambienti, costituisce un aspetto prioritario per poter sviluppare il miglioramento delle capacità produttive attraverso un sistema di MAS.

Alla selezione assistita con marcatori molecolari si affianca la tecnologia della trasformazione genetica. I nuovi indirizzi biotecnologici sono rivolti a produrre piante geneticamente modificate prelevando geni da piante filogeneticamente affini – Piante Cisgeniche –

oppure da piante filogeneticamente lontane - Piante Transgeniche. I benefici attesi dall'impiego delle PGM in agricoltura sono stati ampiamente discussi in pubblicazioni internazionali e nazionali nonché con interventi sul sito di società scientifiche come la Società Italiana di Genetica Agraria (www.siga. unina.it/gmo'01.html) o la Società Americana di Biologia Vegetale (www.aspb.org/publicaffairs/aspb'statement'on'genetic'modifi.cfm).

Tra i benefici, sono stati segnalati: il minor consumo di pesticidi chimici, l'incremento percentuale di specifici nutrienti, la maggiore produttività e quindi un minor sfruttamento delle risorse naturali, la possibilità di utilizzare le piante come fabbriche naturali di sostanze industriali o farmaceutiche, individuando così nuovi orizzonti per la produzione agricola, la possibilità di cambiare in maniera mirata e più velocemente, rispetto al tradizionale incrocio, pochi caratteri deficitari in una varietà altrimenti buona, la possibilità di eliminare potenziali allergeni nelle colture, la possibilità di monitorare il livello d'inquinamento nel suolo e di ridurlo rimuovendo i composti inquinanti.

Una nuova biotecnologia molecolare è stata recentemente messa a punto nel settore vegetale per introdurre o eliminare in modo preciso sul genoma sequenze codificanti. È stata definita "Editing del Genoma - CRISPR/Cas9" e deriva da un processo di difesa dei batteri verso l'attacco di virus. Si sta utilizzando in modo massiccio in campo umano e nelle piante è stata introdotta nel miglioramento genetico.

La conoscenza dei meccanismi che regolano l'architettura della pianta, molto spesso mediata da un controllo ormonale, sono fondamentali per i nuovi ideotipi di pianta per il futuro. In genere gli studi sono stati rivolti principalmente a fisiologia, metabolismo e genetica della parte aerea delle piante. Oggi tuttavia una maggiore attenzione viene rivolta alle radici, per migliorare l'efficienza d'uso dell'acqua (Water Use Efficiency), dell'azoto (Nitrogen Use Efficiency), del Fosforo (Phosphorus Use Efficiency), alla resistenza al freddo (Cold Responsive Genes), alle proprietà fisico-chimiche e biologiche del suolo e al loro impatto sulla resistenza alle malattie, in modo da disegnare un moderno sistema integrato (IPM: Integrated Pest Management) per mettere i nuovi genotipi di pianta nella migliore condizione di crescita. Sono in atto in pieno campo i primi esperimenti di simulazione dell'incremento della CO, nell'atmosfera (FACE Free Air Carbon-Dioxide Enrichment), che si prevede passerà dalle 380 ppm attuali a 600 ppm nel 2050, per verificare l'effetto sulla fotosintesi e qualità dei prodotti (Verrillo *et al.*, 2017).

Sulla base di tutto ciò, è stata "disegnata" una nuova pianta di frumento tenero capace di raggiungere una potenzialità produttiva di 20t/ha nel 2020 partendo dalle 14 t/ha del 2008. Non trascurabile è anche il tema che vede il sistema produttivo agrario non più basato sul trinomio Pianta-Atmosfera-Suolo ma piuttosto sul quadrinomio Pianta-Atmosfera-Suolo-Microrganismi che vivono intorno o dentro le radici. Questa nuova visione ha stimolato la nascita di network per monitorare l'evoluzione del metagenoma al variare dei diversi sistemi colturali e degli ambienti, e come questo possa influenzare la vita delle specie agrarie e selvatiche e l'assorbimento degli elementi nutritivi come il fosforo (Castrillo et al., 2017). Si ipotizza già che la performance di specie di piante e di genotipi entro specie dipenderà anche dagli inoculi microbici, specifici per l'esaltazione di determinati caratteri, che interagiscono con gli elementi fisicobiochimici del suolo e con il microbioma naturale in specifiche condizioni (Bulgarelli et al., 2015).

Le nuove sfide della moderna genetica, per contribuire ad alimentare l'umanità, si baseranno sempre più sulla ricerca di base e l'Innovazione tecnologica, in particolare quella derivata dalle discipline "omiche", tra cui si sta affermando non solo in campo vegetale ma più intensamente in campo microbico, animale e umano l'Editing del Genoma, e sulla velocità con cui queste nuove tecniche raggiungeranno l'azienda agraria.

Ne consegue che la Scienza applicata all'Agricoltura rappresenta il motore dell'aggiornamento ed è direttamente coinvolta nel disegnare i nuovi orizzonti dell'Agricoltura, dell'Alimentazione e dell'Ambiente, partendo dal presupposto che, come ben noto, sarà necessario raddoppiare la produzione di cibo entro il 2050 senza causare danni all'ambiente, e concorrere con colture specializzate a produrre energia, farmaci, polimeri e altre sostanze importanti per la medicina e l'industria. L'aumento delle produzioni agricole, la stabilità delle produzioni, la qualità dei prodotti e la loro tracciabilità, il rispetto delle regole delle razionali pratiche agricole dettate dall'innovazione tecnologica (che si basa sulla conoscenza=sostenibilità) sono gli imperativi ai quali l'agricoltura moderna deve far fronte per garantire cibo a sufficienza all'uomo e agli animali in allevamento.

In conclusione è necessario ricordare che già attualmente le conoscenze derivate dall'approccio genomico consentiranno di utilizzare meglio le piante come fonte di energia rinnovabile, e di produrre dalle piante farmaci, polimeri e altre sostanze importanti per la medicina e per l'industria. Con le tecniche proprie dell'analisi genomica (uso sempre maggiore di marcatori molecolari, impiego dell'ingegneria genetica, sequenziamento dei geni e genomi, analisi globale dell'espressione genica, analisi del proteoma e delle sue modificazioni, analisi globale dei metaboliti)

è possibile studiare i genomi, intesi come insieme di geni e proteine che interagiscono tra loro, e comprendere i meccanismi che regolano il metabolismo cellulare sino a determinare l'espressione fenotipica che rappresenta, in ultima analisi, il valore agronomico ed alimentare delle piante coltivate. Da tutto ciò consegue che la genetica vegetale, punto focale della strategia della "Systems Biology" rappresenterà la base per garantire cibo a sufficienza e di qualità ai dieci miliardi di esseri umani previsti per il 2050, senza turbare l'equilibrio ambientale.

Riferimenti bibliografici

- Bai Y., Lindhout P. (2007), Domestication and breeding of tomatoes: what have we gained and what can we gain in the future?, Annals of Botany 100: 1085-1094.
- Baldwin I.T. (2017), The plant as pugilist, Nature 543 (7643): 39.
- Barcaccia G., Lorenzetti S., Falcinelli M. (2006), Sull'eterosi nelle piante: dall'ipotesi genetica di Jones all'era genomica -UNIPG-1.
- Bulgarelli D., Garrido-Oter R., Munch P.H. et al. (2015), Structure and function of the bacterial root microbiota in wild and domesticated barley, Cell Host Microbe; 17: 1-12.
- Butelli E. et al. (2017), Changes in Anthocyanin production during domestication of Citrus, Plant Physiology 173: 2225-2242.
- Castrillo G., Teixeira P.J.P.L., Herrera Paredes S., Law T.F., de Lorenzo L., Feltcher M.E. et al. (2017), Root microbiota drive direct integration of phosphate stress and immunity, Nature 543 (7646): 513-518.
- Cavalli Sforza L. e F. (2005), Perché la scienza. L'avventura di un ricercatore, Oscar Saggi Mondadori, p. 393.
- Columella (1977), L'arte dell'agricoltura, traduzione di Rosa Calzecchi Onesti Einaudi, pp. XXIII - 1060.
- D'Esposito D., Ferriello F., Dal Molin A., Diretto G., Sacco A., Minio A., Barone A., Di Monaco R., Cavella S., Tardella L., Giuliano G., Delledonne M., Frusciante L., Ercolano M.R. (2017), Unraveling the complexity of transcriptomic, metabolomic and quality environmental response of tomato fruit, BMC Plant Biology 17:1-18.
- Gonzali S., Mazzuccato A., Perata P. (2009), Purple as tomato: towards high anthocyanin tomatoes. Trends in plant science, 14: 237-241.
- Guerra D., Tondelli A., Biselli C., Stanca A.M. (2009), Analisi del genoma delle piante coltivate per l'adattamento all'ambiente colturale, I Georgofili - Quaderni, VI: 129-148.
- Lisoe E., Terzi V., Orru L., Lamontanara A. et al. (2016), Draft genome sequence and chemical profiling of Fusarium langsethiae, an emerging producer of type A trichothecenes, Int. J. Food Microbiol. 221: 29-36.
- Marcussen T., Sandve S.R., Heier L., Spannagl M., Pfeifer M., Jakobsen K.S., Wulff B. BH., Steuernagel B., Mayer K. FX., Olsen O.-A., International Wheat Genome Sequencing Consortium 2014. Ancient hybridizations among the ancestral genomes of bread wheat, Science 345, n. 6194, 1250092.
- Mayer K. FX., Rogers J., Doležel J., Pozniak C., Eversole K., Feuillet C., Gill B., Colaiacovo M., Faccioli P., Stanca A.M.. Cattivelli et al. (2014), A chromosome-based draft sequence of the hexaploid bread wheat (Triticum aestivum) genome, Science 345 (6194), 1251788, 2014.
- Nature Biotechnology 2012, Agnostic about agriculture, vol. 30, n. 3, p. 197.

- Perata P., Alpi A. (1993), Plant responses to anaerobiosis, Plant Sci.
- Pozzi C., Faccioli P., Terzi V., Stanca A.M., Cerioli S., Castiglioni P., Fink R., Capone R., Müller K.J., Bossinger G., Rohde W., Salamini F. (2000), Genetics of mutations affecting the development of a barley floral bract, Genetics, 154(3): 1335-1346.
- Rizza F., Badeck F.W., Cattivelli L., Lidestri O., Di Fonzo N., Stanca A.M. (2004), Use of a Water Stress Index to Identify Barley Genotypes Adapted to Rainfed and Irrigated Conditions, Crop Science, vol. 44, no. 6, pp. 2127-2137.
- Stanca A.M., Marocco A., Pecchioni N., Valè G., Odoardi M., Faccioli P., Cattivelli L., Terzi V. (2014), Genetica Vegetale, Genetica, S. Pimpinelli, Milano, Casa Editrice Ambrosiana, pp. 155-221.
- Stanca A.M. (2015), La scienza e le biotecnologie vegetali saranno pronte per assicurare alimenti alla popolazione mondiale nel 2050?, EAI: 2-13.
- Stanca A.M., Francia E., Tondelli A., Badeck F.W., Terzi V. (2017), Progress in small grain cereals: a case study, in: R. Pilu and G. Gavazzi (eds.), More food: road to survival, chapter 17, 578-604,
- Terzi V., Morcia C., Giovanardi D., D'Egidio M.G., Stanca A.M., Faccioli P. (2004), DNA-based analysis for authenticity assessment of monovarietal pasta, European Food Research and Technology, 219 (4): 428-431.
- Terzi V., Tumino G., Pagani D., Rizza F., Ghizzoni R., Morcia C., Stanca A.M. (2017), Barley Developmental Mutants: The High Road to Understand the Cereal Spike Morphology, Diversity, 9(2) 21.
- Tundo S., Kalunke R., Janni M., Volpi C., Lionetti V., Bellincampi D., Favaron F., D'Ovidio R. (2016), Pyramiding PvPGIP2 and TAXI-III but not PvPGIP2 and PMEI enhances resistance against Fusarium graminearum, Molecular Plant-Microbe Interactions 2016, vol. 29, no. 8, pp. 629-639.
- Verrillo F., Badeck F.-W., Terzi V., Rizza F., Bernardo L., Di Maro A., Fares C., Zaldei A., Miglietta F., Moschella A., Bracale M., Vannini C. (2017), Elevated field atmosferic CO, concentrations affect the characteristics of winter wheat (cv. Bologna) grains, Crop & Pasture Science 68: 713-725.
- Vitulo N., Stanca A.M. et al. (2011), First survey of the wheat chromosome 5A composition through a next generation sequencing approach, PloS one 6(10):e26421.
- Westengen O.T. et al. (2013), Global ex-situ crop diversity conservation and the Svalbard Global Seed Vault: assessing the current status, PloS one 8(5): e64148.
- Wolters P.J. et al. (2013), Evidence for regulation of columnar habit in apple by a putative 2OG-Fe(II) oxygenase, New Phytol. 200:
- Zhang G.Q. et al. (2017), The Apostasia genome and the evolution of orchids, Nature 549 (7672), pp. 379-383.

A. MICHELE STANCA

Nasce a Soleto (LE) il 22 maggio 1942. Laurea in Scienze agrarie -Università di Bari. Direttore, sino al 2009, del Centro di ricerca per la genomica e la postgenomica animale e vegetale di Fiorenzuola d'Arda del CREA Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria. Ha svolto attività di ricerca in genetica, fisiologia e biologia molecolare sull'adattamento delle piante all'ambiente e di genomica strutturale e funzionale, di proteomica e crop systems biology per l'identificazione e analisi della funzione di geni e proteine coinvolti nella espressione di caratteri di rilevanza agronomica Ha sviluppato programmi di miglioramento genetico convenzionale e molecolare (MAS), costituendo varietà di orzo di successo a livello nazionale ed internazionale.

ANALISYS - 2/2017

Autore di circa 400 pubblicazioni su riviste scientifiche nazionali e internazionali, libri e capitoli di libri. Membro dell'International Barley Genetics Committee e della European Barley Genome Net. Attualmente è Professore a contratto gratuito di "Miglioramento genetico e OGM in agricoltura" presso l'Università di Modena e Reggio Emilia.

Accademico dell'Accademia Nazionale di Agricoltura di Bologna;

Accademico dell'Accademia degli Incamminati di Modigliana; Vice Presidente dell'Accademia dei Georgofili di Firenze; Presidente della Unione Nazionale delle Accademie per le Scienze Applicate allo Sviluppo dell'Agricoltura, alla Sicurezza alimentare ed alla Tutela Ambientale (UNASA).

Contatti: E-mail: michele@stanca.it