

FILOSOFIA DELLA SCIENZA

La crisi della scienza moderna tra incertezza scientifica e sua separazione dalla *policy* e società

L'ipotesi della scienza post-normale nell'Antropocene



MAURIZIO FERRI

Coordinatore scientifico della Società Italiana Medicina Veterinaria Preventiva

The difficulty lies, not in the new ideas, but in escaping from the old ones.
John Maynard Keynes (1883 - 1946)

Nell'ultimo decennio la scienza, specie quella biomedica e ambientale, è stata oggetto di critiche mosse sia all'interno della comunità scientifica che all'esterno (es. media e pubblico) riguardo alla sua integrità, qualità, e affidabilità. Critiche che, amplificate sulle pagine di riviste internazionali¹, minacciano di erodere la fiducia sociale nelle

istituzioni scientifiche e generano dubbi sull'adeguatezza e utilità delle evidenze scientifiche per il processo decisionale-normativo. Alcuni degli elementi che si ritiene abbiano contribuito alla cosiddetta "crisi della scienza", in un contesto di complessità crescente dei problemi ambientali e di salute umana, riguardano la irriproducibilità degli studi scientifici, l'incertezza scientifica,

l'inefficacia dei meccanismi di revisione scientifica (*peer review*), il conflitto di interesse e dunque l'indipendenza degli scienziati. Questi elementi, singolarmente o combinati, pongono una serie di sfide future per la *governance* della scienza, e segnalano la necessità di considerare da una parte una narrativa scientifica coerente con l'epoca attuale – caratterizzata da uno sviluppo tecnologico-informatico-digitale esponenziale e dall'emergenza di sistemi complessi e incerti – e dall'altra un modello innovativo di “partecipazione estesa” per la produzione scientifica, che punti all'interazione e collaborazione tra tutti i soggetti che operano all'interno delle istituzioni scientifiche e tra questi e i soggetti esterni come i politici e i cittadini. Indubbiamente, oggi la società nel suo complesso, tende sempre più a proporsi con forme, modalità, tempi e obiettivi diversi, come soggetto attivo nel processo scientifico e regolatorio, e sempre più ritenuta interlocutore privilegiato dei ricercatori e *policy makers*, già in una fase iniziale di formulazione dei problemi, prima ancora dell'avvio dell'indagine scientifica, in un'ottica funzionale a un equilibrio delle informazioni e al loro utilizzo per il perfezionamento degli interventi regolatori.

Il presente contributo, partendo da una sintetica descrizione di alcune condizioni che segnalano la crisi della *governance* della scienza, o meglio di un modello di scienza ancora condizionato da posizioni lineari, riduzionistiche e tecnocratiche, individua alcune delle opzioni metodologiche ed epistemiche ad oggi suggerite per salvaguardare la qualità, integrità e indipendenza del processo scientifico e promuovere il livello di condivisione sociale e dunque di efficace applicabilità dei risultati scientifici. Con questi presupposti appare prioritario riconsiderare il rapporto in evoluzione tra scienza e *policy*, partendo dall'assunto che la scienza stessa oggi è da ritenersi un processo intimamente sociale e dunque ha necessità di superare la sua separazione dalla politica e della società attraverso interazioni con i soggetti esterni portatori di interessi e conoscenze (es. i cittadini) e i *policy makers*, secondo un modello di gestione che punta alla riflessione, apertura e “democratizzazione” dell'esperienza scientifica. Con questo salto metodologico e al fine di evitare di preordinare il tipo di domande ammesse nella fase iniziale (*framing question*), anche il processo di valutazione del rischio, di supporto scientifico al livello politico-decisionale, dovrà acquisire in modo anticipato i fatti non scientifici e/o valori (culturali, economici e tecnologici) o “fatti estesi” (conoscenze, esperienze locali) nel processo scientifico attraverso la partecipazione estesa agli *stakeholders* e integrare le evidenze biologiche, con metodi di valutazione il più possibile armonizzati per ovviare alle divergenze di interpretazione, mantenendo la separazione funzionale dalla gestione del rischio.

Dogma scientifico nella scienza normale e la sua crisi

Se pensiamo al contesto attuale riferito alla crisi della scienza moderna, non c'è descrizione migliore di quella fornita da Silvio Funtowicz² che ha parafrasato una riflessione di Antonio Gramsci sulla crisi dei suoi tempi³. Gramsci sostiene che

«la crisi consiste appunto nel fatto che il vecchio muore e il nuovo non può nascere: in questo interregno si verificano i fenomeni morbosi più svariati». Questa considerazione, seppure inserita tra le sue riflessioni sul capitalismo, è ancora oggi particolarmente attuale se pensiamo al rapporto in evoluzione tra “scienza” (con particolare riferimento alla salute umana, ambientale) e “società”. Difatti, se guardiamo alla produzione scientifica e in particolare alla valutazione del rischio, Funtowicz sostiene come il vecchio oggi è rappresentato da una scienza (tradizionale o normale) e relativo impianto regolatorio, impostati sull'ipotesi riduzionista o lineare che considera le questioni pratiche risolvibili solo se ridotte a una sfera meramente tecnico-scientifica, indipendentemente dalla considerazione dei valori, delle ideologie e della politica. È la concezione della scienza basata sulla fede nella verità e obiettività di Cartesio e Galileo⁴ e proseguita con la tradizione moderna dell'illuminismo europeo, secondo cui essa informa la *policy* fornendo una conoscenza obiettiva, valida e affidabile (la verità degli esperti che parla al potere dei politici – *science as speaking truth to power*) e dunque disconoscendo sia l'incertezza scientifica, che viene eliminata o controllata, sia i fattori esterni alla scienza.

Potremmo rappresentare il vecchio nell'ideale di una stretta separazione tra valori e fatti. Al contrario, il moderno, esemplificato dall'aumento esponenziale delle tecnologie, che devono ancora essere pienamente integrate nelle scienze ambientali, umane e dell'alimentazione, dai nuovi e complessi problemi urgenti di salute umana e ambientale e dall'incertezza scientifica, esplicita una consapevolezza emergente, ma non ancora matura, che la separazione tra fatti e valori non è più funzionale alla legittimità della *governance* nella società contemporanea e dunque tende a privilegiare nuove interazioni della produzione scientifica con il contesto sociale e regolatorio.

La scienza dunque, nella sua espressione riduzionistica, si rivela scientificamente e politicamente inadeguata ad affrontare la complessità dei sistemi moderni (per i quali le competenze di routine e anche la migliore conoscenza e giudizio professionale appaiono totalmente inadeguate o insufficienti), proprio perché priva di apertura costruttiva e di dialogo non solo all'interno della stessa comunità scientifica ma anche all'esterno, verso il livello politico-decisionale e sociale e vieppiù condizionata dall'incertezza, che nelle sue diverse forme (tecnica, metodologica ed epistemica)^{5,6} e in mancanza di un approccio condiviso per la sua gestione, rende l'*output* scientifico discutibile o nel peggiore dei casi inaffidabile agli occhi della società. Nel mezzo ci sono i “fenomeni morbosi” di cui parla Gramsci che non consentono al moderno di emergere, e possono essere individuati nelle difficoltà a riconoscere i nuovi modelli concettuali e pratici basati sui principi di democratizzazione e partecipazione, legittimità e riconoscimento e accettazione dell'incertezza. Assistiamo dunque nel dibattito attuale, alla sovrapposizione e riproposizione del vecchio su problemi e contesti radicalmente mutati, che soffocano l'emergere del nuovo e generano confusione e sfiducia⁷.

Tuttavia, in questo interregno, possono essere segnalate proposte pratiche fondate su esperienze e intuizioni, che propongono una nuova forma di *governance*, non limitata alle risposte fornite dagli esperti ma estesa ad altri soggetti “sociali” secondo un modello di democratizzazione dell’esperienza scientifica⁸ e di partecipazione estesa, e la cui attuazione costituisce una sfida che richiederà cambiamenti scientifici e interventi istituzionali e costituzionali¹.

La crisi della scienza

Gli ultimi 50 anni sono stati testimoni di un cambiamento radicale della scienza nei diversi campi, con uno *shift* progressivo da una impostazione riduzionista o lineare-deterministica (scienza normale), in virtù della quale le domande poste alla scienza e le questioni pratiche sono risolvibili solo se ridotte a una sfera meramente tecnico-scientifica, a una olistica e probabilistica, che prevede più di una risposta o opzione di gestione più o meno rilevanti a seconda del contesto di riferimento e tenuto conto soprattutto di fattori non scientifici e dell’incertezza. Questo passaggio, supportato dal mutamento di indirizzo nella concezione del metodo scientifico e facilitato dal criterio popperiano di scientificità di una teoria⁹ e dall’importanza crescente di un fattore generalmente ritenuto idiosincratico, quale è l’incertezza scientifica, è avvenuto contestualmente, per gli aspetti tecnico-metodologici, allo sviluppo di nuovi metodi statistici, tecniche di modellazione e sofisticati programmi computazionali, e per quello epistemico, alla consapevolezza dell’esistenza di una realtà con relazioni causali molto più complesse di quelle rappresentabili e dunque di un concetto di rischio più ampio⁶. Oggi si parla di crisi della scienza moderna¹⁰ generalmente interpretata come l’impossibilità del modello scientifico riduzionista (che poggia su una relazione lineare con la *policy* e sulla pretesa razionale che le conoscenze scientifiche consentono l’accesso alla vera rappresentazione della realtà) di fornire agli scienziati uno strumento moderno utile a comprendere la natura olistica dei sistemi terrestri, i sistemi ecologici e i fenomeni naturali, i quali richiedono più di uno studio delle parti nelle loro interazioni, che spesso implica cogliere aspetti rilevanti di interi sistemi¹¹. La nuova narrativa della ‘crisi della scienza’ investe sia l’aspetto epistemico che tecnico-metodologico del processo scientifico. Con riferimento al primo, indubbiamente le critiche sono rivolte ai sistemi tradizionali e disciplinari di “conoscenza” scientifica, che poggiano su approcci singoli e indicano l’emergere di una varietà di quadri epistemici che differiscono per il grado in cui i ricercatori, inseriti in un contesto valoriale, economico e regolatorio, prendono cognizione del loro ruolo nella definizione del problema, nella scelta delle variabili, nel focus e nei metodi¹². E dunque comprendere questi aspetti aiuta a ridurre i confini tra le posizioni scientifiche e tra queste e la *policy*. Per l’aspetto tecnico-metodologico si contesta il meccanismo della *peer review*¹³⁻¹⁶, l’irriproducibilità di espe-

rimenti e risultati e la frode scientifica^{17,18} la non sufficiente robustezza dell’evidenza scientifica¹⁹⁻²², l’incertezza scientifica²³, l’indipendenza degli scienziati^{24,25} e l’inaffidabilità del concetto classico di significatività statistica dei risultati di uno studio scientifico. In particolare, una tesi recente riassumendo le suddette criticità, postula che una proporzione crescente di studi pubblicati in tutte le discipline siano inaffidabili a causa del declino della qualità e dell’integrità della ricerca e dei meccanismi di pubblicazione, in gran parte dovuti alle pressioni a pubblicare e ad altri problemi inerenti la professione scientifica contemporanea²⁶. Le critiche dei metodi statistici segnalano un utilizzo eccessivo delle stime puntuali rispetto ai limiti di confidenza basati sul campionamento multiplo e l’uso improprio della teoria e pratica del valore-*p* (*p-value*) (‘manipolazione’, *p-hacking*)²⁷⁻²⁹.

Inoltre, come alcuni autori fanno notare, la quantificazione complessiva matematica o statistica è particolarmente incline all’abuso e alla corruzione, come ad esempio nel contesto riduzionista dell’analisi costo-benefici di fenomeni complessi [30] e tra le varie cause viene segnalato il fenomeno *cargo-cult* della statistica, diventato la norma in molte discipline, che prevede una mimesi ritualistica della statistica piuttosto che la sua pratica coscienziosa, rafforzato e favorito dall’educazione statistica, dai software statistici oltre che dalle *policy* editoriali delle riviste scientifiche³¹.

I suddetti limiti costituiscono una sfida per la progettazione, conduzione e divulgazione degli studi scientifici, e per il grado di affidabilità dei risultati. Inoltre, oggi, un problema che mina l’affidabilità dei risultati scientifici è legato alla scelta dei modelli, alla loro incertezza e alla scarsa chiarezza e trasparenza delle assunzioni. Le soluzioni proposte fanno riferimento da un lato ad una *policy* basata sul “controllo di sensibilità”, per comprendere le diverse fonti di incertezza e la loro importanza relativa alla trasparenza e accessibilità³², dall’altro all’utilizzo dell’analisi multi-modello combinato con moderni *softwares* computazionali che consentono ai ricercatori di mostrare il *range* di stime disponibili a partire da modelli plausibili differenti, rendendo dunque il risultato della ricerca più credibile e completo³³.

L’ipotesi della scienza post-normale

Nell’epoca attuale, definita Antropocene³⁴, segnata da problemi complessi di salute umana, alimentazione, ambiente ed etica e dall’utilizzo di nuove e controverse tecnologie (es. genomica, organismi geneticamente modificati-OGM, nanotecnologie, biologia sintetica, radiazioni etc.), la scienza riduzionista per i motivi già accennati (es. incertezza delle evidenze scientifiche, scarsa conoscenza di fenomeni complessi, forti interessi in gioco, valori controversi, posizioni scientifiche divergenti) appare sempre più inadatta a fornire le risposte desiderate di bio-sicurezza e a supportare soluzioni normative di efficace applicabilità e socialmente accettabili.

La scienza riduzionista, sebbene abbia prodotto dati molto

preziosi per il progresso scientifico, ha operato attraverso studi sperimentali di piccola scala, limitando le inferenze che invece attengono un approccio pluralistico³⁵. In sostanza, in virtù del rapporto lineare *scienza-policy*, da sola non è sufficiente a comprendere i sistemi olistici, in quanto esclude gli interessi e le conoscenze dei “non esperti” o quelle che potrebbero essere acquisite allargando la base di partecipazione (*extended peer communities*) e dunque finisce per operare semplificazioni dei suddetti sistemi con il risultato di far apparire le evidenze scientifiche divergenti, inaffidabili o peggio portatrici di effetti disastrosi. È ampiamente riconosciuto come oggi chi svolge attività di consulenza scientifica è impossibilitato a tradurre in modo univoco un problema pratico che emerge da un preciso quesito scientifico, con un’unica corretta soluzione³⁶. Con questi presupposti e con una prospettiva trans-multi-disciplinare e di rivoluzione metodologica della scienza, e allo scopo di ottimizzare la sua governance, viene formulata circa un quarto di secolo fa da Silvio Funtowicz e Jerome Ravez una proposta epistemica definita “scienza post-normale SPN (*post-normal science- PNS*)³⁷ che identifica, oggi, un approccio funzionale per la gestione di complessi scenari decisionali in cui i problemi si collocano nell’interfaccia tra scienza, policy e società e prendono la forma di fatti incerti, fatti estesi³⁸, valori controversi, interessi elevati e decisioni urgenti³⁹.

Una rappresentazione grafica che aiuta a comprendere la SPN è un diagramma, in cui l’asse X riporta il livello di incertezza del sistema oggetto di studio, mentre l’asse Y il livello di interesse o la posta in gioco⁴⁰. Se entrambi i livelli sono bassi, siamo in presenza di “incertezza tecnica” e dunque si applica la scienza normale che prevede la riduzione dell’incertezza con il solo ausilio della statistica. Se i livelli sono medi, parliamo di “incertezza metodologica” che viene ridotta dall’uso del consenso e *peer-review* professionale. In presenza invece, di livelli elevati di entrambi (forti interessi in gioco, elevata incertezza, valori controversi, decisioni urgenti) una condizione associata ai problemi ambientali di riscaldamento globale, OGM, biotecnologie, alle varie forme di inquinamento e di politica generale, si crea una condizione scientifica indicata come “post-normale”, che esprime un’incertezza epistemica, che può essere ridotta solo attraverso il ricorso al consenso sociale, delle comunità e alla *peer review* della stessa comunità.

In sostanza, la SPN si pone l’obiettivo di allargare la comunità scientifica, includendovi una pluralità di soggetti portatori di interessi e di conoscenze funzionali a una revisione di documenti e teorie scientifiche (democratizzazione della conoscenza scientifica)^{41,42}. La declinazione del concetto di partecipazione estesa prevede sia l’inclusione “interna” di esperti provenienti da più discipline e che lavorano insieme per la valutazione della qualità e dell’incertezza (*peers* tradizionali), compresi i portatori di prospettive minoritarie (*minority report*) o provenienti da settori diversi da quelli oggetto di analisi⁴³, sia quella “esterna” rivolta ai rappresentanti dei diversi *stakeholders* e ai cittadini interessati. Quest’ultimi da meri consumatori,

nella nuova economia della conoscenza e con la rivoluzione digitale, diventano più sofisticati e critici⁴⁴ e attraverso modalità interattive riferite al *crowd sourcing*⁴⁵ o *citizen science*⁴⁶, verosimilmente contribuiscono ad allargare il campo delle osservazione ed evidenze e partecipano ai processi di formulazione dei problemi, scelte degli indicatori e dei criteri di garanzia della qualità.

Lo scopo è dunque di migliorare la legittimità della base scientifica di supporto alla gestione del rischio attraverso l’acquisizione e la valutazione di tutte le prospettive legittime, scientifiche e normative e promuovere un maggiore riflessività, consapevolezza dell’incertezza scientifica, trasparenza e qualità della produzione scientifica, per produrre alla fine consenso ampio intorno alle decisioni adottate⁴⁷.

La trans-scienza

La scienza normale e la sua inadeguatezza nel risolvere le complesse questioni scientifiche, trova una sua simmetria con il concetto di “trans-scienza”, un termine coniato negli anni settanta e che fa riferimento a “domande che possono essere poste alla scienza, ma alle quali la scienza non può rispondere”, a causa della considerevoli fonti di incertezza e complessità che attengono le questioni di bio-sicurezza. Cioè sono domande che “trascendono” la scienza in quanto epistemicamente legate ai fatti ed espressi in un linguaggio scientifico, ma non risolvibili dalla scienza. Weinberg, in un suo lavoro, cita l’esempio dei rischi per la salute umana associati a bassi dosaggi di radiazioni, che non possono essere valutati a causa dei limiti dell’indagine scientifica diretta utilizzando animali di laboratorio, ma discute anche dei problemi legati alla valutazione dei rischi e benefici delle nuove tecnologie, anticipando di alcuni decenni gli attuali dibattiti su: clonazione, cellule staminali embrionali umane, nanotecnologie e cambiamenti climatici^{48,49}.

All’interno della stessa dell’Agenzia per la protezione ambientale degli Stati Uniti (EPA) negli anni 80’ si ammise che molti dei regolamenti adottati per affrontare i rischi carcinogenici per la salute umana associati alle sostanze chimiche tossiche, rispondono a domande trans-scientifiche, in quanto gli stessi poggiano su fatti ambigui o non perfettamente conosciuti. La soluzione venne individuata nella necessità di avere una maggiore flessibilità, attraverso la contestualizzazione del problema a livello locale e la partecipazione pubblica, in sostanza, il problema a livello locale un nuovo tipo di coinvolgimento che porti a confrontare le conseguenze (*trade-offs*) sociali ed economiche associate a decisioni sensibili di gestione del rischio⁵⁰.

E dunque, in analogia alla SPN, la questione delle trans-scienza si colloca in un terreno comune alla scienza, politica e società, dove le stesse interagiscono e la conoscenza viene co-prodotta nel contesto dell’interazione quotidiana tra scienziati, *policy makers* e il pubblico. Queste considerazioni dimostrano come il processo di ricerca scientifica sia intimamente un processo

sociale e dunque debba superare la sua separazione dalla politica e della società.

Ma è possibile ridurre i confini della tran-scienza, ridurre l'incertezza e la complessità delle questioni di bio-sicurezza? Apparentemente no. Ma in una prospettiva di sviluppo esponenziale delle biotecnologie e dell'informatica, in cui la scienza avanza non seguendo più la legge di Moore⁵¹, la risposta ottimistica viene fornita sia dalle nuove tecnologie digitali e software capaci di processare e analizzare una quantità immensa di dati (terabyte), sia dalla produzione di nuove evidenze scientifiche che riducono il livello di incertezza. Pensiamo alla rivoluzione genomica, con la capacità di sequenziamento totale del DNA (*Whole genome sequencing*), allo sviluppo di *softwares* di bioinformatica che analizzano e stabiliscono relazioni tra enormi quantità di dati nel campo biologico, ai nuovi strumenti informatici di analisi ed apprendimento dei *big data* (*machine learning*)⁵² che hanno rinnovato la tossicologia e il processo di valutazione del rischio. Oggi è sorprendente notare come l'apprendimento automatico dei grandi dati tossicologici consentano da una parte di leggere le relazioni tra le attività associate alla diverse strutture delle sostanze chimiche (*Machine Learning of Toxicological Big Data Enables Read-Across Structure Activity Relationships-RASAR*), dall'altra di superare lo scoglio rappresentato dalla riproducibilità dei test condotti su animali di laboratorio⁵³.

Disinformazione digitale, pseudo-scienza e post-verità

La difficoltà a comprendere la complessità dei contesti da cui emergono i problemi ambientali e di salute umana e la mancanza di interazioni funzionali e dialogo tra scienziati, valutatori del rischio e *policy makers*, hanno contribuito più o meno direttamente a generare il fenomeno della “disinformazione digitale”, caratterizzata da una massiccia e distorta diffusione di informazioni attraverso i *social network* e i media, e a polarizzare e politicizzare il dibattito pubblico sui rischi (es. tweetificazione del rischio)⁵⁴.

La disinformazione digitale, compare nel rapporto del *World Economic Forum* del 2013 ‘*digital wildfire in a hyperconnected world*’ insieme ad altri rischi tecnologici e geopolitici, dal terrorismo agli attacchi informatici⁵⁵. Il fenomeno è presente all'interno del dibattito attuale sui cambiamenti climatici e su temi simili che investono interessi elevati e contribuisce sia alla politicizzazione e abuso del principio di precauzione sia alla emergenza di una ‘pseudo-scienza’⁵⁶ che, in varia misura, riflette valori o anche opinioni politiche e soggettive sacrifica e marginalizza il dubbio e lo scetticismo, caratteristiche intrinseche della scienza⁵⁷. In questo contesto e con la complicità di politici populistici avvezzi a “costruire” false evidenze e a fabbricare le post-verità⁵⁸, i valori culturali vengono spesso “manipolati” per finalità di consenso politico e tendono a prevalere sui fatti, con il risultato dello sviluppo di narrative

pseudo-scientifiche (es. *fake news*) e di una crescente sfiducia sociale attorno alla scienza e alle sue evidenze. In particolare a dominare il dibattito pubblico attuale è il fenomeno delle post verità (*post truth*), che ha dimostrato come, nei casi Brexit e Trump, le decisioni politiche non sono più basate su fatti⁵⁸⁻⁶¹. La scienza viene quindi trascinata nell'arena politica, dove le questioni critiche e legittime (istituzionali, costituzionali e sociali) vengono rappresentate come un confronto tra scienza e anti-scienza. La mancanza di meccanismi efficaci per contrastare la scienza “fuorviante”, ha inoltre fatto emergere forme patologiche definite scienza attivista-politicizzata, scienza spazzatura, scienza *voodoo*⁵⁷.

È interessante citare qui i risultati di uno studio recente sul fenomeno della polarizzazione del dibattito pubblico e dei fattori determinanti. Gli autori attribuiscono un ruolo cruciale alle tecniche di *data science* per mappare lo spazio delle informazioni sui social media e creare un sistema di allerta rapida di potenziali target di disinformazione e dimostrano come modelli simili valgano sia per i dibattiti politici (Brexit, referendum costituzionale italiano) che pubblici (cambiamenti climatici, vaccini). Infatti, per entrambi i dibattiti si osserva l'emergere spontaneo di gruppi di utenti ben segregati attorno alle fonti di notizie e la naturale tendenza degli stessi a concentrarsi su un numero limitato di pagine (esposizione selettiva) creando una struttura di comunità forte e polarizzata⁶². Ciò trova conforto negli algoritmi utilizzati da Facebook che consentono agli utilizzatori di avere ciò che vogliono e alimentano l'illusione che la maggiore parte degli “amici” vogliono la stessa cosa. Un fenomeno inquietante che contribuisce ad aumentare la polarizzazione e a minacciare la democrazia⁶³.

Di fronte dunque ad una “inflazione di fatti” che caratterizza il 21 secolo, con un numero eccessivo di fonti, di metodi, con vari livelli di credibilità, a seconda di chi ha finanziato un determinato studio e di come è stato selezionato il “numero accattivante”⁶⁴, e al fine di contrastare la sfiducia nella scienza, incessantemente amplificata dai social media e dalla genesi delle post-verità, emerge la necessità di affrontare da una parte il problema dell'uso della scienza per la *policy* e dall'altra la comunicazione delle evidenze scientifiche relativa incertezza al pubblico. Per il primo, la sfida consiste nel gestire la complessità del problema (es. cambiamento climatico o impatto delle biotecnologie) ed il pluralismo irriducibile della base della conoscenza che richiede sia una sua esatta definizione sia la scelta del processo scientifico e politico ideali. La complessità è definita come l'esistenza di rappresentazioni non equivalenti dello stesso oggetto di studio. Non equivalenti significa che le diverse rappresentazioni non possono essere ridotte l'una all'altra. E dunque ci si domanda: quali sono i fatti che dovrebbero essere utilizzati per la *policy*? Quali di questi dovrebbero essere esclusi e a quali occorre dare priorità?⁶⁵ Il problema della comunicazione al pubblico, segnala la necessità di una nuova strategia basata su informazioni trasparenti e oneste, compresi l'incertezza scientifica e il rapporto rischio-beneficio. Ma le in-

formazioni quantitative e i numeri sono importanti per gestire e comunicare (fatti scientifici) nell'interfaccia scienza-politica? Considerate la complessità e l'incertezza che caratterizzano i moderni sistemi oggetto di indagine scientifica, potremmo aver bisogno di approcci alternativi non basati sui numeri crudi, ma sulla loro concettualizzazione, quali ad esempio la valutazione multi-criterio sociale, quantificazione dell'incertezza attraverso l'approccio NUSAP⁶⁶, l'uso euristico delle statistiche⁶⁷. L'obiettivo principale è di superare il principio della 'scienza che parla di verità al potere', coerentemente con la proposta epistemica di SPN. Nell'ambito di questo nuovo dialogo tra scienza e policy, la SPN offre delle applicazioni pratiche ideali, che prevedono: la valutazione dell'incertezza (rivisitazione del ruolo della scienza che comunica l'incertezza invece dei fatti); la garanzia della qualità scientifica basata sulla riflessività e responsabilità: un approccio di partecipazione estesa attraverso il coinvolgimento della *Citizen Science* o altre forme simili.

Su questo tema di riesame della comunicazione scientifica, lavorerà un team europeo e interdisciplinare nell'ambito del progetto biennale *Quality and effectiveness in science and technology communication*, finanziato dalla Commissione europea nell'ambito del programma Horizon 2020, *Science with and for Society*.

Valutazione del rischio e sua interazione con la policy e la società: il ruolo dei fatti non scientifici

La complessità, l'incertezza e la non sufficiente conoscenza che caratterizzano i sistemi attuali oggetto di indagine scientifica, pongono una serie di sfide ai valutatori del rischio riguardo alla corretta individuazione e prioritizzazione dei rischi, alle conseguenze degli stessi e alla quantificazione e comunicazione dell'incertezza scientifica delle stime. Con il passaggio dalla scienza deterministica a quella probabilistico-quantitativo, e con la crescente disponibilità di dati e informazioni, gli *output* della valutazione del rischio assumono la forma di curve di distribuzione di probabilità del rischio di eventi sfavorevoli. Questo tipo di informazione impegna i gestori del rischio a considerare un range di possibili opzioni di *policy* o interventi regolatori, e a tenere conto di fattori non squisitamente scientifici, e dunque esterni al processo di valutazione, necessari per ottimizzare la regolamentazione del rischio. È anche vero che la valutazione del rischio di problemi complessi di sicurezza degli alimenti, agricoltura e dell'ambiente e i relativi risultati, in virtù della complessità dei sistemi e dell'intervento di molteplici fattori possono subire l'influenza indebita di posizioni politiche, socio-economiche ed etiche. Se a una prima analisi ciò può sembrare preoccupante per l'integrità e indipendenza del processo scientifico, con una prospettiva più ampia il problema, ci si accorge che non lo è. Difatti, nel dibattito attuale sui modelli alternativi di valutazione del rischio viene segnalata un'esigenza di *policy*, che si esprime attraverso la

considerazione di fattori non scientifici già nella fase iniziale di formulazione dei problemi, prima ancora dell'indagine scientifica, senza però che l'evidenza scientifica e i fatti cedano a pressioni lobbistiche e interessi sostenuti da soggetti fedeli a un certo attivismo radicale (scienza attivista). Con questa narrativa l'obiettivo è di promuovere un clima di riflessione, apertura e impegno, tra scienziati, valutatori del rischio e politici nella consapevolezza che non è più realistico pensare a una rimozione delle influenze dei valori etici e sociali dal processo scientifico, pena il rischio di generare conflitti e sfiducia⁶⁸.

La considerazione di fattori esterni dunque aiuta a formulare in modo corretto il problema (in quanto si acquisiscono informazioni rilevanti e affidabili utili sia per i valutatori del rischio sia per i decisori i quali devono testare il rischio (stimare la sua probabilità e gravità) ma anche valutare i costi e i benefici legati all'accettazione del rischio (decidere se le opportunità prevalgono sui rischi) specie in presenza di un livello elevato di incertezza. Pensiamo al rischio inaccettabile associato all'uso di una particolare coltura OGM. Qui il processo decisionale dovrebbe dipendere anche da una valutazione obiettiva delle implicazioni etiche, sociali e politiche⁶⁹. Questa valutazione del rischio "guidata dalla policy", (*policy-based risk assessment*) si contrappone alla valutazione del rischio "guidata dalla scienza" (*science-based risk assessment*) che, riguardo al problema degli OGM, tende a verificare l'ipotesi nulla di nessuna differenza tra un raccolto OGM e uno non OGM, e inizia in una fase precedente all'indagine scientifica con la definizione di ciò che verrebbe ritenuto come cambiamento inaccettabile (danno) o opportunità (benefici) nel caso in cui una particolare coltura OGM sostituisce un'altra già in uso⁷⁰.

Alcuni autori sostengono che i limiti della attività di valutazione del rischio associati all'impatto dell'ingegneria sulle colture, spesso sono riferibili a un atteggiamento *naif* nell'affrontare l'incertezza scientifica e le complesse dinamiche con il risultato di conclusioni inaffidabili⁷¹. Oppure nei casi in cui i dati scientifici sono incerti o oggetto di controversia e nessuna conclusione viene raggiunta, la mancanza di prove sugli effetti dannosi viene erroneamente interpretato come prova della mancanza di effetti⁷².

Su questo tema, Pielke distingue tra una buona *science-based policy* che vede l'uso della scienza per informare i responsabili politici su una varietà di differenti alternative politiche, e una cattiva che poggia sull'uso di informazioni scientifiche di supporto di una sola alternativa per influenzare il processo decisionale⁷³. Oggi si osserva la tendenza a superare l'uso "semplificato" della scienza per la policy⁷⁴.

Questo nuova *governance* della scienza, prevede che la soluzione alle questioni debba essere ricercata in un coinvolgimento più attivo di chiunque abbia un interesse nel processo di produzione valutazione e uso della conoscenza scientifica e soddisfa l'attuale esigenza di contestualizzare la valutazione del rischio, cioè di considerare diverse epistemologie (ad esempio il riconoscimento e l'accettazione di una pluralità di

percezioni o punti di vista),⁷⁵ di ascoltare posizioni diverse e legittime (normative e scientifiche), di favorire l'integrazione tra diversi rami della scienza (combinando gli sforzi degli scienziati che attualmente lavorano in "silos"), Come precedentemente accennato, l'approccio offerto dalla SPN è funzionale a un rinnovato clima scientifico e normativo, con un focus sulla partecipazione, legittimità, trasparenza e accessibilità⁷⁶. Alla scienza tradizionale, il SPN contrappone «*uno stile di indagine scientifica e pratica che è riflessivo, inclusivo e trasparente nei confronti dell'incertezza scientifica e si muove in una direzione di democratizzazione delle competenze*»⁷⁷. L'attuale cultura digitale sta implementando di fatto il concetto di *extended peer review*, con l'impegno di diversi tipi di conoscenza e il coinvolgimento di una vasta comunità di attori sociali⁷⁸. Senza dubbio il *citizen science*⁷⁹ e il *crowdsourcing* potrebbero contribuire a migliorare la legittimità della base scientifica nel processo di valutazione del rischio e a supporto della gestione del rischio.

La percezione del rischio

Oggi un elemento che condiziona l'accettabilità delle posizioni scientifiche e dei relativi *output* nel contesto sociale, riguarda l'inclusione di fattori non scientifici nel processo di valutazione e gestione del rischio, tra cui la percezione del rischio socialmente dominante e i relativi livelli di preoccupazione, determinati da fattori culturali, accettazione del rischio e sua fattibilità tecnica ed economica⁸⁰. È ampiamente dimostrato come la reazione dei consumatori a un rischio specifico, in particolare in un contesto di incertezza scientifica e di effetti sconosciuti, incontrollabili e catastrofici, è determinata dal contesto sociale, dalle esigenze di sicurezza personale e dal giudizio dei valori (e dall'affidabilità della fonte d'informazione) (rischio socialmente costruito),⁸¹ con il risultato che il rischio non sempre si allinea alle stime tecniche del rischio fornite dagli esperti (rischio tecnocratico). Inoltre, ritenuto che la percezione del rischio non è un fattore cristallizzato, ma al contrario evolve all'interno della società, ai *policy-makers* e agli esperti di comunicazione del rischio viene richiesto sia di progettare strategie di comunicazione del rischio il più possibile legate alla conoscenza del contesto di riferimento, tenuto conto della maturazione della percezione del rischio pubblico, sia di creare canali informativi efficaci che rendono chiari al pubblico lo scopo della valutazione del rischio e le relative incertezze. Questo approccio comunicativo bidirezionale, basato sul dialogo è indispensabile per creare un equilibrio tra la percezione del rischio, stemperandone le forme estreme dovute all'amplificazione sociale o attenuazione, e le evidenze scientifiche e per perfezionare il processo di regolamentazione del rischio. La fiducia viene ritenuto oggi un fattore determinante: elevati livelli di fiducia equivalgono a bassi livelli di rischio pubblico percepito, e il contrario. In sostanza la fiducia può spiegare più della metà di come il pubblico percepirà un determinato rischio⁸².

La divergenza nella interpretazione del rischio

Come già discusso, le questioni che sono solo in parte scientifiche e coinvolgono una serie di scelte soggettive, valori e norme sociali sono soggette a interpretazioni scientifiche divergenti sul rischio. Ma un posto principale nelle odierne controversie ambientali è occupato dalla incertezza scientifica, che è diventato centrale nel dibattito odierno sulla crisi della scienza moderna. L'incertezza scientifica può essere intesa non come una mancanza di comprensione scientifica, bensì come la mancanza di coerenza tra le posizioni scientifiche concorrenti, amplificata dai vari contesti politici, culturali e istituzionali all'interno dei quali opera la scienza⁸³. Qui parliamo di rischi associati alla industrializzazione e alle tecnologie moderne quali il rischio chimico di origine ambientale, le onde elettromagnetiche, le emissioni di gas serra, le biotecnologie (OGM, biologia sintetica)⁸⁴ le nanotecnologie, rischi remoti o rischi caratterizzati da ampio margine di incertezza che possono offrire il fianco a incursioni di politici o scienziati politicizzati le cui posizioni mimetizzate con i panni della scienza, perseguono scopi dettati da una propria agenda^{85,86}. Ma le diverse interpretazioni del rischio, si riflettono anche in alcune delle posizioni adottate all'interno del sistema per la risoluzione delle controversie dell'Organizzazione mondiale del Commercio (WTO) per giustificare le misure sanitarie e fitosanitarie (SSP). Paradigmatico è il contenzioso internazionale tra Stati Uniti (US) e Unione Europea sul rischio per la salute umana associato al consumo di carni trattate con sostanze ormonali (autorizzate in US e vietate in Europa). E singolare è l'interpretazione divergente del concetto di valutazione del rischio data dall'Organo di Appello rispetto a quella fornita dal Panel di esperti istituito dall'Organo di Conciliazione. Il primo ha ritenuto che alcune delle disposizioni stabilite nell'Accordo SPS non richiedono una valutazione del rischio per stabilirne un livello minimo quantificabile, né che escludono a priori dal campo di applicazione, fattori che non sono suscettibili di analisi quantitativa da parte della scienza empirica o dai metodi di laboratorio sperimentali (es. biochimica o farmacologia). Inoltre viene stabilito che "la valutazione del rischio non è solo un rischio rilevabile in un laboratorio scientifico, ma [è] anche un rischio nelle società umane così come realmente esistenti", in altre parole, il potenziale effetto negativo nel mondo reale in cui le persone vivono e muoiono. In sostanza, la formulazione maturata all'interno del suddetto contenzioso è stata interpretata da alcuni studiosi come una possibilità di considerare nell'ambito del processo di valutazione del rischio e conseguente determinazione delle SPS (o adozione di norme più severe rispetto agli standard internazionali) oltre ai dati scientifici anche i fattori non scientifici (ad es. variabili culturali) non assoggettabili ad un'analisi quantitativa^{87,88}. Questa narrativa sebbene riferita a un contenzioso scientifico internazionale (e potremo includere anche la recente divergente posizione scientifica dell'EFSA e del WHO sulla questione pericolosità per la salute umana del glifosato)⁸⁹, ci

spiega come oggi il ruolo della scienza è esposto a influenze che originano dal contesto sociale e al peso e conseguenze per il pubblico legati all'incertezza scientifica. Andy Stirling e Clive Mitchell sulla rivista *Nature* hanno osservato come a volte «la complessità dell'evidenza scientifica, conduce a interpretazioni contrastanti ma egualmente valide». In tali circostanze c'è il rischio che *stakeholders* privilegiati associati a una specifica corrente di pensiero, possano indebitamente influenzare valori e interessi particolari prioritizzati in quella sintesi⁹⁰. In sintonia con i citati ricercatori, Bernhard Url, Direttore esecutivo dell'EFSA (*European Food Safety Authority*), sempre sulla medesima rivista e con riferimento alla diatriba sul glifosato, sostiene che non deve sorprendere che a volte le agenzie arrivino a conclusioni differenti se ciascuna utilizza un *corpus* di evidenze e metodologie diverse⁹¹. In realtà, come fa osservare De Marchi, le due agenzie (WHO ed EFSA) non hanno risposto a un unico quesito, ma a due quesiti diversi, coerentemente con i loro specifici mandati e ciò implica una maggiore riflessione sugli obiettivi per i quali i due studi sono stati condotti⁷. C'è necessità dunque di considerare differenti discipline che generano diverse prospettive. Nel dibattito sui cambiamenti climatici ad esempio, il problema può assumere una diversa connotazione se si analizzano in modo separato i punti di vista ecologico, economico o chimico, con il risultato di avere soluzioni di *policy* basate su interpretazioni scientifiche divergenti, accuse di un uso inappropriato della scienza per la *policy* e ridotta credibilità sui fatti scientifici.

Indubbiamente il problema delle frequenti divergenze di interpretazioni scientifiche da parte di autorevoli organismi scientifici internazionali denota una debolezza dell'attuale sistema di valutazione. Infatti, è evidente come la valutazione delle prove scientifiche sugli effetti sulla salute umana di pericoli microbiologici, chimici o fisici, o meglio la decisione di considerare se un effetto osservato sia di rilevanza biologica (cioè è sfavorevole o al contrario mostra un effetto benefico sulla salute) e dunque possa essere considerato o meno un rischio, a volte potrebbe essere condizionato da *bias* dovuti alla diverse metodologie utilizzate. Il problema dunque deve essere aggredito all'interno della stessa disciplina, attraverso la progettazione di un metodo di valutazione armonizzato delle evidenze biologiche raccolte ed analizzate nelle varie fasi del processo di valutazione dei rischi

A riguardo, in ambito europeo, l'EFSA si è recentemente impegnata, attraverso diverse iniziative in materia di sicurezza alimentare e salute degli animali e delle piante, a garantire la trasparenza e la coerenza dei pareri scientifici, un approccio armonizzato per valutare le incertezze, e un processo decisionale più solido⁹². Similmente una recente proposta di regolamento della Commissione europea affronta in modo specifico l'obiettività, l'indipendenza e la trasparenza degli studi scientifici utilizzati come base per la valutazione del rischio⁹³. Nelle intenzioni c'è anche la possibilità per i cittadini di avere un maggiore accesso alle informazioni inerenti la valutazione del

rischio dei prodotti da utilizzare nella filiera agroalimentare⁹⁴. Altro aspetto che richiede interventi metodologici e normativi riguarda l'incertezza scientifica e la sua comunicazione. Un recente documento pubblicato dall'EFSA fornisce una guida concisa su come identificare le opzioni per le analisi di incertezza appropriate per ciascuna valutazione e come applicarle⁹⁵.

Conclusioni

Nonostante la scienza sia ancora tra le più affidabili delle istituzioni pubbliche, nell'ultimo decennio si è acceso un dibattito tra scienziati, media e pubblico, sulla crisi della sua qualità, credibilità e integrità. Oggi si parla di crisi della scienza moderna, o meglio dell'idea pretenziosa che essa sia l'unica istituzione o autorità epistemica che possa aiutare a comprendere e a rappresentare i fenomeni complessi e incerti che minacciano gli ecosistemi ambientali e la salute umana e ambientale e fornire, secondo un rapporto lineare con le esigenze di *policy*, soluzioni pratiche di supporto agli interventi normativi. Questa posizione privilegiata non è più proponibile, sia a causa dei limiti del riduzionismo scientifico, con la fallace visione tecnocratica del *science speaks truth to power*, sia per la consapevolezza crescente dell'esistenza di limiti sia interni che esterni, già commentati, che riguardano l'integrità, affidabilità e indipendenza del processo scientifico. L'epoca attuale, caratterizzata da un progresso scientifico e sviluppo tecnologico senza precedenti e da emergenze ambientali e sanitarie multi-dimensionali, richiede una rivoluzione metodologica del processo scientifico, una nuova prospettiva multi e interdisciplinare (democratizzazione) allo scopo di ampliare la base di conoscenza, includendovi anche i fatti non scientifici, e di ottimizzare il processo decisionale e dunque la governance della scienza. Queste nuove dinamiche, se da un lato mettono in risalto le differenze nei valori dominanti dei diversi contesti sociali, dall'altro impegnano i *policy-makers* e i gestori del rischio nella ricerca di un equilibrio (o compromesso) tra fatti e valori, funzionale a *output* delle valutazioni del rischio solide, adeguate allo scopo e condivise. Oggi l'interazione tra scienza, politica del rischio e difesa dei consumatori è diventata sempre più complessa in un mondo in cui i valori, la storia e la tradizione tendono ad essere più influenti di fatti (scientifici) nel plasmare l'opinione pubblica. Con questi presupposti, viene proposto un approccio epistemologico definito SPN funzionale alla gestione di complessi scenari decisionali in cui i problemi si collocano nell'interfaccia tra scienza, *policy* e società e prendono la forma di fatti incerti, fatti estesi, valori controversi, interessi elevati e decisioni urgenti. Oggi la SPN viene suggerita in relazione sia alla consulenza scientifica verso le istituzioni governative⁹⁶, sia alla regolamentazione del rischio⁹⁷.

In un mondo in cui la conoscenza è potere, i politici realizzano l'enorme vantaggio che possono ricavare dalla scienza. I politici, sebbene parlino di una politica basata sulla scienza, sono spesso più interessati alla scienza basata sulle politiche e

tendono a misurare la sua utilità non sulla base dell'obiettività e veridicità, ma dal supporto politico fornito⁵⁵. È anche vero, però, che una certa scienza si è prestata a soddisfare i bisogni dei politici laddove gli scienziati hanno permesso ai politici di “dirottare” l'impresa scientifica⁹⁸. Questo meccanismo, più evidente per alcune problematiche come quelle del cambiamento climatico, deve essere superato per ristabilire la verità della scienza, liberarla il più possibile dall'ideologia politica e snellire e perfezionare l'attività di regolamentazione del rischio. Se le future esigenze scientifiche non sono sempre prevedibili e se la società svolge un ruolo chiave nella produzione/accettazione delle prove scientifiche, le istituzioni scientifiche nell'ambito delle strategie future, devono aprire le proprie “torri d'avorio”, democratizzare la conoscenza scientifica e contestualizzare la valutazione del rischio per affrontare le sfide che ci attendono. Esiste un ampio ventaglio di approcci che possono contribuire a ripristinare la credibilità e la fiducia nella scienza in generale, ma tutte devono partire dal contesto sociale di riferimento. Saranno dunque necessarie azioni, metodologie e competenze pertinenti per:

- ripristinare la credibilità e la fiducia nella scienza attraverso nuovi approcci per l'uso delle prove scientifiche specie attraverso l'armonizzazione dei metodi di valutazione e utilizzo delle evidenze biologiche;
- sviluppare un rete di conoscenze e di sistemi come strumento per esplorare l'orizzonte (*horizon scanning*);
- utilizzare le piattaforme di *citizen science* e disegnare nuove funzionalità per convalidare un insieme più ampio di informazioni;
- rinnovare il clima di dialogo democratico tra i gestori del rischio ed i valutatori del rischio, focalizzando le discussioni sui rischi “veri” anziché su quelli spesso polarizzati socialmente e politicizzati;

- comprendere il valore aggiunto della comunità e della collaborazione internazionale per operare il cambiamento scientifico;

- comprendere il contesto sociale e culturale in cui maturano la percezione del rischio e le preoccupazioni irrazionali (spesso al centro di disaccordi sugli standard e che portano a controversie commerciali) per ottimizzare la valutazione del rischio;

- sperimentare da parte dei *policy makers* e autorità sanitarie nuovi regimi negoziali con il pubblico, progettando strategie di partecipazione estesa, di comunicazione del rischio e un'educazione diffusa sull'analisi del rischio (sfruttando anche i social media e lavorando con i media), allo scopo di superare il rapporto squilibrato tra percezione del rischio e scientificità delle prove e generare una maggiore fiducia del pubblico verso gli organismi scientifici e il livello politico decisionale.

In conclusione, affinché la scienza possa contribuire nuovamente al progresso sociale, i politici devono rispettare i limiti della scienza e astenersi dal manipolare l'evidenza scientifica su problemi complessi per evitare le proprie responsabilità. Scienziati e politici devono prendere sul serio le loro responsabilità nei confronti della società e vivere fino in fondo la loro *raison d'être*⁵⁷. Questa prescrizione, con un passaggio importante verso la democratizzazione delle competenze³⁹, sposta la scienza da “*speaking truth to power a working deliberatevely inside the imperfections*” in sintonia con l'ipotesi epistemica della SPN⁹⁹.

Ringraziamenti

Ringrazio vivamente il dott. Vitantonio Perrone e la dott.ssa Maria Rita Siddi del Consiglio Direttivo SIMeVeP per la lettura critica del presente lavoro e per i preziosi suggerimenti.

¹ The Economist. How Science Goes Wrong. 21 October 2013.

² http://www.andreasaltelli.eu/file/repository/SF_EFSAdraft150918.pdf. Science wars in the age of Donald Trump. By Silvio Oscar Funtowicz e Andrea Saltelli: <https://theconversation.com/science-wars-in-the-age-of-donald-trump-67594>.

³ Gramsci A. Quaderni del carcere (1929-1935). Q3. Torino, Giulio Einaudi, 1975; p. 311.

⁴ L'ipotesi riduzionista della scienza normale o tradizionale (metodo scientifico classico), secondo le teorie di Thomas Kuhn, si basa sulla semplificazione di fenomeni complessi (e loro osservazione in laboratorio) e sulla ripetibilità. In sostanza i buoni risultati possono essere garantiti finché i livelli di incertezza sono limitati e gli interessi coinvolti sono bassi.

⁵ Funtowicz, S.O. & Ravetz, J.R. (1990) Uncertainty and Quality in Science for Policy. Kluwer, Dordrecht, p.7-16.

⁶ L'incertezza tecnica affronta la questione “quanti numeri sono affidabili? l'incertezza metodologica è relativa alla scelta della ricerca metodologica o dei metodi: in termini statistici parliamo della significatività e della confidenza; l'incertezza epistemica (dal greco *episteme*: conoscenza) fa riferimento alla domanda “cosa può essere conosciuto di questo fenomeno? Siamo sicuri di ciò che conosciamo? Da Silvio Funtowicz and Roger Strand. Models of Science and Policy.

⁷ Bruna De Marchi e Silvio Funtowicz. Obsolete responses are not adequate to new challenges Some reflections concerning the debate on glyphosate. *Epidmiol Prev* 2018; 42 (2):182-183.

⁸ Funtowicz, S. O., & Strand, R. (2011). Change and commitment: Beyond risk and responsibility. *Journal of Risk Research*, 14(8), 995–1003. Il principio di Popper afferma che una teoria, per essere controllabile, perciò scientifica, deve essere “confutabile”.

⁹ Alcuni autori contestano la narrativa della crisi della scienza legata alla crisi della riproducibilità. Leggi: Is science really facing a reproducibility crisis, and do we need it to? Daniele Fanelli. *Colloquium Opinion*: <http://www.pnas.org/content/pnas/115/11/2628.full.pdf>.

¹⁰ Eva Lovbrand and Gunilla Oberg. Comment on “How science make environmental controversies worse” by Daniel Sarewitz. *Environmental Science and Policy*, 7, 385-403, and when Scientists politicize science making sense of the controversy over the Skeptical environmentalists, by Roger A. Pielke Jr. *Environmental Science and Policy*, 7, 405-417. *Environmental Science & Policy* 8(2005) 195-197.

- ¹¹ Laura Colucci-Gray. Undertaking research at the interface between disciplines: questions of purpose, method, and possibilities. May 2018. Granite: Aberdeen University Postgraduate Interdisciplinary Journal. *Special Issue: Between using and abusing our planet.*
- ¹² <https://sciencetransactions.wordpress.com/2016/12/08/the-travesty-of-post-publication-peer-review/>.
- ¹³ Is peer review ergodic? *Nature Physics*. Editorial. Volume 14, page 633 (2018).
- ¹⁴ John R. Couchman (2013). Peer Review and Reproducibility. Crisis or Time for Course Correction? *Journal of Histochemistry & Cytochemistry* 62(1) 9–10.
- ¹⁵ The Economist. The problem with scientific publishing. And how to fix it. March 30th 2017. By A.B.: <https://www.economist.com/the-economist-explains/2017/03/30/the-problem-with-scientific-publishing>.
- ¹⁶ Begley CG, Ioannidis JP. Reproducibility in science. *Circ Res*. 2015;116(1):116–26.
- ¹⁷ David Randall and Christopher Welsler. The irreproducibility crisis of modern science. Causes, Consequences, and the Road to Reform. April 2018. National Association of Scholars. ISBN: 978-0-9986635-5-5.
- ¹⁸ *Nature Biotechnology* (2012). Further confirmation needed. Editorial, *Nature Biotechnology*, 30:806. <http://validation.scienceexchange.com/#/reproducibility-initiative>.
- ¹⁹ Ioannidis JPA (2005) Why Most Published Research Findings Are False. *PLoS Med* 2(8):696-701: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0020124>.
- ²⁰ Marcus R. Munafò, Brian A. Nosek, Dorothy V. M. Bishop, Katherine S. Button, Christopher D. Chambers, Nathalie Percie du Sert, Uri Simonsohn, Eric-Jan Wagenmakers, Jennifer J. Ware and John P. A. Ioannidis, A manifesto for reproducible science. *Nature Human Behaviour*. Perspective. Published: 10 January 2017 | Volume: 1 | article number: 0021.
- ²¹ William Byers. *The Blind Spot. Science and the Crisis of Uncertainty*. Editions. 2011. Princeton University Press.
- ²² David B. Resnik. Conflicts of Interest in Scientific Research Related to Regulation or Litigation. *J Philos Sci Law*, 2007 April 16; 7: 1.
- ²³ Harvey Marcovitch, Virginia Barbour, Carme Borrell, Felix Bosch, Esteve Fernández, Helen Macdonald, Ana Maruši, Magne Nylenna. Conflict of Interest in Science Communication: More than a Financial Issue. Report from Esteve Foundation. Discussion Group, April 2009. *Croat Med J*. 2010; 51: 7-15.
- ²⁴ Daniele Fanelli. Is science really facing a reproducibility crisis, and do we need it to? Colloquium Opinion. *PNAS*, March 13, 2018, vol. 115, no. 11. <https://doi.org/10.1073/pnas.1708272114>.
- ²⁵ Shanks, D. R., Vadillo, M. A., Riedel, B., Clymo, A., Govind, S., Hickin, N., et al. (2015). Romance, Risk, and Replication: Can Consumer Choices and Risk-Taking Be Primed by Mating Motives? *Journal of Experimental Psychology: General*. Epub ahead of print] 2015.
- ²⁶ *P-hacking*, che è un uso improprio dell'analisi dei dati per trovare pattern nei dati che possono essere presentati come statisticamente significativi quando in realtà non esiste un reale effetto di base.
- ²⁷ Wicherts JM, et al. Degrees of freedom in planning, running, analyzing, and reporting psychological studies: A checklist to avoid p-hacking. *Front Psychol*. 2016;7:12.
- ²⁸ Saltelli, A., & Funtowicz, S. (2014). When all models are wrong: More stringent quality criteria are needed for models used at the science-policy interface. *Issues in Science and Technology*, 79–85
- ²⁹ Stark, Philip B., and Andrea Saltelli. 2018. "Cargo-Cult Statistics and Scientific Crisis." *Significance* 15 (4): 40–43. doi:10.1111/j.1740-9713.2018.01174.x.
- ³⁰ Andrea Saltelli, Silvio Funtowicz. When All models are wrong. *Issues in Science and Technology*. Vole XXX, n. 2 Winter 2014.
- ³¹ Cristobal Young. Model Uncertainty and the Crisis in Science. *Socius: Sociological Research for a Dynamic World*, Volume 4: 1–7. <https://doi.org/10.1177/2378023117737206>.
- ³² Gli esperti ambientali sostengono che la denominazione Olocene che indica la scala temporale terrestre attuale iniziata 11.700 anni fa dopo l'ultima glaciazione è obsoleta e propongono il termine "Antropocene" - da *anthropo*, per "uomo" e *cene*, per "nuovo" - perché le attività umane hanno causato estinzioni di massa di specie vegetali e animali, inquinato gli oceani e alterato l'atmosfera, tra gli altri impatti duraturi. Da: What Is the Anthropocene and Are We in It? Joseph Stromberg. *Smithsonian Magazine*. January 2013. <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/what-is-the-anthropocene-and-are-we-in-it-164801414/>. La data di inizio proposta è la fine del 1965. Leggi anche Chris S.M. Turney et al., Global Peachin Atmospheric Radiocarbon Provides a Potential Definition for the Onset of the Anthropocene Epoch in 1965. In "Scientific Reports", 8, 2018.
- ³³ Brian A. Maurer. 1999. Untangling ecological complexity. The macroscopic perspective.
- ³⁴ Gluckman, p. post-normal science advising in an era of post-normal policy formation. Opening speech to the First Global Conference on Science Advice to Governments. 2014. <http://www.pmcas.org.nz/wp-content/uploads/Sir-Peter-Gluckman-Opening-Address-at-Science-Advice-to-Governments-Conference.pdf>.
- ³⁵ Funtowicz, SO and Ravetz JR (1993). Science for the post-normal age. *Futures* 25(7): 739-755.
- ³⁶ I "fatti estesi" sono riferibili a posizioni provenienti da attori portatori di interessi e conoscenze non assimilabili alla produzione scientifica classica (es. evidenze aneddotiche, conoscenze locali, informazioni confidenziali) e dunque non formulate in termini di prove scientifiche, ma comunque non ritenute inutili o irrilevanti per comprendere le dinamiche complesse in cui entrano in gioco elementi naturali, socio-culturali, economici e tecnologici.
- ³⁷ Andrea Saltelli, Jerome Ravetz and Silvio Funtowicz. Who Will Solve the crisis in science? Da *The Rightful Place of Science: Science on the Verge*. Tempe. Az: Consortium for Science, Policy & Outcome. 2016. Leggi anche Bruna De Marchi e Silvio Funtowicz. Scienza i crisi: viaggio verso il nuovo che ancora non c'è. *The Crisis of Science and Democracy: a voyage to a not emerged destination*. *Epidemiol Prev* 2017; 41 (5-6): 314-315.
- ³⁸ What is "Post-Normal" Science? Written by 'Ticker,' The Belmont Club. Published on August 21, 2013. Principia scientific international: <https://principia-scientific.org/what-is-post-normal-science.html>.
- ³⁹ Chiara Carrozza (2015) Democratizing Expertise and Environmental Governance: Different Approaches to the Politics of Science and their Relevance for Policy Analysis, *Journal of Environmental Policy & Planning*, 17:1, 108-126.
- ⁴⁰ Wachelder, Joseph. 2003. "Democratizing Science: Various Routes and Visions of Dutch Science Shops." *Science, Technology, & Human Values* 28 (2): 244-73. doi:10.1177/0162243902250906.
- ⁴¹ Nicolas König, Tom Børsen, Claus Emmeche. The ethos of post-normal science. *Futures* 91 (2017) 12–24

⁴² Il *crowdsourcing* è un modello operativo, reso possibile grazie a internet che prevede lo sviluppo collettivo di un progetto (in genere su base volontaria, o su invito) da parte di una moltitudine di persone esterne all'ente ideatore (es. istituto scientifico) al fine di sollecitare il loro contributo creativo per risolvere un problema o migliorare una determinata situazione.

⁴³ Il *citizen science* è definito dall'*Oxford English Dictionary* del 2014 come "attività scientifica condotta da membri del pubblico indistinto in collaborazione con scienziati o sotto la direzione di scienziati professionisti e istituzioni scientifiche". Prevede un impegno pubblico generale nelle attività di ricerca scientifica, e dunque i cittadini contribuiscono attivamente alla scienza con il loro sforzo intellettuale, conoscenza o con i loro strumenti e risorse. Vedi anche: European Commission, 2014b. EC's digital science unit, 'Green paper on Citizen Science for Europe: Towards a society of empowered citizens and enhanced research', disponibile online: <https://ec.europa.eu/digital-singlemarket/en/news/green-papercitizen-science-europe-towards-society-empowered-citizens-and-enhanced-research>.

⁴⁴ Post Normal science in practice. Editorial. *Futures* 91 (2017) 1-4.

⁴⁵ Weinberg, Alvin M. "Science and Trans-science." *Minerva* 1972, 10(2), 209-222.

⁴⁶ Weinberg discute degli effetti biologici delle radiazioni di bassa intensità sull'ambiente, in particolare gli effetti genetici sui topi. Esperimenti condotti ad alti livelli di radiazione dimostrano che la dose richiesta per raddoppiare la velocità di mutazione spontanea nei topi è di 30 Rentgen di raggi X. Quindi, se la risposta genetica alla radiazione X è lineare, una dose di 150 millirems aumenterebbe il tasso di mutazione spontanea nei topi del ½ per cento. Questa è una questione importante per i decision makers (la politica) poiché le organizzazioni internazionali che stabiliscono gli standard hanno deciso che una dose annuale di circa 150 millirem (in realtà 170 millirems) in una parte della popolazione scelta è accettabile. Ora, per determinare al 95 per cento del livello di confidenza con un esperimento diretto, se 150 millirems aumentano il tasso di mutazione di ½ per cento, sono necessari 8 miliardi di topi! Naturalmente, questo numero diminuisce a 195 mila se si riduce il livello di confidenza al 60 per cento. Numeri che appaiono improponibili e dunque la domanda non può essere affrontata mediante un'indagine scientifica diretta.

⁴⁷ William D. Ruckelshaus. Risk, Science, and Democracy. *Issues in Science and Technology*. Vol. 1, n. 3 (Spring 1985), pp. 19-38.

⁴⁸ La Legge di Moore descrive una tendenza a lungo termine nel settore dell'hardware che prevede il raddoppio della 'potenza di calcolo' ogni due anni.

⁴⁹ Il sistema EU-ToxRisk è relativo alle nuove strategie di test integrati basati su meccanismi che utilizzano test non animali.

⁵⁰ Luechtfeld T. et al, Machine Learning of Toxicological Big Data Enables Read-Across Structure Activity Relationships (RASAR) Outperforming Animal Test Reproducibility. *Toxicol Sci.* 2018 Sep 1;165(1):198-212.

⁵¹ Jack Bobo, Sweta Chakraborty. Pink Slime, Raw Milk and the Tweetification of Risk. *European Journal of Risk Regulation*, 1/2015.

⁵² Il termine "*wildfire digitale*" è stato coniato per caratterizzare la capacità di contenuti provocatori sui social media di propagarsi rapidamente e causare danni off-line. World Economic Forum, 2013 *Digital Wildfires in a hyperconnected world*. Global Risks Report. World Economic Forum (Feb. 2013), disponibile online: <http://reports.weforum.org/global-risks-2013/risk-case-1/digital-wildfires-in-a-hyperconnected-world>.

⁵³ Tim Dare, University of Auckland. Science and pseudo-science. From 'Logical and Critical Thinking': <https://www.futurelearn.com/courses/logical-and-critical-thinking/0/steps/9164>.

⁵⁴ Lucas Bergkamp. Politics and the Changing Norms of Science: https://judithcurry.com/2016/10/25/politics-and-the-changing-norms-of-science/amp/#_.

⁵⁵ Nel 2016, l'Oxford English Dictionary ha definito "post-verità" la parola dell'anno.

⁵⁶ Flood, A. (2016). Post-truth named word of the year by Oxford Dictionaries. London: The Guardian.

⁵⁷ Jonathan Rose (2017) Brexit, Trump, and Post-Truth Politics, *Public Integrity*, 19:6, 555-558.

⁵⁸ Andrea Saltelli, Silvio Funtowicz. To tackle the post-truth world, science must reform itself. January 27, 2017. The Conversation: <https://theconversation.com/to-tackle-the-post-truth-world-science-must-reform-itself-70455>.

⁵⁹ *Misinformation spreading on Facebook*. Fabiana Zollo and Walter Quattrociocchi. Capitolo del libro *Spreading Dynamics in Social Systems*, Springer NatUre 2018; disponibile online: <https://arxiv.org/abs/1706.09494>; presentazione Conferenza EFSA 2018; https://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/event/180918-conference/presentations/20-2_05_Zollo.pdf.

⁶⁰ Roger McNamee. How to fix social media before its too late. Time. January 2019.

⁶¹ The Age of Post-truth Politics. By William Davies. Op-Ed Contributor. New York Times, Aug 24 2016: <https://www.nytimes.com/2016/08/24/opinion/campaign-stops/the-age-of-post-truth-politics.html>.

⁶² Zora Kovacic. Investigating science for governance through the lenses of complexity. *Futures* 91 (2017) 80-83.

⁶³ NUSAP è un sistema di notazione per la gestione e la comunicazione dell'incertezza nella scienza per la politica, basata su cinque categorie che caratterizzano qualsiasi espressione quantitativa: numerale, unità, spread, valutazione e pedigree. Leggi: Funtowicz, S.O., Ravetz, J.R. *Uncertainty and Quality in Science for Policy*. Book. 1990.

⁶⁴ Zora Kovacic. Conceptualizing Numbers at the Science-Policy Interface. *Science, Technology & Human Values*. March 2018. DOI:10.1177/0162243918770734.

⁶⁵ A Tapestry of Values. An Introduction to Values in Science. Kevin C. Elliott. Published: 09 March 2017. 224 Pages.

⁶⁶ Saltelli, A, Giampietro, M, 2017, "What is wrong with evidence based policy, and how can it be improved?", *Futures*, vol 91, pp. 62-71.

⁶⁷ Raybould A and Macdonald P (2018) Policy-Led Comparative Environmental Risk Assessment of Genetically Modified Crops: Testing for Increased Risk Rather Than Profiling Phenotypes Leads to Predictable and Transparent Decision-Making. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 6:43. doi: 10.3389/fbioe.2018.00043.

⁶⁸ Carlo Modonesi and Fausto Gusmeroli. Evidence-based science or science-based evidence? The GM crops between false myths and ecological systems. *Journal of Biological Sciences*. Vol. 2, 1 (July 2018) ISSN: 2532-5876. DOI: 10.13133/2532-5876_3.13.

⁶⁹ Hansen, SF & Tickner, JA 2013, The precautionary principle and false alarms — lessons learned. in Late lessons from early warnings: science, precaution, innovation. European Environment Agency, Copenhagen, EEA Report, no. 1, vol. 2013, pp. 12.

⁷⁰ Pielke, Roger A. 2004. "When Scientists Politicize Science: Making Sense of Controversy over the Skeptical Environmentalist." *Environmental Science and Policy* 7 (5): 405-17. doi:10.1016/j.envsci.2004.06.004

⁷¹ Pereira, Angela G., and Silvio O. Funtowicz. 2009. *Science for Policy*, edited by Angela G. Pereira and Silvio O. Funtowicz. Oxford, UK: Oxford University Press.

- ⁷² Gilberto C. Gallopin, Silvio Funtowicz, Martin O' Connor, and Jerry Ravetz. Science for the twenty-first century: from social contract to the scientific core. *International Journal of Social Science*, 168: 219-229 (2001).
- ⁷³ Funtowicz, S. (2006). What is knowledge assessment? In Guimarães Pereira, S. Guedes Vaz, & S. Tognetti (Eds.), *Interfaces between science and society*, Sheffield: Greenleaf.
- ⁷⁴ Strand, R. (2017). Post-normal science. In C. L. Spash (Ed.), *Routledge handbook of ecological economics: Nature and society* (pp. 288–298). London: Routledge ISBN-13: 978–1138931510.
- ⁷⁵ Ângela Guimarães Pereira, Andrea Saltelli. Post-normal institutional identities: Quality assurance, reflexivity and ethos of care. *Futures* 91 (2017) 53–61.
- ⁷⁶ McQuillan, D. 2014. “The Countercultural Potential of Citizen Science, *Media and Communication Journal*, 17(6).
- ⁷⁷ Lukasz Gruszczynski. The Role of Science in Risk Regulation under the SPS Agreement. EUI Working Paper LAW No. 2006/03.
- ⁷⁸ Fishoff B, Slovic P, Lichtenstein S, et al. “How safe is safe enough ? A psychometric study of attitudes towards technological risks and benefits. *Policy Sciences* 1978, 9: 127-152. Su questo tema leggi anche: Shrader-Frechette, K.S. (1990). Perceived risks versus actual risks: managing hazards through negotiation. *Risk: Health, Safety & Environment*, Volume 1: Pg.341-363A; Alaszewski. Risk communication: identifying the importance of social context. *Health Risk & Society*. June 2005; 7(2): 101-105; Managing risks to the public: appraisal guidance. HM Treasury. June 2005, and Stephen Breyer, *Breaking the vicious Circle: Toward Effective Risk Regulation*. ISBN 9780674081154. Publication: March 1995.
- ⁷⁹ Michael Siegrist, Heinz Gutscher, Timothy C. Earle. Perception of risk: the influence of general trust, and general confidence. *Journal of Risk Research*. Volume 8, 2005, Issue 2.
- ⁸⁰ Daniel Sarewitz. How science makes environmental controversies worse. *Environmental Science & Policy*. Volume 7, Issue 5, October 2004, Pages 385-403.
- ⁸¹ Es. produzione di proteine senza ricorrere alla lisi delle cellule o sintesi automatizzata di molecole di DNA e loro assemblaggio in geni e genomi microbici.
- ⁸² Weimer Maria. The origins of “risk” as an idea and the future of risk regulation. *European Journal of Risk Regulation*, 8 (2017), pp 10-17.
- ⁸³ Questo tipo di scienza è stata diversamente denominata come: *politicized science, activist science, pseudo-science, junk science, voodoo science* ed altre forme di scienza patologica (Da Lucas Bergkamp. *Politics and the Changing Norms of Science*: https://judithcurry.com/2016/10/25/politics-and-the-changing-norms-of-science/amp/#_).
- ⁸⁴ Chris Downes. *The impact of WTO SPS Law on EU Food Regulation*. Studies in European Economic Law and Regulation 2. Springer. 2014.
- ⁸⁵ WTO, *EC-Measures Concerning Meat and Meat Products (Hormones)*, Report of the Appellate Body (16 January 1998) WT/DS26/AB/R and WT/DS48/AB/R.
- ⁸⁶ Il glifosato è un erbicida ampiamente usato nei prodotti fitosanitari e classificato dalla IARC come probabile cancerogeno per l'uomo. Nel novembre 2015, l'EFSA ha pubblicato le sue conclusioni sulla *peer review* della valutazione del rischio di glifosato e, contestando le prove dello IARC, ha concluso che “è improbabile che il glifosato rappresenti un rischio cancerogeno per l'uomo, e l'evidenza non supporta la classificazione riguardo al suo potenziale cancerogeno». Il dibattito si è intensificato nel 2017, dopo che l'Agenzia europea per le sostanze chimiche (ECHA) ha confermato il parere dell'EFSA. Nel dicembre 2017 la Commissione decide di ri-autorizzare il glifosato per altri cinque anni. La critica principale al lavoro dell'EFSA rivolta da un gruppo di scienziati accademici indipendenti e governativi, evidenziava un peso insufficiente dato agli studi tratti dalla letteratura pubblicata, eccessivo affidamento a quelli svolti dall'industria non pubblicamente disponibili e ad una mancanza di trasparenza e indipendenza degli esperti dell'EFSA e degli Stati membri. Secondo la ONG *Pesticide Action Network*, nonostante le prove evidenti del danno del glifosato, la decisione dell'EFSA di etichettarlo come sicuro “ha stravolto il principio comunitario di precauzione dell'UE” dimostrando il fallimento del sistema di approvazione dei pesticidi dell'UE, ritenuto essere il più sicuro al mondo”. Leggi anche: Helmut Burtcher-Schaden, Peter Clausing and Claire Robinson MPh. *Glyphosate and cancer: Buying science. How industry strategized (and regulators colluded) in an attempt to save the world's most widely used herbicide from a ban*. Global 2000. Disponibile in internet: https://www.global2000.at/sites/global/files/Glyphosate_and_cancer_Buying_science_EN_0.pdf.
- ⁸⁷ Andy Stirling and Clive Mitchell Evaluate power and bias in synthesizing evidence for policy. *Correspondance* 05 September 2018. *Nature* 561, 33 (2018).
- ⁸⁸ Url B. Don't attack science agencies for political gain. *Nature* 2018;553:381. https://www.nature.com/articles/d41586-018-01071-9?utm_source=briefing-dy&utm_medium=email&utm_campaign=20180124.
- ⁸⁹ EFSA Guidance on Uncertainty Analysis in Scientific Assessments. *EFSA Journal* 2018;16(1):5123, available at <<https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2018.5123>>.
- ⁹⁰ La proposta è in risposta all'iniziativa dei cittadini europei “vietare il glifosato e proteggere le persone e l'ambiente dai pesticidi tossici”. Particolarmente rilevante è la cooperazione scientifica dei gestori del rischio degli Stati membri e il loro coinvolgimento nell'EFSA, disponibile all'indirizzo <<http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?qid=1523604766591&uri=COM:2018:179:FIN>>.
- ⁹¹ Barbara Galliani. Science, food and society. *The Journal of the Institute of Food Science & Technology*, available at < <https://fstjournal.org/features/32-4/science-and-society> >.
- ⁹² EFSA. Guidance on Communicating uncertainty in scientific assessment. *EFSA Journal* 2019;17(1):5520.
- ⁹³ Sir Peter Gluckman. The role of evidence and expertise in policy-making: the politics and practice of science advice. *Journal & Proceedings of the Royal Society of New South Wales*, vol. 151, part 1, 2018, pp. 91–101.
- ⁹⁴ Grinnell, F. (2015). Rethink our approach to assessing risk. *Nature*, 522, 257.
- ⁹⁵ Questo nuovo fenomeno della “cattura” della comunità scientifica (compresa l'attività di consulenza politica basata sulla scienza) da parte dei responsabili politici è descritto in: Lucas Bergkamp, *The Paris Agreement on Climate Change: A Risk Regulation Perspective*, *EJRR*, gennaio 2016, pp. 35-41. Cf. G. Stigler, *La teoria del regolamento economico*, *Bell J. Econ. Uomo. Sci.* 1971, 2, pp. 3-21.
- ⁹⁶ *Jeroen P. van der Sluijs*. Uncertainty and Dissent in Climate Risk Assessment: A Post-Normal Perspective. *Nature and Culture* 7(2), Summer 2012: 174–195 © Berghahn Journals doi:10.3167/nc.2012.070204.