Quali politiche per la *One Health*?*

Ranieri Guerra**

Corti supreme e *One Health*. Vent'anni di giurisprudenza

SOMMARIO: 1. *One Health*: un paradigma integrativo per la salute globale. – 1.1. Fondamenti epistemologici ed evoluzione storica. – 1.2. La resistenza antimicrobica: una minaccia emergente per la salute globale. – 1.3. Interferenti endocrini, inquinamento e modulazione epigenetica. – 2. *Planetary Health* e sostenibilità della salute globale. – 2.1. L'impatto pervasivo dell'inquinamento chimico. – 2.2. Alimentazione e salute planetaria. – 3. Epigenetica e salute transgenerazionale; l'eredità ambientale. – 3.1. L'impatto dei fattori ambientali sulla regolazione epigenetica. – 3.2. Dinamiche della trasmissione transgenerazionale. – 4. Determinanti legali e normativi. – 4.1. Il quadro normativo italiano: una lettura evolutiva. – 5. *Governance* multilivello per la *planetary health*. – 6. Disuguaglianze e vulnerabilità nella salute planetaria. – 6.1. Giustizia ambientale. – 6.2. Partecipazione e *capacity building*. – 7. Tecnologia e innovazione nella salute planetaria. – 8. Sfide future e raccomandazioni. – Bibliografia.

1. *One Health*: un paradigma integrativo per la salute globale

Il concetto *One Health* riconosce l'interconnessione tra la salute umana, la salute animale e la salute ambientale, e rappresenta una piattaforma cruciale per affrontare le sfide sanitarie globali. Le esperienze maturate a livello globale e nazionale indicano quanto sia urgente e strategico per i sistemi sanitari e giuridici nazionali adottare politiche integrate e convergenti che tengano conto di queste interrelazioni. Le conclusioni del G7 salute tenutosi ad Ancona (9-11 ottobre 2024) danno grande enfasi alla sistematizzazione del concetto

* Lo scritto costituisce la rielaborazione della relazione tenuta dall'Autore al XXII Convegno nazionale di Diritto sanitario "Corti supreme e One Health. Vent'anni di giurisprudenza" (Alessandria, 21-22 ottobre 2024), organizzato nell'ambito del PRIN "Il diritto costituzionale della salute e dell'organizzazione sanitaria dopo l'emergenza della pandemia" (p.i. prof. Renato Balduzzi).

** Già Direttore vicario dell'Organizzazione mondiale della sanità.

stesso e alla sua incorporazione nelle politiche di sistema in vari punti (8, 9, 56, 57, 58, 59, 77, 78, 83, 85) che riconoscono l'intrinseca interdipendenza tra la salute umana, animale, vegetale ed ecosistemica. Questo framework concettuale e operativo si rivela particolarmente cruciale nell'affrontare la triplice crisi planetaria – cambiamento climatico, perdita di biodiversità e inquinamento – insieme alla crescente minaccia della resistenza antimicrobica e delle malattie zoonotiche. L'implementazione di questo approccio, sostenuta dal lavoro del Quadripartito (FAO, UNEP, OMS, WOA) e dal Piano d'Azione Congiunto *One Health* (2022-2026), richiede un impegno intersettoriale coordinato per ottimizzare gli esiti sanitari in modo sostenibile. La crisi climatica, riconosciuta come urgenza sanitaria, necessita di una risposta internazionale allineata con gli obiettivi dell'Accordo di Parigi, mirando a limitare l'aumento della temperatura globale a 1,5°C per salvaguardare la salute globale e la biodiversità. Particolare attenzione viene posta sulle popolazioni vulnerabili maggiormente colpite da questi impatti, tra cui comunità rurali, minoranze, persone con disabilità, rifugiati, migranti, anziani e popolazioni indigene. L'impegno si estende alla trasformazione dei sistemi sanitari verso modelli climaticamente resilienti, equi e a basse emissioni di carbonio, con l'obiettivo di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Fondamentale risulta anche l'integrazione dell'approccio *One Health* nella formazione dei professionisti sanitari attraverso iniziative come l'Accademia dell'OMS e il Laboratorio della Forza Lavoro per la Sanità Pubblica del G20, promuovendo una comprensione più profonda del nesso tra clima e salute e sviluppando evidenze scientifiche per supportare azioni mitigative efficaci, in linea con l'Accordo Quadro degli Emirati Arabi Uniti per la Resilienza Climatica Globale.

1.1. Fondamenti epistemologici ed evoluzione storica

Il paradigma *One Health* rappresenta una pietra miliare nell'evoluzione del pensiero sanitario contemporaneo, le cui radici concettuali possono essere rintracciate nelle pionistiche osservazioni di Rudolf Virchow nel XIX secolo. Egli fu tra i primi a teorizzare l'interconnessione fondamentale tra la salute umana e quella animale, gettando le basi per una comprensione sistemica delle dinamiche sanitarie. Questa visione precorritrice ha trovato piena attualizzazione nel contesto delle recenti emergenze sanitarie globali, che hanno evidenziato in modo drammatico l'indissolubile legame tra salute umana, animale e integrità degli ecosistemi. Le malattie zoonotiche costituiscono un elemento centrale nella comprensione delle dinamiche sanitarie contemporanee, rappresentando il 60% delle patologie infettive umane note e il 75% delle malattie emergenti. Questa predominanza riflette la complessa interazione tra sistemi biologici e pressioni antropiche.

L'analisi dei fattori che favoriscono l'emergenza delle zoonosi rivela un intreccio di dinamiche ecologiche e socioeconomiche. La deforestazione e la conseguente perdita di habitat naturali alterano gli equilibri ecosistemici, creando nuove interfacce di contatto tra popolazioni umane e reservoir animali. Il commercio illegale di fauna selvatica, oltre a costituire una minaccia per la biodiversità, facilita la diffusione di patogeni attraverso reti commerciali globali. L'intensificazione delle pratiche agricole e l'urbanizzazione non pianificata contribuiscono a creare condizioni favorevoli alla trasmissione di agenti patogeni, mentre i

cambiamenti climatici alterano la distribuzione geografica di vettori e ospiti. Le esperienze epidemiologiche e cliniche legate al COVID-19 hanno fornito un esempio emblematico delle dinamiche di spillover e diffusione globale di un patogeno zoonotico. L'evoluzione dell'influenza aviaria H5N1 continua a rappresentare una fonte di preoccupazione per la salute pubblica globale, mentre il virus Nipah illustra il ruolo cruciale dei chiropteri come reservoir di patogeni emergenti. La febbre della Rift Valley offre un caso studio significativo dell'impatto dei cambiamenti climatici sulla diffusione delle malattie vettoriali.

1.2. La resistenza antimicrobica: una minaccia emergente per la salute globale

La resistenza antimicrobica (AMR), ricompresa nel concetto *One Health*, rappresenta una delle sfide più pressanti per la salute pubblica del XXI secolo. Secondo le più recenti stime dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, 2024), questo fenomeno è responsabile di oltre 1.27 milioni di decessi annui, configurandosi come una vera e propria pandemia silenziosa. La complessità del fenomeno richiede un'analisi multifattoriale che tenga conto delle interconnessioni tra medicina umana, veterinaria e gestione ambientale. L'emergenza dell'AMR si caratterizza per una concatenazione di fattori causali che operano sinergicamente. L'utilizzo inappropriato di antibiotici in medicina umana, spesso caratterizzato da prescrizioni non necessarie o dosaggi inadeguati, costituisce un elemento cruciale. Parallelamente, l'impiego massiccio di antimicrobici nell'allevamento intensivo, finalizzato non solo al trattamento delle patologie ma anche alla promozione della crescita, ha creato reservoir ambientali di resistenza. La scarsa regolamentazione in numerosi paesi, unita a sistemi di sorveglianza inadeguati, ha permesso la proliferazione di pratiche non sostenibili. La gestione impropria dei rifiuti farmaceutici contribuisce ulteriormente alla disseminazione ambientale di residui antibiotici e determinanti di resistenza. Le strategie di contrasto all'AMR richiedono un approccio olistico che integri diverse dimensioni di intervento. La sorveglianza integrata umana-animale-ambientale rappresenta un pilastro fondamentale, permettendo il monitoraggio della diffusione dei determinanti di resistenza attraverso le diverse interfacce ecologiche. I programmi di *stewardship* antimicrobica, implementati sia in ambito umano che veterinario, promuovono un utilizzo più razionale e consapevole degli antibiotici. L'innovazione nella scoperta di nuovi antibiotici, pur rappresentando una sfida significativa, rimane cruciale per contrastare l'emergenza di nuovi meccanismi di resistenza. Parallelamente, lo sviluppo di approcci alternativi, quali la fagoterapia e l'immunoterapia, offre prospettive promettenti per la diversificazione delle strategie terapeutiche, senza dimenticare il fondamentale contributo alla prevenzione e mitigazione del fenomeno che il sistema delle vaccinazioni pediatrica e dell'adulto garantisce.

1.3. Interferenti endocrini, inquinamento e modulazione epigenetica

Gli interferenti endocrini (EDC) rappresentano un esempio paradigmatico dell'interconnessione tra salute ambientale e umana, evidenziando come l'alterazione dei sistemi biologici possa manifestarsi attraverso meccanismi complessi e spesso subdoli. La pervasività degli EDC nell'ambiente contemporaneo riflette la molteplicità delle loro fonti. Le plasti-

che e le microplastiche, ubiquitarie negli ecosistemi moderni, rilasciano composti quali bisfenolo A e ftalati. L'utilizzo intensivo di pesticidi e fertilizzanti in agricoltura introduce nell'ambiente sostanze con potenziale attività endocrina, per non parlare delle recenti e massive contaminazioni da PFAS soprattutto in regione Veneto a fronte di un'inerzia normativa e regolatoria che solo ora viene parzialmente recuperata dal legislatore europeo e nazionale. I prodotti per la cura personale contengono frequentemente parabeni e filtri UV con proprietà di interferenza endocrina. I ritardanti di fiamma, ampiamente utilizzati in prodotti di consumo, costituiscono un'ulteriore fonte di esposizione significativa. L'impatto degli EDC sulla salute si manifesta attraverso un ampio spettro di alterazioni biologiche. I disturbi riproduttivi, inclusi problemi di fertilità e alterazioni dello sviluppo sessuale, rappresentano una delle manifestazioni più documentate. Le alterazioni metaboliche, comprendenti obesità e diabete, evidenziano il ruolo degli EDC nella patogenesi delle malattie croniche non trasmissibili. La neurotossicità sviluppativa e i disturbi neurologici sottolineano la vulnerabilità del sistema nervoso all'interferenza endocrina. L'associazione con neoplasie ormono-dipendenti evidenzia il potenziale cancerogeno di queste sostanze. L'impatto dell'inquinamento ambientale sulla salute umana trova nella modulazione epigenetica un meccanismo fondamentale di azione, con implicazioni che si estendono oltre la generazione esposta. La comprensione dei meccanismi epigenetici ha rivoluzionato la nostra concezione dell'interazione tra ambiente e espressione genica. La metilazione del DNA rappresenta uno dei principali meccanismi attraverso cui gli inquinanti ambientali possono indurre modifiche stabili nell'espressione genica. Questo processo, che comporta l'aggiunta di gruppi metilici a specifiche sequenze regolatorie, può determinare il silenziamento o l'attivazione di geni critici per lo sviluppo e l'omeostasi. Le modifiche istoniche, attraverso processi di acetilazione, metilazione e altre modificazioni post-traduzionali, alterano l'accessibilità della cromatina, modulando conseguentemente l'espressione genica. Gli RNA non codificanti emergono come regolatori chiave della risposta agli stress ambientali, mediando adattamenti rapidi e potenzialmente ereditabili. Le alterazioni della struttura della cromatina, infine, rappresentano un livello superiore di organizzazione che integra i diversi meccanismi epigenetici in una risposta coordinata agli stimoli ambientali.

Le conseguenze delle modifiche epigenetiche indotte dall'inquinamento si manifestano attraverso un ampio spettro di effetti sulla salute, caratterizzati da una significativa dimensione transgenerazionale. L'aumentato rischio di malattie croniche non si limita agli individui direttamente esposti, ma può interessare le generazioni successive attraverso la trasmissione di modifiche epigenetiche nella linea germinale. Le alterazioni dello sviluppo embrionale e fetale, mediate da modifiche epigenetiche precoci, possono condizionare la traiettoria di sviluppo dell'organismo con effetti a lungo termine sulla salute. L'impatto sulla fertilità, documentato in diversi modelli sperimentali e studi epidemiologici, suggerisce potenziali ripercussioni sulla capacità riproduttiva delle popolazioni esposte. La predisposizione a patologie complesse, incluse malattie metaboliche, cardiovascolari e neoplastiche, evidenzia come l'esposizione ambientale possa modellare il rischio di malattia attraverso multiple generazioni.

L'interconnessione tra salute umana, animale e ambientale si manifesta quindi attraverso molteplici meccanismi, dalla trasmissione di patogeni zoonotici all'impatto degli inquinanti ambientali sulla regolazione epigenetica. La resistenza antimicrobica e gli interferenti endocrini rappresentano esempi paradigmatici di come le pressioni antropiche possano generare minacce sanitarie globali che richiedono risposte integrate e multidisciplinari. La dimensione transgenerazionale degli effetti epigenetici sottolinea l'urgenza di adottare approcci preventivi e strategie di gestione ambientale sostenibile. Solo attraverso l'integrazione di conoscenze e competenze diverse, unite a un impegno coordinato a livello internazionale, sarà possibile affrontare efficacemente le minacce emergenti alla salute planetaria.

2. *Planetary Health* e sostenibilità della salute globale

Il concetto di *Planetary Health* rappresenta un'evoluzione significativa del paradigma *One Health*, proponendo una visione ancora più ampia e integrata delle interrelazioni tra salute e sistemi globali. Questo approccio innovativo riconosce l'inscindibile connessione tra il benessere umano e l'integrità dei sistemi terrestri fondamentali. Il *framework* concettuale integra l'analisi dei sistemi climatici globali, evidenziando come le alterazioni climatiche e l'inquinamento di aria, suolo e acqua influenzino direttamente e indirettamente la salute umana. I cicli biogeochimici, fondamentali per il mantenimento degli equilibri ecosistemici, vengono considerati come determinanti cruciali della salute planetaria. La biodiversità, intesa come ricchezza e varietà delle forme di vita, emerge come elemento chiave per la resilienza degli ecosistemi e la salute umana. I sistemi socioeconomici vengono riconosciuti come mediatori fondamentali dell'interazione tra attività umane e sistemi naturali.

Gli impatti diretti del cambiamento climatico sulla salute umana si manifestano attraverso molteplici meccanismi. Le ondate di calore, la cui frequenza e intensità sono in costante aumento, rappresentano una minaccia significativa, particolarmente per le popolazioni vulnerabili e gli abitanti delle aree urbane. Gli eventi meteorologici estremi, caratterizzati da una crescente imprevedibilità e violenza, comportano rischi immediati per la vita e danni alle infrastrutture sanitarie. I fenomeni di siccità e inondazioni alterano profondamente gli ecosistemi e compromettono la sicurezza delle comunità. La qualità dell'aria, influenzata da dinamiche atmosferiche alterate e dall'incremento degli inquinanti, impatta direttamente sulla salute respiratoria e cardiovascolare delle popolazioni. Gli effetti indiretti del cambiamento climatico si propagano attraverso complesse catene causali. La sicurezza alimentare viene minacciata dall'alterazione dei pattern climatici e dal degrado dei suoli agricoli. La disponibilità idrica, compromessa da modifiche nel ciclo idrologico e dalla fusione dei ghiacciai, diventa fonte di crescente preoccupazione. I fenomeni di migrazione forzata, indotti da condizioni ambientali estreme o dal degrado ecosistemico, generano nuove sfide sanitarie e sociali. L'intensificazione dei conflitti per l'accesso alle risorse naturali emerge come conseguenza della scarsità indotta dal clima.

L'erosione della biodiversità rappresenta una minaccia fondamentale per la salute planetaria, compromettendo servizi ecosistemici essenziali. La scoperta di nuovi farmaci,

storicamente dipendente dalla diversità biologica, viene limitata dalla perdita di specie potenzialmente utili. Il controllo naturale dei patogeni, mediato da complesse interazioni ecologiche, si indebolisce con la semplificazione degli ecosistemi. L'impollinazione, processo fondamentale per la sicurezza alimentare globale, viene minacciata dal declino degli impollinatori. La regolazione climatica, dipendente dalla funzionalità degli ecosistemi, si deteriora con la perdita di biodiversità.

2.1. L'impatto pervasivo dell'inquinamento chimico

L'inquinamento chimico rappresenta una delle sfide più complesse per la salute planetaria, caratterizzata dalla presenza ubiquitaria di diverse classi di contaminanti. Il particolato fine (PM2.5) e l'inquinamento atmosferico costituiscono una minaccia prioritaria, penetrando profondamente nel sistema respiratorio e circolatorio. I metalli pesanti, persistenti nell'ambiente e soggetti a bioaccumulo, rappresentano un rischio cronico per gli ecosistemi e la salute umana. Gli inquinanti organici persistenti (POPs) si distinguono per la loro resistenza alla degradazione e la capacità di bio-magnificazione attraverso le catene trofiche. I pesticidi e gli agrochimici, pur svolgendo un ruolo nella produzione alimentare, contribuiscono significativamente alla contaminazione ambientale e all'esposizione umana a sostanze tossiche. L'impatto dell'inquinamento chimico sulla salute si manifesta attraverso un ampio spettro di patologie. Le malattie respiratorie, dall'asma alle patologie polmonari croniche, rappresentano una conseguenza diretta dell'esposizione a inquinanti atmosferici. I disturbi cardiovascolari, inclusi infarto e ictus, mostrano una forte correlazione con l'esposizione a particolato fine e altri contaminanti. La neurotossicità, particolarmente rilevante durante lo sviluppo fetale e l'infanzia, può manifestarsi attraverso disturbi cognitivi e comportamentali. L'incremento dell'incidenza di diverse forme tumorali riflette il potenziale cancerogeno di numerosi inquinanti ambientali.

2.2. Alimentazione e salute planetaria

La riduzione del consumo di proteine animali emerge come strategia fondamentale per mitigare l'impatto ambientale dei sistemi alimentari. L'incremento del consumo di alimenti di origine vegetale contribuisce sia alla salute umana che alla riduzione delle emissioni di gas serra. La diversificazione delle fonti alimentari promuove la resilienza dei sistemi alimentari e la conservazione della biodiversità agricola. La riduzione degli sprechi alimentari rappresenta una priorità per ottimizzare l'utilizzo delle risorse e minimizzare l'impatto ambientale della produzione alimentare. L'adozione di una dieta orientata alla salute planetaria genera benefici sinergici su multiple dimensioni. La riduzione delle emissioni di gas serra attraverso la trasformazione dei sistemi alimentari contribuisce significativamente alla mitigazione del cambiamento climatico. La conservazione della biodiversità viene promossa attraverso pratiche agricole più sostenibili e la diversificazione delle colture. Il miglioramento della salute umana si manifesta attraverso la riduzione del rischio di malattie croniche non trasmissibili. La sostenibilità economica viene favorita dalla riduzione dei costi ambientali e sanitari associati ai sistemi alimentari convenzionali.

3. Epigenetica e salute transgenerazionale: l'eredità ambientale

La regolazione epigenetica attraverso modificazioni chimiche del DNA rappresenta un livello fondamentale di controllo dell'espressione genica. La metilazione del DNA, che comporta l'aggiunta di gruppi metilici alle citosine in contesti CpG, emerge come il meccanismo più ampiamente studiato e caratterizzato. Questo processo dinamico può indurre il silenziamento genico attraverso alterazioni della struttura cromatinica e il reclutamento di complessi repressori. L'idrossimetilazione, identificata più recentemente, svolge un ruolo cruciale nei processi di demetilazione attiva e nella regolazione fine dell'espressione genica durante lo sviluppo e in risposta a stimoli ambientali. Altre modifiche covalenti del DNA, incluse la formilazione e la carbossilazione, stanno emergendo come elementi aggiuntivi del "codice epigenetico", contribuendo alla complessità dei meccanismi regolatori. Le modificazioni post-traduzionali degli istoni costituiscono un sistema intricato di regolazione epigenetica, caratterizzato da molteplici tipologie di modifiche chimiche che influenzano l'accessibilità e l'attività trascrizionale della cromatina. L'acetilazione istonica, mediata da acetiltransferasi (HATs) e deacetilasi (HDACs), modula l'interazione DNA-istone e tipicamente promuove una conformazione cromatinica più accessibile. La metilazione istonica, che può avere effetti sia attivatori che repressivi a seconda del residuo modificato e del grado di metilazione, contribuisce alla complessità del codice epigenetico. La fosforilazione istonica, particolarmente rilevante nella risposta a segnali cellulari e nella regolazione del ciclo cellulare, rappresenta un meccanismo rapido di modulazione cromatinica. L'ubiquitinazione degli istoni, processo reversibile che influenza sia la stabilità proteica che la funzione cromatinica, emerge come regolatore chiave di multipli processi cellulari.

3.1. L'impatto dei fattori ambientali sulla regolazione epigenetica

L'esposizione a inquinanti ambientali induce modificazioni epigenetiche significative che possono persistere attraverso multiple generazioni. I metalli pesanti, oltre ai loro effetti tossici diretti, inducono alterazioni specifiche nei pattern di metilazione del DNA e nelle modificazioni istoniche, influenzando l'espressione di geni critici per lo sviluppo e l'omeostasi. Il particolato atmosferico, particolare quello ultrafine (PM_{2.5}), penetra nei tessuti profondi inducendo modificazioni epigenetiche associate a infiammazione cronica e stress ossidativo. Le alterazioni climatiche emergono come potenti modulatori dell'espressione genica: per esempio l'esposizione a temperature estreme induce modificazioni epigenetiche specifiche che influenzano l'espressione di geni coinvolti nella risposta allo stress termico e nel metabolismo energetico. Questi adattamenti molecolari possono persistere ben oltre il periodo di esposizione, influenzando la *fitness* degli organismi e la loro capacità di risposta a stress futuri. La siccità provoca alterazioni epigenetiche significative nei sistemi di regolazione osmotica e nella risposta ormonale, con potenziali effetti transgenerazionali sulla resistenza allo stress idrico. Le inondazioni, oltre al danno diretto, inducono modificazioni epigenetiche associate alla risposta ipossica e allo stress ossidativo. L'inquinamen-

to atmosferico, intensificato dalle condizioni climatiche estreme, provoca alterazioni epigenetiche sistemiche che influenzano sistemi fisiologici multipli, dalla risposta immunitaria al metabolismo energetico.

3.2. Dinamiche della trasmissione transgenerazionale

La trasmissione transgenerazionale di modificazioni epigenetiche rappresenta un paradigma emergente nella comprensione dell'eredità biologica. L'eredità epigenetica *stricto sensu* implica la trasmissione di marchi epigenetici attraverso la linea germinale, sfidando il dogma della riprogrammazione epigenetica durante la gametogenesi. Gli effetti materni, mediati sia da fattori epigenetici che da componenti citoplasmatiche dell'ovocita, costituiscono un importante meccanismo di trasmissione intergenerazionale. La programmazione fetale, concetto elaborato da David Barker, evidenzia come l'ambiente intrauterino possa influenzare profondamente il fenotipo della prole attraverso modificazioni epigenetiche durature. L'esposizione germinale a fattori ambientali può indurre modificazioni epigenetiche nelle cellule germinali che persistono nella progenie, influenzando il rischio di malattia nelle generazioni successive.

Gli studi sulla carestia olandese del 1944-45 hanno fornito evidenze seminali dell'impatto transgenerazionale dell'esposizione ambientale. I discendenti di madri esposte alla carestia durante la gravidanza mostrano alterazioni metaboliche ed epigenetiche persistenti, inclusi cambiamenti nella metilazione di geni chiave del metabolismo. Gli esperimenti su modelli animali hanno permesso di delineare meccanismi molecolari specifici della trasmissione epigenetica, evidenziando come l'esposizione a tossine ambientali, stress nutrizionale o fattori comportamentali possa influenzare il fenotipo della progenie attraverso multiple generazioni. Le coorti epidemiologiche longitudinali hanno documentato associazioni tra esposizioni ambientali ancestrali e *outcome* di salute nei discendenti, supportando la rilevanza clinica della trasmissione epigenetica. Le analisi molecolari avanzate, incluse le tecnologie di sequenziamento di nuova generazione e le analisi epigenomiche ad alta risoluzione, hanno permesso di identificare specifici loci genomici soggetti a regolazione epigenetica transgenerazionale.

Si può quindi concludere che l'epigenetica transgenerazionale emerge come un campo di studio fondamentale per comprendere l'impatto a lungo termine delle esposizioni ambientali sulla salute umana. La caratterizzazione dei meccanismi molecolari della trasmissione epigenetica apre nuove prospettive per interventi preventivi e terapeutici mirati. La comprensione delle dinamiche transgenerazionali dell'eredità epigenetica evidenzia l'importanza cruciale della protezione ambientale per la salute delle generazioni future e allo stesso tempo apre la discussione su un quadro normativo molto particolare che riguarda la tutela intergenerazionale in maniera chiara e basata su evidenze scientifiche non più ignorabili.

L'analisi della casistica empirica in materia di trasmissione epigenetica¹ evidenzia la necessità di una riflessione giuridica approfondita sulle implicazioni normative del fenomeno.

¹ L'esposizione al dietilstilbestrolo (DES), un estrogeno sintetico prescritto alle donne in gravidanza tra gli anni '40 e '70, ha mostrato effetti non solo sui figli esposti in utero (aumentato rischio di tumori del tratto riproduttivo), ma anche

Il caso paradigmatico del dietilstilbestrolo costituisce un precedente significativo nella giurisprudenza internazionale, avendo determinato l'emersione di problematiche relative alla responsabilità per danni transgenerazionali. La giurisprudenza statunitense, in particolare, ha dovuto affrontare la questione della sussistenza del nesso di causalità in ipotesi di danni manifestatisi nella terza generazione, con rilevanti implicazioni in tema di onere probatorio e prescrizione dell'azione risarcitoria.

Gli studi epidemiologici condotti sulla popolazione di Överkalix hanno ulteriormente contribuito alla comprensione dei meccanismi di trasmissione intergenerazionale, sollevando questioni rilevanti in materia di responsabilità ambientale e sanitaria. La dimensione transgenerazionale del danno epigenetico pone infatti significative problematiche in relazione all'individuazione dei soggetti legittimati all'azione e alla quantificazione del pregiudizio. La comprensione dei meccanismi di trasmissione epigenetica impone una riconsiderazione profonda della responsabilità ambientale in chiave intergenerazionale. L'impatto delle nostre azioni non si limita al presente ma si estende potenzialmente attraverso multiple generazioni, configurando un "debito epigenetico" verso le generazioni future.

La gestione del rischio epigenetico e la tutela della salute transgenerazionale richiedono un quadro normativo innovativo che integri valutazione scientifica e protezione giuridica. L'approccio si basa su protocolli standardizzati di screening epigenetico multilivello per la valutazione preliminare delle sostanze chimiche, supportati da una sorveglianza degli effetti transgenerazionali attraverso studi di coorte longitudinali e biomarcatori validati. L'infrastruttura tecnologica avanzata permette l'integrazione di dati molecolari e fenotipi clinici per identificare *pattern* di trasmissione intergenerazionale, mentre la standardizzazione delle procedure e l'interoperabilità dei sistemi facilitano la creazione di *database* comparabili con limiti normativi basati sui meccanismi di interferenza epigenetica.

Il riconoscimento giuridico dei diritti della prole futura necessita della definizione di parametri oggettivi per l'integrità epigenetica e criteri causali specifici per i danni differiti, supportati da meccanismi di responsabilità che considerano la natura probabilistica degli effetti epigenetici. Questa sfida significativa per il diritto contemporaneo richiede un'evoluzione degli strumenti giuridici tradizionali, con particolare attenzione alla prospettiva intergenerazionale e alla configurazione di strumenti di tutela preventiva. L'implementazione pratica necessita di un approccio multisetoriale che coinvolga giuristi, medici, ricercatori e scienziati sociali nella produzione di supporto tecnico al decisore politico, integrando procedure amministrative, standard tecnici e sistemi di monitoraggio longitudinale. La gestione del nesso causale, la quantificazione dei danni e la configurazione di azioni collettive

sulla terza generazione, con alterazioni dello sviluppo riproduttivo e aumentata incidenza di patologie autoimmuni. Le ricerche condotte sulla popolazione svedese di Överkalix hanno rivelato come le condizioni nutrizionali dei nonni durante la loro fase prepuberale influenzino la longevità e il rischio cardiovascolare dei nipoti, suggerendo una trasmissione epigenetica attraverso la linea germinale maschile. Gli studi sui discendenti dei sopravvissuti all'Olocausto hanno evidenziato alterazioni epigenetiche nei geni coinvolti nella risposta allo stress e nel metabolismo del cortisolo, dimostrando la trasmissione biologica del trauma psicologico.

devono adattarsi alle peculiarità del danno epigenetico, mentre la dimensione preventiva richiede meccanismi inibitori efficaci e una regolazione tecnica supportata da competenze specialistiche per la risoluzione delle controversie.

4. Determinanti legali e normativi

L'evoluzione del diritto alla salute planetaria riflette un profondo ripensamento dei fondamenti teorici del diritto ambientale e sanitario. Il riconoscimento dei diritti della natura, già presente in alcune giurisdizioni come l'Ecuador e la Bolivia, rappresenta una svolta paradigmatica nella concezione del rapporto uomo-ambiente. Tale riconoscimento implica l'attribuzione di una soggettività giuridica autonoma agli ecosistemi, superando l'approccio antropocentrico tradizionale. Il principio di non regressione ambientale, elaborato dalla dottrina e progressivamente recepito dalla giurisprudenza internazionale, costituisce un pilastro fondamentale nella tutela degli standard di protezione ambientale raggiunti. Tale principio, codificando l'irreversibilità delle conquiste normative in materia ambientale, rappresenta una garanzia essenziale per la tutela della salute planetaria.

La responsabilità intergenerazionale emerge come principio cardine del nuovo paradigma giuridico, imponendo una riconsiderazione degli strumenti di tutela in chiave diacronica. Il dovere di tutela degli ecosistemi si configura come obbligo giuridico positivo, superando la tradizionale concezione in termini meramente negativi della protezione ambientale. La proposta di inclusione esplicita della *Planetary Health* nel tessuto costituzionale risponde all'esigenza di fornire un fondamento normativo di rango costituzionale alla tutela integrata della salute umana e degli ecosistemi. L'ampliamento dell'interpretazione dell'art. 32 della Costituzione in chiave ecosistemica rappresenta un'evoluzione necessaria per adeguare il quadro normativo alle sfide contemporanee. La tutela costituzionale della biodiversità, già presente in alcune carte fondamentali, deve essere articolata in modo da garantire la protezione efficace degli equilibri ecosistemici. Il principio di sostenibilità forte, che impone limiti assoluti allo sfruttamento delle risorse naturali, richiede un'elaborazione costituzionale specifica.

4.1. Il quadro normativo italiano: una lettura evolutiva

Il citato art. 32, nel sancire la salute quale diritto fondamentale dell'individuo e interesse della collettività, deve essere interpretato estensivamente alla luce delle acquisizioni scientifiche in materia epigenetica, fornendo la base per una interpretazione evoluta che integri la dimensione ecosistemica della salute. Questa trova ulteriore fondamento nel principio di solidarietà di cui all'art. 2 e nel dovere di protezione dell'ambiente ricavabile dall'art. 9, come novellato dalla riforma costituzionale del 2022. Le modifiche, con l'introduzione esplicita della tutela dell'ambiente, della biodiversità e degli ecosistemi nell'art. 9, hanno fornito un fondamento normativo più solido alla protezione della salute planetaria. La giurisprudenza costituzionale ha progressivamente elaborato un'interpretazione sistemica che collega la tutela ambientale alla protezione della salute, riconoscendo l'inscindibile con-

nessione tra questi beni giuridici. E, tuttavia, la mappatura dei siti di interesse nazionale – SIN – (tralasciando quelli di interesse regionale secondo la nomenclatura vigente) descritta all'indirizzo: https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/siti-contaminati/riferimenti-normativi_sin_giugno_2024.pdf, ci offre un panorama non certo rassicurante di come ad una legislazione di grande rilevanza non corrisponda una progettualità ed una piena implementazione delle prescrizioni. Il risanamento dei soli SIN, ignorato dal PNRR nazionale, potrebbe ammontare a una cifra vicina ai 100 miliardi di euro. Altrettanto costerebbe il risanamento dei SIR. Il risultato sarebbe ovviamente la garanzia del rispetto del diritto alla salute delle popolazioni che risiedono nei luoghi del degrado, oltre al recupero di luoghi spesso di grande pregio.

L'Italia dispone comunque di strumenti giuridici avanzati per la tutela della salute pubblica, come la L 833/1978, che istituisce il Servizio Sanitario Nazionale (SSN), e il D.Lgs 81/2008, che disciplina la sicurezza sul lavoro in ambito sanitario. Tuttavia, nonostante i passi avanti, è necessaria un'evoluzione normativa che includa un'integrazione sistematica del paradigma *One Health*. Il vigente Piano Nazionale della Prevenzione (PNP) 2020-2025 ha integrato alcuni principi *One Health*, ponendo l'accento sulla gestione del rischio zoonotico e sulla prevenzione delle infezioni correlate all'ambiente. L'Italia si è, inoltre, dotata di strumenti innovativi, quali il DL 36/2022 che istituisce il Sistema Nazionale Prevenzione Salute dai rischi ambientali e climatici e il DPCM 29 marzo 2023 che definisce le modalità di interazione del SNPS con il Sistema nazionale protezione ambiente (SNPA, creato con la L 28 giugno 2016, n. 132) e l'istituzione della Cabina di regia (GU Serie Generale n.113 del 16-05-2023) e, infine, il Piano Nazionale per gli investimenti complementari (PNC), DL 6 maggio 2021, n. 59, convertito dalla L 101/2021, che prevede un investimento specifico in 'salute, ambiente, biodiversità e clima' con 5 linee di intervento, affidate all'ISS (miglioramento e adeguamento di strutture e servizi, formazione continua, creazione della piattaforma digitale nazionale) e alla DGPRE del Ministero della salute (programmi pilota in due siti contaminati, ricerca applicata), garantendo una dotazione di 500 M €. Peraltro, anche il DL 7 giugno 2017, n. 73 convertito con modificazioni dalla L. 31 luglio 2017, n. 119 sull'obbligo vaccinale rappresenta una tappa significativa verso la riduzione della prescrizione temeraria di antibiotico e quindi una prevenzione seria dell'AMR. Quando parliamo poi di *Planetary Health*, dobbiamo ricordare che i determinanti legali della salute includono politiche che mitigano gli effetti del cambiamento climatico e dell'inquinamento ambientale. Il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC) è un passo importante, ma richiede una piena integrazione con le politiche sanitarie per garantire che la tutela dell'ambiente sia vista come parte integrante della tutela della salute. Proprio in virtù della potenziale parcellizzazione delle responsabilità e delle azioni, per rafforzare l'approccio *One Health* in Italia, sarebbe fondamentale:

- Rafforzare la *governance* centralizzata: l'istituzione di un'Agenzia Nazionale per la sanità pubblica che comprenda l'approccio *One Health*, simile a *Santé Publique France* o a *Public health England* (ora *UK Health Security Agency*), consentirebbe di centralizzare le competenze in materia di salute pubblica e protezione ambientale. Un tale organismo federerebbe i dipartimenti di prevenzione regionali e locali, lasciando alle

Regioni la gestione dei servizi sanitari clinici e rivolti alla persona, ma centralizzando la sanità pubblica, zoonotica e ambientale. Sarebbe cruciale definire un mandato simile a quanto fatto per AGENAS, riconosciuta come Agenzia per la sanità digitale con DL 27 gennaio 2022, n. 4 e L 28 marzo 2022, n. 25, attribuendolo ad esempio all'Istituto Superiore di Sanità, che possiede già le caratteristiche strutturali necessarie per una sua piena implementazione.

- Aggiornare il quadro normativo: serve una revisione del Testo Unico sulla sicurezza sul lavoro (D.Lgs. 81/2008) per includere specifiche misure di prevenzione e monitoraggio legate alle zoonosi emergenti nei contesti lavorativi agricoli e veterinari.
- Rafforzare due strumenti innovativi di pochissima visibilità pubblica: L n. 160/2019 che introduce il Bilancio verde e la L n. 208/2015 che prescrive il Bilancio di genere, oltre al percorso normativo e operativo determinato con la L 4 agosto 2016, n. 163, le cui realizzazioni sono inserite nel Rapporto annuale BES (benessere equo e sostenibile) dell'ISTAT (<https://www.istat.it/statistiche-per-temi/focus/benessere-e-sostenibilita/la-misurazione-del-benessere-bes/>).
- Integrare la protezione della biodiversità nelle politiche sanitarie: La legge italiana deve prevedere esplicitamente politiche che favoriscano il ripristino degli ecosistemi come strumento di prevenzione sanitaria, riconoscendo il ruolo della biodiversità nella prevenzione delle malattie e provvedendo alla piena implementazione di strumenti come la VIS (Valutazione di Impatto Sanitario) e il Programma dei Mille Giorni nella definizione delle priorità di investimento del Fondo sanitario nazionale.
- Valorizzare le questioni legate ai LEPS e quindi al ruolo dell'amministratore locale delineato dagli interventi normati dal comma 163 della L n. 234/2021, che riguardano il percorso assistenziale integrato da attivare per le persone che presentano bisogni complessi, non autosufficienti o in condizione di grave disabilità.

L'integrazione nei Livelli Essenziali di Assistenza (LEA) di indicatori ecosistemici rappresenterebbe un'innovazione significativa, permettendo di valutare l'efficacia delle politiche sanitarie anche in termini di impatto ambientale. Il sistema di valutazione integrata degli impatti dovrebbe basarsi su metodologie scientificamente validate e prevedere meccanismi di aggiornamento periodico che tengano conto dell'evoluzione delle conoscenze. Particolare attenzione dovrebbe essere dedicata al coordinamento tra autorità sanitarie, sociali e ambientali, sia a livello nazionale che regionale, attraverso la creazione di organismi tecnici congiunti e l'adozione di protocolli operativi condivisi. La formazione del personale e l'aggiornamento delle competenze professionali rappresentano elementi cruciali per l'efficace implementazione del nuovo sistema.

5. Governance multilivello per la *planetary health*

La *governance* della salute planetaria si configura come un sistema complesso che richiede una profonda riconfigurazione dell'architettura istituzionale internazionale, integrando dimensioni istituzionali, sociali e ambientali attraverso le aree fondamentali e interconnesse

dei determinanti legali della salute. L'OMS, in collaborazione con l'OIE e la FAO, ha sviluppato l'approccio *One Health* per affrontare minacce sanitarie globali, come evidenziato durante la pandemia COVID-19 e nel rapporto congiunto del 2021². La proposta di istituire un Consiglio per la Salute Planetaria nelle Nazioni Unite e un Tribunale Internazionale per i Crimini Ambientali rappresenta una risposta strutturale alla necessità di coordinamento interistituzionale. Il sistema si articola attraverso livelli complementari: dal regionale-locale, focalizzato sulla pianificazione territoriale e gestione sanitaria, al nazionale con agenzie come – in Italia – ISPRA e ISS, fino al livello europeo guidato dalla Commissione e dalle sue agenzie specializzate (EEA, ECDC, EFSA, EMA). L'infrastruttura tecnologica integra reti IoT, biomonitoraggio e telerilevamento, supportata da *big data analytics* e AI per sistemi predittivi, mentre le tecnologie quantistiche emergenti offrono nuove possibilità per simulazioni complesse. Il framework si completa con strumenti finanziari innovativi come *Planetary Health Bonds*, meccanismi di *blended finance*, sistemi di *carbon pricing plus* e *pay for success*, insieme a fondi multilaterali e microfinanza verde per progetti locali sostenibili, incorporando meccanismi di rappresentanza delle generazioni future attraverso la giustizia distributiva temporale e l'equità intergenerazionale nelle decisioni di politica globale.

6. Disuguaglianze e vulnerabilità nella salute planetaria

Le disuguaglianze nella salute planetaria sono profondamente radicate nei determinanti sociali, che si manifestano attraverso molteplici dimensioni interconnesse. I fattori economici giocano un ruolo fondamentale: il reddito, l'occupazione e il livello di istruzione determinano significativamente l'esposizione ai rischi ambientali e l'accesso alle risorse protettive. La qualità dell'abitazione, in particolare, rappresenta un indicatore cruciale di vulnerabilità, influenzando direttamente l'esposizione a rischi ambientali e sanitari. I fattori culturali amplificano queste disuguaglianze attraverso meccanismi complessi. Le barriere nell'accesso all'informazione limitano la consapevolezza dei rischi e la capacità di adottare comportamenti protettivi. Le barriere linguistiche ostacolano l'accesso ai servizi e alle risorse informative, mentre pratiche tradizionali e forme di discriminazione possono ulteriormente marginalizzare determinati gruppi.

La vulnerabilità si manifesta con particolare intensità in specifici gruppi demografici. Gli anziani presentano una maggiore suscettibilità agli impatti ambientali e climatici, aggravata da condizioni di isolamento sociale e limitata mobilità. I bambini, con il loro sistema immunitario in sviluppo e la maggiore esposizione pro-kg a contaminanti ambientali, co-

² <https://cdn.who.int/media/docs/default-source/food-safety/onehealth/obblep-annual-report-2021.pdf>.

stituiscono un gruppo ad alto rischio. Le minoranze etniche e i migranti affrontano vulnerabilità multiple, derivanti dall'intersezione tra fattori socioeconomici, barriere culturali e linguistiche, e spesso status legale precario. Questi gruppi necessitano di interventi mirati che includano un accesso facilitato ai servizi sanitari e ambientali, la costruzione e il mantenimento di reti di supporto sociale culturalmente appropriate, programmi di inclusione sociale e culturale, e, soprattutto, un sistema di protezione legale rafforzata.

6.1. Giustizia ambientale

La distribuzione iniqua dei rischi ambientali rappresenta una manifestazione critica delle disuguaglianze strutturali. La localizzazione delle industrie inquinanti, la distribuzione dell'inquinamento atmosferico e l'impatto dei cambiamenti climatici seguono spesso *pattern* di discriminazione socioeconomica e razziale. L'accesso diseguale alle risorse naturali e ai servizi ecosistemici amplifica ulteriormente queste disparità. L'integrazione della giustizia ambientale nella pianificazione territoriale richiede un approccio sistematico che consideri molteplici dimensioni. Le politiche inclusive devono basarsi su sistemi di pianificazione e protezione, determinati da una ricerca delle migliori evidenze scientifiche, anche predittive, utilizzando al meglio le risorse dell'intelligenza artificiale. La gestione dell'equità ambientale richiede un approccio integrato che si articola attraverso molteplici strumenti e metodologie interconnesse: le Valutazioni di Impatto sulla Salute (HIA) fungono da framework metodologico centrale per l'analisi sistematica degli impatti sanitari differenziali, supportate da indicatori di equità distributiva che combinano metriche quantitative di esposizione con variabili socioeconomiche per una comprensione multidimensionale delle disuguaglianze. L'implementazione di sistemi di *early warning*, basati sull'integrazione di dati ambientali, sanitari e socioeconomici, si accompagna a meccanismi di *feedback* strutturati per l'ottimizzazione continua delle politiche, mentre la zonizzazione equitativa e la distribuzione strategica delle infrastrutture verdi rappresentano approcci preventivi fondamentali nella pianificazione territoriale, con particolare attenzione alle aree storicamente svantaggiate. Questo sistema si completa con quadri normativi vincolanti e standard minimi ambientali basati su evidenze scientifiche aggiornate, la cui efficacia è garantita da robusti meccanismi di *enforcement* che integrano competenze specialistiche e protocolli operativi standardizzati per una tutela effettiva delle comunità vulnerabili.

6.2. Partecipazione e *capacity building*

L'*empowerment* delle comunità in materia di giustizia ambientale si articola attraverso un sistema integrato di strumenti e processi partecipativi: i meccanismi di consultazione pubblica e le piattaforme multi-*stakeholder* costituiscono la base istituzionale per un dialogo strutturato e inclusivo, mentre la *citizen science* offre opportunità di monitoraggio partecipativo che coniuga rigore metodologico e accessibilità locale. Questi elementi si avvalgono di programmi formativi mirati che combinano conoscenze teoriche e competenze pratiche, accompagnati da un supporto tecnico continuativo nell'interpretazione dei dati e delle loro implicazioni. Lo sviluppo della leadership comunitaria attraverso programmi strutturati si integra con la creazione di network *community-based* e piattaforme per la

condivisione delle migliori pratiche, mentre i sistemi di mentoring facilitano il trasferimento di conoscenze tra comunità, creando un ecosistema di apprendimento reciproco e *capacity building* che rafforza l'efficacia complessiva delle iniziative di giustizia ambientale. La realizzazione di una transizione ecologica equa richiede un approccio multidimensionale che integra diversi strumenti di intervento e supporto: l'allocazione dei fondi per le bonifiche deve seguire criteri trasparenti di prioritizzazione, accompagnata da programmi di screening sanitario che combinano standardizzazione e personalizzazione, mentre i sistemi di compensazione dei danni e *revenue sharing* garantiscono un'equa distribuzione dei benefici attraverso metodologie validate e strutture di *governance* partecipativa. Le opportunità legate alla *green economy* e allo sviluppo eco-sostenibile devono essere supportate da programmi di *capacity building* e approcci integrati che massimizzano l'impatto locale, mentre la realizzazione di infrastrutture verdi e programmi di efficientamento energetico punta a generare co-benefici ambientali e sociali, con particolare attenzione alla riduzione della povertà energetica e al divario che ne consegue. Questo quadro si completa con interventi di rigenerazione urbana che integrano obiettivi di qualità ambientale, inclusione sociale e sviluppo economico locale, garantendo il coinvolgimento attivo delle comunità in tutte le fasi progettuali per assicurare la sostenibilità degli interventi.

7. Tecnologia e innovazione nella salute planetaria

L'integrazione dell'intelligenza artificiale nel settore sanitario sta trasformando radicalmente l'approccio alla salute pubblica attraverso molteplici dimensioni interconnesse: dalla sorveglianza epidemiologica potenziata da sistemi AI che integrano dati multimodali per l'identificazione precoce di *pattern* emergenti, alla diagnostica avanzata che sfrutta il *deep learning* per migliorare accuratezza e tempestività delle diagnosi, fino alla ricerca farmaceutica accelerata attraverso l'analisi predittiva di interazioni molecolari. La gestione intelligente dei dati sanitari ottimizza l'efficienza operativa del sistema, ma solleva importanti sfide relative alla privacy e alla protezione delle informazioni sensibili, mentre la questione dei *bias* algoritmici e dell'interpretabilità delle decisioni *AI-assisted* richiede un approccio rigoroso per garantire equità e trasparenza nell'applicazione clinica. Questi sviluppi tecnologici devono essere accompagnati da politiche mirate a garantire un'equa distribuzione dei benefici, superando il divario tecnologico per assicurare un accesso universale alle innovazioni in ambito sanitario. In questo senso la generazione, conservazione, integrità e analisi dei Big Data rappresentano le fondamenta per ogni tipo di decisione che sia veramente basato sull'evidenza. L'evoluzione dei sistemi di *data analytics* in ambito sanitario ha creato un ecosistema informativo complesso e interconnesso che integra diverse fonti di dati cruciali per la salute pubblica: le cartelle cliniche elettroniche (EHR) forniscono una base dati longitudinale dettagliata su diagnosi e trattamenti, mentre le reti di sensori ambientali generano flussi continui di dati sulla qualità di aria, acqua e suolo, complementati dall'analisi dei social media per comprendere comportamenti e percezioni della popolazione e dai dispositivi IoT che forniscono dati in tempo reale su parametri vitali e

comportamentali. Questa infrastruttura di dati alimenta sistemi avanzati di predizione dei rischi e *pattern recognition* che identificano correlazioni nascoste tra fattori ambientali e risultati di salute, supportando il monitoraggio in tempo reale e sistemi di supporto decisionale che integrano multiple fonti di evidenze per ottimizzare le decisioni cliniche e di salute pubblica, migliorando complessivamente la qualità e l'efficienza dell'assistenza sanitaria. L'innovazione sostenibile diventa così l'elemento fondativo per la creazione di un percorso di salute planetaria rigenerativa. L'implementazione di pratiche sostenibili nel settore sanitario richiede un approccio integrato che abbraccia diverse dimensioni tecnologiche e operative: dall'adozione di energie rinnovabili e materiali biodegradabili che riducono l'impronta ambientale delle strutture sanitarie, all'integrazione di tecnologie di agricoltura *smart* per una produzione alimentare sostenibile, fino a soluzioni innovative di mobilità verde che ottimizzano l'accesso ai servizi sanitari. La gestione efficiente delle risorse si realizza attraverso sistemi avanzati di riduzione degli sprechi e processi di riuso dei materiali che promuovono la circolarità nella logistica sanitaria, mentre l'implementazione di tecnologie di costruzioni intelligenti e approcci di eco-innovazione nel design di prodotti e servizi sanitari massimizza l'efficienza energetica e la sostenibilità operativa, creando un sistema sanitario che integra armonicamente obiettivi di salute pubblica e tutela ambientale.

8. Sfide future e raccomandazioni

Le sfide contemporanee per la salute globale richiedono un approccio integrato e multidimensionale che affronti simultaneamente diverse minacce interconnesse: dalla preparazione al contrasto alle pandemie, che necessita del potenziamento dei sistemi di sorveglianza globale e delle capacità di risposta rapida, alla crescente emergenza della resistenza antimicrobica, che richiede interventi coordinati attraverso i settori sanitario, veterinario e ambientale. L'impatto dell'inquinamento e del cambiamento climatico sulla salute globale impone strategie immediate di mitigazione e adattamento, con particolare attenzione alla protezione delle popolazioni vulnerabili, mentre la trasformazione dei sistemi sanitari verso modelli sostenibili deve bilanciare innovazione tecnologica, ottimizzazione delle risorse e accessibilità alle cure. Il superamento delle disuguaglianze sanitarie globali si intreccia con la necessità di preservare la resilienza degli ecosistemi attraverso approcci integrati di conservazione e gestione adattiva, mentre la giustizia intergenerazionale emerge come principio guida fondamentale per l'integrazione dell'equità temporale nelle politiche attuali, assicurando che la valutazione degli impatti transgenerazionali informi le decisioni strategiche su investimenti e allocazione delle risorse per la tutela della salute planetaria. È chiaro quindi che l'implementazione di un approccio integrato alla salute planetaria richiede un'articolata strategia multidimensionale che parte dall'armonizzazione delle politiche settoriali attraverso meccanismi di coordinamento efficaci e *framework* valutativi integrati, supportata da una cooperazione internazionale rafforzata basata su strutture di *governance* inclusive e meccanismi equi di condivisione delle risorse. Gli investimenti

strategici in ricerca devono bilanciare eccellenza scientifica e rilevanza sociale, mentre lo sviluppo di competenze interdisciplinari attraverso l'innovazione dei curricula formativi risulta cruciale per preparare una forza lavoro capace di operare secondo l'approccio *One Health*, la cui implementazione richiede strutture organizzative integrate e il superamento delle barriere settoriali. Il monitoraggio integrato, supportato da piattaforme tecnologiche avanzate e metodologie standardizzate, deve alimentare processi decisionali *evidence-based*, mentre il coinvolgimento efficace degli *stakeholder* attraverso meccanismi strutturati di partecipazione garantisce la costruzione di partenariati duraturi basati su trasparenza e responsabilità condivisa. Questo sistema si completa con *framework* valutativi complessi che permettono di misurare gli impatti multidimensionali degli interventi, considerando effetti diretti e indiretti sulla salute planetaria sia nel breve che nel lungo termine.

Bibliografia

- M.L. Rodriguez, *Are Human Biological Differences Based on Inequalities in Wealth a Threat for Planetary Health?*, in A.R. Waller, D.R.J. Macer (a cura di), *Planetary Health and Bioethics*, Christchurch, Eubios Ethics Institute, 2023.
- T.K. Harju, *Towards a socially sustainable society: Preventing intergenerational transmission of violence and malaise through an ecological approach to health and wellness promotion*, Laurea University of Applied Sciences, tesi di laurea magistrale, 2013, (reperibile al seguente link: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/63418/Harju_Tanja.pdf?sequence=1).
- J.T. Ryan, S. Jones, P.A. Hayes, J.M. Craig, *Leadership Evolution for Planetary Health: A Genomics Perspective*, in *Challenges*, 2019, vol. 10, n. 1.
- A. C. Logan, S. L. Prescott, T. Haahtela, D. L. Katz, *The importance of the exposome and allostatic load in the planetary health paradigm*, in *Journal of Physiological Anthropology*, 2018, vol. 4, n. 37.
- O. J. Rando, A. Boškovic, *Transgenerational Epigenetic Inheritance*, in *Annual Review of Genetics*, 2018, vol. 52.
- M. Lønnebotn, N. El-Merhie, J.W. Holloway, W. Horsnell, S. Krauss-Etschmann, F. G. Real, C. Svanes, *Environmental Impact on Health across Generations: Policy Meets Biology. A Review of Animal and Human Models*, in *Challenges*, 2018, vol. 9, n. 42.
- L. Lin, W. Yanyan, I. A. Sharapa, *Environmental Sustainability and Legal Liability of Commercial Entity Property*, in *Matters of Russian and International Law*, 2023, vol. 13, n. 8.
- K. I. Otteburn, K. Raube, A. Marx, *To the Whetstone or the Drawing Board? Access to Remedy for Extraterritorial Business-Related Human Rights Violations*, Katholieke Universiteit Leuven, tesi dottorale, 2024 (reperibile al seguente link: https://kuleuven.limo.libis.be/discovery/fulldisplay?docid=lirias4167093&context=SearchWebhook&vid=32KUL_KUL:Lirias&lang=en&search_scope=lirias_profile&adaptor=SearchWebhook&tab=LIRIAS&query=any,contains,LIRIAS4167093&offset=0).

- R. Falk, A. Lopez-Claros, *Global Governance and International Cooperation: Managing Global Catastrophic Risks in the 21st Century*, Oxon, Routledge, 2024.
- R. Campione, *The Legal–Digital Metamorphosis of the Individual*, in *Philosophies*, 2025, vol. 10, n. 2.
- M. Sadeghi, *The comparative analysis of the role of political ideologies in the conceptual evolution of the principle of legality of crimes and punishments; with reflection on Iranian legal system*, in *Journal of Research and Development in Comparative Law*, 2024.
- M. Audino, *Filling the Ocean Funding Gap: A Study of Blended Finance and the Promise of Blue Bonds for Ocean Conservation*, Duke University, 2024.
- K. Upadhyay, R.D. Tirumala, *Creativity in Sustainable Finance: Growth of Green Instruments*, in *Routledge Companion to Creativity and the Built Environment*, 2024.
- A. S. Campos, *Intergenerational Justice Today*, in *Philosophy Compass*, 2018, vol. 13.
- L.E. Luzzatto, *Intergenerational Challenges and Climate Justice Setting the Scope of Our Obligations*, Oxon, Routledge, 2022.
- M. Petrov, *Evolution of epigenetic age clocks-training approaches and prediction outcome*, Università Jagellonica, 2024.
- Y. Ahn, *Disparities of compound exposure of particulate matter (PM2.5) and heat index using citywide monitoring networks*, in *Sustainable Cities and Society*, 2024.
- J. Slepicka, *Green Criminology and the Spatiotemporal Distribution of Environmental Hazards, 1990-2019: The Effect of Differential Exposure on Rates of Violent and Property Crime Domestically and Intentional Homicide Cross-Nationally*, Penn State University, 2024.
- K. Ledingham, S. Hartley, R. Owen, *Introduction: Setting the Scene: Our Planet in Crisis: Why We Need to Rethink Innovation*, in *Rethinking Innovation: Alternative Approaches for People and Planet*, London, Palgrave Macmillan, 2024.
- A. Saghir, S.L. Priyadharshini, M.S. Hosen, A. Ng, S. Islam, J. A. Manik, *The Impact Of Artificial Intelligence On Business & Social Values: Benefits, Challenges, And Future Directions*, in *Educational Administration: Theory and Practice*, 2024, vol. 30, n. 6.
- E. Ozomadu, B.O. Edeoga, *Education for Sustainability: A Pathway to Global Resilience*, in *Godfrey Okoye University International Journal of Education*, 2024, vol. 3, n. 3.
- S. Tattay, *Whose rights? Which representation?: Conceptual problems concerning the representation of the 'rights' of future generations*, in *Hungarian Journal of Legal Studies*, 2024, vol. 65.
- E. Krajnyák, *The Voice of Future Generations: Institutional Representation, Lessons Learned, and the Way Forward*, in *European Journal of Legal Studies*, 2024, vol. 16, n. 1.
- A. Rotter, E. Grigalionyte-Bembic, P. Grifoni, N. Biancone, *Empowering women and mainstreaming gender equality in the blue economy*, 2024 (report reperibile al seguente link: <https://dirros.openscience.si/IzpisGradiva.php?id=21083&lang=eng>).
- D. Zhang, W. Zhang, H. Liu, S. Huang, W. Huang, Y. Zhu, X. Ma, Y. Xia, J. Zhang, W. Lu, D. Shao, D. Weng, *Intergenerational metabolism-disrupting effects of maternal exposure to plasticizer acetyl tributyl citrate (ATBC)*, in *Environment International*, 2024, Vol. 191.
- K. Nonogaki, *Editorial: Insights in obesity: 2023*, in *Frontiers in Endocrinology*, 2024, vol. 15.

M. Sharma, S. Gupta, T.M. Kumar, *Green Infrastructure*, in A.G. Radwan, S.K. Abd-El-Hafiz, I.T.A. Halim (a cura di), *Advanced Research Trends in Sustainable Solutions, Data Analytics, and Security*, Hershey, Igi global, 2025.

A. Biggeri, *Risk appraisal of dietary intake of per- and polyfluoroalkyl substances by the Veneto population living in the area with water contamination. Update based on EFSA 2020 limits. Food surveillance campaign 2016-2017*, in *Epidemiologia e Prevenzione*, 2024, n. 3.

I. Battisti, *Sostanze perfluorurate (PFAS) nell'ambiente agrario: assorbimento, bioaccumulo, effetti fisiologici nelle piante, e nuovi approcci analitici*, Università di Padova, tesi di dottorato, 2024.

A.M. Ingelido, A. Abballe, S. Gemma, E. Dellatte, N. Iacovella, G. De Angelis, V. Marra, F. Russo, M. Vazzoler, E. Testai, E. De Felip, *Serum concentrations of perfluorinated alkyl substances in farmers living in areas affected by water contamination in the Veneto Region (Northern Italy)*, in *Environment International*, 2020, vol. 136.

A. Biggeri, G. Stoppa, L. Facciolo, G. Fin, S. Mancini, V. Manno, G. Minelli, F. Zamagni, M. Zamboni, D. Catelan, L. Bucchi, *All-cause, cardiovascular disease and cancer mortality in the population of a large Italian area contaminated by perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (1980-2018)*, in *Environ Health*, 2024, vol. 23, n. 42.

B. Rogina, C. Franceschi, H.A. Tissenbaum, *Year in review: discussions in genetics of aging*, in *Frontiers in Genetics*, 2024.

M. Sobol, *Friends in Law Places - The Role for Medical-Legal Partnerships in Reshaping the Rural Bar and Bedside*, in *South Dakota Law Review*, 2024, vol. 69, n. 3.