



DARIA LUISA PETRUCCI*

LA TUTELA DEL DIRITTO DELL'INDIVIDUO A UN AMBIENTE SALUBRE NELL'ERA DELL'IA: SFIDE E PROSPETTIVE

SOMMARIO: 1. Introduzione: l'avvento dell'IA nell'attuale contesto di crisi climatica. – 2. Dall'interesse collettivo al diritto soggettivo: il diritto umano a un ambiente salubre e le sue implicazioni giuridiche. – 3. Le Potenzialità dell'IA nella lotta al cambiamento climatico: la *Twin Transition*. – 4. I rischi ambientali legati allo sviluppo dell'IA. – 5. La tutela ambientale e lo sviluppo sostenibile nei nuovi strumenti di regolazione dell'intelligenza artificiale. – 6. L'IA nella transizione verso l'economia circolare. – 7. Conclusioni: verso un equilibrio sostenibile.

1. *Introduzione: l'avvento dell'IA nell'attuale contesto di crisi climatica*

L'intelligenza artificiale sta rivoluzionando il modo in cui l'umanità si approccia alla realtà, incidendo non solo nel campo dell'innovazione e della ricerca, ma anche su numerosi aspetti della vita quotidiana quali la *privacy*, il lavoro, la salute.

Le nuove tecnologie che impiegano sistemi di intelligenza artificiale (d'ora in poi "IA") consentono di elaborare enormi quantità di dati e di svolgere operazioni infinitamente complesse con un elevatissimo grado di accuratezza e in tempi *record*. Per questo motivo, vengono impiegate in un numero sempre crescente di settori, tra i quali figura quello ecologico.

Nel contesto delle sfide contemporanee, quella ambientale è la più imminente: elaborare strategie effettive e a lungo termine per contrastare il cambiamento climatico e assicurare la conservazione delle risorse e della biodiversità è una necessità alla quale si deve provvedere quanto prima. In termini di tutela ambientale e di sostenibilità molto si discute dell'impiego dell'IA in ambito ecologico e delle potenzialità di questa nuova tecnologia nella lotta al cambiamento climatico e al depauperamento delle risorse. Si parla, in proposito, di *twin transition*¹, espressione con la quale si fa riferimento alla possibilità che l'IA si faccia carico delle problematiche ambientali, indirizzando in modo sostenibile la rivoluzione tecnologica e digitale. Alcune caratteristiche proprie di questi sistemi, quali l'apprendimento,

* Dottoranda in Diritto dell'Unione europea presso l'Università degli Studi di Napoli "Parthenope".

¹ Nel 2020-2021 la Presidente della Commissione europea Ursula von de Leyen ha individuato nelle "transizioni gemelle" il futuro dell'Unione europea.

l'automazione e le straordinarie capacità computazionali, alimentano attualmente il dibattito sulla possibilità che queste nuove tecnologie *smart* possano diventare utili strumenti per la protezione dell'ambiente e la conservazione delle risorse naturali². In quest'ottica, i possibili punti di integrazione tra la rivoluzione digitale dell'IA e la necessità, sempre più impellente, di elaborare nuove strategie di sostenibilità ambientale a lungo termine, rappresentano il fulcro della ricerca scientifica dei prossimi decenni.

Tuttavia, non mancano preoccupazioni circa i potenziali rischi che lo sviluppo delle tecnologie che impiegano sistemi di IA potrebbe comportare per l'ambiente e, di conseguenza, per il diritto del singolo individuo a vivere in un ambiente salubre. Si parla, in proposito, di *hidden ecological cost*, cioè del costo ecologico associato alla nuova rivoluzione digitale, che rimane in gran parte inosservato e non contabilizzato³. Data la straordinaria portata dell'IA, l'analisi del suo impatto ecologico a lungo termine rischia di passare in second'ordine. È invece fondamentale, nell'attuale contesto globale, riconoscere e approfondire il “prezzo” di queste tecnologie in termini ambientali, proprio al fine di assicurarne il miglior impiego possibile e far sì che non si ripeta quanto già accaduto con la rivoluzione industriale, quando lo sviluppo umano in un settore, per l'appunto quello dell'industria, comportò una perdita netta di benessere per la collettività nel settore ambientale.

Il presente contributo, dunque, si propone di analizzare le intersezioni tra l'IA e la tutela ambientale, al fine di indagare se questa possa effettivamente rappresentare un'opportunità per affrontare le minacce poste dalla crisi climatica o se, al contrario, rappresenti un rischio eccessivo per la tutela degli ecosistemi e per il diritto individuale a un ambiente salubre (par. 2). A partire dalle applicazioni pratiche dell'IA (par. 3 e par. 4), si condurrà un'analisi comparativa degli strumenti giuridici e normativi in materia (par. 5), esplorando i limiti e le potenzialità degli stessi (par. 6) e evidenziando possibili sinergie tra i quadri regolatori europei ed internazionali (par. 7).

2. *Dall'interesse collettivo al diritto soggettivo: il diritto umano a un ambiente salubre e le sue implicazioni giuridiche*

Da quando l'Assemblea Generale delle Nazioni Unite, con la risoluzione n. 76/300 del 28 luglio 2022⁴, ha affermato l'esistenza di un vero e proprio diritto a un ambiente salubre, la prospettiva giuridica della tutela ambientale ha mutato forma. Dopo oltre quarant'anni di evoluzione normativa e giurisprudenziale, che hanno progressivamente delineato la correlazione tra diritti umani e ambiente, la risoluzione ha rappresentato un passaggio simbolico e politico importante nell'affermazione dell'esistenza di un diritto soggettivo a un

² W. D'AVANZO, *Le applicazioni dell'intelligenza artificiale a tutela dell'ambiente*, in *Diritto e giurisprudenza agraria, alimentare e dell'ambiente - DGA* (on-line), n. 2, 2019, p. 1 ss.; F. CAMISA, *Ambiente e tecnologia: l'intervonnesseone tra le 'transizioni gemelle'*, in *Federalismi.it*, 2024, p. 57; M. OROFINO, *Le due transizioni, digitale e verde, nel cd. pacchetto digitale europeo*, in *Astrid Rassegna*, n. 10, 2023, pp. 1-11.

³ A. ZHUK, *Artificial Intelligence Impact on the Environment: Hidden Ecological Costs and Ethical-Legal Issues*, in *Journal of Digital Technologies and Law*, 2023, p. 932.

⁴ GENERAL ASSEMBLY, *Resolution 76/300, The human rights to a clean, healthy and sustainable environment*, UN Doc. A/RES/76/300, 1 August 2022.

ambiente salubre⁵. L'ambiente, per molto tempo riconosciuto e tutelato come bene pubblico collettivo, diviene l'oggetto di un diritto soggettivo dell'individuo.

Il diritto a un ambiente sano, non espressamente previsto tra quelli tutelati dai maggiori strumenti di protezione dei diritti umani, come la Dichiarazione universale dei diritti dell'uomo o le grandi convenzioni internazionali come la CEDU e la Carta di Nizza, ha avuto per lungo tempo la dignità di principio generale e ha faticato a imporsi come posizione giuridica soggettiva.

Nell'attuale contesto di crisi ecologica, però, è intervenuta la risoluzione dell'Assemblea Generale che, seppur non vincolante, ha segnato un cambiamento di traiettoria nel modo in cui ci si relaziona alla tematica ambientale: le attività altamente inquinanti violano non più "solo" interessi collettivi ambientali, ma anche diritti umani individuali.

Sebbene non esista ancora una fonte universale vincolante che codifichi il diritto a un ambiente sano come diritto umano soggettivo, la risoluzione n. 76/300 è espressione di un convincimento generale degli Stati che si sta progressivamente consolidando, essendo stata sostenuta da 161 Stati dell'ONU. La prassi internazionale passa per la giurisprudenza delle grandi corti regionali, come la Corte Interamericana dei Diritti Umani, che ha riconosciuto espressamente il diritto a un ambiente sano come diritto umano autonomo, valido anche *erga omnes*, con l'opinione consultiva OC-23/17 del 2017⁶. Un ruolo cruciale in questo progressivo percorso di definizione di un diritto umano soggettivo, distinto dalla generica tutela dell'ambiente, è stato svolto dalla giurisprudenza della Corte europea dei diritti dell'uomo, nonostante la CEDU non preveda espressamente tale diritto. A ben vedere, nella Convenzione europea dei diritti dell'uomo, come è logico, non vi è alcun riferimento all'ambiente in generale⁷. Tuttavia, la Corte EDU, a partire dai casi *López Ostra v. Spagna* e *Tatar v. Romania* relativi all'inquinamento e alla protezione ambientale, ha tentato di ovviare a questo *vulnus* normativo interpretando l'art. 8 CEDU (diritto alla vita privata e familiare) in modo da includervi la protezione contro gravi danni ambientali (inquinamento, rumore, rifiuti tossici)⁸.

Inoltre, il diritto umano a un ambiente pulito, sano e sostenibile, è stato incorporato in vari accordi regionali sui diritti umani, tra cui la Carta africana dei diritti dell'uomo e dei popoli, il Protocollo addizionale alla Convenzione americana dei diritti umani nel campo dei diritti economici, sociali e culturali, la Carta araba dei diritti dell'uomo e la Dichiarazione dei

⁵ A livello sovranazionale si è molto discusso dell'esistenza di un diritto soggettivo a un ambiente salubre. Sulla scia della risoluzione n. 48/13 del Consiglio per i Diritti Umani dell'ONU del 2021 (UN Doc. A/HRC/RES/48/13) con la quale è stata riconosciuta formalmente l'esistenza di un diritto umano a un ambiente pulito, sano e sostenibile, la risoluzione n. 76/300 ha rappresentato un punto di svolta nel procedimento di affermazione del diritto stesso, rilevando che «the right to a clean, healthy and sustainable environment is related to other rights and existing international law».

⁶ Corte Interamericana dei Diritti Umani, Opinione Consultiva OC-23/17, 15 novembre 2017.

⁷ Al momento dell'approvazione della Convenzione, nel 1948, non si era ancora sviluppata una coscienza collettiva rispetto al problema ambientale.

⁸ P. MASCARO, *Il diritto a un ambiente salubre nella giurisprudenza della Corte europea dei diritti dell'uomo*, in *Diritto e giurisprudenza agraria, alimentare e dell'ambiente - DGA* (on-line), n. 4, 2023, p.1. Per la giurisprudenza della Corte EDU si v. Corte EDU, sent. 9 dicembre 1994, ric. n. 16798/90, *López Ostra c. Spagna*, § 51; Corte EDU, sent. 19 febbraio 1998, ric. n. 14967/89, *Guerra e altri c. Italia*, §§ 58-60; Corte EDU (GC), sent. 30 novembre 2004, ric. n. 48939/99, *Öneryildiz c. Turchia*, § 87; Corte EDU, sent. 27 gennaio 2009, ric. n. 67021/01, *Tatar c. Romania*, § 107; Corte EDU, sent. 24 gennaio 2019, ricc. nn. 54414/13 e 54264/15, *Cordella e altri c. Italia*, § 51.

diritti umani adottata dall'ASEAN⁹. Sul piano domestico, è oggi riconosciuto dalle costituzioni di numerosi Stati¹⁰.

Questo mutamento di paradigma da interesse collettivo a diritto umano soggettivo apre la strada a importanti riflessioni sulla giustizia ambientale, sulla responsabilità delle imprese e sull'effettività delle tutele nell'era della crisi ecologica globale. Nella risoluzione n. 76/300, infatti, l'AG non solo riafferma l'obbligo degli Stati di proteggere e realizzare i diritti umani, riprendendo i Principi quadro sui diritti umani e l'ambiente del 2018¹¹, ma ribadisce anche la responsabilità di tutte le imprese di rispettarli¹², richiamando quanto sancito dai Principi Guida dell'ONU su imprese e diritti umani del 2011¹³ nonché dal rapporto *Mapping* del 2013¹⁴.

Sugli Stati, dunque, grava non solo il dovere di legiferare per stabilire, attuare e mantenere quadri normativi e istituzionali che consentano ai singoli il pieno godimento di un ambiente sano (Principio 11 - Principi quadro del 2018)¹⁵, ma anche l'obbligo di garantire l'effettiva attuazione degli *standard* ambientali nei confronti di attori pubblici e privati (Principio 12 - Principi quadro del 2018), il cd. obbligo di protezione¹⁶. A quanto si deduce dal commentario di quest'ultimo principio, gli Stati devono monitorare e far rispettare efficacemente gli *standard* ambientali adottati prevenendo, investigando, punendo e rimediando alle violazioni dei medesimi compiute dagli attori privati e dalle autorità governative. In particolare, gli Stati devono regolamentare le attività delle imprese per proteggere gli individui dalle violazioni dei diritti umani derivanti da danni ambientali e fornire l'accesso ai rimedi giurisdizionali¹⁷.

Le imprese, a loro volta, sono tenute da una parte a rispettare tutte le normative in vigore in materia ambientale e ad attuare processi di *due diligence* volti a prevenire o a mitigare l'impatto ecologico delle proprie attività, dall'altra sono chiamate ad assumere chiari impegni

⁹ Si v. art. 24 della Carta africana dei diritti dell'uomo e dei popoli; art. 11 Protocollo addizionale alla Convenzione americana dei diritti umani nel campo dei diritti economici, sociali e culturali; art. 38 Carta araba dei diritti dell'uomo; art. 28.f. Dichiarazione dei diritti umani dell'ASEAN.

¹⁰ Stando a quanto riportato dal sito *web* dell'UNEP, oltre un centinaio di Stati hanno incorporato il diritto a un ambiente sano nei propri testi costituzionali.

¹¹ SPECIAL RAPPORTEUR ON THE ISSUE OF HUMAN RIGHTS OBLIGATIONS RELATING TO THE ENJOYMENT OF A SAFE, CLEAN, HEALTHY AND SUSTAINABLE ENVIRONMENT, *Report of Special Rapporteur on the issue of human rights obligations relating to the enjoyment of a safe, clean, healthy and sustainable environment*, UN Doc. A/HRC/40/55, 24, January 2018. I Principi, elaborati nel 2018 dal Relatore Speciale John Knox sistematizzano gli obblighi degli Stati in materia di diritti umani e ambiente.

¹² GENERAL ASSEMBLY, *Resolution 76/300*, cit., considerando 16.

¹³ SPECIAL REPRESENTATIVE OF THE SECRETARY GENERAL ON THE ISSUE OF HUMAN RIGHTS AND TRANSNATIONAL CORPORATIONS AND OTHER BUSINESS ENTERPRISES, *Guiding Principles on Business and Human Rights: Implementing the United Nations "Protect, Respect and Remedy" Framework*, o UNGPs, UN Doc. A/HRC/17/31, 21 March 2011. Gli UNGPs sanciscono l'obbligo degli Stati di proteggere gli individui dalle violazioni dei diritti umani poste in essere da terzi, incluse le imprese.

¹⁴ INDEPENDENT EXPERT ON THE ISSUE OF HUMAN RIGHTS OBLIGATIONS RELATING TO THE ENJOYMENT OF A SAFE, CLEAN, HEALTHY AND SUSTAINABLE ENVIRONMENT, JONH H. KNOX, *Mapping Report*, UN Doc. A/HRC/RES/25/53, 30 December 2013, d'ora in poi rapporto *Mapping* del 2013. Nella sezione dedicata agli obblighi sostanziali in materia di diritti umani e ambiente, il rapporto analizza anche gli obblighi degli Stati volti a regolamentare le attività del settore privato al fine di proteggere gli individui dai danni ambientali associati a tali attività.

¹⁵ V. Principi quadro del 2018, cit. *supra*, nota 11.

¹⁶ *Ibidem*.

¹⁷ Per un approfondimento sul punto v. V. GRADO, *Il diritto umano universale a un ambiente sano: recenti (e futuri) sviluppi*, in *Ordine internazionale e diritti umani*, 2023, p. 229 ss.

di *policy* anche prescindendo dalle normative nazionali di settore¹⁸. Infatti, la responsabilità delle imprese per violazioni dei diritti umani derivanti da danni ecologici esiste “indipendentemente” dalla capacità e/o volontà degli Stati di adempiere ai propri obblighi in materia di ambiente, come precisato dal commentario del Principio 11 degli *UNGPs* del 2011¹⁹.

Un ulteriore sviluppo significativo è rappresentato dal recente Parere consultivo della Corte internazionale di giustizia del 23 luglio 2025²⁰, emesso nell’ambito della richiesta sul contenuto e sulla portata degli obblighi degli Stati in relazione al cambiamento climatico.

La Corte ha affermato in modo esplicito che «*the human right to a clean, healthy and sustainable environment is essential for the enjoyment of other human rights*», chiarendo così, a livello universale, che un ambiente pulito, sano e sostenibile costituisce una precondizione necessaria per l’effettivo godimento di altri diritti umani fondamentali, tra cui il diritto alla vita e alla salute.

Il parere completa la traiettoria evolutiva già tracciata dalla Risoluzione dell’Assemblea Generale ONU 76/300 del 28 luglio 2022: mentre quest’ultima ha natura politica e riconosce l’ambiente sano come diritto umano in termini di indirizzo, la Corte internazionale di giustizia ne conferma la rilevanza giuridica, riconoscendo che l’obbligo degli Stati di prevenire danni ambientali significativi discende non solo dagli accordi internazionali, ma anche dal diritto internazionale consuetudinario e dal nucleo essenziale dei diritti umani.

La Corte precisa, inoltre, che la responsabilità internazionale è conseguenza non solo della violazione degli obblighi climatici, ma anche della mera inazione: la mancata adozione di misure dovute, quando sussista un obbligo di prevenzione, può infatti integrare un illecito internazionale. Tali affermazioni rafforzano la qualificazione dell’ambiente salubre come diritto fondamentale dotato di un contenuto autonomo ed effettivo, la cui protezione richiede comportamenti positivi da parte degli Stati.

3. Le Potenzialità dell’IA nella lotta al cambiamento climatico: la *Twin Transition*

Secondo alcuni esperti di transizione ecologica²¹, attraverso la riduzione degli sprechi, l’ottimizzazione delle risorse e il monitoraggio ambientale, l’IA potrebbe disegnare una nuova traiettoria verso la sostenibilità, implementando al tempo stesso due transizioni: quella tecnologica e quella ambientale. Sono infatti molteplici le potenzialità di questa tecnologia in ambito ecologico²².

¹⁸ Tra i documenti già citati, fanno specifico riferimento alla responsabilità delle imprese di rispettare i diritti umani, oltre agli *UNGPs* e alla recente ris. 76/300 dell’AG, anche il rapporto *Mapping* del 2013 e i Principi quadro del 2018.

¹⁹ V. *UNGPs* del 2011, cit. *supra*, nota 17. Sul punto v. anche V. GRADO, *Il diritto umano universale a un ambiente sano*, p. 234.

²⁰ Corte int. giust., Parere consultivo 23 luglio 2025, *Obblighi degli Stati in relazione al cambiamento climatico*.

²¹ M. R. WADE, K. TRANTOPOULOS, *Twin Transformation: How to Stop Treating AI and Sustainability as Separate Challenges*, 2025.

²² Sugli aspetti positivi della trasformazione digitale e ambientale W. D’AVANZO, *Algoritmi, smart cities, metaversi. Etica ambientale ed etica digitale per lo sviluppo sostenibile*, in *Diritto e giurisprudenza agraria, alimentare e dell’ambiente - DGA* (on-line), n. 2, 2024, p. 1 ss.; W. D’AVANZO, *Le applicazioni dell’intelligenza artificiale* cit., p. 1 ss.; F. CAMISA, *Ambiente e tecnologia*, cit., p. 56 ss.

Un primo aspetto riguarda il monitoraggio dei livelli di inquinamento e di emissioni²³. L'IA, infatti, può contribuire a ridurre l'impatto ambientale delle attività umane attraverso strumenti di analisi avanzata e di previsione, nonché attraverso l'elaborazione di strategie di ottimizzazione delle risorse e analisi di *environmental risk management*²⁴. In tale settore, avanguardistico risulta l'impiego delle cosiddette *smart grids* o reti intelligenti, sistemi di distribuzione dell'energia elettrica che utilizzano *software* di IA per ottimizzare la produzione, la distribuzione e il consumo di energia e migliorare l'efficienza, l'affidabilità e la sostenibilità della rete elettrica²⁵.

Altro impiego dei sistemi di IA riguarda il monitoraggio e la prevenzione dei disastri ambientali: i *software* di IA potrebbero essere impiegati per rilevare tempestivamente anomalie di vario genere tramite l'analisi delle immagini satellitari, consentendo così di attuare interventi immediati²⁶. Si pensi al fenomeno, piuttosto frequente, dell'*oil spilling*, rispetto al quale un tempestivo intervento per frenare le fuoriuscite di petrolio è fondamentale.

Altrettanto rilevante per la tutela ambientale è l'utilizzo dell'IA nel settore della conservazione della biodiversità²⁷. Attualmente esistono già progetti in Italia²⁸ che utilizzano dispositivi acustici basati sull'IA per monitorare oasi protette dal WWF e specie a rischio, rilevando eventuali attività illegali in tempo reale²⁹.

E ancora, nel campo della sicurezza alimentare, alcuni recenti studi condotti da ENEA³⁰ e dall'Università degli Studi di Bari³¹ hanno impiegato tecniche di *machine learning* per analizzare il microbioma del suolo, identificando indicatori di salute del terreno e contribuendo alla sicurezza alimentare³².

In fine, la gestione dei rifiuti e la raccolta differenziata potrebbero certamente beneficiare dell'utilizzo delle tecnologie di IA. In particolar modo, il riciclo e la riprogettazione dei rifiuti in nuovi prodotti aiuterebbero a promuovere il buon funzionamento dell'economia circolare³³.

²³ M. SINGH, S. SINGH, *Role of Artificial Intelligence for Environment Protection: An Analysis*, in *Law Journal of GNDU*, 2023, p. 172; A. P. VICTORIO, E. CELESTRE, A. QUINTAVALLA, *Greening AI? The New Principle of Sustainable Digital Products and Services in the EU*, in *CMLR*, 2024, p. 1019 ss.

²⁴ W. D'AVANZO, *Environmental risk management e intelligenza artificiale simbiotica. Prospettive di sviluppo e criticità*, in *Diritto e giurisprudenza agraria, alimentare e dell'ambiente - DGA* (on-line), n. 2, 2025, p. 1 ss.; M. C. GAETA, *Intelligenza artificiale sostenibile e tutela dei green Rights*, in *European Journal of Privacy Law & Technologies – EJPLT* (on-line), 2024, p.148.

²⁵ Sul punto T. LYNN, P. ROSATI, D. KREPS, K. CONBOY, *Digital Sustainability – Leveraging Digital Tech to Combat Climate Change*, *Palgrave Studies*, in *Digital Business and Enabling Technologies*, 2024.

²⁶ K. OTSU, J. MASO, *Digital Twins for Research and Innovation in Support of the European Green Deal Data Space: A Systematic Review*, in *Remote Sensing*, 2024, p. 4 ss. Questo studio descrive strumenti digitali avanzati per il monitoraggio dei disastri ambientali tramite satelliti. In particolare, presenta *Destination Earth*, un'iniziativa della Commissione europea per sviluppare un gemello digitale della Terra ad alta precisione, capace di monitorare e prevedere l'evoluzione dei fenomeni naturali e delle attività umane sul pianeta.

²⁷ Sul punto A. PACHOT, A. PATISSIONIER, *Towards Sustainable Artificial Intelligence: An Overview of Environmental Protection Uses and Issues*, in *Green and Low-Carbon Economy*, 2022.

²⁸ Maggiori informazioni sul progetto *Nature Guardian*, frutto della collaborazione tra WWF Italia, Huawei e Rainforest Connection, sono reperibili sul sito ufficiale del WWF o sul sito di Rainforest Connection.

²⁹ *Ibidem*.

³⁰ Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo sostenibile.

³¹ G. CARRERA, R. BARBATO, M. LIBERATI, M. ROMANO, *Machine Learning for Soil Microbiome Analysis to Assess Climate Change Effects*, in *Machine Learning and Knowledge Extraction*, vol. 6, n. 4, 2024, pp. 736–749.

³² T. LYNN et al., *Digital Sustainability*, cit.

³³ Sul punto A. PACHOT, A. PATISSIONIER, *Towards Sustainable Artificial Intelligence*, cit.

4. I rischi ambientali legati allo sviluppo dell'IA

Se da un lato è indiscutibilmente vero che l'IA potrebbe rappresentare un *turning point* nella lotta al depauperamento delle risorse, contribuendo ad individuare strategie a lungo termine per la risoluzione delle sempre più imminenti sfide ambientali, d'altro molto si discute dei potenziali rischi che lo sviluppo di queste tecnologie avanguardistiche potrebbero determinare rispetto alla tutela ambientale, con inevitabili ripercussioni sul diritto soggettivo a un ambiente salubre³⁴. Infatti, l'esecuzione e l'addestramento di modelli di IA richiedono l'impiego di smisurate quantità di energia e di risorse idriche, rischiando di generare un danno ambientale non riassorbibile che comprometterebbe, nel lungo periodo, la qualità di vita della generalità degli individui in maniera irrimediabile.³⁵

In primo luogo, rileva la questione dei *data centres*, enormi complessi industriali nei quali vengono sviluppate e *trainate* le tecnologie che impiegano IA, che contribuiscono in modo significativo al consumo energetico e che sono spesso alimentati da fonti di energia non rinnovabili³⁶. Queste strutture richiedono una notevole quantità di elettricità per alimentare i *server* e, allo stesso tempo, anche un dispendioso impiego di risorse idriche per i sistemi di raffreddamento delle apparecchiature di rete. Si stima che un utilizzo continuo dei *server* possa richiedere oltre 400 milioni di litri d'acqua all'anno³⁷.

Anche la fase dell'addestramento dei sistemi di IA richiede enormi quantità di energia per processare tutti i dati che vengono impiegati nel *training*. Infatti, i calcoli computazionali alla base di queste tecnologie e lo sviluppo di complessi algoritmi di funzionamento automatizzato richiedono l'elaborazione di enormi quantità di dati, processi energivori che, entro il 2026, potrebbero richiedere un consumo totale di elettricità a livello globale superiore ai 1.000 TWh, equivalendo approssimativamente al consumo elettrico del Giappone³⁸. Il consumo di energia durante l'addestramento può variare da alcune centinaia di chilowattora (kWh) a diverse migliaia di kWh, a seconda delle dimensioni e della complessità del modello, del *set* di dati e dell'infrastruttura *hardware* utilizzata³⁹.

³⁴ Sulle ripercussioni della trasformazione digitale P. DE PASQUALE, *Sostenibilità e trasformazione digitale: paradigmi a confronto nella disciplina dell'Unione europea*, in DUE, 2022, p. 67 ss.; G. PIRINA, *I costi umani e ambientali del digitale*, in *il Mulino*, n. 3, 2022, pp. 57-64; M. TOMASI, *Intelligenza artificiale, sostenibilità e responsabilità intergenerazionali: nuove sfide per il costituzionalismo?*, in *Rivista AIC*, n. 4/2024, p. 49.

³⁵ Sulle esternalità ambientali negative della trasformazione digitale si veda C. DI FRANCESCO MAESA, *Economia circolare e IA: a che condizioni è una sfida possibile per l'UE?*, in *Quaderni AISDUE - Rivista quadriennale ISSN 2975-2698 - Anticipazione fascicolo*, Convegno Forum AES del 5 e 6 dicembre 2024, p. 10 ss.

³⁶ P. VICTORIO, E. CELESTRE, A. QUINTAVALLA, *Greening AI?*, cit. p. 1024; A. ZHUK, *Artificial Intelligence Impact on the Environment*, cit., p. 938. Anche SERBAN et al., nel suo studio *Artificial intelligence for smart renewable energy sector in Europe - smart energy infrastructures for next generation smart cities*, 2020, sottolinea l'importanza di passare a fonti di energia rinnovabili.

³⁷ P. LI et al., *Making AI Less 'Thirsty': Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models*, in *arXiv*, 2023; A. ZHUK, *Artificial Intelligence Impact on the Environment*, cit., p. 938.

³⁸ Sul consumo energetico dei *data center* si veda *report* dell'INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), *Electricity 2024: Analysis and Forecast to 2026*, del 2024. Stando a quanto riportato dal *report*, nel 2023 i *data center* hanno consumato circa 460 TWh a livello globale. Questo valore è destinato ad aumentare fino a 620-1.050 TWh nel 2026, a seconda degli scenari considerati. Una porzione significativa di questa crescita è attribuita, in particolare, all'addestramento e all'uso di modelli di IA generativa, come i Large Language Models (LLMs).

³⁹ A. ZHUK, *Artificial Intelligence Impact on the Environment*, cit., p. 936. Sul punto anche R. SCHWARTZ, J. DODGE, N. A. SMITH, O. ETZIONI, *Green AI*, in *arXiv*, 2020.

Oltre al problema dell’impiego delle risorse, c’è da esaminare anche la contropartita rappresentata dalle emissioni di gas nocivi che ne derivano (*digital pollution*). Basti pensare che l’addestramento di un singolo modello linguistico di IA può arrivare ad emettere tanta anidride carbonica quanta ne viene emessa nel corso della vita di cinque automobili⁴⁰ e che, più in generale, lo sviluppo di un singolo modello di IA può comportare l’emissione di circa 300 tonnellate di CO₂⁴¹.

Un altro aspetto da prendere in considerazione riguarda la fabbricazione di componenti necessari per il funzionamento di sistemi di IA, come le GPU⁴², che implica l’estrazione di materie prime e la generazione esponenziale di rifiuti elettronici⁴³. La rapida evoluzione dei dispositivi utilizzati per produrre tecnologia di IA, infatti, comporta la rapida obsolescenza di questi *hardware*, che presentano cicli di vita sempre più brevi. Ciò genera una crescente quantità di *e-waste*, spesso non adeguatamente riciclati, con catastrofici impatti sull’ambiente⁴⁴. Il rapporto *Global E-waste Monitor 2020* indica che la produzione di rifiuti elettronici ha raggiunto la cifra record di 53,6 milioni di tonnellate, con solo il 17,4% raccolto e riciclato ufficialmente⁴⁵.

Nonostante il moltiplicarsi degli studi, i rischi ambientali associati all’impiego delle nuove tecnologie di IA non solo permangono, ma aumentano. In risposta all’impennata della domanda, le *big tech* ne stanno incrementando la produzione e, in conseguenza, aumenterà anche il consumo energetico necessario per alimentare le infrastrutture di elaborazione. Inoltre, le numerose applicazioni di sistemi di IA continuano a progredire e a diventare sempre più complesse, comportando un aumento del numero e delle dimensioni dei *data center* e un incremento della potenza computazione e di calcolo richiesta, con spaventose ripercussioni sul piano energetico⁴⁶.

Non bisogna, inoltre, sottovalutare i rischi connessi a un cattivo impiego delle stesse. L’uso inappropriato o non regolamentato di queste tecnologie, sempre più alla portata di mercato, potrebbe vanificare i richiamati benefici connessi al monitoraggio ambientale e agli sforzi di conservazione delle risorse e della biodiversità, sconvolgendo il naturale funzionamento degli ecosistemi naturali. Basti pensare che, secondo gli esperti, i droni per il monitoraggio ambientale e i veicoli autonomi utilizzati per l’esplorazione delle risorse potrebbero potenzialmente disturbare gli *habitat* della fauna selvatica, interferendo con i modelli di migrazione e aggravando gli squilibri dell’ecosistema. Si parla in proposito di *unintended consequences of AI on biodiversity and ecosystems*⁴⁷.

⁴⁰ *Ibidem*.

⁴¹ E. STRUBELI, A. GANESH, A. MCCALLUM, *Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP*, in *Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 2019, pp. 3645–3650; R. SCHWARTZ, J. DODGE, N. A. SMITH, O. ETZIONI, *Green AI*, in *arXiv*, 2020.

⁴² Le GPU (*Graphics Processing Unit*) sono unità di elaborazione grafica, ovvero processori specializzati per elaborare immagini (come quelle dei *videogames* o delle animazioni 3D), che oggi vengono ampiamente utilizzate anche al di fuori dell’ambito grafico, fungendo da “motore” computazionale che rende possibile l’addestramento e il funzionamento dell’IA moderna.

⁴³ DE PASQUALE, *Sostenibilità e trasformazione digitale*, cit., p. 75.

⁴⁴ P. WANG et al., *E-waste Challenges of Generative Artificial Intelligence*, in *Journal of Digital Technologies and Law*, 2024, p. 1 ss.

⁴⁵ V. FORTI, C.P. BALDÉ, R. KUEHR, G. BEL, *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*, United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) & International Telecommunication Union (ITU), 2020, p. 4.

⁴⁶ P. DE PASQUALE, *Sostenibilità e trasformazione digitale*, cit., p. 85; A. ZHUK, *Artificial Intelligence Impact on the Environment*, cit., p. 935.

⁴⁷ *Ibidem*.

5. La tutela ambientale e lo sviluppo sostenibile nei nuovi strumenti di regolazione dell'intelligenza artificiale

La tutela dell'ambiente rientra tra gli obiettivi che devono orientare l'azione dell'Unione europea ai sensi dell'art. 3.3 del TUE. L'art. 37 della Carta dei diritti fondamentali dell'Unione e l'art. 11 del TFUE sanciscono, inoltre, il principio di integrazione delle esigenze ambientali in tutte le politiche e azioni dell'Unione.

Accanto a questo nucleo di disposizioni di diritto primario, il quadro normativo dell'Unione si è recentemente arricchito di atti di diritto derivato volti a rafforzare l'integrazione degli obiettivi ambientali nelle attività economiche, quali la direttiva sulla sostenibilità⁴⁸ e la direttiva sulla responsabilità delle imprese⁴⁹.

Parallelamente, la direzione politica dell'Unione deve essere orientata al rispetto di iniziative *Green oriented*, tra cui il *Green Deal*⁵⁰ e la Dichiarazione europea sui diritti e i principi digitali, il cui Capitolo VI, rubricato *Sostenibilità*, è espressamente dedicato all'impatto ambientale delle tecnologie digitali.⁵¹ Tali strumenti di *soft law*, seppur non vincolanti, contribuiscono a delineare la cornice entro cui si collocano le recenti iniziative legislative in materia di sviluppo sostenibile e di responsabilità delle imprese.⁵²

Anche l'*AI ACT*⁵³, che rappresenta il primo tentativo organico di regolamentazione dell'intelligenza artificiale, si impegna ad assicurare che lo sviluppo e l'impiego dei sistemi di IA siano sostenibili da un punto di vista ambientale⁵⁴. Tra gli obiettivi del nuovo regolamento, infatti, figura quello di garantire un elevato livello di protezione dei diritti fondamentali riconosciuti e tutelati dal diritto dell'Unione, tra cui la democrazia, lo Stato di diritto e la tutela dell'ambiente⁵⁵. Il riferimento alla necessità che l'implementazione di queste nuove tecnologie rispetti l'ambiente è frequente all'interno del regolamento, tanto nei considerando⁵⁶ quanto nelle norme⁵⁷, ma non vengono specificate le modalità. Sul punto, il reg. (UE) 2024/1689 si limita a generici richiami.⁵⁸ D'altronde, l'*AI ACT* si occupa prevalentemente di regolare la circolazione dell'IA all'interno del mercato e non introduce alcun coordinamento con il *corpus* normativo dell'Unione a tutela dell'ambiente.

Al considerando 27, per esempio, si evidenzia la necessità che i sistemi di IA siano sviluppati e utilizzati, tra l'altro, «in modo sostenibile e rispettoso dell'ambiente [...]. Il

⁴⁸ Direttiva (UE) 2022/2464 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 14 dicembre 2022, che modifica il regolamento (UE) n. 537/2014, la direttiva 2004/109/CE, la direttiva 2006/43/CE e la direttiva 2013/34/UE in materia di rendicontazione societaria di sostenibilità.

⁴⁹ Direttiva (UE) 2024/1760 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 5 luglio 2024, relativa al dovere di diligenza delle imprese ai fini della sostenibilità (*Corporate Sustainability Due Diligence Directive – CSDDD*).

⁵⁰ Comunicazione della Commissione COM(2019) 640 final, Il *Green Deal* europeo, 11 dicembre 2019.

⁵¹ P. VICTORIO, E. CELESTRE, A. QUINTAVALLA, *Greening AI?*, cit. p. 1021.

⁵² P. DE PASQUALE, *Sostenibilità e trasformazione digitale*, cit., p. 70.

⁵³ Regolamento (UE) 2024/1689 del Parlamento europeo e del Consiglio del 13 giugno 2024 che stabilisce regole armonizzate sull'intelligenza artificiale e modifica i regolamenti (CE) n. 300/2008, (UE) n. 167/2013, (UE) n. 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1139 e (UE) 2019/2144 e le direttive 2014/90/UE, (UE) 2016/797 e (UE) 2020/1828.

⁵⁴ F. CAMISA, *Ambiente e tecnologia*, cit., p. 69.

⁵⁵ M. ALMADA, N. PETIT, *The EU AI act: a medley of product safety and fundamental rights?*, European University Institute, Robert Schuman Centre Working Paper, 59, 2023, pp. 7-27.

⁵⁶ Reg. (UE) 2024/1689 - considerando 1, 2, 4, 8, 27, 48, 130, 142, 155, 176.

⁵⁷ *Ivi*, art. 1, art. 3, art. 46, art. 59.

⁵⁸ C. DI FRANCESCO MAESA, *Economia circolare*, cit., p. 16 ss.

considerando 48, invece, fa espressamente riferimento al «diritto fondamentale a un livello elevato di protezione dell’ambiente» tra quelli da tenere in considerazione nella valutazione circa la gravità di un ipotetico danno causato da un sistema di IA. Il considerando 142 incoraggia gli Stati a «sostenere e promuovere la ricerca e lo sviluppo di soluzioni di IA a sostegno di risultati vantaggiosi dal punto di vista sociale e ambientale [...] e a conseguire obiettivi in materia di ambiente». Il considerando 155 precisa che i fornitori di sistemi di IA ad alto rischio «dovrebbero [...] essere tenuti [...] a predisporre un sistema per segnalare alle autorità competenti eventuali incidenti gravi», tra cui sono compresi i «gravi danni alle cose o all’ambiente».

Sul piano operativo, la norma che instaura un tenue coordinamento di tipo pratico con le altre disposizioni ambientali dell’Unione è l’articolo 40, che prevede l’intervento della Commissione per promuovere la *standardizzazione* tecnica. Il comma 2 stabilisce che la Commissione debba richiedere agli organismi di *standardizzazione* di fornire risultati relativi «a processi di comunicazione e documentazione intesi a migliorare le prestazioni dei sistemi di IA in termini di risorse, come la riduzione del consumo di energia». In questo senso, l’implementazione della sostenibilità energetica dell’IA è rimessa allo sviluppo di *standard* armonizzati da parte degli organismi competenti. Questa impostazione riflette un modello di regolazione *soft*, basato sull’autodisciplina tecnica attraverso l’implementazione di *standard* condivisi piuttosto che su obblighi immediatamente vincolanti. Tuttavia, questa strategia di “rinvio” genera un duplice rischio: da un lato, i tempi di approvazione degli *standard* da parte degli organismi competenti sono spesso lunghi; dall’altro, tali organismi fanno ampio riferimento a *stakeholder* industriali, con il rischio di affidare alle logiche di mercato la definizione di regole che dovrebbero invece garantire un bilanciamento effettivo tra innovazione tecnologica e sostenibilità ambientale.⁵⁹

Oltre all’articolo 40, un ulteriore obbligo in materia ambientale è contenuto nell’Allegato XI⁶⁰ e riguarda specificamente i modelli di IA per finalità generali. In base a tale disposizione, i fornitori di tali modelli sono tenuti a comunicare, nelle informazioni tecniche, il consumo energetico noto o stimato associato alla fase di addestramento del sistema. In presenza di rischi sistematici, è altresì previsto che si effettui una valutazione dell’efficienza energetica del modello, con possibilità per la Commissione di elaborare metodologie comuni di misurazione al fine di garantire comparabilità e coerenza tra i diversi sviluppatori.⁶¹ Tali forme di *disclosure* si inseriscono in un tentativo di aumentare la trasparenza sull’impronta ecologica delle architetture più potenti e pervasive, in assenza, tuttavia, di veri e propri vincoli sostanziali in termini di riduzione dei consumi o minimizzazione dell’impatto.

Rilevate queste criticità, l’*AI ACT* mostra una debolezza strutturale rispetto ad altri atti normativi dell’Unione che adottano approcci più stringenti e orientati a una piena integrazione tra transizione digitale e transizione verde.⁶² La direttiva CSDDD (*Corporate Sustainability Due Diligence Directive*), per esempio, adotta un approccio prescrittivo, imponendo obblighi stringenti alle imprese in materia ambientale lungo tutta la catena del valore. La direttiva 2022/2464 in materia di rendicontazione societaria di sostenibilità, invece, impone alle imprese l’obbligo di fornire una dettagliata informativa non finanziaria sulle *performance* ambientali, sociali e di *governance*, rafforzando così il principio di trasparenza e il controllo pubblico sulle strategie aziendali in materia di sostenibilità. Entrambe delineano un

⁵⁹ M. TOMASI, *Intelligenza artificiale*, cit., p. 56.

⁶⁰ Reg. (UE) 2024/1689 - Allegato XI, par. 2, lett. e).

⁶¹ *Ivi*, art. 112, par. 6; art. 53, par. 1, lett. a) in combinato disposto con l’Allegato XI.

⁶² C. DI FRANCESCO MAESA, *Economia circolare*, cit., p. 18.

quadro normativo più ambizioso e vincolante rispetto all'*AI ACT* che, sul piano ambientale, resta ancorato a mere indicazioni programmatiche.

Ancora più generica è la Convenzione quadro del Consiglio d'Europa sull'intelligenza artificiale e i diritti umani, la democrazia e lo Stato di diritto, adottata a Strasburgo il 17 maggio 2024. All'interno del Preambolo, si specifica «this Convention is intended to address specific challenges which arise throughout the lifecycle of artificial intelligence systems and encourage the consideration of the wider risks and impacts related to these technologies including, but not limited to, human health and the *environment* [...]. Per quanto concerne la parte normativa, composta da sole 36 norme, l'ambiente figura all'articolo 19, rubricato “Consultazione pubblica” che recita «Ciascuna Parte si adopera per garantire che le questioni importanti sollevate in relazione ai sistemi di intelligenza artificiale siano, [...], debitamente esaminate [...], alla luce delle implicazioni sociali, economiche, giuridiche, etiche, *ambientali* e di altro tipo».

Nonostante l'interesse dimostrato verso il tema ambientale, l'applicabilità della Convenzione è oggi limitata. Al momento solo pochi Stati⁶³ l'hanno firmata e si prevede che non sarà operativa nel breve periodo, non essendo stato ancora depositato alcuno strumento di ratifica⁶⁴. Resta tuttavia auspicabile che la Convenzione venga ratificata e attuata, atteso che la cooperazione internazionale risulta indispensabile per affrontare efficacemente le questioni ambientali derivanti dall'IA. In definitiva, per il momento, il quadro rimane prematuro, e la sua effettiva implementazione potrebbe richiedere tempo e ulteriori passi concreti da parte degli Stati.

6. L'IA nella transizione verso l'economia circolare

Da quanto detto finora, emerge come la trasformazione digitale porti con sé indiscutibili vantaggi e altrettante sfide, che possono essere sommariamente ricondotte a due macrocategorie: da una parte si colloca il tema delle esternalità ambientali, dall'altra quello del depauperamento delle risorse.

Con riguardo all'impoverimento del capitale naturale, molti studi rilevano che l'elevato consumo energetico e idrico che deriva dall'addestramento e dall'impiego di modelli di IA comporta un dispendio di risorse naturali che il Pianeta non può permettersi e che non sarà sostenibile nel tempo. La soluzione prospettata da alcuni studiosi consiste nel riconvertire l'industria produttiva dell'IA in un settore *eco-friendly*, alimentato esclusivamente da fonti di energia rinnovabile. Se si riuscisse a orientare la produzione digitale verso l'impiego di energie pulite, sarebbe possibile continuare a sviluppare nuove tecnologie basate sull'IA senza aggravare il problema della scarsità delle risorse⁶⁵.

⁶³ Hanno firmato il trattato quattordici Stati e l'Unione europea.

⁶⁴ È necessario il raggiungimento di cinque ratifiche (di cui almeno tre provenienti da Stati membri del Consiglio d'Europa) perché entri in vigore.

⁶⁵ A. ZHUK, *Artificial Intelligence Impact on the Environment*, cit., p. 932 ss.; E. ZHANG, D. WU, J. BOMAN, *Carbon-Aware Workload Shifting for Mitigating Environmental Impact of Generative AI Models*, in *Proceedings of IEEE GreenCom 2024*, p. 446 ss.; A. PACHOT, A. PATISSIER, *Towards Sustainable Artificial Intelligence*, cit.; M. A. STEIN, *Artificial Intelligence and Climate Change: Towards an Ethical Legal Framework*, in *International Journal of Environmental Law*, 2023, n. 2, p. 77 ss; P. LI et al., *Making AI Less 'Thirsty'*, cit.; A. MORAIN, N. ILANGOVAN, C. DELHOM et al., *Artificial Intelligence for Water Consumption Assessment: State of the Art Review*, in *Water Resour Management*, 2024; OECD, *Measuring the Environmental Impacts of AI Compute and Applications*, in *OECD Digital Economy Papers*, n. 341, 2022;

Rispetto alla questione dell'inquinamento ambientale, recenti studi evidenziano come un corretto impiego delle tecnologie di IA possa contribuire, nel lungo periodo, all'elaborazione di nuove politiche economiche in grado di mitigare l'impatto ambientale⁶⁶. Secondo questa prospettiva, dopo un iniziale effetto negativo dell'IA sull'ecosistema, il danno potrebbe progressivamente ridursi grazie a sistemi di IA in grado di ottimizzare i processi produttivi e migliorare l'efficienza energetica, favorendo così un parziale "riassorbimento" del danno⁶⁷. Tuttavia, l'elaborazione di strategie di efficientamento, per quanto utile, non può da sola annullare né compensare integralmente i danni già prodotti. Anzi, l'attuale tendenza mostra un incremento costante delle emissioni associate all'addestramento e all'utilizzo dei modelli di IA e solo scenari ottimistici ipotizzano una loro effettiva riduzione, eventualmente resa possibile dall'uso esclusivo di fonti energetiche rinnovabili.⁶⁸ Inoltre, va sottolineato che l'IA non ha alcun effetto correttivo diretto rispetto all'erosione delle risorse naturali, in particolare quelle idriche ed energetiche. Infine, occorre ricordare che alcuni danni ambientali sono, per loro natura, irreversibili: tra questi, la perdita di biodiversità, lo scioglimento dei ghiacci perenni e l'acidificazione degli oceani⁶⁹.

Ad ogni modo, con riguardo all'impatto ecologico dell'IA, si dovrebbe tendere a un approccio preventivo piuttosto che "curativo". In questo senso viene in rilievo la distinzione, già oggetto di critica da parte della dottrina⁷⁰, tra *sustainable AI* e *AI for sustainability*. In risposta alla massiccia proliferazione delle tecnologie di IA si promuove l'implementazione di una *sustainable AI*, ovvero di un'IA che tenda al rispetto dell'ecosistema, ma non si discute ancora abbastanza di un *AI for sustainability*, cioè di un'IA che, nel suo agire, non si limiti a rispettare gli argini derivanti dalla tutela ambientale, ma che sia direttamente finalizzata alla promozione dello sviluppo sostenibile. La ricerca dovrebbe mirare non solo a rendere sostenibile la trasformazione digitale, ma ancor più a porre l'IA al servizio dell'economia circolare. In tal modo, si realizzerebbe davvero il passaggio dall'industria 4.0 all'industria 5.0, intesa come un modello economico-industriale di integrazione uomo-macchina, in cui l'ambiente non venga compromesso e nel quale si realizzi un effettivo *surplus* di benessere per la collettività nel suo insieme⁷¹.

In questo scenario, l'IA potrebbe rappresentare uno strumento strategico per lo sviluppo dell'economia circolare. L'adozione di sistemi di IA capaci di ottimizzare il riciclo, ridurre gli scarti e monitorare l'intero ciclo di vita dei prodotti permetterebbe di chiudere i cicli produttivi in modo intelligente e responsabile. La combinazione tra IA e modelli circolari

A. COCCA GUARDIA, L. TISCORNIA, A. VELÁZQUEZ, *Assessing the Energy Impact and Carbon Footprint of AI Model Training: A Case Study Using GPU Servers*, in *Proceedings of CLAGTEE 2024*, 2024, E. STRUBELL et al., *Energy and Policy Considerations*, cit., pp. 3645–3650.

⁶⁶ F. CAMISA, *Ambiente e tecnologia*, cit., p.58.

⁶⁷ K. OTSU, J. MASO, *Digital Twins*, cit., p. 3-4; T. LYNN et al., *Digital Sustainability*, cit.; R. RAMAN et al., *Green and sustainable AI research: an integrated thematic and topic modeling analysis*, in *Journal of Big Data*, 2024; EUROFER, *Industry 4.0 and the Road to Sustainable Steelmaking in Europe - Recasting the Future*, 2024, p.5-6; A. VERDECCHA, *Reinforcing Sustainability Awareness in the AI Ecosystem: A Strategic View on the AI Value Chain*, in *Sustainability*, n. 5, 2024; M. SINGH, S. SINGH, *Role of Artificial Intelligence*, cit., p. 165.

⁶⁸ P. VICTORIO, E. CELESTRE, A. QUINTAVALLA, *Greening AI?*, cit. p. 1039.

⁶⁹ P. LI et al., *Making AI Less 'Thirsty'*, cit.; E. STRUBELL et al., *Energy and Policy Considerations*, cit., p. 3645–3650.; M. A. STEIN, *Artificial Intelligence and Climate Change*, cit., p. 77 ss.

⁷⁰ M. C. GAETA, *Intelligenza artificiale sostenibile*, cit., p.148; M. TOMASI, *Intelligenza artificiale*, cit., p. 57; A. VAN WYNBERGHE, *Sustainable AI: AI for sustainability and the sustainability of AI*, in *AI and Ethics*, 2021, I, p. 214.

⁷¹ K. REJEB; J. G. KEOGH; E. SÜLE, *When Industry 5.0 Meets the Circular Economy: A Systematic Literature Review of Industry 5.0 and CE*, in *Circular Economy and Sustainability*, vol. 6, 2025; P. J. AMIRKHIZI, S. PEDRAMMEHR, S. PAKZAD, *A system-based approach to value prioritization in Industry 5.0*, in *Discover Sustainability*, vol. 6, 2025.

consentirebbe non solo di ridurre l'impronta ecologica dell'industria, ma anche di promuovere nuovi paradigmi economici rigenerativi. Si tratta di una sinergia che potrebbe contribuire concretamente alla costruzione di un ecosistema produttivo, resiliente e orientato alla neutralità climatica.

È chiaro che si tratta di considerazioni acerbe: occorrono ulteriori anni di ricerca e di approfondimento sulla tematica; ma ciò che fin da subito appare chiaro è che la *twin transition* assume oggi un ruolo chiave nell'ambito della ricerca scientifica, rappresentando il punto di partenza per l'implementazione di nuovi obiettivi di prioritaria importanza, diretti a tutelare la salute e al benessere di tutti gli individui, anche di quelli non ancora venuti ad esistenza.

7. Conclusioni: verso un equilibrio sostenibile

In conclusione, se è pacifico che l'impiego dell'IA rappresenti un'opportunità epocale, è altrettanto evidente che una simile innovazione debba essere analizzata e conseguentemente normata per quello che è: uno strumento potente, in grado di innescare un'irreversibile trasformazione della società contemporanea e del Pianeta che la ospita. In questo contesto è fondamentale che l'evoluzione tecnologica proceda all'interno di un perimetro normativo ed etico che garantisca il rispetto dei diritti fondamentali, tra cui il diritto a un ambiente sano. Lo sviluppo umano ha nuovamente condotto a un *trade-off* progresso tecnologico-tutela ecologica e il modo in cui questa tecnologia sarà sfruttata in futuro dipende dal legislatore, la cui sfida principale sarà quella di conciliare la transizione digitale con quella ecologica, promuovendo applicazioni dell'IA che contribuiscano al bene comune e arginando gli impieghi potenzialmente lesivi.

In quest'ottica il quadro europeo, pur dimostrando una crescente attenzione verso la sostenibilità ambientale, come nel caso dell'*AI ACT*, presenta margini di miglioramento.⁷² Come si è detto, il regolamento si limita a raccomandare che lo sviluppo e l'impiego dei sistemi di IA siano sostenibili sotto il profilo ecologico e a fornire indicazioni generali, senza introdurre criteri operativi o vincoli precisi.

In tal senso, al fine di conciliare innovazione tecnologica e protezione ambientale occorre che l'IA venga messa al servizio della tutela dell'ambiente. L'obiettivo è quello di traslare il *focus* della ricerca scientifica da una *sustainability AI* a un *AI for sustainability*, antecedendo la tutela ambientale agli interessi economici delle *big tech*.

Bisogna inoltre superare le criticità legate al rinvio agli organismi di *standardizzazione*, implementando un maggiore coordinamento normativo tra le norme direttamente volte a tutelare l'ambiente e quelle volte a disciplinare l'IA.

L'auspicio è che le future normative si occupino di integrare i criteri della sostenibilità ambientale nella regolamentazione di queste tecnologie, introducendo per le aziende obblighi di trasparenza e di rendicontazione sulle emissioni e limiti al consumo energetico e idrico. In questi termini, si rende necessaria l'elaborazione di una legislazione *ad hoc* che intervenga per introdurre a disciplinare nuovi profili di responsabilità ambientale a carico delle aziende che sviluppano sistemi di IA, al fine, da un lato, di indirizzarne l'impiego lì dove ciò sia funzionale a incrementare la ricerca e a facilitare i processi produttivi di ciascuno Stato, dall'altro, di

⁷² Green Software Foundation, *The EU AI Act: Insight from the Green AI Committee 2024*, consultabile all'indirizzo: www.greensoftware.foundation/articles/the-eu-ai-act-insights-from-the-green-ai-committee.

arginarne l'utilizzo qualora lo stesso si presenti potenzialmente lesivo della tutela ambientale. Una normazione più integrata e un coordinamento efficace tra le politiche digitali e ambientali potrebbero rappresentare un passo decisivo verso una regolazione capace di coniugare innovazione e sostenibilità.