

Paola Zamperlin\*

*L'intelligenza artificiale come modello della realtà.  
Riflessioni intorno ai gemelli digitali*

Questo contributo esplora criticamente il paradigma dei gemelli digitali (*digital twin*), analizzandone lo sviluppo tecnologico, le applicazioni emergenti e le implicazioni epistemologiche e spaziali. L'adozione crescente dei gemelli digitali in ambiti quali la produzione industriale, la pianificazione urbana, la medicina e la modellazione climatica riflette una transizione paradigmatica nella relazione tra modelli digitali e realtà fisica. La tecnologia, sostenuta dall'intelligenza artificiale e da sistemi di acquisizione e gestione dati avanzati, si configura come una replica dinamica e interattiva della realtà, in grado di supportare il processo decisionale tramite simulazioni predittive. Tuttavia, si evidenziano le criticità legate alla fiducia nei modelli, alla selezione delle variabili significative, ai rischi di standardizzazione e all'accentuarsi delle disuguaglianze regionali nell'accesso e nell'implementazione di tali strumenti. I gemelli digitali emergono così non solo come artefatto tecnologico, ma come oggetto spazialmente e cognitivamente performativo, la cui adozione solleva interrogativi etici, politici e metodologici riguardo alla rappresentazione e alla trasformazione dei territori.

*Parole chiave:* gemello digitale, intelligenza artificiale, disuguaglianze, spazialità.

*Artificial intelligence as a model of reality. Reflections on digital twins.* – This paper critically examines the paradigm of digital twins, analyzing their technological development, emerging applications, and epistemological and spatial implications. The increasing adoption of digital twins in fields such as industrial manufacturing, urban planning, medicine, and climate modeling reflects a paradigmatic shift in the relationship between digital models and physical reality. Supported by artificial intelligence and advanced data acquisition and management systems, digital twins function as dynamic and interactive replicas of real-world systems, enabling decision-making through predictive simulations. However, critical issues emerge related to model reliability, the selection of significant variables, risks of standardization, and the widening of regional

\* Università di Firenze, Dipartimento di Storia, Archeologia, Geografia, Arte e Spettacolo (SAGAS), Via San Gallo 10, 50129 Firenze, [paola.zamperlin@unifi.it](mailto:paola.zamperlin@unifi.it).

Saggio proposto alla redazione il 20 giugno 2025, accettato il 15 dicembre 2025.

*Rivista geografica italiana*, CXXXIII, Fasc. 1, marzo 2026, ISSN 2499-748X, pp. 52-68, Doi 10.3280/rgioa1-2026oa22427

Copyright © FrancoAngeli.

This work is released under Creative Commons Attribution – Non-Commercial – No Derivatives License.  
For terms and conditions of usage please see: <http://creativecommons.org>.

disparities in access to and deployment of such technologies. Digital twins thus emerge not merely as technological artefacts, but as spatially and cognitively performative constructs, whose adoption raises ethical, political, and methodological questions concerning the representation and transformation of territorial realities.

*Keywords:* digital twin, artificial intelligence, inequalities, spatiality.

1. INTRODUZIONE. – L’accelerazione con cui negli ultimi anni la ricerca sull’intelligenza artificiale ha sorretto la produzione di nuove applicazioni ha subito un’impennata tale da rendere sotto certi aspetti più faticosa la comprensione dei processi in atto, considerato che in questo scenario aumenta il grado di complessità esasperato dalla pervasività degli usi dell’intelligenza artificiale stessa praticamente in ogni contesto della quotidianità, molto spesso senza che si abbia modo di averne consapevolezza. Ogni ambito del sapere si sta confrontando con il cambiamento, mescolando atteggiamenti di entusiasmo per le potenzialità che si stanno dispiegando e, al contempo, manifestazioni di preoccupazione per le ignote destinazioni a cui si potrà arrivare. La domanda non è tanto “quali nuovi mondi digitali avverrà l’intelligenza artificiale”, ma “in quali nuovi mondi fisici vivremo secondo le indicazioni dell’intelligenza artificiale”.

Ricordo che sul finire dello scorso millennio e all’inizio di questo, di fronte all’estendersi di Internet e poi all’avvento del cosiddetto Web 2.0 – che trasformava gli utenti lettori in partecipanti attivi della rete – si svilupparono intense discussioni scientifiche. Tali dibattiti coinvolgevano fisici, informatici, filosofi e sociologi in particolare, ma non soltanto, e miravano a ridefinire l’antitesi tra reale e virtuale. L’obiettivo era quello di cercare una soluzione in nuove ontologie non oppostive, emergenti con l’apparire di una nuova dimensione, che Pierre Lévy aveva battezzato cyberspazio (1994). Da questa prospettiva sono poi gemmate altre categorie interpretative, che hanno avuto molta fortuna nei decenni successivi, come cybercultura, cyberdemocrazia, e così via. Oggi, a soli trent’anni dall’uscita del saggio di Lévy, sebbene non sia più così pacifico che nella dimensione cyber-spaziale si estrinsechi l’intelligenza collettiva umana, pensare che le categorie di reale e virtuale siano disgiunte suscita un sorriso. Gran parte della vita di relazione delle persone si svolge in piattaforme digitali, spesso avviene mediata da agenti non umani, condizionata dall’efficacia di algoritmi che orientano scelte che vanno dall’acquisto di beni, al ‘commercio’ di idee e di sentimenti (quali libri leggere, che musica ascoltare, quali persone votare, quali amici scegliere, ecc.), per cui è diventato impossibile districare una matassa di artefatti fisici e digitali oramai tra loro densamente intrecciati. Tuttavia, questo intreccio sempre più indissolubile suscita nuove domande, o, se vogliamo, ne ripropone di antiche che si rivestono di significati nuovi, in particolare per quanto attiene al rapporto tra l’essere umano e la sua spazialità.

Per porre sul tavolo alcune di queste domande, vorrei stimolare la riflessione a partire da un recente artefatto a cui è stato dato il nome di gemello digitale o *digital twin*. Il termine designa oggi una tecnologia considerata tra quelle più interessanti e promettenti per l'interpretazione di fenomeni complessi, ma quando fa la sua comparsa, una ventina d'anni fa, esso indica più semplicemente la copia digitale di un manufatto (Grieves, 2014), ampiamente utilizzata nelle fasi di progettazione e in quelle di produzione per il controllo delle prestazioni e di eventuali errori. Si tratta di un'innovazione che diventa ben presto centrale nell'idea che la replica virtuale dei processi di fabbricazione avrebbe comportato una spinta verso l'eccellenza manifatturiera, semplificato l'automazione intelligente in diversi settori dell'industria 4.0, riducendo i tempi di produzione, consentendo una migliore valutazione dei costi del ciclo produttivo e contenendo il numero dei possibili difetti di progettazione, il cui riscontro in un sistema tradizionale può avvenire solo con il confronto con l'oggetto prodotto (Bonin *et al.*, 2025).

Nell'ambito dell'ingegneria della produzione, per gemello digitale si intende qualcosa che solo in parte si ricollega al concetto di modello tridimensionale o plastico analogico. Il riferimento riguarda infatti in modo limitato gli aspetti legati alla riduzione in scala della realtà fisica, alla tridimensionalità e agli scopi del modello. In particolare, questi ultimi sono riconducibili a ragioni di controllo della progettazione – nel caso di manufatti o edifici – oppure alla pianificazione di scenari di intervento (ad esempio i grandi plastici che riproducono città o territori sui quali dispiegare truppe al fine di valutare l'evoluzione di scenari di guerra, e così via). Quello che marca la differenza non sta tanto nell'essere il plastico tangibile e l'altro digitale, ma sta nell'adozione della metafora di gemello della realtà fisica, e cioè di un qualcosa che si pone in relazione costante e dinamica con la realtà stessa. In altre parole, il *digital twin* costituisce l'immagine speculare di un oggetto o di un processo fisico con la capacità di riprodurre il funzionamento mentre questo si va sviluppando o simularne il variare poste determinate condizioni.

La metafora ha molta fortuna, evidentemente per i vantaggi che la tecnologia apporta e, parallelamente alla diffusione di alcune tecnologie dell'informazione (*Internet of things, big data, cloud computing, machine learning, deep learning, neural networks, high performance computing, edge computing, blockchain, building information modeling, 5G, ecc.*), si estende ad altri campi dove la progettazione e pianificazione sono strategiche. Lo scopo del *digital twin* è quello di far conoscere la realtà attraverso la sua copia digitale e di controllarne le evoluzioni sulla base di scenari di previsione risultanti da algoritmi sempre più affidabili. Stiamo parlando, cioè, di una realtà digitale gemella di quella fisica che prende vita sulla base di modelli, le cui entità e relazioni sono espresse da astrazioni matematiche, informatiche e probabilistiche e che, pertanto, possiedono diversi gradi di affidabilità.

2. DEFINIZIONI E SCENARI. – Già nel 2012, in una sessione speciale dedicata al *digital twin* all'interno della 53<sup>a</sup> conferenza dell'American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) su *Structures, structural dynamics, and materials*, viene introdotto il paradigma del gemello digitale per il futuro della progettazione dei veicoli della NASA e dell'Aeronautica militare statunitense: “digital twin is an integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin. The digital twin is ultra-realistic [...] integrates sensor data [...] maintenance history and all available historical and fleet data obtained” (Glaessgen e Stargel, 2012, p. 7). Attualmente, quando il futuro prospettato ha compiuto già dieci anni, l'espressione *digital twin* si applica a un'ampia eterogeneità di modelli di replica e simulazione digitale che mirano a facilitare la conoscenza e la gestione dei sistemi fisici che riproducono, e che è testimoniata dalla crescita pressoché esponenziale del numero delle pubblicazioni su questo tema a partire dal 2017 (van der Valk *et al.*, 2020). Spesso il termine viene utilizzato con accezioni simili, anche se manca ancora una definizione univoca (Cimino *et al.*, 2019; Tomczyk e van der Valk, 2022; Boyes e Watson, 2022). Tuttavia, l'aspetto interessante della definizione sopra citata è che pone l'attenzione sul legame bidirezionale tra la componente fisica e quella digitale che la duplica, mostrando appunto la consapevolezza del mutamento di paradigma che questo concetto introduce rispetto alla modellistica precedente. Le tecnologie dell'informazione di più recente sviluppo rendono possibile il fatto che la replica digitale (il modello) si alimenti costantemente dei dati che la realtà fisica produce, e possa, quindi, modificarsi di conseguenza e adattarsi se stessa ai cambiamenti degli stati fisici (Gil *et al.*, 2024). Un ulteriore importante guadagno è dato dal fatto che per mezzo di un gemello digitale si possa ipotizzare come la corrispondente realtà fisica reagirebbe al variare di determinate condizioni, aprendo in tal modo la via ad azioni volte a evitare, mitigare o gestire situazioni di rischio, solo per fare un esempio. È facile immaginare quali impatti possa avere la disponibilità di un gemello digitale, che aggiorna i suoi passaggi di stato in tempo quasi reale, sul modo in cui si prendono le decisioni e quanto possa influenzare l'esito delle nostre scelte il grado di affidabilità del modello di riferimento. Il principio fondante, secondo cui un gemello digitale – aggiornato in tempo reale – risulta ontologicamente equivalente al suo omologo fisico, solleva interrogativi circa le modalità di impiego del gemello digitale per l'analisi del sistema rappresentato, la simulazione di configurazioni alternative o comportamenti emergenti, nonché la validazione di nuovi servizi in ambienti virtuali controllati.

Si tratta di questioni tutt'altro che semplici se ristrette a una scala geografica limitata, e che diventano estremamente complesse quando si considerano i gemelli digitali che intendono riprodurre ampie porzioni di spazio. Il salto di scala ha de-

terminato, infatti, non solo un'estensione dell'area da modellare, ma soprattutto un aumento significativo della complessità sistemica, in termini di fattori e variabili da considerare. Trascurarne l'integrazione comprometterebbe la natura stessa del modello digitale, inteso come replica fedele della realtà e dei processi dinamici che in essa si manifestano.

Lo spettro degli attuali progetti di *digital twin* va da un estremo in cui sono compresi esempi di replica del corpo umano o di parti di esso (Casola, 2023) all'estremo opposto per grandezza, che comprende modelli pertinenti all'intero pianeta<sup>1</sup>. Si tratta, quindi, di applicazioni che presentano complessità tecniche e progettuali diverse, oltre che risvolti etici e normativi specifici. Nel primo scenario, l'impiego del gemello digitale evidenzia i vantaggi derivanti da un'interazione bidirezionale e dinamica tra il paziente e la sua controparte virtuale, costituita da modelli in grado di rappresentarne le caratteristiche spaziali e temporali. Tale replica digitale viene utilizzata per supportare decisioni cliniche relative a interventi, trattamenti e valutazioni diagnostiche, le quali, a loro volta, retroagiscono sul gemello digitale aggiornandone lo stato. L'implementazione pratica di tale approccio richiede l'adozione di modelli caratterizzati da differenti livelli di affidabilità e risoluzione, suscettibili di integrazione multimodello. L'introduzione di nuove osservazioni empiriche comporta operazioni ricorrenti di calibrazione, con conseguente aggiornamento delle stime previsionali. Le simulazioni di scenari terapeutici permettono la generazione di previsioni di esito, successivamente ottimizzate al fine di individuare le strategie di trattamento più efficaci.

All'estremo opposto della scala di osservazione si collocano iniziative di elevata complessità volte alla realizzazione di una replica digitale del sistema Terra, fondate sull'integrazione di modelli fisici ad alta risoluzione e affidabilità, che insieme rappresentano i processi dinamici dell'atmosfera, degli oceani, della litosfera e della criosfera. L'obiettivo per ora dichiarato di tali progetti è la costruzione di gemelli digitali operativi su scala globale e orientati allo studio del clima in una prospettiva di sostenibilità, in grado di generare previsioni avanzate – ad esempio sulla temperatura media globale o sulla frequenza e intensità di eventi estremi – utili a informare la definizione di politiche ambientali, a guidare lo sviluppo di sistemi osservativi di nuova generazione e a ottimizzare le risposte a scenari emergenziali. Un esempio molto ambizioso è dato dal programma *Destination Earth* della Commissione europea (DestinE), non a caso una delle componenti chiave della Strategia europea per i dati, che prevede la replica della Terra entro il 2030, basata sulla

<sup>1</sup> Citando Nativi e Craglia (2023, p. 295): “A Digital Twin of the Earth is the digital replica of an Earth system component, structure, process, or phenomenon obtained by merging digital modeling (notably, learning-based models) and real-world observational continuity – that is, natural and societal sensing data streams. A Digital Twin of the Earth continuously learns and updates itself and must be seen as a living digital simulation model that modifies and changes itself as its physical counterpart changes”.

modellazione digitale, e che ambisce a segnare una svolta in termini di accuratezza, dettaglio, accesso alle informazioni, interattività e velocità delle performances<sup>2</sup>. Il programma è orientato principalmente allo studio del cambiamento climatico e dei rischi naturali associati, con un'attenzione specifica alla previsione di eventi estremi e alla mitigazione dei relativi impatti socio-economici su ecosistemi marini e contesti urbani. In termini operativi, l'iniziativa prevede il finanziamento di progetti capaci di generare simulazioni del sistema terrestre altamente affidabili, interattive e dinamiche, finalizzate al potenziamento delle capacità previsionali per la gestione sostenibile delle risorse idriche, delle fonti energetiche rinnovabili e della sicurezza alimentare. Tali sviluppi sono in ultimo orientati al supporto dei processi decisionali e all'implementazione di politiche efficaci. È chiara, quindi, l'importanza che la stessa Unione europea attribuisce al *digital twin* come strumento abilitante per la transizione ecologica.

Nell'ambito dell'urbanistica, l'adozione dei *digital twin* si è progressivamente consolidata con lo sviluppo della smart city, intesa come configurazione urbana intelligente in grado di impiegare in modo sostenibile le risorse naturali ed economiche, interagire efficacemente con il capitale umano e sociale, e garantire una governance efficiente orientata al mantenimento di elevati standard di qualità della vita attraverso l'utilizzo integrato di dati e servizi digitali (Garau *et al.*, 2020). Di fronte alla crescente inadeguatezza dei modelli analitici tradizionali nel governare la complessità territoriale, caratterizzata da una pluralità di attori, dinamiche interdipendenti e variabili multidimensionali (Ferré-Bigorra *et al.*, 2022), i gemelli digitali si sono rapidamente affermati come strumenti centrali in ambito sia scientifico sia operativo. Il loro valore risiede nella capacità di rappresentare in modo sintetico e accurato sistemi urbani complessi, integrando informazioni storiche e flussi dati in tempo reale, abilitando la simulazione di scenari evolutivi e impatti potenziali, e supportando processi decisionali tempestivi sia nella gestione operativa che nella pianificazione tattico-strategica (Andreani *et al.*, 2024). La progettazione e la gestione degli edifici, ad esempio, sono oggetto di una trasformazione profonda, soprattutto per l'urgenza di offrire soluzioni di adattamento ai cambiamenti climatici. Grazie ai gemelli digitali è possibile simulare interazioni ambientali in tempo reale per ottimizzare la resilienza delle infrastrutture. Una revisione sistematica della letteratura scientifica, condotta su studi dell'ultimo decennio attraverso i database di *IEEE Xplore*, *ScienceDirect* e *Scopus*, mostra che i gemelli digitali permettono una riduzione del consumo di energia fino al 30%, dei costi operativi del 25% e un notevole miglioramento dell'adattabilità al clima attraverso sistemi di controllo interni agli edifici e un'integrazione nella pianificazione su scala urbana (Aleke *et al.*, 2025).

<sup>2</sup> Si veda Destination Earth: <https://destination-earth.eu/> (consultato il 10/12/2025).

In linea generale, le principali questioni sollevatesi nel dibattito scientifico e politico scaturito da questi temi vertono sul livello di risoluzione e accuratezza, che discendono dal tipo di dati disponibili e dalla scala di acquisizione, intervallo temporale e copertura spaziale. Sono, questi ultimi, dei parametri che chiaramente influiscono sulla qualità attesa del gemello digitale (Batty, 2018; Batty, 2024). Non manca chi si interroga sui costi, anche computazionali ed energetici, che la realizzazione e il mantenimento di un *digital twin* comportano sia nell'ambito dell'Industria 4.0, dove oramai sono ampiamente impiegati (Oetl *et al.*, 2023), sia nell'ambito dell'industria delle costruzioni (Che Haron e Muhd Zafir, 2025) o dei sistemi di mobilità e trasporti (Hui *et al.*, 2022). Tuttavia, le questioni connesse all'integrazione dei dati e alla sicurezza informatica dei sistemi rimangono centrali, poiché l'aumento della pericolosità delle minacce e, per conseguenza, della vulnerabilità dei *digital twin* ne inficia il livello di affidabilità strutturale (Grieves e Vickers, 2017; Mun *et al.*, 2025).

Fatte queste doverose premesse e delineati i principali e recentissimi ambiti di applicazione, vorrei porre alcune domande, che ritengo potranno essere di interesse entro lo spazio di riflessione e di indagine della geografia. L'utilizzo esteso dei *digital twin*, al di fuori di casi di successo su piccola scala (Industria 4.0, costruzioni, mobilità) è attualmente circoscritto a un numero limitato di implementazioni in contesti urbani molto sviluppati, dove il paradigma della smart city è applicato nella pianificazione e governo del territorio da oltre un decennio; contestualmente, come già accennato, si sta cercando di sviluppare su scala globale attraverso il finanziamento di progetti mirati alla realizzazione di modelli digitali della superficie terrestre ad alta risoluzione e alla modellazione dell'atmosfera, idrosfera e criosfera. È quindi ancora presto per poter spingersi in valutazioni rigorose sugli effettivi benefici che quest'innovazione apporterà in relazione alle aspettative che vi sono riposte; tuttavia è bene interrogarsi su alcuni dei possibili effetti attesi e non attesi derivanti dall'implementazione dei *digital twin*.

3. ALCUNE RIFLESSIONI GEOGRAFICHE. – Per fornire una chiave interpretativa, partirò da una citazione presa a prestito da Winston Churchill, che nell'ottobre del 1943 pronunciò un discorso alla *House of commons*, riportata alla sua dignità originaria a due anni di distanza dai bombardamenti che l'avevano distrutta. In seno al discorso celebrativo, egli affermò che “we shape our buildings, and afterwards our buildings shape us”. Quest'affermazione può essere trasposta nella relazione che gli esseri umani intrattengono, in generale, con le tecnologie, specie quelle digitali, e in particolare con la loro progettazione. È infatti necessario essere consapevoli che una prospettiva etica è imprescindibile, dal momento che essa non riguarda semplicemente il modo in cui le tecnologie vengono utilizzate, ma anche il modo in cui, a loro volta, finiscono per plasmare gli utilizzatori stessi. Nel processo di

territorializzazione dello spazio naturale, le comunità umane attivano pratiche di appropriazione simbolica, materiale e organizzativa aventi un'incidenza crescente nell'imprimere un nuovo volto allo spazio originario (Turco, 1988; 2010). Nell'atto di reificare, così come in quello di dare un'organizzazione (o una disorganizzazione) allo spazio, si palesa il tentativo di trasferire una *forma mentis* astratta nelle forme concrete che lo spazio viene ad assumere, tanto che alcuni architetti arrivano a considerare i manufatti stessi (oggetti, edifici, città) come “pensiero solido”. La relazione, però, non è unidirezionale; anzi, come ben sintetizzano le parole di Churchill, le nostre costruzioni e configurazioni finiscono per imprimere a loro volta una forma a noi stessi, costruendo uno sfondo organizzato per la formulazione dei nostri pensieri e per la tessitura delle nostre relazioni.

Posta questa condizione assiomatica, è lecito chiederci se l'utilizzo pervasivo di gemelli digitali della realtà fisica potrà in qualche misura ingenerare nuove forme di territorializzazione poiché, di fatto, il *digital twin* può essere considerato come un artefatto spazialmente rilevante, che è al contempo replicativo (rispetto allo stato presente), cognitivo e predittivo (rispetto ai possibili stati evolutivi futuri). Quanto, quindi, questo modello dinamico possa performare la realtà, e non solo esserne informato, è uno degli aspetti più interessanti, a mio avviso, di questa tecnologia.

Un altro punto degno di nota concerne il fatto che in un futuro oramai presente si tenderà a conoscere e controllare la realtà attraverso un insieme di modelli che in sé costituiscono dei surrogati della realtà che rappresentano. Ne consegue che quanto di autorità decideremo di delegare al modello dovrà essere commisurato alla solidità che il modello stesso garantisce. I tradizionali modelli virtuali 3D, anche se incorporano processi in tempo reale (su dimensioni quali il traffico, i consumi di energia, i flussi e i comportamenti delle persone, le temperature, l'inquinamento dell'aria, ecc.), rimangono rappresentazioni significative soltanto per brevi periodi di tempo e limitatamente a una sezione trasversale della città (Lei *et al.*, 2023). In altre parole, essi sono molto più simili a un modello computerizzato convenzionale, capace di astrarre solo un insieme limitato di variabili e processi, utile alla predisposizione di quadri conoscitivi. I *digital twin*, invece, che adottano modelli di intelligenza artificiale di grandi dimensioni (in particolare reti neurali, *machine, deep e reinforcement learning*) permettono di mettere a punto modelli in grado di elaborare enormi quantità di variabili abbattendo le limitazioni dei modelli computazionali tradizionali, sia per le predizioni che per le simulazioni con i modelli generativi. Tuttavia, come ogni modello, che è per definizione una sintesi parziale della realtà, anche il gemello digitale si presenta in questa sua nuova declinazione come definito dalle variabili che sono scelte come significative per simulare il comportamento reale e, pertanto, la realtà che esso rappresenta sarà condizionata dalle variabili selezionate e dagli algoritmi utilizzati per analizzarle.

Qual è, quindi, la realtà che sta dietro al modello e quanto il modello è fedele alla realtà che rappresenta? Inoltre, quanto possiamo dire in merito alla trasparenza dei modelli? (Ye e Goodchild, 2025).

La domanda si arricchisce di sfumature se pensiamo che il *digital twin* non solo replica la realtà, ma orienta l'azione futura su di essa attraverso l'elaborazione di scenari predittivi. La realtà (anche nelle scale di analisi più piccole) è un insieme denso e variamente intrecciato di componenti fisiche e immateriali, in cui la percezione del soggetto che la rappresenta ha un peso costitutivo non marginale. Quale dei mondi possibili è sintetizzato entro un modello? Ciascuno, nel definire il proprio modello, può cogliere componenti, aspetti, relazioni, topologie che ritiene fondamentali e che per altri non lo sono. Ciascuno può immaginare mondi diversi, sia come interpretazione dell'esistente, sia come sforzo progettuale e creativo, la cui concretizzazione è sempre più spesso subordinata al raggiungimento di indicatori di performance (KPIs) arbitrariamente stabiliti. La perimetrazione e la contestualizzazione di questo 'arbitrio' è quindi un argomento rilevante nell'analisi di quali potranno essere le prossime relazioni con la spazialità.

In un saggio di qualche anno fa dal titolo *On Drawing Lines on a Map*, il filosofo B. Smith (1995) si soffermava sul significato che assume l'atto di disegnare una linea su una carta, quando essa si oggettiva in una separazione nella realtà fisica (*dividing reality*), ovvero si traduce nella posizione di un confine, che egli distingue possa essere riconducibile a una delle tipologie dicotomiche dei confini che esistono indipendentemente (*bona fide*) o che non esistono indipendentemente dagli atti cognitivi umani (*fiat*)<sup>3</sup>. Nel definire un modello si pongono necessariamente dei confini: a quale porzione di spazio si limita la replica? Quali elementi materiali e immateriali sono dentro il confine? Quali fuori? Quanto il limite è artificiale?. Il più grande vantaggio del *digital twin* è quello di prefigurare scenari futuri, controllare i possibili stadi di evoluzione di uno spazio digitalmente duplicato nelle sue componenti principali, analizzandone il comportamento e con questo controllarne meglio l'evoluzione nello spazio dei processi umani e naturali. Esso risponde, nell'atto di monitorare e indirizzare gli interventi, alla necessità di allineare la realtà all'idea che di essa si vuole dare forma.

Se si chiedesse a diversi gruppi di persone quali componenti della città in cui vivono dovrebbero essere inclusi in un gemello digitale, si avrebbero sicuramente risposte diverse, solo in parte intersecabili e probabilmente nell'intorno di quei fattori che sono ritenuti un bene comune. Maggiore è il grado di disomogeneità

<sup>3</sup> “*Bona fide* boundaries are boundaries which exist independently of all human cognitive acts - they are a matter of qualitative differentiations or discontinuities in the underlying reality. [...] Let us call boundaries of this created sort *fiat* boundaries [...]. *Fiat* boundaries are boundaries which exist only in virtue of the different sorts of demarcations effected cognitively by human beings” (Smith, 1995, p. 476, corsivi dell'autore).

del campione, maggiore sarà verosimilmente la varianza nei modelli che si vanno a delineare. Ne consegue che un duplice carico di responsabilità, tecnico-scientifica ed etica, sia in capo ai soggetti preposti alla definizione dei modelli (van Meerten e Smit, 2025; Ye e Goodchild, 2025). Non si può trascurare, infatti, il rischio che per via di una standardizzazione dei processi di modellizzazione, delle tecniche impiegate e dei KPI da raggiungere si ingenerino situazioni che, pur geograficamente diverse, mostrino un alto grado di omologazione. Il problema dell'integrazione della dimensione sociale e culturale nei *digital twin* urbani (UDT) sta attirando l'attenzione degli studiosi proprio perché ancora essi rimangono concentrati prevalentemente sugli aspetti fisici degli ambienti urbani, trascurando le dimensioni sociali interconnesse, certo più difficili da astrarre in un modello, ma determinanti per la formulazione di gemelli digitali di 'luoghi' e non semplicemente di 'spazi', nei quali si possa superare la divergenza tra sistemi tecnologici generici e vissuti urbani specifici.

Come già accennato, i *digital twin* a grande scala non possono essere considerati artefatti neutrali. Il loro sviluppo si basa infatti su scelte progettuali che implicano la selezione dei dati da includere, così come dei soggetti chiamati a condurre analisi e ad adottare misure fondate su di essi. A ciò si aggiunge il fatto che, all'aumentare della scala geografica, cresce anche la quantità di incertezza che deve essere gestita. Inoltre, la percezione umana rivela la prospettiva attraverso cui le persone interpretano l'ambiente costruito; tuttavia, data la difficoltà di tradurla in un sistema digitale, si finisce spesso per trascurare l'elemento umano nella definizione del modello (Lei *et al.*, 2024; Qanazi *et al.*, 2025). È però molto probabile che tecnologie di intelligenza artificiale sempre più raffinate riescano, in futuro, a dar voce agli attributi percettivi e alle visioni locali cui le realizzazioni attuali non attribuiscono ancora un adeguato rilievo.

Un altro aspetto su cui porre attenzione riguarda la distribuzione delle disuguaglianze spaziali, che potrebbero essere amplificate da una sbilanciata adozione dei gemelli digitali tra regioni con una più alta propensione all'innovazione e all'investimento di capitali nello sviluppo tecnologico e regioni contrassegnate da condizioni di marginalità o di sviluppo strutturalmente fragile.

La progettazione e realizzazione di un *digital twin*, sia esso nell'Industria 4.0 o nella pianificazione urbana, richiede un calcolo dei costi implementativi che devono comprendere anche quelli legati alle risorse umane impiegate nell'utilizzo e manutenzione, soprattutto in termini di formazione delle competenze. Studi recenti documentano proprio queste necessità come una delle sfide principali per la buona riuscita dei modelli (Oetl *et al.*, 2023; Lei *et al.*, 2023). Nella scelta di adottare un gemello digitale, quindi, incideranno la disponibilità di finanziamenti da un lato e la presenza di condizioni di contesto (competenze, attitudini, relazioni, ecc.) che la favoriscono. In ambito extraeuropeo, la storia economica e urbanistica di esempi

come Singapore e Dubai spiega bene certi indirizzi ipertecnologici, che fanno da cornice coerente alla presenza di sperimentazioni di *digital twin* già mature. In Europa, come emerge da un recente rapporto tecnico teso a fornire un'analisi della distribuzione regionale delle competenze tecnologiche e scientifiche legate alle tecnologie *green*, digitali e *twin* (Romero-Goyeneche *et al.*, 2025), i *digital twin* sono piuttosto intesi come il risultato della convergenza tra tecnologie dell'automazione digitale – quali IA, robotica, *additive manufacturing* – e tecnologie *green*, orientate alla sostenibilità e alla mitigazione del cambiamento climatico. L'indagine, condotta attraverso l'analisi dei brevetti nei domini del digitale e del *green*, nonché della loro sovrapposizione semantica nelle pubblicazioni scientifiche, consente di individuare almeno quattro traiettorie regionali. Si va da regioni con un'elevata specializzazione in entrambi i domini, che presentano un manifesto potenziale per lo sviluppo dei *digital twin*, a regioni con una forte capacità limitata agli ambiti dell'automazione. Vi sono poi regioni solide nelle tecnologie ambientali ma deboli sul versante digitale e, infine, regioni 'intrappolate' in attività economiche a bassa complessità. Queste ultime tendono ad accrescere la propria dipendenza da tecnologie inquinanti e inefficienti e faticano chiaramente ad attivare soluzioni basate sul gemello digitale (Balland e Boschma, 2024). Da ciò emerge un quadro in cui le disuguaglianze regionali sono marcate, con aree ad alto reddito (come ad esempio Oberbayern, Île-de-France) in posizione di vantaggio rispetto a quelle per esempio dell'Europa orientale che, con infrastrutture tecnologiche più deboli, si trovano ad affrontare barriere sostanziali nella produzione di tecnologie digitali e verdi. È evidente che un mancato bilanciamento tra regioni può aumentare le disuguaglianze e che quelle realtà in cui mancano reti collaborative solide o capacità di assorbimento rischiano di restare escluse dalla cosiddetta transizione gemella.

4. RIFLESSIONI CONCLUSIVE. – Nei paragrafi precedenti si è cercato di delineare un quadro teorico entro cui prendere in esame un recente artefatto digitale, attraverso una lente interpretativa geografica, vale a dire non esclusivamente focalizzata sugli aspetti problematici della progettazione e dello sviluppo tecnologico del gemello digitale. Solo in maniera indiretta sono state toccate questioni che, benché si stiano evidenziando come fondanti, ancora poco animano il dibattito scientifico, in gran parte schiacciato sull'enfasi conseguente all'ottimizzazione dei processi produttivi e di *decision-making* a cui si assiste oggi.

In tutti i processi decisionali, uno dei problemi centrali è quello che ruota intorno alla dicotomia affidabilità/fiducia (*trustworthiness* vs. *trust*). Due sono, infatti, gli ordini di 'fiducia': il primo è connesso alla misura dell'affidabilità del sistema (le componenti replicate, le variabili e i dati considerati, gli algoritmi previsionali, ecc.), che si traduce nel restituire solide ricostruzioni dello stato di fatto e buone previsioni sul futuro; il secondo è dato dalla misura di quanto gli utilizzatori si

fidino del gemello digitale e della sua capacità di replicare la realtà con la massima aderenza ad essa. Già nella seconda metà del secolo scorso, la scoperta del cosiddetto “caos deterministico” ha rivelato che anche sistemi dinamici apparentemente semplici, cioè descrivibili da poche equazioni differenziali non lineari, possono manifestare un comportamento caotico, generando traiettorie decisamente influenzabili dalle condizioni di partenza e con divergenze esponenziali tali da rendere difficile una prevedibilità entro intervalli di confidenza ristretti sul lungo termine. Ciò ha avuto una grande influenza nell’epistemologia della previsione stessa, con ricadute transdisciplinari, dall’astrofisica, alla meteorologia, all’economia, alle dinamiche ecologiche e demografiche. L’acquisizione della conoscenza che variazioni anche minime nelle condizioni iniziali possano condurre a esiti macroscopicamente lontani tra loro ha inficiato il concetto stesso di prevedibilità dei sistemi.

La rappresentazione virtuale in un gemello digitale viene aggiornata dinamicamente dai nuovi dati che il mondo fisico fornisce grazie a sensori, telerilevamento, Internet, ecc. L’insieme delle simulazioni e previsioni, basate su tecniche raffinate di intelligenza artificiale che si snodano all’interno della rappresentazione virtuale, muove relativi interventi e determina cambiamenti nella controparte fisica. Il gemello digitale crea una nuova spazialità, che è replica dello spazio geografico e allo stesso tempo dialogante con esso, in un mutuo scambio performativo. Non si può ancora dire in che misura queste nuove realtà parallele che stiamo plasmando finiranno con il plasmare noi stessi, per riprendere la suggestione churchilliana. Che le rappresentazioni del mondo, la carta geometrica *in primis* possa precedere il territorio (Baudrillard, 1983) è argomento su cui i geografi hanno dibattuto per lungo tempo e su cui non vale la pena qui ritornare, se non per riflettere sulla necessaria consapevolezza che, per quanto raffinato e sempre più indispensabile alla gestione di processi complessi, il gemello digitale è un surrogato della realtà fisica.

Alcuni autori, a partire da un recente rapporto della statunitense *National academies of sciences, engineering, and medicine* (2023), auspicano una riformulazione sui gemelli digitali, soprattutto su scale ampie a partire da quella urbana, in modo che diventino infrastrutture civiche, che siano al contempo deliberative, trasparenti nei meccanismi di analisi, adattabili a contesti differenti ed eticamente giuste. Come questi scopi possano essere raggiunti nel breve tempo rimane materia di studio che richiede il concorso di discipline e approcci differenti, che abbraccino competenze tecnico-scientifiche (*data science*, GIS, modellazione spaziale, simulazione, ecc.) e umanistiche in senso lato (analisi dei processi sociali e territoriali, ragionamento etico, teoria critica e comunicazione pubblica).

Non è difficile prevedere che i gemelli digitali assumeranno un ruolo sempre più centrale in quegli ambiti in cui è necessario prendere decisioni in tempi rapidi, anche a fronte di un elevato numero di variabili. In questo modo, essi confermano un approccio di governance sempre più *data-driven*. Allo stesso modo, saranno

sempre più centrali nelle modalità con cui le decisioni prese verranno comunicate in forza dell'immediatezza comunicativa che la rappresentazione tridimensionale e la simulazione possiedono intrinsecamente. Va da sé che tutte le questioni sopra menzionate, riguardanti la cura del dato, ivi compresa la sua manutenzione nel tempo, e la responsabilità nei confronti dell'adozione di un disegno eticamente solido che coinvolga tutti i soggetti in gioco, debbano procedere in parallelo, pena il rischio non marginale di costruire dei modelli iniqui sui quali si verrà a plasmare la realtà (Ye e Goodchild, 2025).

Non si può non aspettarsi che la diffusione di gemelli digitali basati sul *machine learning* e sui dati non porti un cambio di paradigma nella modellazione urbana. Il problema si sposta, quindi, su quali saranno i principi che legittimeranno e conferiranno credibilità a questi modelli centrali nell'attuazione di pianificazioni e quanto margine di scostamento dalle indicazioni di tali modelli rimane nei soggetti che in fine dovranno assumere le decisioni. In generale, la conoscenza specifica di dominio, condivisa e verificata, è essenziale per conferire credibilità ai modelli utilizzati nel supporto alle decisioni e per garantirne la responsabilità, grazie a regole su raccolta dati e progettazione, calibrazione e interpretazione dei risultati. Modelli che si basano solo su tecniche generiche di adattamento ai dati, senza un solido quadro teorico per riconoscere distorsioni o errori, esasperano il rischio che eventuali *bias* nei dati di addestramento si propaghino nel modello, senza che se ne possa avere corretta consapevolezza e portando a previsioni erranee o problematiche. A questo si aggiunga la difficoltà di gestire i processi culturali, politici e socio-economici, ancora non risolta, nonostante alcune embrionali sperimentazioni in cui si cercano soluzioni per tradurre informazioni così eterogenee e soggette a continua variazione nel tempo in dati computabili dai modelli. Nella modellazione, il ciclo iterativo di calibrazione e validazione è fondamentale per garantire la qualità del modello e per far progredire le conoscenze e, come è facile capire, richiede un enorme dispendio di energie, umane e finanziarie, per la corretta e costante messa a punto. Inoltre, i modelli più recenti sono pensati di preferenza su dati in tempo reale, spesso non strutturati, sui quali gli algoritmi cercano di individuare *pattern* o prevedere tendenze senza l'obbligo di confrontarsi con quadri teorici, ma più spesso con metriche statistiche generiche, senza verificare i meccanismi causali e spesso non spiegabili. Pertanto, seppur si presentino come estremamente interessanti, sembra ancora prematuro e pericoloso affidarsi a loro ciecamente come sostituti del giudizio umano (Wan *et al.*, 2024).

L'applicazione dei *digital twin* è senz'altro promettente, ma deve essere riconosciuta l'inevitabile incertezza insita in ogni replica del mondo reale. L'accuratezza del modello varia a seconda della qualità e quantità di informazione che lo alimenta e deve sempre essere valutata rispetto a uno scopo preciso (*fitness for use*).

L'incertezza pone problemi difficili, poiché molte entità geografiche non sono o non possono essere definite in modo rigoroso, e, inoltre, nei modelli complessi l'incertezza si propaga tra dati correlati, con assunzioni forti e talvolta irrealistiche. La quantificazione pratica dell'incertezza nei *digital twin*, soprattutto quelli dinamici e predittivi, risulta quindi estremamente difficile e ignorarla o presentare previsioni come accurate è un comportamento eticamente scorretto che può portare a conseguenze disastrose (Bonin e Frankhauser, 2025).

Difficile dire quanto il paradigma tecnologico che sottende queste recenti innovazioni sia anche tecnocratico. Di sicuro si può affermare che esse comportano l'insorgere di nuove sfide, quando si tratta di verifica, validazione e quantificazione dell'incertezza insita nella modellazione e nella simulazione sempre più complesse e dinamiche. Proprio gli aggiornamenti dinamici, che sono una componente chiave della tecnologia dei *digital twin*, costituiscono un problema, per risolvere il quale c'è bisogno di nuovi metodi in grado di adattarsi ai cambiamenti nei modelli, ai cambiamenti nei dati e ai cambiamenti nel contesto di previsione e decisione. Sarà sempre più essenziale tenere conto in modo rigoroso e sistematico delle incertezze *end-to-end* nel gemello digitale, dall'assimilazione e inferenza dei dati al processo decisionale predittivo del modello. In altre parole, la componente umana non dovrà rinunciare a un ruolo primario nella responsabilità della decisione, secondo un approccio progettuale che la vede coinvolta direttamente nei processi di interazione con le diverse intelligenze artificiali (*human-in-the-loop*). Poter contare su sistemi intelligenti basati sui dati ad alta affidabilità è nei fatti estremamente comodo, ma allo stesso tempo pericoloso. Craig Martell, *Chief Data and AI Officer* del Pentagono, in un articolo apparso sul Washington Post nel febbraio del 2024 affermava: "Everyone wants to be data-driven. Everyone wants it so badly that they are willing to believe in magic" (Martell, 2024). La magia si deve manifestare nella capacità di fare una scelta.

## Bibliografia

- Adreani L., Bellini P., Fanfani M., Nesi P., Pantaleo G. (2024). Smart city digital twin framework for real-time multi-data integration and wide public distribution. *IEEE Access*, 12: 1-27. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3406795.
- Aleke C.U., Ovie E.O., Asere J.B., Oriakhi E.A., Igah G.C., Ajibade O.E., Egbuna I.K. (2025). Digital twins for climate resilient infrastructure: simulating environmental impact on buildings. *Asian Journal of Geographical Research*, 8(2): 132-41. DOI: 10.9734/ajgr/2025/v8i2270.
- Balland P.-A., Boschma R. (2024). An evolutionary approach to regional development traps in European regions. *Papers in Evolutionary Economic Geography (PEEG)*, 2420, Utrecht University.

- Batty M. (2018). Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45: 817-993. DOI: 10.1177/2399808318796416.
- Batty M. (2024). Digital twins in city planning. *Nature Computational Science*, 4: 192-199. DOI: 10.1038/s43588-024-00606-7.
- Baudrillard J. (1983). *Simulations*. New York: Semiotexte.
- Bonin O., Frankhauser P. (2025). Digital twins versus simulation models and planning concepts: Increasing the resemblance between a digital twin and the modeled territory to facilitate the construction and evaluation of urban scenarios. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, Vol. 0(0): 1-16. DOI: 10.1177/23998083251318474.
- Boyes H., Watson T. (2022). Digital twins: An analysis framework and open issues. *Computers in Industry*, 143: 103763. DOI 10.1016/j.compind.2022.103763.
- Casola L., a cura di (2023). Opportunities and challenges for digital twins in biomedical research. *Proceedings of a Workshop in Brief. National Academy of Engineering; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*. Washington, DC: The National Academies Press. DOI: 10.17226/26922.
- Che Haron R., Muhd Zafir N.B. (2025). Digital twin application in construction cost management. *Planning Malaysia*, 23(1): 81-96. DOI: 10.21837/pm.v23i35.1665.
- Cimino C., Negri E., Fumagalli L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, 113: 103-130. DOI: 10.1016/j.compind.2019.103130.
- Garau C., Nesi P., Paoli I., Paolucci M., Zamperlin P. (2020). A big data platform for smart and sustainable cities: Environmental monitoring case studies in Europe. In: Gervasi O. *et al.*, a cura di, *International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA)*. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-58820-5\_30.
- Gil J., Petrova-Antonova D., Kemp G.J. (2024). Redefining urban digital twins for the federated data spaces ecosystem: A perspective. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 0(0). DOI: 10.1177/23998083241302578.
- Glaessgen E., Stargel D.S. (2012). Digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. *Paper for the 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin*: 1-14. DOI: 10.2514/6.2012-1818.
- Goodchild M.F., Connor D., Fotheringham, A.S. *et al.* (2024). Digital twins in urban informatics. *Urban Info*, 3(1): 16. DOI: 10.1007/s44212-024-00048-6.
- Grievés M. (2014). *Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication*. Whitepaper. DOI: 10.20944/preprints202305.1758.v1.
- Grievés M., Vickers J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: Kahlen J., Flumerfelt S., Alves A., eds., *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7\_4.
- Hui Y., Ma X., Su Z., Cheng N., Yin Z., Luan T. H., Chen Y. (2022). Collaboration as a service: Digital-twin-enabled collaborative and distributed autonomous driving. *IEEE Internet Things J.*, 9 (19): 18607-18619. DOI: 10.1109/jiot.2022.3161677.

- Lei B., Janssen P., Stoter J., Biljecki F. (2023). Challenges of urban digital twins: A systematic review and a Delphi expert survey. *Automation in Construction*, 147: 104716. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104716.
- Lei B., Liang X., Biljecki F. (2024). Integrating human perception in 3D city models and urban digital twins. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10: 211-218. DOI: 10.5194/isprs-annals-x-4-w5-2024-211-2024.
- Lévy P. (1994). *L'Intelligence collective. Pour une anthropologie du cyberspace*. Paris: La Découverte, trad. it. (2002), *L'intelligenza collettiva. Per un'antropologia del cyberspazio*. Milano: Feltrinelli.
- Martell C. (2024). Pentagon explores military uses of large language models. *The Washington Post*, February 20, 2024: [www.washingtonpost.com/technology/2024/02/20/pentagon-ai-llm-conference/](http://www.washingtonpost.com/technology/2024/02/20/pentagon-ai-llm-conference/) (consultato il 12 dicembre 2025).
- Mun H., Han K., Damiani E., Yeun H.K., Kim T.Y., Martino L., Yeun C.Y.,(2025). A comprehensive survey on digital twin: Focusing on security threats and requirements. *IEEE Access*, 13: 73362-73390. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3563621.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine – NASEM (2023). *Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins*. Washington DC: National Academies Press.
- Nativi S., Craglia M. (2023). Digital twins of the earth. In: Daya Sagar B.S., Cheng Q., McKinley J., Agterberg F., eds., *Encyclopedia of Mathematical Geosciences. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-85040-1\_457.
- Oettl F., Eckart L., Schilp J. (2023). Cost estimation approach of a digital twin implementation in industry. *Procedia CIRP*, 118: 318-323. DOI: 10.1016/j.procir.2023.06.055.
- Qanazi S., Leclerc E., Bosredon P. (2025). Integrating social dimensions into urban digital twins: A review and proposed framework for social digital twins. *Smart Cities*, 8(23). DOI: 10.3390/smartcities8010023.
- Romero-Goyeneche O.Y., Boschma R., Li D. (2025). *The Geography of the Green, Digital and Twin Technological and Scientific Specialisation in Europe*. Technical Report, Project: Strategies for just and equitable transitions in Europe (ST4TE).
- Smith B. (1995). On drawing lines on a map. In: Frank A.U., Kuhn W., Mark D.M., eds., *Spatial information theory: Proceedings of COSIT 1995*. New York: Springer.
- Tomczyk M., van der Valk H. (2022). Digital twin paradigm shift: The journey of the digital twin definition. *Proceedings of the 24th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2022)*, 2: 90-97. DOI: 10.5220/0010997600003179.
- Turco A. (1988). *Verso una teoria geografica della complessità*. Milano: Unicopli.
- Turco A. (2010). *Configurazioni della territorialità*. Milano: FrancoAngeli.
- van der Valk H., Haße H., Möller F., Arbter M., Henning J.-L., Otto B. (2020). A taxonomy of digital twins. *AMCIS 2020 Proceedings, Organizational Transformation & Information Systems (SIGORSA) 2018*: 1-10.
- van Meerten J., Smit K. (2025). The impact of digital twin technology on the policy lifecycle in government agencies and the role of value-sensitive design in guiding its ethical development. *ICS&B '24: Proceedings of the 2024 8th International Conference on Software and e-Business*: 37-44. DOI: 10.1145/3715885.3715891.

- Wan L., Jin Y., Echenique M., Batty M., Wegener M. (2024). From urban modelling to city digital twins – Reflections from the applied urban modelling (AUM) symposia. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 0(0). DOI: 10.1177/23998083241279601.
- Ye X., Goodchild M. (2025). Toward ethical geodesign in the urban digital twin era. *Journal of Planning Education and Research*, 45(4): 721-725. DOI: 10.1177/0739456X251359233.