

La gestione digitale dei sistemi urbani: una chiave per affrontare le sfide della sostenibilità ambientale nel settore edilizio

Federico Cinquepalmi, Virginia Adele Tiburcio

Il problema della sostenibilità ambientale è sempre più critico, in particolare nelle aree ad alta densità abitativa e urbane, dove l'impatto delle attività umane è significativo.¹ La sostenibilità si riferisce alla capacità di mantenere un equilibrio tra l'uso delle risorse naturali e la conservazione dell'ambiente.²

Attualmente, i sistemi urbani e l'ambiente costruito sono responsabili di circa il 75% delle emissioni di gas serra a livello globale e consumano circa il 75% delle risorse energetiche del pianeta.³ Inoltre, oltre il 65% della popolazione mondiale vive e lavora nelle città, concentrando le attività emissive in tali contesti.⁴ Le aree del pianeta dove si supera il 75% di popolazione concentrata nelle città sono l'Europa occidentale e settentrionale, le Americhe, il Medio Oriente e l'Australia (Figura 1).

Per affrontare questa problematica, molte città in tutto il mondo stanno adottando normative e iniziative per promuovere la sostenibilità ambientale.⁵

¹ Bassi, F., & Petrillo, A. (2019). La sostenibilità ambientale delle aree urbane ad alta densità abitativa: sfide e opportunità. *Territorio*, 90, 15-24.

² Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press.

³ European Environment Agency. (2020). *Urban sustainability in Europe: insights from the assessment of the 100 European cities*. Publications Office of the European Union.

⁴ United Nations. (2018). *World urbanization prospects 2018*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.

⁵ Urban Land Institute. (2018). *Climate risk and real estate investment decision-making*. Urban Land Institute.

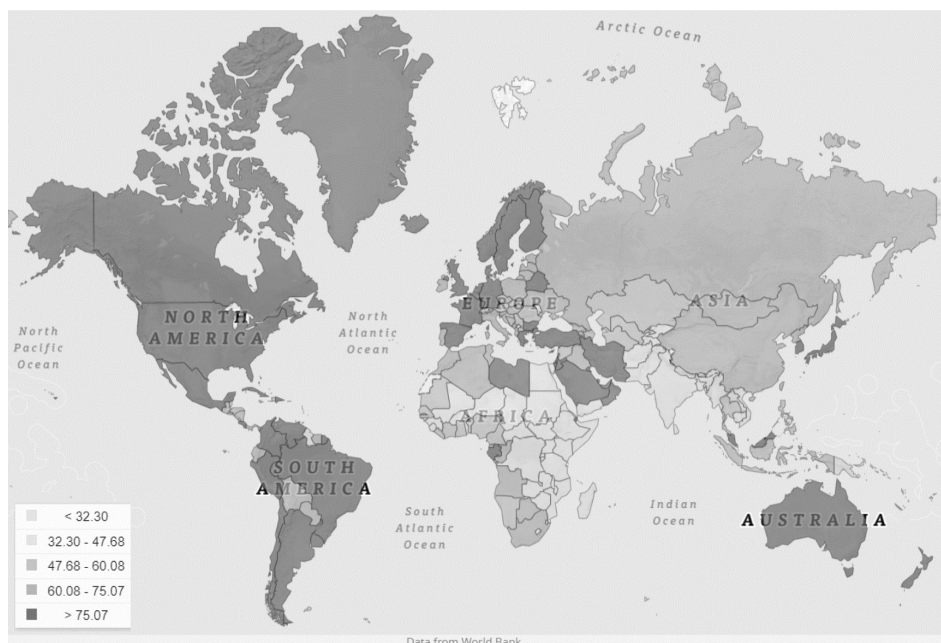


Figura 1 Carta della concentrazione di popolazione in area urbana per Paese a livello globale (United Nations Population Division. *World Urbanization Prospects: 2018 Revision* riportati ed elaborati graficamente da World Bank)

Quest'ultima costituisce un tema di crescente importanza nelle città europee. Secondo uno studio del 2020 della Commissione europea, le città europee hanno compiuto in anni recenti progressi significativi verso la sostenibilità; lo studio ha rilevato che il 97% delle città europee sta attuando politiche per ridurre le emissioni di gas serra, mentre il 91% sta promuovendo l'uso dei mezzi pubblici e delle biciclette e l'81% sta promuovendo l'uso di energie rinnovabili.⁶ Tuttavia, la gestione delle città è sempre più complessa a causa dell'aumento della domanda di energia elettrica, del consumo di acqua e delle emissioni di gas serra. La crescita della popolazione urbana e l'espansione delle città stanno mettendo a dura prova le risorse naturali e il loro uso rendendo la loro

⁶ Commissione Europea. (2020). *Towards a green and sustainable future for cities*. Recuperato il 13 marzo 2023, da https://ec.europa.eu/environment/european-green-capital/towards-green-sustainable-future-cities_en

impronta ecologica uno dei più gravi problemi di questo secolo.⁷

Il cambiamento climatico rende le città più vulnerabili a eventi meteorologici estremi, come alluvioni e siccità e emergono nuovi rischi per la salute pubblica legati all'inquinamento atmosferico ed ai suoi effetti diretti ed indiretti sulla popolazione.⁸ Queste sfide richiedono un'azione urgente e un approccio integrato che coinvolga una vasta gamma di interessati, tra cui governi locali, comunità, aziende, organizzazioni non governative e istituzioni accademiche.

“Le minacce ai sistemi urbani contemporanei, che siano endogene o causate da eventi e cambiamenti esterni, creano sfide che gli amministratori e i responsabili delle politiche urbane devono affrontare ogni giorno. Tali sfide a volte sembrano mettere in discussione l'idea stessa per cui la città è nata, ovvero creare un luogo sicuro e confortevole dove i cittadini possono vivere, prevenendo che i sistemi urbani si trasformino in trappole mortali.”

Per affrontare le sfide ambientali delle città, vengono adottate soluzioni innovative basate sulle tecnologie digitali come l'Internet delle cose (IoT), l'intelligenza artificiale (AI) e la realtà virtuale (VR).¹⁰ Le tecnologie IoT sono utilizzate per monitorare il consumo di energia e acqua in tempo reale, rilevare eventuali perdite e ridurre gli sprechi.¹¹ L'AI è usata per migliorare la gestione del traffico, prevedere le emissioni di gas serra e monitorare la qualità dell'aria.¹² La VR è utilizzata

⁷ United Nations. (2019). World Urbanization Prospects 2018. Recuperato il 13 marzo 2023, da <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>

⁸ Ibrahim, N., & Sahin, U. (2019). The relationship between urbanization and climate change. In *Handbook of Climate Change Communication: Vol. 3. Case Studies in Climate Change Communication* (pp. 197-209). doi: 10.1007/978-3-319-70066-3_14

⁹ Cinquepalmi F., *Towards (R)evolving Cities: Urban fragilities and prospects in the 21st century*. Didapress Firenze, 2021. pag 127.

¹⁰ Yigitcanlar, T., Kamruzzaman, M., & Buys, L. (2018). Planning, developing and managing smart cities: A review of key concepts, trends, and issues. *Cities*, 81, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.04.010>

¹¹ Gao, Y., Li, X., & Liang, X. (2019). Internet of Things and Big Data Analytics for Smart and Connected Communities. *IEEE Access*, 7, 42200-42214. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908868>

¹² Chen, S., Li, L., & Li, J. (2020). Intelligent transportation systems: A comprehensive survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(2), 803-821.

per simulare gli impatti di progetti futuri, consentendo decisioni informate sulla pianificazione del territorio. I Digital Twin forniscono una visione più completa e accurata dell'impatto ambientale delle attività umane sulle città e sui loro abitanti.¹³⁻¹⁴ La creazione di modelli digitali degli edifici e delle infrastrutture, combinati con dati sulle condizioni meteorologiche, sull'inquinamento dell'aria e sull'utilizzo delle risorse, consente di identificare potenziali rischi e prevenire danni ambientali e sanitari.

La digitalizzazione ha avuto un impatto significativo sull'intera filiera edilizia, dalla progettazione alla realizzazione, manutenzione e ristrutturazione degli edifici.¹⁵ Questo cambiamento ha influenzato l'evoluzione dell'architettura e aperto nuovi orizzonti per la progettazione, la costruzione e la gestione degli edifici. Le tecnologie digitali stanno cambiando la modalità di pensare l'architettura e la pianificazione urbana, permettendo di creare ambienti urbani più sostenibili e resilienti alle sfide ambientali del nostro tempo.

Negli ultimi anni, il settore delle costruzioni ha subito una significativa evoluzione normativa per integrare i metodi e gli strumenti digitali nella progettazione, nella costruzione e nella gestione degli edifici, il tutto allo scopo di favorire una maggiore sostenibilità ambientale.¹⁶ In particolare, la normativa europea ha riconosciuto l'importanza dell'utilizzo del 'Building Information Modeling' (BIM), come metodologia per l'analisi statica del patrimonio edilizio, che prevede la realizzazione di un modello tridimensionale digitale per la progettazione, la

<https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2903308>

¹³ RATTI, C., & PULSELLI, R. M. (2018). Digital twins to personalize urban environmental quality. *Science*, 360(6386), 961-962. <https://doi.org/10.1126/science.aat5211>

¹⁴ ZHANG, Y., & WANG, W. (2020). Digital Twins: A survey from the perspectives of applications, data analytics, and architecture. *Future Generation Computer Systems*, 111, 214-230. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.05.010>

¹⁵ EASTMAN, C., TEICHOLZ, P., SACKS, R., & LISTON, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. John Wiley & Sons.

¹⁶ VARGHESE, K., RAMACHANDRAN, M., & PRASAD, R. (2019). Smart buildings: Concepts, benefits, and challenges. In *Internet of Things (IoT): Technologies, Applications, Challenges and Solutions* (pp. 243-257). Springer.

costruzione e la gestione degli edifici. In linea con queste evoluzioni normative, la direttiva europea 2018/844/UE EPBD¹⁷ ha introdotto il concetto di “Smart Building”. Questo si basa sull’utilizzo di sensori e sistemi di automazione per monitorare e controllare i consumi energetici degli edifici in tempo reale, consentendo ai gestori degli edifici di individuare e risolvere rapidamente eventuali inefficienze e migliorare le prestazioni energetiche degli edifici.¹⁸ L’obiettivo principale del concetto di Smart Building è quello di creare edifici più intelligenti, efficienti e sostenibili, riducendo l’impatto ambientale e migliorando la qualità della vita degli occupanti.

Numerosi progetti di architettura sfruttano le tecnologie digitali per perseguire obiettivi di sostenibilità ambientale.¹⁹ Un esempio è il progetto della ‘Casa a Energia Positiva’, sviluppato dal Politecnico di Milano in collaborazione con la startup Energetica.²⁰ Il progetto impiega un sistema di pannelli solari, batterie e un sistema di gestione energetica intelligente per generare più energia di quella consumata, rendendo la casa a energia positiva. Il sistema di gestione energetica utilizza la tecnologia di intelligenza artificiale per ottimizzare l’uso dell’energia in base alle esigenze degli utenti.

La ricerca continua a svolgere un ruolo fondamentale nello sviluppo di nuove soluzioni per la sostenibilità ambientale nell’architettura. L’Università di Cambridge sta attualmente lavorando ad un progetto di ricerca per sviluppare sensori wireless che possono essere incorporati nei materiali da costruzione, consentendo un monitoraggio continuo

¹⁷ Direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio: *Che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell’edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull’efficienza energetica*. Gazzetta Ufficiale dell’Unione Europea, Bruxelles 30 maggio 2018.

¹⁸ LEE, G., & KIBERT, C. J. (2016). A review of building information modeling tools for sustainable design. *Sustainable Cities and Society*, 20, 99-108.

¹⁹ LI, J., LI, X., & PENG, Y. (2019). Application of Digital Technology in Architecture Design. *Proceedings of the 4th International Conference on Education, Management, and Systems Engineering (EMSE 2019)*, 117-122.

²⁰ POLITECNICO DI MILANO. (2021). Casa a energia positiva. <https://www.energy.polimi.it/casa-a-energia-positiva/>

delle prestazioni dell'edificio.²¹ Questo potrebbe consentire ai proprietari e ai gestori di edifici di individuare eventuali problemi e efficientare l'uso dell'energia.

Inoltre, la ricerca sulle nuove tecnologie di stampa 3D sta anche conducendo a nuove opportunità per l'architettura sostenibile. Ad esempio, lo studio di architettura 3D-printed Habitat attualmente lavora ad un progetto di stampa in 3D di case sostenibili utilizzando materiali biodegradabili e prodotti localmente. Ciò potrebbe ridurre i costi di trasporto e migliorare l'impatto ambientale.²² In generale, l'utilizzo delle tecnologie digitali può contribuire in modo significativo alla sostenibilità ambientale e la ricerca continua a giocare un ruolo importante nello sviluppo di nuove soluzioni innovative per affrontare le sfide della sostenibilità nell'ambiente costruito.^{23_24}

Dunque, la sostenibilità ambientale nelle città è diventata una sfida sempre più urgente e la tecnologia digitale ha dimostrato di poter offrire soluzioni innovative per affrontare queste criticità.²⁵ I progetti di architettura che utilizzano tecniche di digitalizzazione sono solo l'inizio di un percorso che promette di portare grandi benefici alla società. Tuttavia, è importante sottolineare che la tecnologia digitale da sola non è sufficiente in tal senso, ma deve essere accompagnata da una ricerca costante e approfondita per sviluppare soluzioni sempre

²¹ University of Cambridge. (2021). Researchers develop wireless sensors that stick to walls and ceilings to monitor buildings. <https://www.cam.ac.uk/research/news/researchers-develop-wireless-sensors-that-stick-to-walls-and-ceilings-to-monitor-buildings>

²² 3D-printed Habitat. (2021). 3D-printed Habitat. <https://www.3dprintedhabitat.com/>

²³ CABEZA, L. F., CASTELL, A., BARRENECHE, C., DE GRACIA, A., FERNÁNDEZ, A. I., & PÉREZ, G. (2016). Technological review of conventional heating and innovative cooling systems for the built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 201-215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.010>

²⁴ GUO, S., JIANG, J., & QIAN, Q. (2018). A comprehensive review on application of building information modeling (BIM) for sustainable building design. *Sustainability*, 10(10), 3609. <https://doi.org/10.3390/su10103609>

²⁵ Architectural Design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012012>

più avanzate e sostenibili.²⁶ Solo attraverso un impegno congiunto, con una stretta collaborazione tra il settore privato, pubblico e ricerca, sarà possibile creare un futuro più sostenibile per tutti.

L'architettura digitale ha visto un notevole miglioramento con l'avvento del concetto di 'Digital Twin', che consiste in una replica digitale e interattiva di un edificio, un quartiere o un'intera città. Questa tecnologia consente di simulare e prevedere il comportamento degli edifici e dei sistemi urbani in modo da ottimizzarne le prestazioni e garantire una maggiore sostenibilità ambientale.²⁷ In questo modo, è possibile valutare la performance energetica di un edificio, migliorare la gestione delle risorse idriche, e ridurre gli impatti negativi sulle persone e sull'ambiente.

Il potenziale dei Digital Twin nel settore delle costruzioni e dell'urbanistica è enorme, in quanto promuove una maggiore partecipazione democratica e una gestione più inclusiva e sostenibile degli edifici e delle città. La ricerca e lo sviluppo sono determinanti in questo processo, consentendo di migliorare e affinare le prestazioni e le funzionalità dei sistemi digitali e dei Digital Twin.²⁸

L'Urban Digital Twin rappresenta un paradigma di modellizzazione urbana che integra una vasta gamma di dati urbani, sistemi intelligenti e informazioni di digitalizzazione, al fine di migliorare la comprensione del funzionamento e della gestione delle città. Lo schema dell'Urban Digital Twin è organizzato intorno all'immagine centrale degli edifici reali e virtuali, che funge da rappresentazione grafica della città. I dati urbani, i sistemi intelligenti e le informazioni di digitalizzazione vengono quindi organizzati in categorie distinte e integrate in modo da consentire un'analisi completa della città. Infine, i dati vengono rap-

²⁶ KICHUK, K., & SCHLUETER, A. (2020). The Digital Twin in Sustainable Building Design and Construction. *Journal of Green Building*, 15(2), 165-184. <https://doi.org/10.3992/1943-4618.15.2.165>

²⁷ PORTER, A., & ROSS, A. (2017). Digital technologies and sustainable development: Reimagining sustainable cities. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 9(2), 129-145. <https://doi.org/10.1080/19463138.2016.1258798>

²⁸ FERRER, M. P., SCHLUETER, A., & FATHI, M. (2021). Building Information Modeling and Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review. *IEEE Access*, 9, 55320-55341.

presentati attraverso grafici e piattaforme, che consentono di visualizzare le informazioni in modo chiaro e accessibile, consentendo così un'analisi approfondita della città (Figura 2).

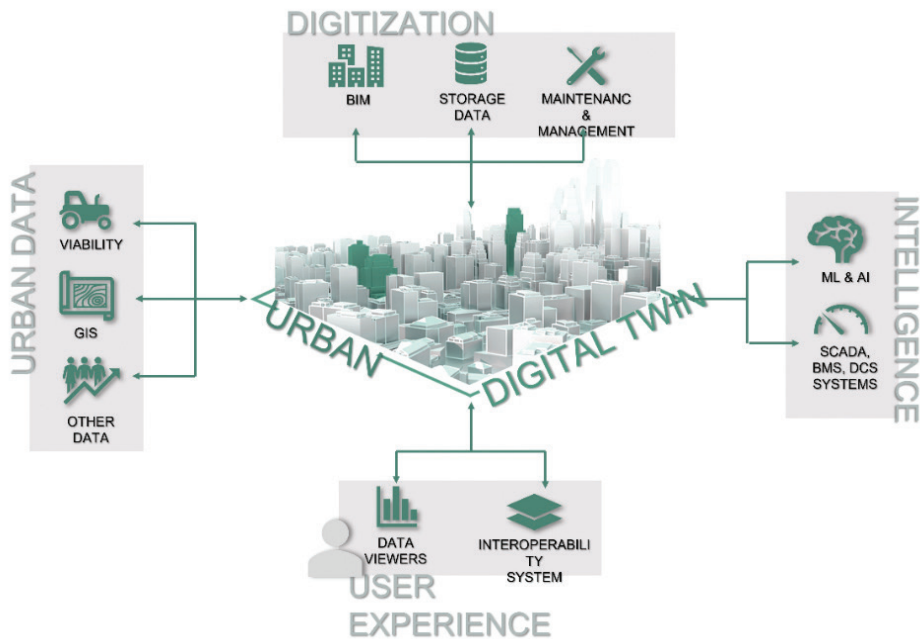


Figura 2 Schema esemplificativo delle relazioni funzionali all'interno di un Digital Twin Model applicato all'ambiente costruito

L'importanza del Digital Twin e di altre tecnologie innovative nel miglioramento della sostenibilità ambientale è stata oggetto di numerosi studi e ricerche. Ad esempio, uno studio del 2020 della società di ricerca di mercato MarketsandMarkets ha stimato che il mercato globale dei Digital Twin nel settore delle costruzioni crescerà da \$1,5 miliardi nel 2020 a \$6,4 miliardi entro il 2025, grazie alla crescente domanda di edifici sostenibili e alla necessità di ridurre i costi di progettazione e di costruzione²⁹. Analogamente, uno studio del 2021 di McKinsey & Com-

²⁹ MARKETSANDMARKETS. (2020). Digital Twin Market by Technology, Type (Product, Process, and System), Application (Predictive Maintenance, Machine Learning, and IoT), Industry (Aerospace & Defense, Automotive & Transportation, and Healthcare), and

pany ha evidenziato come l'utilizzo di tecnologie digitali come il Digital Twin possa portare a una riduzione significativa delle emissioni di gas a effetto serra nei settori dell'edilizia e delle infrastrutture. Lo studio ha anche sottolineato come l'adozione di tecnologie digitali possa contribuire a raggiungere gli obiettivi di sostenibilità e a ridurre i costi operativi degli edifici.³⁰

Infine, un rapporto del World Green Building Council del 2019 ha sottolineato come il Digital Twin possa consentire una maggiore trasparenza e collaborazione tra i professionisti del settore edilizio, migliorando l'efficienza e la sostenibilità degli edifici e delle città.³¹

Non c'è dubbio che il vasto processo di digitalizzazione avviato dalla seconda metà del ventesimo secolo abbia permesso una maggiore precisione e rapidità nella progettazione, grazie all'utilizzo di software di modellazione 3D e di analisi strutturale. La digitalizzazione ha inoltre reso possibile la creazione di prototipi virtuali degli edifici, noti come Digital Twin, che testano il comportamento strutturale e ambientale degli edifici in modo virtuale, prima ancora che siano costruiti fisicamente. L'innovazione tecnologica e l'utilizzo di strumenti come il Digital Twin rappresentano un grande passo verso la riduzione dell'impatto ambientale delle attività umane e la creazione di un futuro più sostenibile.

La ricerca sul Digital Twin è in costante evoluzione, con l'obiettivo di sviluppare soluzioni sempre più avanzate e personalizzate per rispondere alle esigenze specifiche dei progetti e dei contesti in cui vengono utilizzati. Attualmente, molte università e centri di ricerca in tutto il mondo stanno investendo nella ricerca e sviluppo di tecnologie innovative, tra cui i Digital Twin, per migliorare l'efficienza, la sostenibilità e la sicurezza degli edifici e delle città. Tuttavia, è fondamentale che l'adozione di queste tecnologie avvenga in modo responsabile ed efficiente, in modo da massimizzare i loro benefici e minimizzare gli eventuali impatti negativi.

Geography - Global Forecast to 2025.

³⁰ MCKINSEY & COMPANY. (2021). The Future is Now: How Digital Twins are Changing the Game.

³¹ World Green Building Council. (2019). Bringing Embodied Carbon Upfront: Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon.

Nonostante i numerosi vantaggi dei Digital Twin nel settore delle costruzioni e dell'urbanistica, sono ancora presenti alcuni ostacoli da superare, come la gestione dei dati e l'interoperabilità delle tecnologie.

Per sfruttare appieno il loro potenziale, è necessario investire nella ricerca e nello sviluppo di soluzioni avanzate e standardizzate, nonché nella formazione del personale e nella definizione di standard comuni. Solo attraverso queste azioni sarà possibile garantire una gestione più consapevole e sostenibile degli edifici e delle città.

Riferimenti:

1. BASSI, F., & PETRILLO, A. (2019). *La sostenibilità ambientale delle aree urbane ad alta densità abitativa: sfide e opportunità*. Territorio, 90, 15-24.
2. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press.
3. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. (2020). *Urban sustainability in Europe: insights from the assessment of the 100 European cities*. Publications Office of the European Union.
4. UNITED NATIONS. (2018). *World urbanization prospects 2018*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
5. URBAN LAND INSTITUTE. (2018). *Climate risk and real estate investment decision-making*. Urban Land Institute.
6. COMMISSIONE EUROPEA. (2020). *Towards a green and sustainable future for cities*. Recuperato il 13 marzo 2023, da https://ec.europa.eu/environment/european-green-capital/towards-green-sustainable-future-cities_en
7. UNITED NATIONS. (2019). *World Urbanization Prospects 2018*. Recuperato il 13 marzo 2023, da <https://population.un.org/wup/Publications/Files/Wup2018-Report.pdf>
8. IBRAHIM, N., & SAHIN, U. (2019). *The relationship between urbanization and climate change*. In *Handbook of Climate Change Communication: Vol. 3. Case Studies in Climate Change Communication* (pp. 197-209). doi: 10.1007/978-3-319-70066-3_14
9. CINQUEPALMI F., *Towards (R)evolving Cities: Urban fragilities and prospects in the 21st century*. Didapress Firenze, 2021. pag 127
10. YIGITCANLAR, T., KAMRUZZAMAN, M., & BUYS, L. (2018). *Planning, developing and managing smart cities: A review of key concepts, trends, and issues*.

- Cities, 81, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.04.010>
11. GAO, Y., LI, X., & LIANG, X. (2019). *Internet of Things and Big Data Analytics for Smart and Connected Communities*. IEEE Access, 7, 42200-42214. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908868>
 12. CHEN, S., LI, L., & LI, J. (2020). *Intelligent transportation systems: A comprehensive survey*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 21(2), 803-821. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2903308>
 13. RATTI, C., & PULSELLI, R. M. (2018). *Digital twins to personalize urban environmental quality*. Science, 360(6386), 961-962. <https://doi.org/10.1126/science.aat5211>
 14. ZHANG, Y., & WANG, W. (2020). *Digital Twins: A survey from the perspectives of applications, data analytics, and architecture*. Future Generation Computer Systems, 111, 214-230. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.05.010>
 15. EASTMAN, C., TEICHOLZ, P., SACKS, R., & LISTON, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. John Wiley & Sons.
 16. VARGHESE, K., RAMACHANDRAN, M., & PRASAD, R. (2019). *Smart buildings: Concepts, benefits, and challenges*. In *Internet of Things (IoT): Technologies, Applications, Challenges and Solutions* (pp. 243-257). Springer.
 17. DIRETTIVA (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio: Che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, Bruxelles 30 maggio 2018.
 18. LEE, G., & KIBERT, C. J. (2016). A review of building information modeling tools for sustainable design. *Sustainable Cities and Society*, 20, 99-108.
 19. LI, J., LI, X., & PENG, Y. (2019). *Application of Digital Technology in Architecture Design*. *Proceedings of the 4th International Conference on Education, Management, and Systems Engineering (EMSE 2019)*, 117-122.
 20. POLITECNICO DI MILANO. (2021). *Casa a energia positiva*. <https://www.energy.polimi.it/casa-a-energia-positiva/>
 21. UNIVERSITY OF CAMBRIDGE. (2021). *Researchers develop wireless sensors that stick to walls and ceilings to monitor buildings*. <https://www.cam.ac.uk/research/news/researchers-develop-wireless-sensors-that-stick-to-walls-and-ceilings-to-monitor-buildings>

22. 3D-PRINTED HABITAT. (2021). 3D-printed Habitat. <https://www.3dprintedhabitat.com/>
23. CABEZA, L. F., CASTELL, A., BARRENECHE, C., DE GRACIA, A., FERNÁNDEZ, A. I., & PÉREZ, G. (2016). *Technological review of conventional heating and innovative cooling systems for the built environment*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 201-215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.010>
24. GUO, S., JIANG, J., & QIAN, Q. (2018). *A comprehensive review on application of building information modeling (BIM) for sustainable building design*. *Sustainability*, 10(10), 3609. <https://doi.org/10.3390/su10103609>
25. ARCHITECTURAL DESIGN. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012012>
26. KICHUK, K., & SCHLUETER, A. (2020). *The Digital Twin in Sustainable Building Design and Construction*. *Journal of Green Building*, 15(2), 165-184. <https://doi.org/10.3992/1943-4618.15.2.165>
27. PORTER, A., & ROSS, A. (2017). *Digital technologies and sustainable development: Reimagining sustainable cities*. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 9(2), 129-145. <https://doi.org/10.1080/19463138.2016.1258798>
28. FERRER, M. P., SCHLUETER, A., & FATHI, M. (2021). *Building Information Modeling and Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review*. *IEEE Access*, 9, 55320-55341.
29. MARKETS AND MARKETS. (2020). *Digital Twin Market by Technology, Type (Product, Process, and System), Application (Predictive Maintenance, Machine Learning, and IoT), Industry (Aerospace & Defense, Automotive & Transportation, and Healthcare), and Geography - Global Forecast to 2025*.
30. MCKINSEY & COMPANY. (2021). *The Future is Now: How Digital Twins are Changing the Game*.
31. WORLD GREEN BUILDING COUNCIL. (2019). *Bringing Embodied Carbon Upfront: Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon*.