

CONTENT

|                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CESARE SPOSITO, FRANCESCA SCALISI<br>(EDITORIAL)                                                   | <i>Affrontare la Complessità – Conoscenza, progetto e gestione dell’ambiente costruito</i><br>Dealing with Complexity – Knowledge, design, and management of the built environment                                                                        | 2   |
| MANUEL GAUSA                                                                                       | <i>Complessità, n-città e sistemi dinamici multilivello – Verso una (geo)urbanità in rete e in reti</i><br>Complexity, n-city, and multilevel Dynamic systems – Towards a networked (geo)urbanity and networks                                            | 16  |
| FEDERICO M. BUTERA                                                                                 | <i>La Città Ideale</i><br>The Ideal City                                                                                                                                                                                                                  | 30  |
| CONSUELO NAVA, ALESSANDRO MELIS                                                                    | <i>IA generativa e complessità – Verso un nuovo paradigma nel design digitale rigenerativo</i><br>Generative IA and complexity – Towards a new paradigm in regenerative digital design                                                                    | 40  |
| ANDREA GIACHETTA, LINDA BUONDONNO                                                                  | <i>La formazione dell’Architetto in realtà complesse – Un nuovo approccio sul piano cognitivo</i><br>Architect training in multifaceted environments – A new cognitive level approach                                                                     | 50  |
| MARCELLO CORRADI, TIMO STEVENS, INA MACAIONE<br>ALESSANDRO RAFFA, BIANCA ANDALORO                  | <i>Rigenerazione climatica green degli streetscapes – L’esperienza di De Urbanisten ad Anversa</i><br>Green climate-adaptive streetscapes regeneration – The De Urbanisten Experience in Antwerp                                                          | 60  |
| TOMMASO BERRETTA, FEDERICO DESIDERI<br>MATTEO STALTARI                                             | <i>Il progetto dello spazio pubblico, tra complessità e crisi ecologica – Da sfida a opportunità per la rigenerazione urbana</i><br>Public space project, between complexity and ecological crisis – From challenge to opportunity for urban regeneration | 74  |
| NICOLA V. CANESSA, CHIARA CENTANARO                                                                | <i>Co(mplex)city – Utente come sensore urbano e mobilità accessibile nel progetto Mobiquity</i><br>Co(mplex)city – User as urban sensor and accessible mobility in the Mobiquity project                                                                  | 88  |
| MARIA ROSARIO CHAZA CHIMENO<br>ROSARIA REVELLINI, CRISTIANA CELLUCCI                               | <i>Invecchiamento della popolazione e spazi urbani – Nuove sfide digitali per il benessere degli anziani</i><br>Ageing population and urban spaces – New digital challenges for elderly well-being                                                        | 98  |
| JONATHAN OCHSHORN                                                                                  | <i>Analisi della complessità e delle contraddizioni in Architettura</i><br>Critiquing complexity and contradiction in Architecture                                                                                                                        | 108 |
| CRISTIAN DALLERE, MATTEO TEMPESTINI                                                                | <i>Il Centro di Formazione a Salez – Progettare la sostenibilità con interazioni semplici tra utenti e architettura</i><br>An Educational Centre in Salez – Designing sustainability through simple interactions between users and architecture           | 118 |
| ALESSANDRA BIASI, VERONICA RIAVIS<br>ISABELLA ZAMBONI, ALBERTO CERVESATO                           | <i>Patrimonio architettonico urbano e cambiamento climatico – Un’occasione per affrontarne la complessità</i><br>Urban architectural heritage and climate change – An opportunity to address its complexity                                               | 130 |
| ROBERTA FONTI                                                                                      | <i>Patrimonio per un futuro sostenibile – Il principio teorico della reversibilità e i suoi riflessi in architettura</i><br>Heritage for a sustainable future – The theoretical principle of reversibility and its reflections on architecture            | 144 |
| MARCUS CARTER, FEDERICO IANIRI<br>CARMELA MARIANO                                                  | <i>Tattiche di resilienza per ambiti urbani costieri – La Marina di Latina e il Porto di New York</i><br>Resilience tactics for coastal urban areas – The Marina di Latina and the New York Harbour                                                       | 156 |
| GIUSEPPE LOSCO, CHIARA PASQUALINI<br>MOHAMMADJAVAD KHODAPARAST                                     | <i>Rivitalizzare le comunità rurali – Autosufficienza energetica e valorizzazione delle risorse boschive locali</i><br>Revitalising rural communities – Energy self-sufficiency and valorisation of local forest resources                                | 174 |
| MATTEO GIOVANARDI, CLAUDIO CASTELLAN, MARCELLO LA ROSA<br>ALEKSANDAR PAVLOVIC, ALESSANDRO PRACUCCI | <i>Progettare BIPV – Strategie per gestire la complessità del fotovoltaico integrato in facciata</i><br>Designing BIPV – Strategies for managing complexity in the integration of photovoltaics in facades                                                | 186 |
| AILEEN IVERSON-RADTKE, OTTO PAANS                                                                  | <i>Computazione incorporata e spazio-materialità – Esplorare la complessità con la cyber-modellazione</i><br>Embodied computation and spatiomateriality – Exploring complexity through cybermodelling                                                     | 194 |
| ANNA OSELLO, MICHELE ZUCCO<br>EMMANUELLE IACONO, MATTEO DEL GIUDICE                                | <i>Logiche nascoste della complessità – Interfacce grafiche e algoritmi per il sistema edificio</i><br>Hidden logic of complexity – Graphical interfaces and algorithms for the building system                                                           | 202 |
| ANNA OSELLO, FRANCESCA MARIA UGLIOTTI<br>NICOLA RIMELLA, FRANCESCO LODDO                           | <i>Modelli digitali e linguaggio naturale – Nuove prospettive per interpretare la complessità</i><br>Digital models and natural language – New perspectives for interpreting complexity                                                                   | 212 |
| TERESA VILLANI, GIANMAURO ROMAGNA<br>ANGELO ODDI                                                   | <i>Ottimizzare la fruibilità nei musei – Gestione integrata di dati sui modi d’uso dello spazio e dei contenuti culturali</i><br>Optimising usability in museums – Integrated management of data on the use of space and cultural content                 | 220 |
| CLAUDIA PORFIRIONE, XAVIER FERRARI TUMAY<br>ISABEL LEGGIERO                                        | <i>Conoscenza, innovazione e cambiamento – Il potere dell’errore nel design e nei sistemi complessi</i><br>Knowledge, innovation, and change – The power of error in design and complex systems                                                           | 232 |
| NICCOLÒ CASIDDU, FRANCESCO BURLANDO<br>BOYU CHEN                                                   | <i>Human-de-centred Design – Verso una (nuova) era della sofferenza</i><br>Human-de-centred Design – Towards a (new) era of suffering                                                                                                                     | 242 |
| CARLA LANGELLA, DARIO RUSSO<br>FRANCESCA SCALISI                                                   | <i>Design e Gastrofisica – Innovazione e sostenibilità dei sistemi alimentari multisensoriali</i><br>Design and Gastrophysics – Innovation and sustainability of multisensory food systems                                                                | 250 |
| ANTONELLA ROSMINO                                                                                  | <i>Corpi, menti e design – Un approccio integrato per l’innovazione museale</i><br>Bodies, minds, and design – An integrated approach to museum innovation                                                                                                | 278 |
| FEDERICA DAL FALCO, OMAVMAH AL AZHARI                                                              | <i>Complessità e significati del mashrabiya nelle arti islamiche tra tradizione e innovazione digitale</i><br>Complexity and meanings of the mashrabiya in the Islamic arts between tradition and digital innovation                                      | 290 |
| STEFANO MAFFEI, PATRIZIA BOLZAN<br>MASSIMO BIANCHINI, FRANCESCA ZECCARA ET ALII                    | <i>Svelare la complessità della transizione circolare per il settore del mobile imbottito</i><br>Unveiling the complexity of circular transition for the upholstered furniture sector                                                                     | 304 |
| EUGENIA MORPURGO                                                                                   | <i>Biomateriali e zone umide – Filiere per l’edilizia e il tessile dalla valorizzazione di ecosistemi locali</i><br>Biomaterials and wetlands – Supply chains for construction and textiles through the enhancement of local ecosystems                   | 314 |
| LUCA CASAROTTO, MONICA ODDONE                                                                      | <i>Identità territoriale scalabile – Progettare la comunicazione della complessità</i><br>Scalable territorial identity – Designing the communication of complexity                                                                                       | 324 |
| FLAVIANO CELASCHI, GIORGIO CASONI<br>ELENA FORMIA                                                  | <i>La mediazione del Design – L’integrazione tra agenti artificiali autonomi, produzione manifatturiera e servizi</i><br>The mediation of Design – The integration between autonomous artificial agents, manufacturing production, and services           | 334 |
| JACOPO MASCITTI, DAVIDE PACIOTTI                                                                   | <i>Verbal Design Modelling – Complessità, IA e innovazione di prodotto</i><br>Verbal Design Modelling – Complexity, AI and product innovation                                                                                                             | 344 |

ISSN print 2464-9309



## ARTICLE INFO

Received 14 September 2024  
Revised 15 October 2024  
Accepted 17 October 2024  
Published 30 December 2024

## OTTIMIZZARE LA FRUIBILITÀ NEI MUSEI

Gestione integrata di dati sui modi d'uso dello spazio e dei contenuti culturali

## OPTIMISING USABILITY IN MUSEUMS

Integrated management of data on the use of space and cultural content

Teresa Villani, Gianmauro Romagna, Angelo Oddi

### ABSTRACT

In un contesto di digitalizzazione del Patrimonio costruito i musei evolvono da custodi di cultura a promotori di conoscenza e partecipazione sociale. Il contributo esplora il museo come servizio dinamico e inclusivo, promuovendo un approccio predittivo alla fruibilità e proponendo una metodologia integrata che combina analisi qualitative della configurazione spaziale e dati quantitativi raccolti tramite sensori IoT per ottimizzare l'esperienza museale. Sul caso studio del Museo di Roma – Palazzo Braschi è stato applicato uno strumento digitale sviluppato in ambiente BIM, capace di integrare e visualizzare dati spaziali e comportamentali. I risultati evidenziano come l'approccio predittivo e le tecnologie avanzate migliorino la gestione della fruibilità e la partecipazione. Questa metodologia può supportare i gestori dei musei nel monitoraggio di spazi, flussi e persone e negli adempimenti normativi sulla fruibilità.

In the context of digitalising cultural heritage, museums are evolving from being mere keepers of culture to becoming promoters of knowledge and social participation. This paper explores the museum as a dynamic and inclusive service, advocating for a predictive approach to usability and introducing an integrated methodology that combines qualitative spatial configuration analysis with quantitative data collected via IoT sensors to enhance the museum experience. A digital tool developed in a BIM environment was applied to the Museum of Rome – Palazzo Braschi case study, which integrates and visualises spatial and behavioural data. The results highlight how predictive approaches and advanced technologies improve the management of usability and participation. This methodology can assist museum managers in monitoring spaces, visitor flows, and accessibility regulations.

### KEYWORDS

fruibilità, musei, analisi della sintassi spaziale, comportamento utente, BIM e IoT

usability, museums, space syntax analysis, user behaviour, BIM and IoT

**Teresa Villani**, Architect and PhD, is an Associate Professor of Architectural Technology at the Department of Planning, Design, and Architectural Technology, 'Sapienza' University of Rome (Italy). She primarily carries out research on building quality control through detection methods and performance evaluation of technological building components and tools for technical project control. Mob. +39 349/59.50.221 | E-mail: [teresa.villani@uniroma1.it](mailto:teresa.villani@uniroma1.it)

**Gianmauro Romagna**, Architect, is a Research Fellow at the Institute of Cognitive Sciences and Technologies of the CNR in Rome (Italy). His research mainly focuses on decision-support tools for programming and design in cultural and healthcare fields and, more generally, in complex decision-making contexts, within the broader framework of digital management of the built environment. E-mail: [gianmauro.romagna@istc.cnr.it](mailto:gianmauro.romagna@istc.cnr.it)

**Angelo Oddi**, PhD, is a Senior Researcher at the Institute of Cognitive Sciences and Technologies of the CNR in Rome (Italy), where he mainly works on Artificial Intelligence techniques for the automatic and interactive solution of planning and decision-support problems. He has published several articles on AI, focusing on space, robotics, quantum computing, and cultural heritage. E-mail: [angelo.oddic@cnr.it](mailto:angelo.oddic@cnr.it)



In un contesto in cui la transizione digitale facilita la conoscenza e la gestione predittiva dell'ambiente costruito, sia nelle sue componenti materiali che immateriali, e soprattutto nelle relazioni che si instaurano tra esse e le persone che ne fruiscono, gli strumenti di gestione digitale del Patrimonio edilizio esistente hanno stimolato un ampio sviluppo di studi e ricerche (Daniotti, Gianinetto and Della Torre, 2020) caratterizzate prevalentemente dalla necessità di prestare attenzione a ogni aspetto della vita degli edifici, includendo anche la fase d'uso e l'esperienza dell'utente durante la fruizione (Andersen, Jensen and Ryberg, 2021; Ferretti, Quattrini and D'Alessio, 2022). Pertanto il monitoraggio della fruibilità degli edifici diventa un aspetto interconnesso con la gestione della fase d'uso, essendo focalizzato sull'adeguamento continuo degli spazi affinché rispondano contestualmente alle esigenze funzionali, tecniche e operative che emergono nel corso del tempo e alle aspettative degli utenti in termini di comfort e accessibilità (Cetorelli and Papi, 2024; McGlinn et alii, 2017). Questo implica non solo il mantenimento degli impianti e delle infrastrutture, ma anche l'adattamento dinamico degli spazi a nuove esigenze, per migliorare l'efficienza energetica e parallelamente ottimizzare i servizi e l'organizzazione degli ambienti.

Un tale nuovo modello integrato per la gestione degli edifici è particolarmente significativo se applicato agli edifici museali in quanto edifici complessi che prevedono sempre di più una fruizione collettiva più che individuale, per dar vita a un sistema di relazioni e favorire scambi tra i visitatori (Di Benedetto, 2021). Si tratta di valorizzare il Patrimonio edilizio esistente che integra, tra i parametri da controllare durante la fase di esercizio, numerosi fattori fra loro disomogenei di natura sociale, cognitiva ed emozionale legati proprio alla complessità dell'esperienza di fruizione (Zammuner, 2006).

Le numerose sperimentazioni nazionali e internazionali in ambito museale mostrano come i musei oggi cerchino di riservarsi uno spazio importante nella società, di grande responsabilità e non facile da conquistare. I musei stanno diventando sempre più soggetti attivi sul territorio (Lupo, 2021); il loro valore non è determinato esclusivamente dal Patrimonio protetto e custodito al suo interno, ma soprattutto dal loro ruolo sociale nel diffondere la conoscenza, nel sensibilizzare la società civile alla partecipazione, alle questioni relative alla salvaguardia, alla gestione, alla pianificazione e alla trasmissione del Patrimonio culturale alle generazioni future, collocandosi nella categoria più ampia dei servizi (Riva, 2008; Gupta and Vegelin, 2016); essi rappresentano luoghi democratici, inclusivi e polifonici, aperti al dialogo critico e al confronto tra passato e futuro (Dal Falco and Bonomi, 2021).

Nella sua complessità il museo – in teoria e nella prassi – affronta questioni immateriali legate all'esperienza, finalizzate a dare beneficio a chi lo fruisce (servizio user-friendly) e alle modalità di coinvolgimento, digitalizzazione e forme di interazione (Andersen et alii, 2011; Xu et alii, 2023); si occupa inoltre di questioni concrete derivanti dall'essere un servizio attivo nel contribuire a prevenire e mitigare le difficoltà e le criticità (ambientali, sociali e di fruibilità) delle persone nel tempo, attraverso strategie e iniziative (Zakaria, 2023). Il museo si identifica, quindi, come un servizio in termini di fruizione, interazione con gli utenti ed esperienza per il cui funzionamento è importante operare sia in base alle esigenze di tu-

tela dell'ambiente (ecodesign) sia in relazione alle esigenze dei suoi utenti (user-centred design) e delle comunità locali (design per le comunità) attraverso processi di valorizzazione (Cellucci and Villani, 2024), in linea con la nuova definizione di museo quale istituzione permanente al servizio della società, aperto al pubblico, accessibile e inclusivo e che promuove la diversità e la sostenibilità.<sup>1</sup>

Alla complessità legata al 'funzionamento' degli spazi si aggiunge quella relativa al 'funzionamento' delle persone teorizzato dal modello bio-psicosociale ICF (WHO, 2001) che considera il benessere e le capacità individuali come il risultato di un'interazione dinamica tra abilità che si evolvono nell'intero arco della vita e fattori ambientali. Ancor più per i luoghi di cultura queste due dimensioni di complessità devono essere considerate in modo integrato e interconnesso per garantire la fruibilità fisica e cognitiva a tutti, quale obiettivo primario per chiunque abbia il compito di gestire e promuovere un sito del Patrimonio culturale (Sposito and Scalisi, 2018).

Per affrontare questa sfida è fondamentale considerare la fruibilità non come una semplice condizione da garantire, ma come un 'processo' in continua evoluzione che coinvolge la struttura fisica del museo, i modi d'uso intrapresi dai visitatori, la comunicazione e la formazione continua dei gestori e delle persone che vi lavorano (Cetorelli and Papi, 2024). Un processo che può essere gestito, al pari degli aspetti manutentivi, in maniera predittiva, mettendo in atto un monitoraggio progressivo e costante condotto attraverso un approccio multidisciplinare in grado di acquisire informazioni riferite alla complessità delle persone e dei luoghi della cultura e analizzarle nel dettaglio per proporre soluzioni fisiche, percettive, cognitive e tecnologiche che ne tutelino e valorizzino le peculiarità e la bellezza.

Una tale visione di processo accentua la necessità di indagare le problematiche di fruibilità di questi luoghi in maniera strutturata, integrando la capacità di osservazione critica di gestori e curatori, legata alla approfondita conoscenza delle potenzialità e problematiche delle strutture museali anche in relazione all'uso consapevole delle tecnologie digitali (Bonacini, 2011) con informazioni qualitative sul funzionamento degli edifici, effettuate sulla base della configurazione dello spazio, della disposizione degli elementi spaziali nel layout e delle loro relazioni (Hillier, 2007; Hillier and Hanson, 1984; Penn, 2003).

Riferimento in tal senso sono le sperimentazioni fatte in grandi poli museali come il British Museum di Londra, per verificare l'interazione tra lo spazio e le principali direttrici di movimento dei visitatori; con l'ausilio delle moderne tecnologie IA (Intelligenza Artificiale) e dei sensori IoT (Internet of Things) si possono collezionare e analizzare dati reali relativi ai flussi dei visitatori (Orenes-Vera, Terroso-Saenz and Valdes-Vela, 2021), nonché integrarli con analisi dirette per la valutazione dell'esperienza emotiva dei visitatori (Ceccarelli et alii, 2024) al fine di proporre previsioni di comportamento basati su modelli di Markov (Centorino et alii, 2021) e tecniche di deep learning (Rossi et alii, 2021).

Data l'eterogeneità dei dati qualitativi sulla 'funzionalità' degli spazi provenienti da analisi indirette mediante la Space Syntax Analysis e i dati quantitativi ottenuti in modalità diretta sulla 'funzionalità delle persone' tramite sensori IoT, spesso raccolte su piattaforme diverse, il contributo si pone l'obiettivo generale di promuovere l'approccio alla fruibilità predittiva considerando i 'processi di funzionamento'

della persona e dei luoghi della cultura come domini sovrapponibili. L'obiettivo specifico è proporre una metodologia di integrazione di tutti i dati considerati attraverso uno strumento digitale sviluppato in ambiente BIM (Dixit et alii, 2019) finalizzato alla gestione dei dati sulla fruibilità degli spazi museali per una comprensione intuitiva delle dinamiche spaziali e comportamentali. Tale strumento rappresenta un punto unico di acquisizione della conoscenza per consentire ai gestori e ai curatori delle esposizioni di prendere decisioni più informate e orientate all'ottimizzazione della complessa esperienza di fruizione culturale.

Lo studio è stato sviluppato nella consapevolezza che l'innovazione rappresenta una priorità intellettuale e la tecnologia non è il fine, ma piuttosto uno strumento flessibile che può rivelare scenari sorprendenti dove i dati rappresentano una forma di conoscenza caratterizzata da un importante valore (Valenti et alii, 2024). I risultati della metodologia proposta mostrano che si può facilitare l'integrazione tra osservazione critica della realtà e valutazione quantitativa dei fenomeni sapendo cogliere l'opportunità di «[...] voltarsi verso il mondo per cogliere quello che esso ha da insegnarci per governare problemi complessi, rifiutando quella separazione tra raccolta di dati e costruzione teorica che sta alla base della scienza normale» (Ingold, 2019, pp. 20, 21).

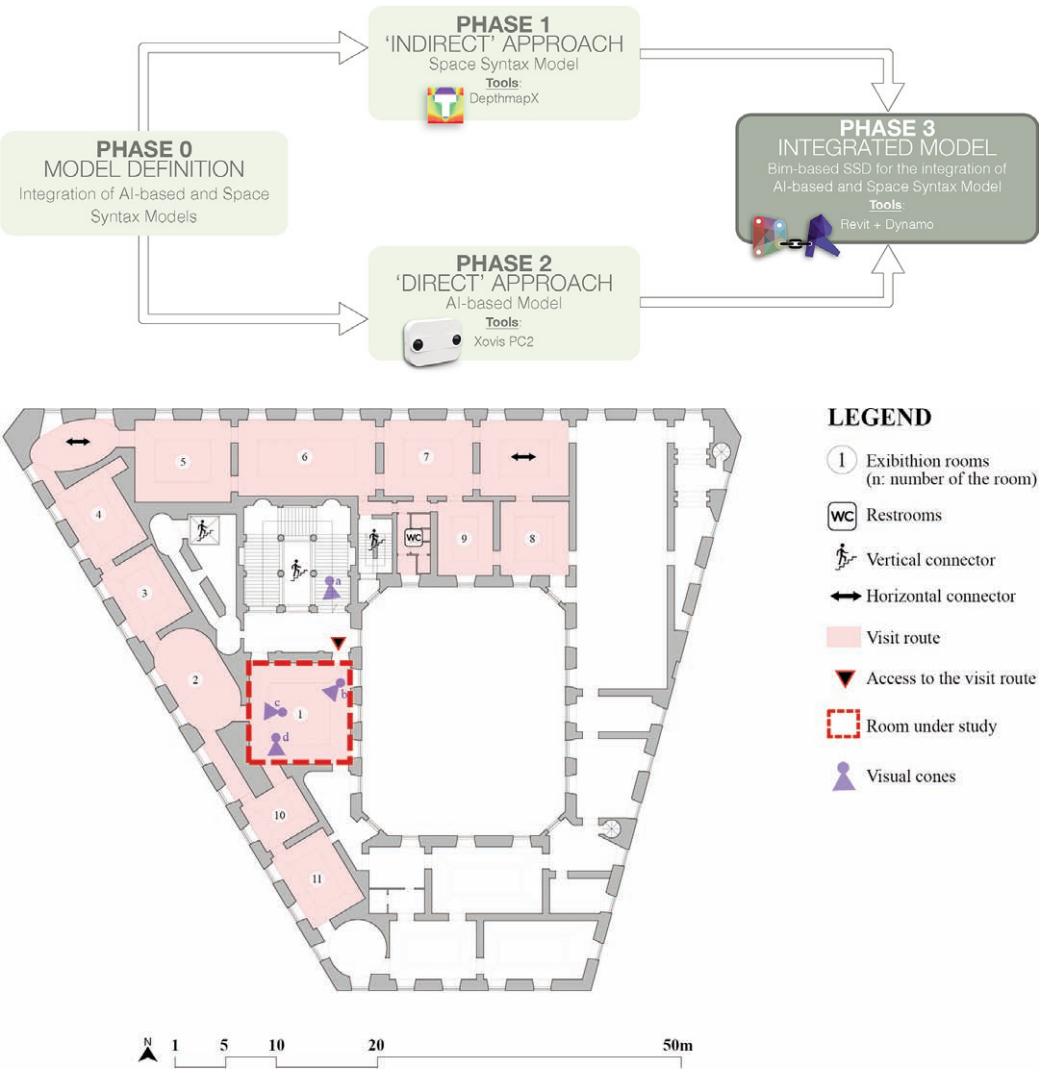
#### **Studi internazionali sull'uso di strumenti BIM-based per unificare dati esterni con dati contestuali dello spazio fisico**

Se da un lato i dati vengono utilizzati come strumento per comprendere la realtà attraverso la loro analisi, dall'altro è importante capire come, considerati singolarmente in momenti specifici o nel loro flusso continuo, possano essere integrati e diventare parte dello spazio stesso. Nonostante sia riconosciuta l'urgenza di indirizzare gli studi sulle modalità di integrazione di dati eterogenei riguardanti l'ambiente costruito e il comportamento delle persone che lo fruiscono, ad oggi sono ancora pochi quelli utili a comprendere come poter tenere insieme il sistema uomo-spazio-dato in un equilibrio dinamico.

Per meglio comprendere i passaggi metodologici per la messa a punto di uno strumento digitale per la gestione contestuale di dati disomogenei sulla fruibilità degli spazi museali a supporto dei gestori delle strutture, sono state selezionate e analizzate alcune metodologie utilizzate in casi applicativi presenti in letteratura che propongono l'utilizzo del BIM come strumento di unificazione di dati esterni con i dati contestuali dello spazio fisico, su problematiche diverse. Utilizzando Google Scholar, Web of Science e Scopus come piattaforme di ricerca e impiegando come parole chiave 'IoT', 'BIM', 'integration' e le loro combinazioni, sono stati selezionati studi ufficiali pubblicati nell'arco temporale degli ultimi dieci anni (2014-2024). In questo contesto l'attenzione è stata orientata verso tre criteri di selezione chiave: a) l'eterogeneità dei dati coinvolti; b) l'utilizzo centrale del BIM nell'ambito della raccolta, analisi e visualizzazione dei dati; c) l'applicabilità e la replicabilità degli approcci proposti a contesti differenti, inclusi spazi complessi come quelli museali.

Kensek (2014) indaga la fattibilità dell'integrazione in ambiente BIM di dati esterni provenienti da sensori ambientali (livelli di illuminazione, umidità e concentrazione di CO<sub>2</sub>) validando diverse tecnologie e strumentazioni, tra cui Arduino, Dynamo e l'API (Application Programming Interface) di Autodesk

| Authors               | Domain                    | Purpose                                                                                 | Tools                                                                | Results                                                                                                                                                                   | Limitations                                                                                                                 |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kensek, 2014          | Dynamic facades           | Optimize the facades based on external conditions                                       | Revit + Dynamo, Revit API, Arduino, Photoresistive sensors           | Real-time bidirectional simulation and control to improve energy efficiency                                                                                               | Slow interactions, limited interoperability, limited optimization capabilities                                              |
| Kazado et alii, 2019  | Energy-saving             | Leverage sensor data, improve decision-making efficiency, and reduce energy consumption | IoT, Revit + Dynamo, Naviswork + API                                 | Improvement of energy efficiency and internal comfort, reduction of operational costs                                                                                     | Integration complexity, scalability improvement needed, sensor dependence                                                   |
| Artan et alii, 2022   | Post-occupancy evaluation | Integrate user feedback in a BIM environment                                            | Revit + Dynamo, Bluetooth devices, system architecture               | A user-friendly system to communicate occupant comfort needs, effective utilization of the occupant feedback in FM, integration of occupant feedback information with BIM | Dependence on Bluetooth devices, sometimes imprecise, rigid standardization of feedback, limited data analysis capabilities |
| Fialho et alii, 2022  | Lighting maintenance      | Support maintenance teams by detecting anomalies and displaying them on the BIM model   | Sensors, IoT, Revit + Dynamo, IoT platform                           | A prototype for smart lighting maintenance capable of transmitting real-time information on BIM and IoT interfaces                                                        | Lack of consistent tools and methods for measuring the performance of building components                                   |
| Scianna et alii, 2021 | Structural monitoring     | Exploring the integrability of BIM and IoT for infrastructure monitoring                | Ultrasonic sensors, Arduino UNO, Wi-fi module, RDBSM, Revit + Dynamo | A low-cost real-time monitoring system                                                                                                                                    | Advanced skills and tools required                                                                                          |
| Desogus et alii, 2021 | Indoor comfort monitoring | Framework for integrating BIM and IoT in indoor comfort monitoring                      | IoT, Revit + Dynamo, RDBSM                                           | Optimization of indoor comfort conditions, reduction of costs                                                                                                             | Technical challenges related to data management and the lack of 3D visualization tools for building analysis                |
| Chang et alii, 2018   | Energy-saving             | A simplified integration between IoT and BIM for energy-saving                          | IoT, Arduino, Raspberry Pi, Revit + Dynamo                           | A platform for transforming sensor data to context-based visualized data and presenting the resulting colour visualization via BIM model                                  | Flexibility improvement needed                                                                                              |



Tab. 1 | Overview and key takeaways from the experiments on using BIM-based tools to integrate external data with contextual data of the physical space (credit: G. Romagna, 2024).

Fig. 1 | Explanatory diagram of the implemented methodology (credits: G. Romagna, 2024).

Fig. 2 | The second-floor plan of the Museum of Rome – Palazzo Braschi shows the various space uses in detail: the exhibition path is highlighted in pink, starting from the entrance (black and red arrow); the room under experimentation (Room 1) is outlined in red (credit: G. Romagna, 2024).

Revit, su diversi casi studio con l’obiettivo di ottimizzare le prestazioni energetiche dell’ambiente costruito. In particolare, sul tema delle facciate intelligenti, viene testata la possibilità di modificare il modello BIM in maniera automatica e sulla base dei dati trasferendo tali modifiche all’asset fisico tramite attuatori connessi ad Arduino. Tra le limitazioni riportate vi è la lentezza delle interazioni tra Revit e Dynamo, rispetto all’utilizzo di software simili non integrati in BIM (ad esempio Rhino Grasshopper), la scarsa interoperabilità nella comunicazione dal modello digitale a quello fisico, che rende difficile la sincronizzazione (Digital Twin), e l’assenza di funzionalità di ottimizzazione delle prestazioni dell’edificio sulla base dei dati.

Kazado, Kavgc e Eskicioglu (2019) similmente indagano l’utilizzo combinato di strumenti su dati di natura energetica con l’obiettivo di migliorare l’efficienza decisionale, permettendone una visualizzazione chiara e ridurre al contempo i consumi. Concentrandosi su un edificio universitario, vengono discussi tre approcci per livelli di complessità: a) sensori-Revit; b) sensori-Revit-Naviswork; c) sensori-Revit-Naviswork-API. La difficoltà di visualizzazione

di grandi volumi di dati del primo approccio viene superata con l'implementazione di Naviswork nel secondo; successivamente nel terzo approccio viene integrata un'API (Application Programming Interface) per abilitare funzionalità avanzate.

Lo studio rileva limitazioni relative alla complessità degli strumenti e delle competenze richieste, che potrebbe ostacolare l'operato dei Facility Manager, rendendo l'uso sistematico eccessivamente oneroso; l'impegnativa gestione dei dati storici limita inoltre la possibilità di analisi a lungo termine, riducendo quindi le capacità di ottimizzazione delle prestazioni. Un'ulteriore criticità riguarda l'adattabilità della metodologia su larga scala: sebbene risulti efficace a livello di singolo edificio, la sua estensione a edifici complessi o a reti di edifici diventa problematica, a causa dell'aumento esponenziale del flusso di dati e delle elevate capacità computazionali richieste. Lo studio mette in evidenza infine come l'affidabilità dipenda dalla qualità e dalla corretta manutenzione dei sensori, considerando l'importanza di una scelta ponderata rispetto alle diverse soluzioni disponibili sul mercato come ulteriore sfida da affrontare.

In un contesto diverso Artan et alii (2022) presentano un metodo avanzato per condurre una valutazione post-occupativa in edifici per uffici che permette, attraverso l'integrazione con tecnologie BIM, di raccogliere e analizzare i feedback sui livelli di comfort, funzionalità e soddisfazione generale degli occupanti. Il prototipo (Rateworkspace) sviluppato utilizza un modello semantico basato sul formato standard IFC (Industry Foundation Class), integrato con tecnologie di localizzazione Bluetooth: questa combinazione permette di collegare i dati raccolti nel modello BIM, rendendoli interrogabili e visualizzabili in maniera intuitiva attraverso avanzate tecnologie di analisi.

Le limitazioni riscontrate risiedono nella dipendenza da tecnologie Bluetooth, meno affidabili in caso di sovraffollamento, oltre che nella rigida standardizzazione dei feedback e nelle funzionalità limitate di analisi dei dati. Inoltre la mancata integrazione con i Sistemi di Automazione dell'Edificio (BAS) che gestiscono, controllano e monitorano i vari aspetti legati all'efficienza operativa dell'edificio, riduce le capacità del sistema di fornire un'analisi in tempo reale. Un'ulteriore barriera si riscontra nell'assenza di un'interfaccia dedicata ai tecnici, che compromette l'efficienza nella gestione delle operazioni di manutenzione; infine la generalizzazione del prototipo è vincolata a un caso d'uso specifico.

In maniera simile Fialho et alii (2022) sviluppano una piattaforma BIM-based per la manutenzione intelligente di edifici universitari, con il focus sull'illuminazione: tramite sensori direttamente applicati sui dispositivi, un modello BIM e una specifica architettura software, la piattaforma proposta consente di rilevare e segnalare in maniera intuitiva i guasti. In particolare la comunicazione tra BIM e IoT avviene attraverso un workflow Dynamo, messo a punto per programmare logiche di rappresentazione grafica del modello in base agli stati di funzionamento. Questo approccio consente di visualizzare il modello in modo dinamico e interattivo, adattando la grafica alle diverse condizioni operative.

Lo studio mette in luce limiti nella complessità tecnica di integrazione dello specifico dominio (illuminazione artificiale) in ambiente BIM, che richiede una calibrazione precisa dei sensori per prevenire interferenze con i livelli d'illuminazione naturale ed evitare misurazioni imprecise. Inoltre, nonostante il numero limitato di variabili coinvolte, il trasferimento dei dati è stato occasionalmente ostacolato dall'instabilità dell'infrastruttura cloud: l'uso di Autodesk online viewer ha determinato una criticità nella trasmissione dei risultati, in quanto non supporta alcune funzionalità avanzate di Dynamo. Infine la sicurezza dei dati e la gestione centralizzata delle informazioni rimangono parzialmente irrisolte, poiché alcune parti del sistema sono ancora vulnerabili in quanto suscettibili a rischi legati all'archiviazione locale dei dati che può comportare perdite di informazioni, accessi non autorizzati o danni ai dati stessi.

Parallelamente Scianna, Gaglio e La Guardia (2022) propongono un'applicazione di integrazione a basso costo per il monitoraggio strutturale in tempo reale di una trave di ponte. Il sistema sviluppato in laboratorio, oltre a sensori ultrasonici, prevede l'utilizzo di Arduino UNO, un modulo wi-fi, un RDBMS (Relational Database Management System) e un modello BIM sviluppato in Autodesk Revit, accompagnato da un workflow Dynamo per la comunicazione continua tra database e modello. Lo studio evidenzia criticità in termini di interoperabilità tra i diversi e complessi strumenti utilizzati che, oltre a richiedere competenze altamente specializzate, rendono difficoltosa l'integrazione di dati nel modello BIM tramite Dynamo. L'interazione tra i sensori e il modello non avviene in tempo reale, causando ritardi nella visualizzazione dei dati, problema significativo in situazioni legate all'ambito specifico. Inoltre il sistema presenta limiti di scalabilità, rendendo necessaria, per l'applicazione su infrastrutture reali,

l'adozione di sensori e tecnologie di comunicazione più avanzate, a scapito dell'economicità del metodo, considerata un presupposto iniziale.

Un approccio simile al precedente viene adottato da Desogus et alii (2021) che, sul tema del monitoraggio dei parametri ambientali, propongono un framework di integrazione dati in BIM basato su sensori IoT, modello BIM, RDBMS e un workflow Dynamo per la comunicazione tra questi ultimi, ma criticità appaiono innanzitutto nelle difficoltà legate alla modellazione BIM di edifici esistenti. Questo processo richiede la raccolta di grandi quantità di informazioni, spesso difficili da reperire o incomplete, soprattutto nel caso di edifici storici o di rilevanza architettonica che spesso non dispongono di una documentazione completa su layout costruttivo, componenti e impianti. Inoltre, sebbene l'obiettivo dello studio fosse ottenere un monitoraggio in tempo reale, la raccolta dei dati è stata spesso soggetta a ritardi o discontinuità. Tali problemi derivano sia dalle limitazioni intrinseche delle tecnologie impiegate, sia dalla configurazione del sistema che potrebbe non essere ottimizzata per favorire una efficace raccolta e trasmissione delle informazioni, determinando una rappresentazione incompleta o non tempestiva e quindi incidendo negativamente su decisioni basate sui dati.

Chang, Dzeng e Wu (2018), in modo più speditivo, presentano un approccio semplificato di integrazione tra BIM e dati provenienti da IoT su tematiche di gestione energetica con lo scopo di dimostrare la fattibilità del concetto di integrazione mediante l'impiego di un unico strumento. Utilizzando Autodesk Revit e costruendo in Dynamo un workflow dedicato, la ricerca mostra la possibilità di comunicazione tra sensori e sistemi diversi (come Arduino e Raspberry Pi) ridisegnando le informazioni finali direttamente nel modello, aggiungendo visualizzazioni che esprimono diverse prospettive e supportando quindi decisioni complesse e interdisciplinari.

Gli stessi autori evidenziano limitazioni rispetto alla flessibilità operativa dell'approccio proposto, non testato in caso di situazioni con protocolli di gestione più articolati e complessi. I sensori utilizzati nella sperimentazione presentano inoltre un livello di tolleranza inadeguato per altri contesti in cui è fondamentale garantire un elevato grado di affidabilità del dato. Anche in questo caso la gestione dei dati in tempo reale risulta limitata: il ritardo nella raccolta e nell'elaborazione dei dati potrebbe compromettere la capacità di prendere decisioni tempestive, rendendo meno efficace la piattaforma in scenari



**Fig. 3** | Visual cones indicated in Figure 2: a) the entrance of the visitor route; b) Room 1 with the central installation and (above) the sensors installed on suspended cables; c) the passage leading from Room 1 to the main direction of the visit; d) the passage leading from Room 1 to the secondary direction of the visit; e) the entrance of the corner space that aligns (inline) all the previous passageways of the visitor route; f) the exit of the corner space that aligns (inline) all the subsequent passageways of the visitor route (credits: G. Romagna, 2024).

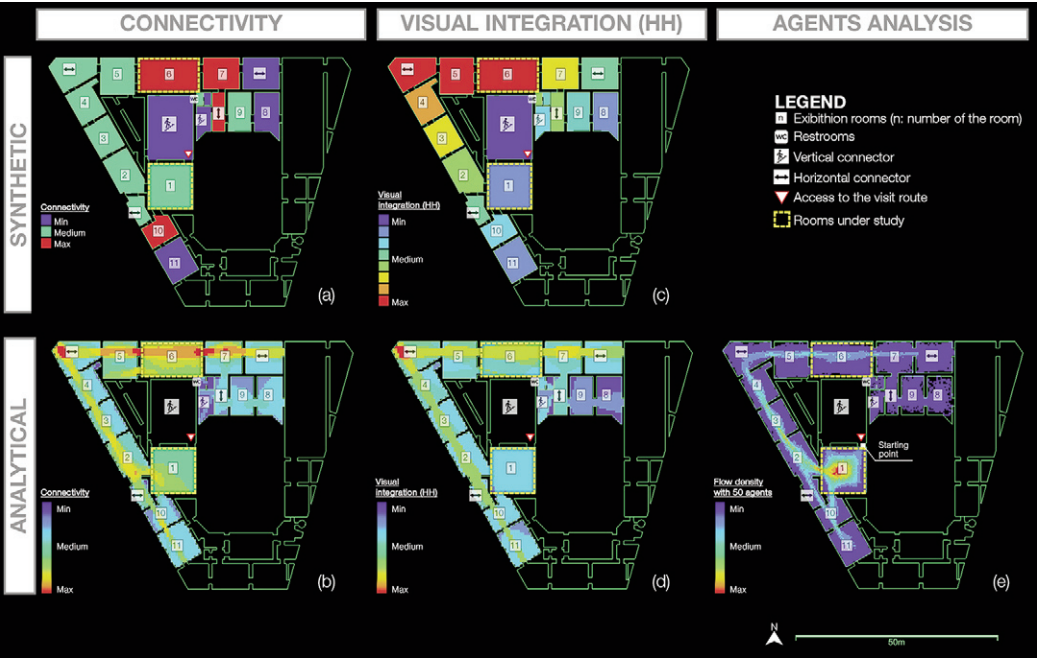


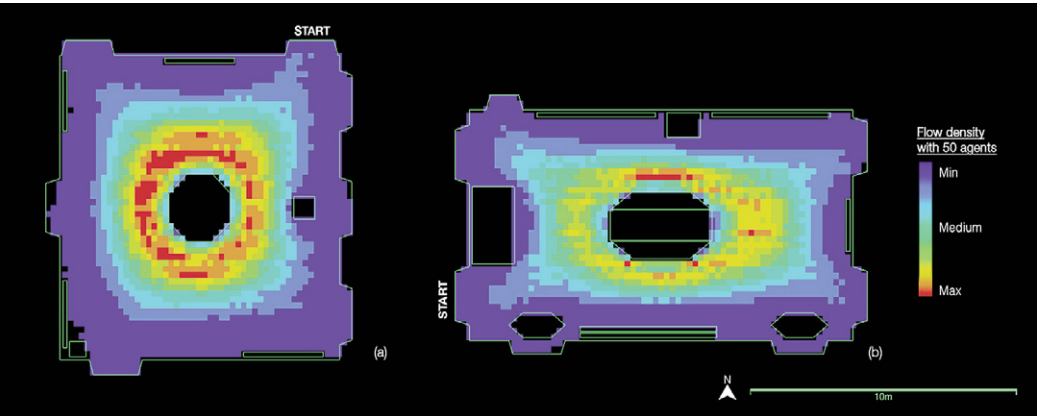
Fig. 4 | Spatial syntax analysis of the entire floor: a) synthetic connectivity; b) analytical connectivity; c) synthetic visual integration; d) analytical visual integration; e) flow analysis through agents (credit: G. Romagna, 2024).

Fig. 5 | Spatial syntax analysis for Room 1 and Room 6: flow analysis through agents of (a) Room 1 and (b) Room 6 (credit: G. Romagna, 2024).

Fig. 6 | Heatmap of Room 1 (a) and Room 6 (b) produced with trajectories collected on June 17, 2023 (credit: G. Romagna, 2024).

Next page

Fig. 7 | The BIM model of Room 1 developed in Autodesk Revit: (left) plan, section and (right) axonometry (credit: G. Romagna, 2024).



grazione tra Autodesk Revit e Dynamo. Questa scelta non solo ottimizza i flussi di lavoro, ma riduce la complessità associata all'uso di più strumenti, un limite trasversale riscontrato in tutte le metodologie analizzate.

**Metodologia e strumenti per la costruzione dello strumento di gestione di dati eterogenei sulla fruibilità** | Gli obiettivi del processo di gestione integrata dei dati sulla fruibilità descritto nell'articolo sono stati raggiunti applicando una metodologia articolata in quattro fasi distinte (Fig. 1). La fase 0 prevede la definizione astratta del modello di analisi integrato. Nello specifico si pianifica la scelta di un insieme di metodi di analisi elementari (sia diretti che indiretti) suggeriti dagli obiettivi del processo di gestione descritto, dalle possibili analisi comparate che si possono effettuare tra i risultati delle analisi singole e dai vincoli presenti nell'ambiente museale. L'implementazione e utilizzazione dei singoli metodi è curata nelle fasi successive della metodologia.

Un primo approccio, denominato 'indiretto' e sviluppato nella fase 1 ha previsto un'indagine sulle proprietà spaziali rilevanti per la fruibilità (Biocca, Villani and Romagnoli, 2022) e il wayfinding (Romagnoli, Villani and Oddi, 2019) attraverso l'applicazione di metodologie configurazionali, sia alla scala del piano sia alla scala della singola stanza; in questa fase è stato pianificato l'uso del software DepthmapX.

Nella fase 2 è stato adottato un secondo approccio definibile 'diretto', già impiegato nell'ambito del progetto ARTEMISIA (Analisi delle Reazioni e delle Traiettorie Museali Individuali con Strumenti di Intelligenza Artificiale; Ceccarelli et alii, 2024) e basato sull'uso di sensori IoT dotati di sistemi di IA integrati (Xovis PC2) per analizzare le traiettorie dei visitatori a livello di stanze del museo.

L'uso comparato dei due approcci citati si basa sull'intuizione che il comportamento dei visitatori è influenzato da due diverse componenti: 1) la configurazione dello spazio, analizzata nella letteratura sulla metodologia Space Syntax; 2) la presenza delle opere d'arte esposte, che attraggono i visitatori e in un certo senso cambiano la loro percezione dello spazio. I due approcci introdotti servono quindi a definire un modello comparativo che sfrutta le ca-

che richiedono un monitoraggio continuo e rapido. Infine il workflow proposto presenta delle limitazioni in termini di replicabilità, poiché richiede piccoli adeguamenti in base alle peculiarità del caso studio.

Il quadro di sintesi delle sperimentazioni riportato in Tabella 1 evidenzia che, nonostante la varietà dei domini trattati, vi è una parziale uniformità negli strumenti adottati. Sebbene la maggior parte dei dati derivi da sensori IoT, la flessibilità degli approcci consente anche l'integrazione di dati di natura diversa. Si rileva inoltre che l'aumento delle tecnologie impiegate tende sistematicamente a essere corre-

lato a limitazioni dovute alle complesse competenze richieste.

Un elemento costante in tutti i casi esaminati è l'uso di Autodesk Revit in combinazione con Dynamo, integrato di volta in volta con tecnologie differenti a seconda delle specificità di contesto. Considerando quanto descritto e la natura innovativa delle tematiche oggetto del contributo si è ritenuto vantaggioso adottare un approccio semplificato che faciliti il trasferimento delle conoscenze acquisite dagli studi internazionali condotti, privilegiando l'utilizzo di un unico ambiente di lavoro basato sull'inte-

ratteristiche distintive di ciascun metodo al fine di sviluppare un approccio sinergico. I risultati di questa integrazione saranno analizzati nella fase 3 che mette in atto un ulteriore livello di analisi, svolto in modo coordinato.

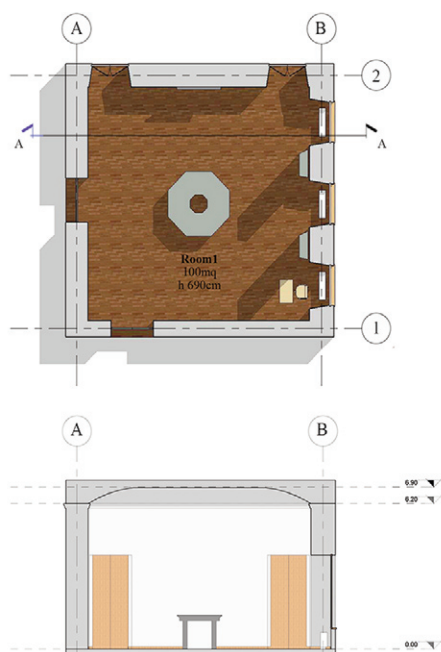
Considerando la difficoltà di accesso e valutazione delle informazioni legate alla gestione della fruibilità è stato scelto il BIM come strumento efficace in grado di collezionare, gestire e aggiornare numerosi insiemi di dati eterogenei in un unico ambiente (IFMA, 2013). Seguendo alcune delle metodologie analizzate in letteratura per l'integrazione di dati esterni in BIM (Chang, Dzung and Wu, 2018), è stata selezionata una metodologia di integrazione che prevede l'utilizzo combinato del software BIM Revit e del plug-in nativo Dynamo. Quest'ultimo, attraverso la sua interfaccia di programmazione visiva e intuitiva, è in grado di elaborare algoritmi personalizzati per la gestione dei dati connessi al modello BIM, consentendo visualizzazioni grafiche intuitive e quindi di supporto ai decisori.

I risultati di questa fase, essenziale per una comprensione più completa e articolata del contesto in esame, hanno consentito di valutare in modo più accurato le dinamiche e le relazioni tra i fattori considerati. In altre parole confrontando i due approcci è possibile comprendere meglio gli effetti delle due componenti distinte (spazio e opere d'arte) sul comportamento delle persone, pertanto le analisi integrate potrebbero suggerire alcuni cambiamenti nell'organizzazione dello spazio nel museo, così come lo spostamento / scambio della posizione di alcune opere d'arte (per quanto possibile).

**Il caso studio del Museo di Roma, Palazzo Braschi** | La sperimentazione si lega trasversalmente al progetto di ricerca ARTEMISIA<sup>2</sup> e utilizza parte delle analisi sull'esperienza di visita con il supporto di algoritmi di AI condotte per comprendere le dinamiche di comportamento degli utenti in relazione ai contenuti culturali e agli elementi architettonici, organizzativi e didattici. Lo sviluppo applicativo ha avuto luogo presso il Museo di Roma situato a Palazzo Braschi e realizzato tra la fine del XVIII e l'inizio del XIX secolo (Ricci, 1989). L'attuale allestimento permanente, datato 2017, si estende tematicamente tra il secondo e il terzo piano e racconta la storia di Roma dal XVII al XX secolo (D'Amelio, Pirani and Strano, 2018). Il primo piano è invece destinato a mostre temporanee.

Il contesto sul quale sono state elaborate le informazioni indirette sulla sintassi dello spazio e le informazioni dirette provenienti da sensori comprende gli spazi della mostra permanente e in particolare il secondo piano (Fig. 2). Il percorso di visita, a cui si accede dalla scalinata di rappresentanza (Fig. 3a), o tramite l'ascensore, parte dall'ingresso della Sala 1 (Fig. 3b) e si biforca tramite due passaggi in due itinerari: uno principale (Fig. 3c), che conduce fino al termine del percorso, e uno secondario (Fig. 3d), che obbliga a tornare indietro. I passaggi tra le sale espositive sono allineati permettendo al visitatore di percepire visivamente gli spazi precedenti e successivi. Ciò è particolarmente rilevabile nello spazio angolare, nodo centrale dal quale è possibile scorgere tutte le sale precedenti (Fig. 3e) e successive (Fig. 3f), ad esclusione delle Sale 1, 8 e 9.

Nella prima fase sono state condotte una serie di analisi configurazionali focalizzate su due diverse scale di indagine: l'intero secondo piano dedicato alla mostra permanente (Fig. 4) e due sale (Sala 1 e

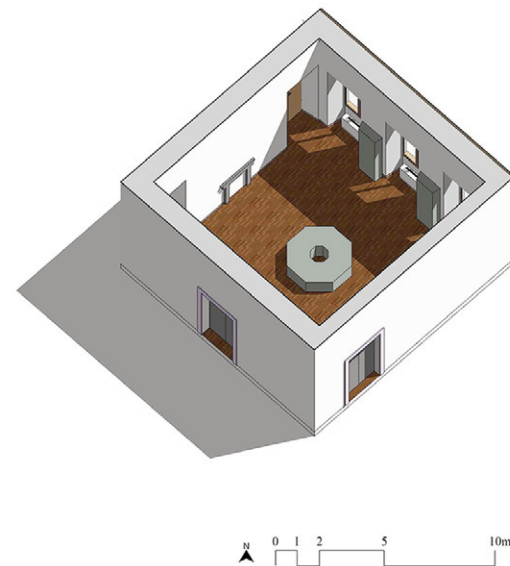


Sala 6; Fig. 5), ritenute particolarmente rilevanti in quanto rappresentano l'inizio e la fine del percorso di visita. In questa fase è stato utilizzato il software open source Depthmap X 0.8.0 per esaminare l'usabilità fisica e l'integrazione visiva degli spazi che hanno un impatto significativo sulla navigazione dei visitatori (Hillier, 2007) e quindi sulla loro esperienza di visita e sulle dinamiche relazionali.

Nel condurre questa analisi indiretta è stata adottata un'astrazione del modello spaziale, rappresentando gli spazi come nodi e le loro connessioni come linee che collegano i nodi. Da questa astrazione è stato ricavato il grafico della visibilità, che ha consentito di verificare la connettività, una misura che valuta il numero di spazi immediatamente connessi a un dato spazio (usabilità fisica), e l'integrazione visiva, che indica la distanza visiva tra tutti gli spazi. Come ulteriore fase di approfondimento gli ambienti, in dettaglio, sono stati suddivisi idealmente tramite una griglia di punti (dimensioni 60x60 cm, assimilabile allo spazio occupato da una persona in movimento) al fine di calcolare e confrontare i valori corrispondenti. Infine è stata condotta una simulazione dei flussi negli spazi basata su 'agenti' (entità che, basandosi sulla visibilità dei punti della griglia, prendono decisioni statisticamente informate assimilabili al comportamento umano), determinando, sulla base della configurazione spaziale, le aree con densità di flusso prevista maggiore o minore.

Passando alla scala delle due sale sperimentali, gli studi si sono limitati all'analisi dei flussi basata sugli 'agenti': in entrambi gli scenari il software restituisce una visualizzazione qualitativa dei risultati, delineando i diversi valori di ciascuna analisi (connettività, integrazione visiva e densità dei flussi) attraverso una scala cromatica che va dal rosso (valori più alti) al giallo, al verde e al blu (valori più bassi).

La seconda fase è stata condotta, nell'ambito del progetto ARTEMISIA (Ceccarelli et alii, 2024), grazie all'installazione su cavi sospesi di sensori IoT nelle Sale 1 e 6. Nello specifico sono state installate stereocamere Xovis PC2 dotate di algoritmi di visione artificiale in grado di rilevare la presenza umana ed elaborare direttamente nel dispositivo dati strutturati. Le informazioni acquisite includono: marca temporale, ID anonimi dei visitatori, identificatori di



sala, coordinate spaziali (x, y) e orientamento della testa del visitatore (dx, dy) sul piano orizzontale.

**I risultati della sperimentazione** | In questa sede si prende in esame un solo tipo di analisi 'diretta': le heatmap. Tenendo conto dell'uniformità dei dati giornalieri raccolti, vengono presentati i risultati relativi a un singolo giorno campione, scelto arbitrariamente nel giorno di sabato 17 giugno 2023 (Figg. 6a, 6b). Le heatmap consentono un'analisi visiva efficace della distribuzione dei visitatori negli spazi studiati; ciò si ottiene attraverso la trasformazione lineare delle coordinate posizionali in coordinate pixel e l'utilizzo di una scala cromatica che rappresenta i conteggi di permanenza all'interno di ciascun pixel. Ogni volta che un visitatore attraversa un pixel, il conteggio della permanenza in quel punto viene incrementato di uno.

Per la fase relativa all'integrazione (fase 3) la sperimentazione si è concentrata nell'ambito specifico della Sala 1, il cui modello BIM elaborato in Autodesk Revit è illustrato in Figura 7. La sala, di forma quadrata con dimensioni 10x10 metri, è accessibile direttamente dal corpo scala principale tramite due ingressi e comunica, mediante altri due passaggi, con entrambe le direzioni del percorso di visita. Da un punto di vista delle condizioni di illuminazione naturale la sala è caratterizzata da tre ampie finestre collocate su un'unica parete, mentre l'illuminazione artificiale è concentrata sulle opere esposte.

La caratterizzazione architettonica prevede pareti rivestite in intonaco bianco e il soffitto, con un'altezza variabile da 6,20 a 6,90 metri, presenta una volta priva di decorazioni. All'interno della sala sono presenti quattro dipinti, due teche e un'installazione multimediale centrale composta da un volume specchiato con due schermi informativi integrati che forniscono dettagli sulle opere esposte. Oltre a due totem esplicativi situati tra le finestre, sono anche presenti due pannelli informativi posizionati accanto ai due varchi, per guidare i visitatori lungo il percorso espositivo.

In questo contesto il workflow sviluppato in Dynamo (Fig. 8) ha previsto un'organizzazione dei nodi in gruppi tematici visivamente distinti tramite l'uso del colore (verde per i gruppi di input, rosa per i gruppi

pi di calcolo e arancione per i gruppi di output). Dopo aver esplicitato la geometria del pavimento del modello caricato in Autodesk Revit (Fig. 8a) e calcolate le coordinate centrali (Fig. 8b) è stato possibile leggere e riadattare le coordinate (Posx, Posy) del file CSV generato dalle stereocamere (Fig. 8c) in modo da calibrarle perfettamente rispetto alla posizione del modello BIM. Questi passaggi risultano particolarmente rilevanti in termini di replicabilità della metodologia proposta, consentendo l'adattabilità del workflow indipendentemente dal posizionamento del modello BIM nello spazio virtuale e risolvendo quindi le limitazioni legate alla flessibilità dello strumento, riscontrate nelle esperienze internazionali precedentemente analizzate.

Il workflow termina infine con due gruppi di output (Figg. 8d, 8e) che generano rispettivamente due heatmaps partendo dai dati dei sensori (Fig. 9a) e dall'output di DepthmapX (Fig. 9b).

Sulla base dei risultati ottenuti l'analisi del flusso basata sugli agenti (Figg. 5a, 9b) evidenzia una concentrazione dei visitatori uniformemente distribuita attorno all'installazione multimediale centrale. Se consideriamo invece la heatmap (Figg. 5b, 9a) tracciata per la stessa stanza, l'uniformità della distribuzione dei flussi, evidente nell'approccio precedente, appare notevolmente distorta, mostrando una maggiore densità di presenza in corrispondenza delle opere d'arte con potenziali problematiche di sovraffollamento nell'angolo inferiore destro. Ciò conferma come il comportamento degli utenti all'interno di uno spazio culturale, inteso come 'contenitore', sia fortemente influenzato dai 'contenuti' esposti, dalle loro caratteristiche peculiari e dalla loro distribuzione rispetto all'ambiente.

In questo senso le evidenze ottenute dall'uso del modello integrato risultano utili a suggerire una consapevole riorganizzazione delle opere d'arte esposte nella Sala 1. In generale è possibile auspicare che questo tipo di analisi comparativa integrata pos-

sa essere applicata in modo iterativo in tutte le sale del museo con l'obiettivo di convergere verso una nuova e ottimizzata distribuzione del livello di occupazione degli spazi di fruizione.

**Conclusioni** | Dallo studio condotto emerge come la disponibilità di informazioni sui contesti fisici che caratterizzano gli edifici museali e sul comportamento dei visitatori ha introdotto modalità di conoscenza e interpretazione fino a pochi anni fa sconosciute. Il percorso di integrazione dei dati, sperimentato attraverso una prima applicazione e che necessita di essere ulteriormente perfezionata in quanto ancora caratterizzata da passaggi complessi e onerosi in termini di lavoro e tempi, rappresenta una sfida complessa, ma necessaria per valorizzare e ottimizzare l'esperienza culturale contemporanea. L'approccio predittivo alla gestione della fruibilità degli spazi museali proposto in questo contributo attraverso l'integrazione di dati quantitativi e qualitativi promuove una visione olistica in cui lo spazio e il visitatore sono interconnessi in un dialogo continuo. Questo metodo innovativo consente di anticipare esigenze future correlate alle esposizioni e migliorare la qualità della fruizione, rendendo i musei non solo contenitori di cultura, ma luoghi attivi di scambio e partecipazione sociale.

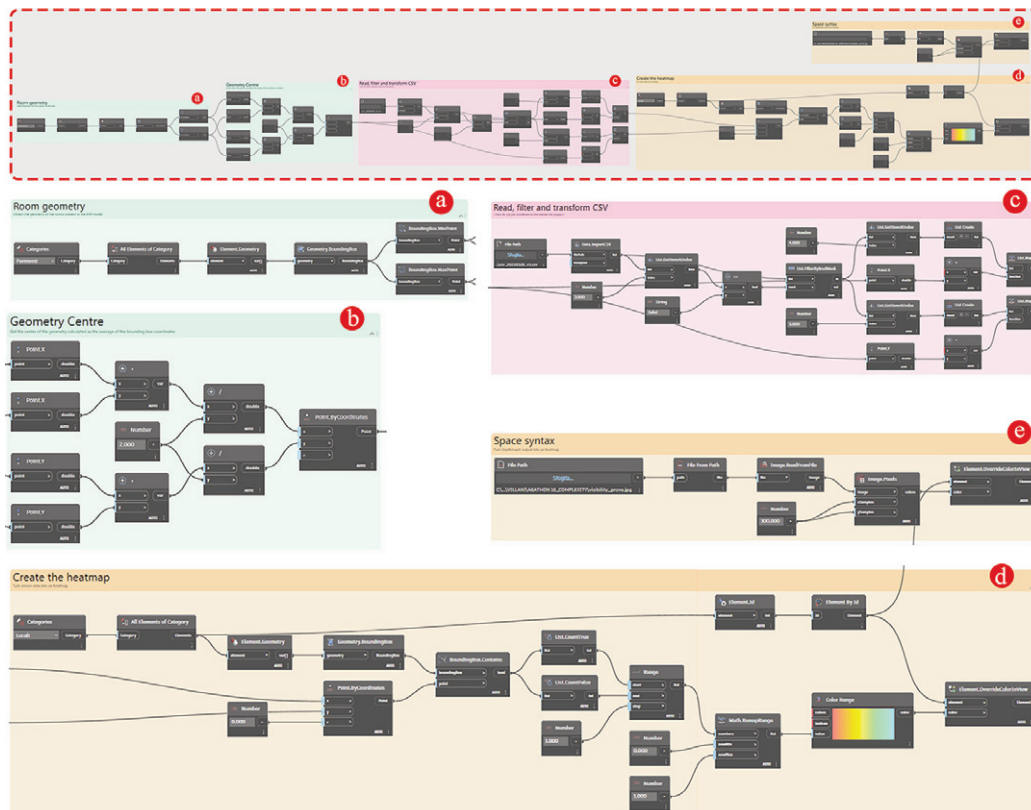
Inoltre l'uso di tecnologie BIM per la gestione integrata dei dati spaziali e comportamentali si configura come una soluzione strategica, capace di fornire a curatori e gestori gli strumenti necessari per prendere decisioni più informate e consapevoli per garantire la fruizione ampliata del Patrimonio, in aderenza alla Convenzione delle Nazioni Unite sui Diritti delle Persone con Disabilità (UN, 2008), ai concetti enunciati dalla Convenzione Quadro di Faro (Council of Europe, 2005) e agli articoli 3 e 9 della Costituzione della Repubblica Italiana del 1947.<sup>3</sup>

Una visualizzazione integrata chiara degli aspetti che influenzano la fruibilità può fornire un utile sup-

porto nella redazione / aggiornamento dei PEBA (Piani di Eliminazione delle Barriere Architettoniche) che tutti i musei devono elaborare nella rinnovata accezione della Circolare MIBACT (2018) della Direzione Generale Musei n. 26 del 25 luglio 2018 per superare tutte le barriere (architettoniche, senso-percettive, culturali e cognitive) esistenti nei siti museali. I risultati ottenibili con l'applicazione della metodologia proposta sono già pienamente in linea con i contenuti dei PEBA che sono strumenti di monitoraggio della fruibilità e di pianificazione e coordinamento sugli interventi migliorativi, dal momento che prevedono soluzioni a cui associare anche l'analisi dell'impegno finanziario, delle priorità di intervento e dei tempi di esecuzione.

Quanto prodotto nell'ambito della ricerca offre una prima risposta in termini di strumenti avanzati per effettuare un'attività di monitoraggio periodica, in base agli obiettivi stabiliti dalle strutture sul livello di fruibilità, e per introdurre cambiamenti e/o miglioramenti su vari aspetti, compresi quelli di governance, organizzativi e realizzativi, che possono incidere positivamente sull'incremento dei visitatori, sul livello di gradimento e sul soddisfacimento delle aspettative di visita. Infine, la messa a punto di uno strumento digitale per la gestione contestuale di dati sulla fruibilità potrebbe auspicabilmente contribuire all'implementazione del finanziamento PNRR 'Rimozione delle Barriere Fisiche e Cognitive in Musei, Archivi e Biblioteche, per Consentire un più Ampio Accesso e Partecipazione alla Cultura – Missione 1 – Componente 3 (Turismo e Cultura 4.0) – Investimento 1.2', del valore di 300 milioni di euro, di cui 282 milioni destinati ai luoghi della cultura statali e 18 milioni a quelli non statali.

Rispetto a quanto finora prodotto dalla ricerca ulteriori sviluppi riguarderanno operazioni di ottimizzazione dello strumento di integrazione dei dati e di semplificazione, in modo tale che la complessità delle fasi e degli strumenti utilizzati – che può apparire



**Fig. 8** | The workflow developed in Dynamo (above) is divided into groups (below): a) floor geometry representation; b) central coordinate calculation; c) reading and adapting the coordinates in the CSV according to the model; d) visualising sensor data in heatmap; e) transposing and visualising DepthmapX output in heatmap (credit: G. Romagna, 2024).

come una criticità che limita lo sviluppo e l'adozione di questo approccio innovativo – possa essere superata per arrivare a una profonda comprensione delle dinamiche spaziali e comportamentali e ottenere risposte più precise e mirate alle esigenze delle comunità che fruiscono degli spazi museali, migliorando così l'esperienza culturale e sociale nel suo complesso.

In a context where digital transformation facilitates knowledge and predictive management of the built environment, considering both its material and immaterial components, and especially the relationships between them and the people who interact with them, digital management tools for existing built heritage have stimulated extensive research (Danioiti, Gianinetti and Della Torre, 2020) mainly characterised by the need to pay attention to every aspect of the building's life, including the use phase and the user's experience (Andersen, Jensen and Ryberg, 2021; Ferretti, Quattrini and D'Alessio, 2022). Thus, monitoring building usability becomes intertwined with managing the use phase, as it aims to continuously adapt spaces to meet functional, technical, and operational needs over time, along with user expectations for comfort and accessibility (Cetorelli and Papi, 2024; McGlinn et alii, 2017). This involves not only maintaining facilities and infrastructure but also dynamically adjusting spaces to new needs, improving energy efficiency while optimising services and the organisation of environments.

Such an integrated building management model is particularly significant when applied to museums, as these are complex structures increasingly designed for collective, rather than individual, experiences, fostering interactions and exchanges between visitors (Di Benedetto, 2021). Given the complexity of the visitor experience (Zammuner, 2006), the goal is to enhance existing heritage buildings by controlling various social, cognitive, and emotional factors during the use phase.

Numerous national and international experiments in the museum sector demonstrate how museums today strive to carve out an important societal role, one of great responsibility that is not easily achieved. Museums are becoming increasingly active entities within their communities (Lupo, 2021); their value is not solely determined by the cultural heritage they protect, but by their social role in disseminating knowledge, raising awareness about civic participation, safeguarding, managing, and transmitting cultural heritage to future generations (Riva, 2008; Gupta and Vegelin, 2016). They represent democratic, inclusive, and polyphonic spaces, open to critical dialogue and reflection on the past and the future (Dal Falco and Bonomi, 2021).

In its complexity, the museum – in theory and practice – deals with intangible issues related to the experience, aimed at benefiting the user (user-friendly service) and the ways of involvement, digitisation, and forms of interaction (Ander et alii, 2011; Xu et alii, 2023); it also deals with concrete issues arising from being an active service in helping to prevent and mitigate difficulties and criticalities (environmental, social, and usability) over time for people, through strategies and initiatives (Zakaria, 2023). Thus, museums are seen as services in terms of usability, user interaction, and experience, where it is essential to operate both by environmental protection (eco-design)

and user needs (user-centred design) while considering local communities (community-oriented design) through enhancement processes (Cellucci and Villani, 2024). This aligns with the new definition of a museum as a permanent institution that serves society, is open to the public, is accessible and inclusive, and promotes diversity and sustainability.<sup>1</sup>

In addition to the complexity of how spaces 'function', there is also the complexity of how people 'function' as theorised by the ICF bio-psycho-social model (WHO, 2001), which considers individual well-being and capabilities as the result of a dynamic interaction between abilities that evolve over a lifetime and environmental factors. Particularly for cultural spaces, these two dimensions of complexity must be considered in an integrated and interconnected way to ensure physical and cognitive accessibility for all, which is a primary goal for those managing and promoting cultural heritage sites (Sposito and Scalisi, 2018).

To address this challenge, usability should not be seen as a fixed condition to guarantee but as an evolving process involving the physical structure of the museum, the ways visitors interact with it, and the ongoing training of staff and management (Cetorelli and Papi, 2024). This process can be managed predictively, like maintenance aspects, through progressive and continuous monitoring using a multidisciplinary approach that gathers and analyses detailed information about people and cultural spaces. The goal is to propose physical, perceptual, cognitive, and technological solutions that protect and enhance the uniqueness and beauty of both systems.

This vision emphasises the need to investigate usability issues in a structured way, integrating the critical observation skills of managers and curators, based on their in-depth knowledge of museum structures and their issues also according to the conscious use of digital technologies (Bonacini, 2011), with qualitative information about how buildings function. This can be done by analysing spatial configuration, the arrangement of spatial elements in the layout, and their relationships (Hillier, 2007; Hillier and Hanson, 1984; Penn, 2003).

This approach is supported by trials conducted at major museums like the British Museum in London, which assessed the interaction between space and visitors' movement patterns. By using AI (Artificial Intelligence) and IoT (Internet of Things) sensors to collect and analyse real visitor flow data (Orenes-Vera, Terroso-Saenz and Valdes-Vela, 2021), it becomes possible to integrate direct analyses for evaluating visitors' emotional experiences (Ceccarelli et alii, 2024), predicting behaviour using Markov models (Centorrino et alii, 2021) and deep learning techniques (Rossi et alii, 2021).

Given the heterogeneity of qualitative spatial data from indirect analyses (like Space Syntax Analysis) and quantitative data obtained directly about 'user functionality' via IoT sensors, often collected on different platforms, this contribution aims to promote a predictive accessibility approach by considering the 'functional processes' of both people and cultural spaces as overlapping domains. The specific objective is to propose a methodology for integrating all relevant data through a digital tool developed in a BIM environment (Dixit et alii, 2019) to manage data on museum space accessibility, enabling an intuitive understanding of spatial and behavioural dynamics. This tool is a unique knowledge source to help managers and curators make better-informed decisions to optimise the complex cultural experience.

This study was developed with the understanding that innovation is an intellectual priority, and technology is not an end but rather a flexible tool capable of revealing surprising scenarios where data represent a form of knowledge with significant value (Valenti et alii, 2024). The proposed methodology's results show that it is possible to facilitate the integration of critical observation with quantitative assessment of phenomena, recognising the opportunity to turn to the world to learn what it has to teach us to address complex problems, rejecting the separation between data collection and theoretical construction that underpins normal science (Ingold, 2019).

### International studies on the use of BIM-based tools to unify external data with contextual data of physical space

While data are used to understand reality through analysis, it is crucial to understand how, when considered individually in specific moments or their continuous flow, they can be integrated and become part of the space itself. Although there is an urgent need to focus studies on integrating heterogeneous data related to the built environment and user behaviour, there are still few that successfully explain how to maintain a dynamic balance between the human-space-data system.

To better understand the methodological steps necessary to develop a digital tool for managing heterogeneous data on museum space accessibility and to support museum managers, some methodologies were selected and analysed from the literature. These cases propose using BIM to unify external data with contextual physical space data, focusing on different issues. Using platforms such as Google Scholar, Web of Science, and Scopus, official studies published over the last decade (2014-2024) were selected using keywords like 'IoT', 'BIM', 'integration', and their combinations. The analysis focused on three key selection criteria: a) the heterogeneity of the data involved; b) the central role of BIM in data collection, analysis, and visualisation; and c) the applicability and replicability of the proposed approaches in different contexts, including complex spaces like museums.

Kensek (2014) explores the feasibility of integrating external data from environmental sensors (such as lighting levels, humidity, and CO<sub>2</sub> concentration) into a BIM environment, validating various technologies and tools, including Arduino, Dynamo, and Autodesk Revit's API (Application Programming Interface), across different case studies to optimise the energy performance of the built environment. Specifically, regarding smart facades, the study tests the possibility of automatically modifying the BIM model based on sensor data, transferring these changes to the physical asset through actuators connected to Arduino. Among the limitations reported is the slow interaction between Revit and Dynamo, compared to similar non-BIM integrated software (e.g., Rhino Grasshopper), the poor interoperability in communication from the digital to the physical model, which makes synchronisation (e.g., Digital Twin) difficult, and the lack of optimisation functionalities for building performance based on the data.

Similarly, Kazado, Kavgić and Eskicioglu (2019) investigate using tools with energy-related data to improve decision-making efficiency by enabling clear visualisation while simultaneously reducing consumption. Focusing on a university building, they discuss three approaches with increasing levels of complexity: a) sensors-Revit; b) sensors-Revit-Naviswork;

c) sensors-Revit-Naviswork-API. The difficulty in visualising large volumes of data in the first approach is overcome by implementing Naviswork in the second. Subsequently, the third approach integrates an API (Application Programming Interface) to enable advanced functionalities.

The study reveals limitations related to the complexity of the tools and the skills required, which could hinder the work of Facility Managers, making the systematic use excessively burdensome; furthermore, the demanding management of historical data limits long-term analysis capabilities, thereby reducing performance optimisation potential. Another issue pertains to the scalability of the methodology. Although it proves effective for individual buildings, its extension to complex buildings or networks of buildings becomes problematic due to the exponential increase in data flow and the high computational power required. The study also highlights how reliability depends on the quality and proper maintenance of sensors, underscoring the importance of making a careful choice among the various solutions available on the market, which presents an additional challenge.

In a different context, Artan et alii (2022) present an advanced method for conducting post-occupancy evaluations in office buildings that allows for the collection and analysis of feedback on comfort levels, functionality, and overall occupant satisfaction through integration with BIM technologies. The developed prototype (Rateworkspace) uses a semantic model based on the standard IFC (Industry Foundation Class) format, integrated with Bluetooth localisation technologies; this combination enables the linking of the data collected in the BIM model, making it queryable and intuitively visualisable through advanced analytical technologies.

The limitations identified include dependence on Bluetooth technologies, which are less reliable in crowded environments, rigid standardisation of feedback and limited data analysis functionalities. Additionally, the lack of integration with Building Automation Systems (BAS), which manage, control, and monitor various aspects related to building operational efficiency, reduces the system's ability to provide real-time analysis. Another barrier is the lack of an interface dedicated to technicians, which compromises operational maintenance efficiency. Finally, the generalisation of the prototype is constrained by a specific use case.

Similarly, Fialho et alii (2022) develop a BIM-based platform for smart maintenance in university buildings, focusing on lighting. Using sensors directly applied to devices, a BIM model, and specific software architecture, the proposed platform allows for intuitive detection and reporting of failures. Specifically, communication between BIM and IoT takes place through a Dynamo workflow, designed to program the graphical representation logic of the model based on operational states. This approach enables dynamic and interactive visualisation of the model, adjusting the graphics according to different operational conditions.

The study highlights limitations in the technical complexity of integrating the specific domain (artificial lighting) into the BIM environment, requiring precise calibration of sensors to prevent interference with natural lighting levels and avoid inaccurate measurements. Additionally, despite the limited number of variables involved, data transfer was occasionally hindered by the instability of the cloud infrastructure: the use of Autodesk online viewer posed a critical

issue in transmitting results, as it does not support some advanced Dynamo functionalities. Finally, data security and centralised information management remain partially unresolved, as some parts of the system are still vulnerable to risks related to local data storage, which can result in information loss, unauthorised access, or data damage.

In parallel, Scianna, Gaglio and La Guardia (2022) propose a low-cost integration application for real-time structural monitoring of a bridge beam. The system developed in the laboratory, in addition to ultrasonic sensors, includes the use of Arduino UNO, a Wi-Fi module, an RDBMS (Relational Database Management System), and a BIM model developed in Autodesk Revit, accompanied by a Dynamo workflow for continuous communication between the database and the model. The study highlights challenges in terms of interoperability between the various complex tools used, which, in addition to requiring highly specialised skills, make data integration into the BIM model via Dynamo difficult. The interaction between the sensors and the model does not occur in real-time, causing delays in data visualisation, a significant problem in this specific field. Furthermore, the system has scalability limitations, requiring more advanced sensors and communication technologies for application to real infrastructures, thereby compromising the cost-effectiveness of the method, which was an initial premise.

A similar approach is adopted by Desogus et alii (2021), who, on the topic of environmental parameter monitoring, propose a BIM data integration framework based on IoT sensors, a BIM model, RDBMS, and a Dynamo workflow for communication between the latter. The study highlights the challenges associated with the BIM modelling of existing buildings, which requires the collection of large amounts of information, often difficult to obtain or incomplete, especially in the case of historical or architecturally significant buildings that often lack comprehensive documentation on the construction layout, components, and systems. Moreover, although the study aimed to achieve real-time monitoring, data collection was often subject to delays or discontinuities. These problems arise from the intrinsic limitations of the technologies employed and the system configuration, which may not be optimised to facilitate effective information collection and transmission, resulting in incomplete or untimely representations and thus negatively affecting data-driven decisions.

Chang, Dzung and Wu (2018) present a simplified approach to BIM integration with IoT data on energy management issues to demonstrate the feasibility of the integration concept using a single tool. Using Autodesk Revit and building a dedicated workflow in Dynamo, the research shows the possibility of communication between sensors and different systems (such as Arduino and Raspberry Pi) by re-drawing the final information directly in the model, adding visualisations that express different perspectives, thereby supporting complex and interdisciplinary decisions.

The authors highlight limitations regarding the operational flexibility of the proposed approach, which was not tested in situations with more articulated and complex management protocols. The sensors used in the experiment also show an inadequate tolerance level for other contexts where it is crucial to ensure a high degree of data reliability. Again, real-time data management is limited: delays in data collection and processing could compromise the ability to make

timely decisions, making the platform less effective in scenarios that require continuous and rapid monitoring. Finally, the proposed workflow presents limitations in terms of replicability, as it requires small adjustments based on the specificities of the case study.

The summary framework of the experiments reported in Table 1 highlights that, despite the variety of domains addressed, the tools adopted are partially uniform. Although most of the data come from IoT sensors, the flexibility of the approaches also allows for the integration of different types of data. It is also noted that the increase in employed technologies tends to correlate with limitations due to the complex skills required systematically.

A constant element in all the examined cases is the use of Autodesk Revit in combination with Dynamo, integrated with different technologies depending on the specific context. Given the innovative nature of the topics covered in this contribution, it was deemed advantageous to adopt a simplified approach that facilitates the transfer of knowledge acquired from international studies, prioritising the use of a single working environment based on the integration of Autodesk Revit and Dynamo. This choice not only optimises workflows but also reduces the complexity associated with using multiple tools, a cross-cutting limitation found in all the methodologies analysed.

#### Methodology and tools for building a data management system for usability

The goals of the integrated data management process described in this article were achieved by applying a methodology divided into four distinct phases (Fig. 1). Phase 0 involves the abstract definition of the integrated analysis model. Precisely, the choice of a set of elementary analysis methods (both direct and indirect) is planned, informed by the goals of the management process described, the possible comparative analyses that can be carried out between the results of individual analyses, and the constraints present in the museum environment. The implementation and use of individual methods are handled in the subsequent phases of the methodology.

The first approach, called 'indirect' and developed in Phase 1, involved investigating the spatial properties relevant to usability (Biocca, Villani and Romagnoli, 2022) and wayfinding (Romagnoli, Villani and Oddi, 2019) through the application of configurational methodologies at the floor scale and the individual room scale. In this phase, the use of DepthmapX software was planned.

In Phase 2, a second approach, called 'direct', was adopted, which had already been used within the ARTEMISIA project (lit. Analysis of Individual Museum Reactions and Trajectories with Artificial Intelligence Tools; Ceccarelli et alii, 2024). This approach was based on using IoT sensors equipped with integrated AI systems (Xovis PC2) to analyse visitor trajectories at the museum room level.

The comparative use of the two approaches mentioned is based on the insight that visitor behaviour is influenced by two different components: 1) the spatial configuration, analysed in the literature on Space Syntax methodology, and 2) the presence of the exhibited artworks, which attract visitors and, in a way, change their perception of space. The two introduced approaches thus define a comparative model that leverages the distinctive characteristics of each method to develop a synergistic approach. The results of this integration will be analysed in Phase 3.

se 3, which implements a further level of coordinated analysis.

Given the difficulty of accessing and evaluating information related to usability management, BIM was chosen as an effective tool capable of collecting, managing, and updating numerous heterogeneous datasets in a single environment (IFMA, 2013). Following some of the methodologies reviewed in the literature for integrating external data into BIM (Chang, Dzeng and Wu, 2018), a methodology was selected that involves the combined use of BIM Revit software and the native Dynamo plug-in. The latter, through its visual and intuitive programming interface, can develop custom algorithms for managing data connected to the BIM model, allowing intuitive graphic visualisations that support decision-makers.

The results of this phase, essential for a more complete and articulated understanding of the context under examination, have allowed for a more accurate evaluation of the dynamics and relationships between the factors considered. In other words, comparing the two approaches helps better understand the effects of the two distinct components (space and artworks) on people's behaviour. As a result, integrated analyses may suggest some changes in the organisation of the museum space, as well as the relocation/exchange of some artworks' positions (where possible).

**Case study of the Museo di Roma, Palazzo Braschi** | The experiment is connected to the ARTEMISIA<sup>2</sup> research project and utilises part of the analyses on the visitor experience, supported by AI algorithms, conducted to understand the behavioural dynamics of users according to cultural content and architectural, organisational, and educational elements. The application development took place at the Museo di Roma in Palazzo Braschi, built between the late 18th and early 19th centuries (Ricci, 1989). The current permanent exhibition, dated 2017, spans the second and third floors; it tells the story of Rome from the 17th to the 20th century (D'Amelio, Pirani and Strano, 2018). On the other hand, the first floor is dedicated to temporary exhibitions.

The context on which the indirect information about space syntax and the direct information from sensors were processed includes the spaces of the permanent exhibition, particularly the second floor (Fig. 2). The visit path, accessed from the main staircase (Fig. 3a) or via the elevator, starts from the entrance of Room 1 (Fig. 3b) and splits into two routes: a main one (Fig. 3c), which leads to the end of the path, and a secondary one (Fig. 3d), which requires visitors to return the way they came. The passages between the exhibition rooms are aligned, allowing visitors to perceive previous and subsequent spaces visually. This is particularly noticeable in the angular space, a central node from which all previous (Fig. 3e) and subsequent (Fig. 3f) rooms can be glimpsed, except for Rooms 1, 8, and 9.

In the first phase, a series of configurational analyses focused on two different scales of investigation were conducted: the entire second floor dedicated to the permanent exhibition (Fig. 4) and two rooms (Room 1 and Room 6; Fig. 5), considered particularly relevant as they represent the beginning and end of the visit path. In this phase, the open-source Depthmap X 0.8.0 software was used to examine the physical usability and visual integration of the spaces – which have a significant impact on visitor navigation (Hillier, 2007) – and, thus, on their visit experience and relational dynamics.

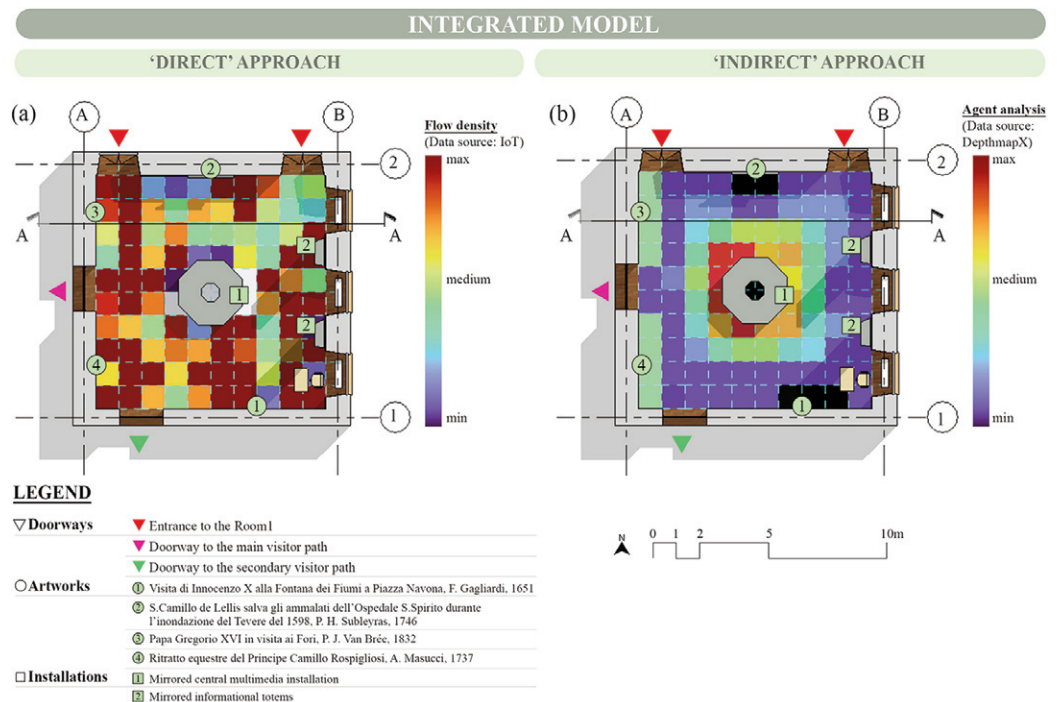
In conducting this indirect analysis, an abstraction of the spatial model was adopted, representing spaces as nodes and their connections as lines connecting the nodes. From this abstraction, the visibility graph was derived, allowing the connectivity, a measure that evaluates the number of spaces immediately connected to a given space (physical usability), and visual integration, which indicates the visual distance between all spaces, to be verified. As a further stage of in-depth analysis, the environments were ideally divided using a grid of points (60x60 cm dimensions, comparable to the space occupied by a moving person) to calculate and compare the corresponding values. Finally, a simulation of flows in the spaces was conducted based on 'agents' (entities that, based on the visibility of the grid points, make

statistically informed decisions similar to human behaviour), determining the areas with greater or lesser expected flow density solely based on spatial configuration. Moving on to the scale of the two experimental rooms, the studies were limited to agent-based flow analysis. In both scenarios, the software provides a qualitative visualisation of the results, outlining the different values of each analysis (connectivity, visual integration, and flow density) through a colour scale ranging from red (the highest values) to yellow, green, and blue (the lowest values).

The second phase was conducted as part of the ARTEMISIA project (Ceccarelli et alii, 2024) through the installation of IoT sensors on suspended cables in Rooms 1 and 6. Specifically, Xovis PC2 stereo cameras equipped with artificial vision algorithms were installed, capable of detecting human presence and directly processing structured data on the device. The acquired information includes timestamps, anonymous visitor IDs, room identifiers, spatial coordinates (x, y), and visitor head orientation (dx, dy) on the horizontal plane.

**Experimental results** | This study examines only one type of 'direct' analysis: heatmaps. Given the uniformity of the daily data collected, the results for a single sample day, arbitrarily chosen as Saturday, 17 June 2023 (Fig. 6a, 6b), are presented. Heatmaps enable an effective visual analysis of visitor distribution in the studied spaces. This is achieved by linearly transforming positional coordinates into pixel coordinates and using a colour scale representing dwell time counts within each pixel. Each time a visitor crosses a pixel, the dwell time count for that point is incremented by one.

For the integration phase (Phase 3), the experiment explicitly focused on Room 1, whose BIM model developed in Autodesk Revit is illustrated in Fig. 7. The room, square in shape with dimensions of 10x10 meters, is directly accessible from the main staircase via two entrances and communicates, through two other passages, with both directions of the visit path. From the point of view of natural lighting conditions, the room is characterised by three large windows



**Fig. 9** | The outputs of the integrated model developed via the Dynamo workflow: a) sensor data; b) Space Syntax (credit: G. Romagna, 2024).

located on one wall, while artificial lighting is focused on the exhibited artworks.

The architectural characterisation includes walls covered in white plaster and a ceiling with a varying height, featuring a plain vault, from 6.20 to 6.90 meters. Inside the room, there are four paintings, two display cases, and a central multimedia installation consisting of a mirrored volume with two integrated information screens providing details about the exhibited works. Additionally, two explanatory totems are located between the windows, and two information panels are positioned next to the two openings, guiding visitors along the exhibition route.

In this context, the workflow developed in Dynamo (Fig. 8) involved organising the nodes into thematically distinct groups through colour (green for input groups, pink for calculation groups, and orange for output groups). After specifying the floor geometry of the model loaded in Autodesk Revit (Fig. 8a) and calculating the central coordinates (Fig. 8b), it was possible to read and adjust the coordinates (Posx, Posy) of the CSV file generated by the stereo cameras (Fig. 8c) to calibrate them concerning the BIM model's position perfectly. These steps are particularly relevant regarding the replicability of the proposed methodology, allowing for the adaptability of the workflow regardless of the BIM model's position in virtual space, thus solving the flexibility limitations of the tool observed in previously analysed international experiences.

The workflow concludes with two groups of outputs (Figg. 8d, 8e), which generate two heatmaps respectively based on sensor data (Fig. 9a) and the DepthmapX output (Fig. 9b).

Based on the obtained results, the agent-based flow analysis (Figg. 5a, 9b) shows a uniformly distributed concentration of visitors around the central multimedia installation. However, when we consider the heatmap (Figg. 5b, 9a) for the same room, the uniformity of flow distribution, as observed in the previous approach, appears significantly distorted, indicating a higher density of visitors around the artworks, with potential overcrowding issues in the bottom right corner. This confirms how visitor behaviour within a cultural space, seen as a 'container', is strongly

influenced by the exhibited 'contents', their specific characteristics, and their layout according to the environment.

In this sense, the findings from the use of the integrated model are useful in suggesting a thoughtful reorganisation of the artworks displayed in Room 1. Generally, it is possible to hope that this integrated comparative analysis could be applied iteratively in all museum rooms to aim for a new and optimised distribution of space usage levels.

**Conclusions** | The study reveals that the availability of information on the physical contexts characterising museum buildings and visitor behaviour has introduced methods of knowledge and interpretation that were unknown until a few years ago. The data integration process, tested through a first application that needs further refinement due to its complex and labour-intensive steps, represents a complex but necessary challenge to enhance and optimise the contemporary cultural experience. Through the integration of quantitative and qualitative data, the predictive approach to managing the usability of museum spaces proposed in this contribution promotes a holistic vision in which the space and the visitor are interconnected in a continuous dialogue. This innovative method allows for anticipating future needs related to exhibitions and improving the quality of the experience, turning museums not just into containers of culture but into active places of exchange and social participation.

Furthermore, the use of BIM technologies for the integrated management of spatial and behavioural data emerges as a strategic solution, capable of providing curators and managers with the necessary tools to make more informed and conscious decisions, essential to ensuring broader accessibility to cultural heritage, in adherence to the United Nations Convention on the Rights of Persons with Disabilities (UN, 2008), the concepts outlined in the Faro Framework Convention (Council of Europe, 2005), and Articles 3 and 9 of the 1947 Italian Constitution.<sup>3</sup>

A clear integrated visualisation of the factors influencing usability can offer valuable support in drafting or updating PEBA (Plans for the Elimination of Ar-

chitectural Barriers), which all museums must develop in line with the renewed understanding outlined in the MIBACT (2018) Circular of the Directorate General of Museums no. 26 of 25 July 2018, to overcome all existing barriers (architectural, sensory-perceptual, cultural, and cognitive) in museum sites. The results achievable through the application of the proposed methodology are already fully in line with the content of PEBA, which serve as monitoring tools for usability and planning and coordinating improvement interventions, as they provide solutions that also include the analysis of financial commitment, intervention priorities, and execution times.

What has been produced within this research offers an initial response in terms of advanced tools to conduct periodic monitoring activities based on the objectives set by institutions concerning usability levels and to introduce changes and/or improvements in various aspects, including governance, organisational, and implementation, which can positively impact the increase in visitors, satisfaction levels, and fulfilment of visit expectations. Lastly, the development of a digital tool for contextual management of usability data could potentially contribute to the implementation of the PNRR funding for 'Removal of Physical and Cognitive Barriers in Museums, Archives, and Libraries to Allow Broader Access and Participation in Culture – Mission 1 – Component 3 (Tourism and Culture 4.0) – Investment 1.2', with a total value of 300 million euros, of which 282 million are allocated to state-owned cultural sites and 18 million to non-state sites.

Regarding what has been produced so far from the research, further developments will focus on optimising the data integration tool and simplifying it so that the complexity of the phases and tools used – which may appear as a limitation to the development and adoption of this innovative approach – can be overcome to achieve a deeper understanding of the spatial and behavioural dynamics and obtain more precise and targeted responses to the needs of the communities using museum spaces, thereby improving the cultural and social experience as a whole.

## Acknowledgements

Thanks to all participants in the ARTEMISIA research project (Analisi delle Reazioni e delle Traiettorie Museali Individuali con Strumenti di Intelligenza Artificiale; lit. Analysis of Individual Museum Reactions and Trajectories with Artificial Intelligence Tools). For more information, visit the website: [artemisiaproject.it](http://artemisiaproject.it) [Accessed 30 September 2024].

Special thanks also go to the Capitoline Superintendency (Rome) for Cultural Heritage.

## Notes

1) In 2022, ICOM approved a new Museum definition. For more information, see the webpage: [icom.museum/en/news/icom-approves-a-new-museum-definition/](https://icom.museum/en/news/icom-approves-a-new-museum-definition/) [Accessed 10 September 2024].

2) ARTEMISIA is a research project funded by the Lazio Region through Lazio Innova within the DTC (Distretto Tecnologico per i Beni e le Attività Culturali; lit. Technological District for Cultural Heritage and Activities) of the Centre of Excellence on Intervention TE 1 – Invitation to the Centre of Excellence to present projects for the second

phase – RSI, project CUP: F85F21001090003 with determination no. G12666 of 18 October 2021, published in the BURL no. 99 of 21 October 2021.

3) The text of the Constitution can be viewed on the webpage: [gazzettaufficiale.it/dettaglio/codici/costituzione](http://gazzettaufficiale.it/dettaglio/codici/costituzione) [Accessed 10 September 2024].

## References

- Ander, E., Thomson, L., Noble, G., Lanceley, A., Menon, U. and Chatterjee, H. (2011), "Generic well-being outcomes – Towards a conceptual framework for well-being outcomes in museums", in *Museum Management and Curatorship*, vol. 26, issue 3, pp. 237-259. [Online] Available at: [doi.org/10.1080/09647775.2011.585798](https://doi.org/10.1080/09647775.2011.585798) [Accessed 10 September 2024].
- Andersen, R., Jensen, L. B. and Ryberg, M. (2021), "Using digitized public accessible building data to assess the renovation potential of existing building stock in a sustainable urban perspective", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 75, article 103303, pp. 1-8. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.scs.2021.103303](https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103303) [Accessed 10 September 2024].
- Artan, D., Ergen, E., Kula, B. and Guven, G. (2022), "Rateworkspace – BIM integrated post-occupancy evaluation system for office buildings", in *Journal of Information*

*Technology in Construction*, vol. 27, pp. 461-485. [Online] Available at: [doi.org/10.36680/j.itcon.2022.022](https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.022) [Accessed 10 September 2024].

Biocca, L., Villani, T. and Romagnoli, F. (2022), "Usability of Visiting Routes in Heritage – The Case Study of Mercati di Traiano", in Garofolo, I., Bencini, G. and Arenghi, A. (eds), *Transforming our World through Universal Design for Human Development – Proceedings of the Sixth International Conference on Universal Design (UD2022), Brescia, Italy, September 7-9, 2022*, IOS Press BV, Amsterdam, pp. 483-490. [Online] Available at: [doi.org/10.3233/SHT1220877](https://doi.org/10.3233/SHT1220877) [Accessed 10 September 2024].

Bonacini, E. (2011), *Nuove tecnologie per la fruizione e valorizzazione del patrimonio culturale*, Aracne, Roma.

Ceccarelli, S., Cesta, A., Cortellessa, G., De Benedictis, R., Fracasso, F., Leopardi, L., Ligios, L., Lombardi, E., Malatesta, S. G., Oddi, A., Pagano, A., Palombini, A., Romagna, G., Sanzari, M. and Schaerf, M. (2024), "Evaluating visitors' experience in museum – Comparing artificial intelligence and multi-partitioned analysis", in *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 33, article e00340, pp. 1-14. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00340](https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00340) [Accessed 10 September 2024].

Cellucci, C. and Villani, T. (2024), "Sustainable Environ-

- mental Communication Project – Eco-Friendly and Sensory Materials for Museums”, in *Sustainability*, vol. 16, issue 8, article 3358, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su16083358 [Accessed 10 September 2024].
- Centorrino, P., Corbetta, A., Cristiani, E. and Onofri, E. (2021), “Managing crowded museums – Visitors flow measurement, analysis, modeling, and optimization”, in *Journal of Computational Science*, vol. 53, article 101357, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jocs.2021.101357 [Accessed 10 September 2024].
- Cetorelli, G. and Papi, L. (2024), *Manuale di progettazione per l'accessibilità e la fruizione ampliata del patrimonio culturale – Dai funzionamenti della persona ai funzionamenti dei luoghi della cultura*, CNR Edizioni, Roma. [Online] Available at: dsu.cnr.it/pubblicazioni/ [Accessed 10 September 2024].
- Chang, K.-M., Dzen, R.-J. and Wu, Y.-J. (2018), “An automated IoT Visualization BIM Platform for Decision Support in Facilities Management”, in *Applied Sciences*, vol. 8, issue 7, article 1086, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app8071086 [Accessed 10 September 2024].
- Council of Europe (2005), *Convention on the Value of Cultural Heritage for Society*. [Online] Available at: coe.int/en/web/culture-and-heritage/faro-convention [Accessed 10 September 2024].
- D'Amelio, A. M., Pirani, F. and Strano, F. (eds) (2018), *Museo Di Roma in Palazzo Braschi – Brief Guide*, Silvana Editoriale, Cisinello Balsamo.
- Dal Falco, F. and Bonomi, S. (2021), “Comunicare il museo tra analogico e digitale – Un'esperienza di progettazione multimediale interattiva | Communicating the museum between analogue and digital – Interactive multimedia design experience”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 10, pp. 200-209. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/10182021 [Accessed 10 September 2024].
- Daniotti, B., Gianinetti, M. and Della Torre, S. (eds) (2020), *Digital Transformation of the Design, Construction and Management Processes of the Built Environment*, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-030-33570-0 [Accessed 10 September 2024].
- Desogus, G., Quaquer, E., Rubiu, G., Gatto, G. and Perra, C. (2021), “BIM and IoT Sensors Integration – A Framework for Consumption and Indoor Conditions Data Monitoring of Existing Buildings”, in *Sustainability*, vol. 13, issue 8, article 4496, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su13084496 [Accessed 10 September 2024].
- Di Benedetto, G. (2021), “Nuove frontiere museografiche – Immaterialità e multimedialità del museo narrativo | New museographic frontiers – Immateriality and multimediality of the narrative museum”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 10, pp. 68-75. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1062021 [Accessed 10 September 2024].
- Dixit, M. K., Venkatraj, V., Ostadalimakhmalbaf, M., Pariasai, F. and Lavy, S. (2019), “Integration of facility management and Building Information Modeling (BIM) – A review of key issues and challenges”, in *Facilities*, vol. 37, issue 7-8, pp. 455-483. [Online] Available at: doi.org/10.1108/F-03-2018-0043 [Accessed 10 September 2024].
- Ferretti, U., Quattrini, R. and D'Alessio, M. (2022), “A Comprehensive HBIM to XR Framework for Museum Management and User Experience in Ducal Palace at Urbino”, in *Heritage*, vol. 5, issue 3, pp. 1551-1571. [Online] Available at: doi.org/10.3390/heritage5030081 [Accessed 10 September 2024].
- Fialho, B. C., Codinhoto, R., Fabricio, M. M., Estrella, J. C., Ribeiro, C. M. N., dos Santos Bueno, J. M. and Torrezan, J. P. D. (2022), “Development of a BIM and IoT-based smart lighting maintenance system prototype for universities' FM sector”, in *Buildings*, vol. 12, issue 2, article 99, pp. 1-31. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings12020099 [Accessed 10 September 2024].
- Gupta, J. and Vegelin, C. (2016), “Sustainable development goals and inclusive development”, in *International Environmental Agreements | Politics, Law and Economics*, vol. 16, pp. 433-448. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10784-016-9323-z [Accessed 10 September 2024].
- Hillier, B. (2007), *Space is the machine – A configurational theory of architecture*, Space Syntax, London.
- Hillier, B. and Hanson, J. (1984), *The Social Logic of Space*, Cambridge University Press, Cambridge (UK). [Online] Available at: doi.org/10.1017/CBO9780511597237 [Accessed 10 September 2024].
- IFMA – International Facility Management Association (2013), *BIM for Facility Managers*, John Wiley & Sons, Hoboken. [Online] Available at: wiley.com/en-sg/BIM+for+Facility+Managers-p-9781118382813 [Accessed 10 September 2024].
- Ingold, T. (2019), *Making – Antropologia, archeologia, arte e architettura* [or. ed. *Making – Anthropology, archaeology, art and architecture*, 2013], Raffaello Cortina, Milano.
- Kazado, D., Kavgić, M. and Eskicioglu, R. (2019), “Integrating Building Information Modeling (BIM) and Sensor Technology for Facility Management”, in *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, vol. 24, pp. 440-458. [Online] Available at: itcon.org/papers/2019\_23-ITcon-Kazado.pdf [Accessed 10 September 2024].
- Kensek, K. M. (2014), “Integration of Environmental Sensors with BIM – Case studies using Arduino, Dynamo, and the Revit API”, in *Informes de la Construcción*, vol. 66, issue 536, article e044. [Online] Available at: doi.org/10.3989/ic.13.151 [Accessed 10 September 2024].
- Lupo, E. (2021), “Design e innovazione del patrimonio culturale – Connessioni phygital per un Patrimonio di prossimità | Design and innovation for the Cultural Heritage – Phygital connections for a Heritage of proximity”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 10, pp. 186-199. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/10172021 [Accessed 30 September 2024].
- McGlinn, K., Yuce, B., Wicaksono, H., Howell, S. and Rezgui, Y. (2017), “Usability evaluation of a web-based tool for supporting holistic building energy management”, in *Automation in Construction*, vol. 84, pp. 154-165. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.033 [Accessed 10 September 2024].
- MIBACT – Ministero per i Beni e le Attività Culturali (2018), *Circolare n. 26 – Linee guida per la redazione del Piano di eliminazione delle barriere architettoniche (P.E.B.A.) nei musei, complessi monumentali, aree e parchi archeologici*. [Online] Available at: musei.beniculturali.it/wp-content/uploads/2018/12/Linee-guida-per-la-redazione-del-Piano-di-eliminazione-delle-barriere-architettoniche-P.E.B.A.-Circolare-26-anno-2018-e-allegati.pdf [Accessed 10 September 2024].
- Orenes-Vera, M., Terroso-Saenz, F. and Valdes-Vela, M. (2021), “RECITE – A framework for user trajectory analysis in cultural sites”, in *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, vol. 13, issue 5, pp. 389-409. [Online] Available at: doi.org/10.3233/AIS-210612 [Accessed 10 September 2024].
- Penn, A. (2003), “Space Syntax and Spatial Cognition – Or Why the Axial Line?”, in *Environment and Behavior*, vol. 35, issue 1, pp. 30-65. [Online] Available at: doi.org/10.1177/0013916502238864 [Accessed 10 September 2024].
- Ricci, C. (1989), *Palazzo Braschi – Storia ed Architettura di un Edificio Settecentesco*, Palombi, Roma.
- Riva, R. (2008), *Il Metaprogetto dell'Ecomuseo*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna.
- Romagnoli, F., Villani, T. and Oddi, A. (2019), “The Environmental Contribution to Wayfinding in Museums – Enhancement and Usage by Controlling Flows and Paths”, in Bagnara, S., Tartaglia, R., Albolino, S., Alexander, T. and Fujita, Y. (eds), *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018) – Volume VIII – Ergonomics and Human Factors in Manufacturing, Agriculture, Building and Construction, Sustainable Development and Mining*, Florence, Italy, August 26-30, 2018, Springer, Cham, pp. 579-588. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-96068-5\_64 [Accessed 10 September 2024].
- Rossi, L., Paolanti, M., Pierdicca, R. and Frontoni, E. (2021), “Human trajectory prediction and generation using LSTM models and GANs”, in *Pattern Recognition*, vol. 120, article 108136, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.patcog.2021.108136 [Accessed 10 September 2024].
- Scianna, A., Gaglio, G. F. and La Guardia, M. (2022), “Structure Monitoring with BIM and IoT – The Case Study of a Bridge Beam Model”, in *ISPRS | International Journal of Geo-Information*, vol. 11, issue 3, article 173, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.3390/ijgi11030173 [Accessed 10 September 2024].
- Sposito, C. and Scalisi, F. (2018), “Processo conservativo e significatività – Un approccio metodologico per la progettazione dei sistemi di protezione nei siti archeologici | Conservation process and significance – A methodological approach to plan shelters in archaeological sites”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 4, pp. 45-58. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/462018 [Accessed 30 September 2024].
- UN – United Nations (2008), *Convention on the Rights of Persons with Disabilities*. [Online] Available at: social.desa.un.org/issues/disability/crpd/convention-on-the-rights-of-persons-with-disabilities-crpd [Accessed 10 September 2024].
- Valenti, A., Scalisi, F., Sposito, C., Dellamotta, L. and Masserdotti, A. (2024), “Energia, tecnologia emotiva e valore culturale dei dati – Creare consapevolezza nell'utente con lo storytelling | Energy, emotional technology and cultural value of data – Creating user awareness through storytelling”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 70-83. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1552024 [Accessed 10 September 2024].
- WHO – World Health Organization (2001), *ICF – International Classification of Functioning, Disability and Health*. [Online] Available at: iris.who.int/bitstream/handle/10665/42407/9241545429.pdf?sequence=1 [Accessed 10 September 2024].
- Xu, W., Dai, T.-T., Shen, Z.-Y. and Yao, Y.-J. (2023), “Effects of technology application on museum learning – A meta-analysis of 42 studies published between 2011 and 2021”, in *Interactive Learning Environments*, vol. 31, issue 7, pp. 4589-4604. [Online] Available at: doi.org/10.1080/10494820.2021.1976803 [Accessed 10 September 2024].
- Zakaria, N. N. (2023), “Assessing the working practices and the inclusive programs to students with disabilities in the Egyptian museum – Challenges and possibilities for facilitating learning and promoting inclusion”, in *Frontiers in Education*, vol. 8, article 1111695, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3389/educ.2023.1111695 [Accessed 10 September 2024].
- Zammuner, V. (2006), “La fruizione museale – Un'esperienza complessa di natura sociale, cognitiva ed emozionale”, in Frateschi, C. F. and Mistri, M. (eds), *I valori dell'arte – Economia e psicologia della cultura*, Carocci, Roma, pp. 97-125.