

Il monitoraggio microclimatico per la resilienza del patrimonio culturale ai cambiamenti climatici

Sileo M., Bevilacqua C., Gizzi F.T., Masini N.

Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale, Consiglio Nazionale delle Ricerche, C. da S. Loja, 85050 Potenza, Italy

Il cambiamento climatico rappresenta una delle principali minacce emergenti per la conservazione del patrimonio culturale mondiale. L'aumento delle temperature, la maggiore frequenza di eventi estremi e le variazioni repentine dei livelli di umidità (relativa ed assoluta) accelerano processi di degrado di materiali organici e inorganici. Musei, archivi, biblioteche, siti archeologici e architetture storiche risultano oggi vulnerabili a dinamiche non previste poiché sono stati progettati e conservati per secoli in condizioni ambientali relativamente stabili. Le dinamiche microclimatiche interne ed esterne ai siti di interesse culturale sono, dunque, un fattore determinante per la loro conservazione. L'attenzione verso strategie di prevenzione piuttosto che interventi *ex post* è diventata una priorità nella gestione del rischio, in coerenza con gli indirizzi e le raccomandazioni internazionali promossi da UNESCO, ICOM e ICCROM. In tale contesto, il monitoraggio microclimatico continuo e integrato emerge come strumento chiave per comprendere e anticipare gli effetti del cambiamento climatico sul patrimonio culturale, permettendo di sviluppare politiche mirate di conservazione preventiva (Tringa et al 2024). Il monitoraggio, peraltro, svolge un ruolo chiave anche nell'ottimizzazione energetica degli edifici storici, dove occorre trovare un equilibrio tra comfort degli utenti, tutela dei manufatti e sostenibilità ambientale (Frasca et al 2025).

Problema di ricerca: l'importanza del monitoraggio microclimatico per i beni fragili

Molti materiali impiegati nell'arte e nell'architettura come carta, tessuti, legno, pitture murali, metalli e pietra, reagiscono in maniera sensibile alle variazioni di temperatura e umidità. Le oscillazioni microclimatiche possono accelerare processi degradativi quali deformazioni, fessurazioni, attacchi biologici, fenomeni di condensazione e corrosione. Inoltre, i beni culturali situati in contesti territoriali vulnerabili, come zone costiere o regioni soggette a desertificazione, risultano più esposti all'azione congiunta dell'atmosfera e degli eventi climatici estremi (Sesana et al 2021; Nastou & Zerefos 2024).

La complessità del problema risiede nella circostanza che tali cambiamenti non sono sempre immediatamente percepibili: il danno spesso si manifesta solo quando è già diventato irreversibile. Pertanto, emerge la necessità di strumenti diagnostici che non solo misurino i parametri ambientali, ma che consentano anche una lettura interpretativa della loro evoluzione nel tempo. Ciò implica un approccio interdisciplinare che coinvolga conservatori, climatologi, ingegneri, fisici dell'edificio e *data scientist*.

Da questa riflessione deriva la domanda centrale della ricerca:

In che modo un sistema di monitoraggio microclimatico continuo e integrato può supportare strategie efficaci di conservazione preventiva per i beni culturali fragili, nel contesto del Climate Change?

Gli spunti critici da approfondire includono i quesiti chiave:

- Definire soglie di rischio specifiche per materiali e ambienti differenti;
- Prevedere soluzioni più sostenibili rispetto ai sistemi di climatizzazione tradizionali;
- I big data insieme ai modelli previsionali climatici su scala locale possono essere utili per integrare il supporto decisionale.

Approccio di monitoraggio proposto per salvaguardare i beni fragili

Si propone un sistema di monitoraggio microclimatico di ambienti confinati multi-livello e *data-driven*, capace di coniugare tecnologie sensoristiche avanzate, interoperabilità digitale e analisi predittiva. L'approccio si articola in tre assi principali:

1. Monitoraggio microclimatico ad alta risoluzione:

- Reti di sensori wireless per misurare in continuo temperatura, umidità relativa, illuminamento, concentrazione di inquinanti.
- Analisi spaziale delle condizioni ambientali tramite modelli CFD (Computational Fluid Dynamics) per individuare micro-aree critiche.

2. Valutazione del rischio e predizione del degrado:

- Incrocio dei dati microclimatici con indicatori di vulnerabilità materiale.
- Implementazione di algoritmi predittivi (Machine Learning) per prevedere fenomeni di degrado, identificando anomalie e trend potenzialmente pericolosi (Tringa et al 2024).

3. Supporto decisionale e gestione sostenibile:

- Dashboard interattive per la visualizzazione in tempo reale dei dati.
- Strategie di intervento basate su un principio di *intervento minimo*, privilegiando regolazioni climatiche passive, ventilazione controllata e uso di materiali protettivi reversibili.

Particolare attenzione viene posta sull'efficienza energetica, con l'obiettivo di ridurre consumi e impronta ambientale degli impianti di climatizzazione, contribuendo così alla mitigazione degli stessi fenomeni che minacciano il patrimonio culturale (Frasca et al 2025).

4. Discussione e conclusioni

Il monitoraggio microclimatico rappresenta una frontiera fondamentale della conservazione preventiva, poiché consente di trasformare un rischio ancora in parte invisibile, i danni indotti dal climate change, in un fenomeno osservabile, analizzabile e gestibile. L'adozione sistematica di tali metodologie richiede, tuttavia, un cambiamento culturale e gestionale: dalla logica dell'intervento episodico a quella della manutenzione programmata e della previsione.

I risultati attesi dall'approccio proposto includono:

- una maggiore resilienza dei beni culturali fragili grazie a strategie basate su evidenze empiriche;
- una riduzione dei costi di restauro nel lungo periodo, grazie all'individuazione precoce del degrado;
- la creazione di archivi digitali di dati ambientali utili per future ricerche e benchmark internazionali.

Nel quadro delle sfide globali attuali, proteggere il patrimonio culturale significa non solo salvaguardare la memoria storica delle comunità, ma anche sostenere quella componente identitaria che rafforza la coesione sociale e la capacità di resilienza della società stessa. Il monitoraggio microclimatico non è quindi solo un'azione tecnica, ma una scelta strategica e culturale per la cura del patrimonio.

Riferimenti bibliografici:

Tringa, E.; Kavroudakis, D.; Tolika, K. (2024). Microclimate-Monitoring: Examining the Indoor Environment of Greek Museums and Historical Buildings in the Face of Climate Change. *Heritage*, 7(3), 1400-1418. MDPI

Frasca, F.; Verticchio, E.; Bosco, E.; Kuka, E.; Sang-Hoon Lee, D.; Krarup Andersen, C.; Bertolin, C.; Siani, A. M. (2024). Assessing microclimate thresholds for heritage preventive conservation to achieve sustainable and energy efficiency goals in a changing climate. *Scientific Reports*, 14, Article 18707. Nature

Elena Sesana, Alexandre S. Gagnon, Chiara Ciantelli, JoAnn Cassar, John J. Hughes (2021). Climate change impacts on cultural heritage: A literature review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. [wires.onlinelibrary.wiley.com](https://onlinelibrary.wiley.com)

Marina Panagiota P. Nastou & Stelios C. Zerefos 2024 - Effects of climate change on open air heritage: a review and the situation in the region of Mediterranean. *Heritage Science* volume 12, Article number: 367 (2024)