

TRAIETTORIA 5. TECNOLOGIE PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PROVOCATI DA FATTORI NATURALI E ANTROPICI SUI BENI CULTURALI

1 Introduzione

Il principale obiettivo della Traiettorie 5 – *Tecnologie per il Monitoraggio degli Effetti Provocati dai Fattori Naturali e Antropici sui Beni Culturali* è creare un aggregato di competenze tecnologiche su scala nazionale per lo sviluppo del monitoraggio e della mitigazione del rischio, derivante da fattori naturali e dall'azione dell'uomo, a cui è sottoposto il patrimonio culturale italiano. Tale obiettivo prevede la partecipazione del sistema industriale, della ricerca e della pubblica amministrazione nazionale e regionale per la definizione di una roadmap per lo sviluppo e l'applicazione di tecnologie in grado di valutare il comportamento del patrimonio sul territorio nazionale, di monitorare il suo stato di salute e la sua evoluzione rispetto ad eventi naturali e antropici, con l'obiettivo finale di fornire gli strumenti di supporto per la sua conservazione e recupero.

Ad oggi, grazie alle attività condotte dai ricercatori in ambito universitario e industriale, l'Italia si colloca tra i paesi all'avanguardia nel settore; tuttavia, manca ancora un chiaro programma di ricerca in grado di coinvolgere tutti i potenziali interlocutori e di fornire opportunità concrete di sviluppo tecnologico e innovativo. Pertanto, appare necessario lavorare sullo sviluppo di competenze nazionali in sinergia con le esigenze dello sviluppo industriale e tecnologico del paese, come proposto nel piano strategico stesso della Traiettorie.

Definizione di monitoraggio e diverse tipologie di rischio

È bene sottolineare fin da subito la specifica interpretazione di monitoraggio su cui si basa la Traiettorie. Il monitoraggio è qui inteso come parte fondamentale della mitigazione del rischio per il patrimonio culturale, soprattutto se condotto con un approccio scientifico-culturale in grado di utilizzare accuratamente gli strumenti forniti dallo sviluppo tecnologico. In particolare, questa definizione si rifà alla formula matematica utilizzata in ambito scientifico che descrive il Rischio (R) come il prodotto tra Pericolosità (P), Esposizione (E) e Vulnerabilità (V):

$$R = P * V * E$$

Il rischio è dunque espressione del prodotto di:

- P, intesa come probabilità di accadimento di un evento caratterizzato da intensità maggiore o uguale a fissata soglia, in un certo sito e in un determinato tempo di riferimento;
- V, intesa come la propensione dell'oggetto di interesse (i.e., il bene culturale o parte di esso) a subire danneggiamenti in conseguenza delle sollecitazioni indotte da un evento di una certa intensità;
- E, intesa come il valore del bene esposto, riguardo sia al bene materiale sia alle persone che possono essere coinvolte.

A questi elementi, inoltre, va aggiunto, nel caso del patrimonio culturale, l'esigenza di conservazione del valore iconico e materico del bene da proteggere. Data questa definizione, risulta quindi possibile operare su uno o più fattori dell'equazione per mitigare il rischio. A seconda della tipologia di rischio, saranno diversi i fattori sui quali andare ad operare.

Il Dipartimento della Protezione Civile, nella definizione delle competenze della Commissione Grandi Rischi, suddivide il rischio a cui può essere sottoposto il patrimonio culturale nelle seguenti tipologie:

Rischio sismico; Rischio vulcanico; Rischio da frana; Rischio idraulico; Rischio industriale; Rischio ambientale e degli incendi boschivi. Ad esse vanno aggiunte:

- Rischio legato alla subsidenza, derivante dal prelievo di acquiferi sotterranei o dalla presenza di cavità;
- Rischio specifico del Patrimonio culturale legato all'esposizione dello stesso e all'interazione con chi vi entra in contatto (i.e. visitatori, operatori, ecc.).

Tra queste tipologie, il rischio sismico, da frana e idraulico sono certamente quelli più diffusi sul nostro territorio nazionale. In Italia, le aree interessate da pericolosità sismica, frane e alluvioni coprono quasi tutto il territorio nazionale e, quindi, investono potenzialmente la quasi totalità del patrimonio culturale italiano.

Il ruolo del monitoraggio nella mitigazione del rischio

Il Monitoraggio assume un ruolo particolare nella mitigazione del rischio con una triplice valenza:

- a) Costituisce, insieme ad altre metodologie di indagine e di acquisizione di informazioni storiche, architettoniche e archeologiche, uno strumento essenziale per la conoscenza dello stato di un bene culturale e dell'evoluzione delle sue condizioni nel tempo;
- b) Può costituire la base per la protezione del patrimonio culturale con il cosiddetto *early-warning*, ovvero il controllo della "sorgente" del pericolo per l'adozione di opportuni rimedi in tempi brevi e compatibili con l'evoluzione del fenomeno;
- c) Può essere uno strumento per verificare la validità degli interventi di mitigazione del rischio o di consolidamento strutturale, soprattutto quando, per evitare interventi molto invasivi, si sceglie di procedere con un approccio osservazionale.

Inoltre, soprattutto nel caso in cui esso sia esteso su area vasta e corredato da una chiara interpretazione su base scientifico-tecnica, il monitoraggio può configurarsi come uno strumento utile per l'allocatione di risorse pubbliche e private. In alcuni casi, infine, può anche avere un valore sociale in quanto i suoi esiti possono estendersi anche a ciò che circonda o si trova nelle vicinanze del bene culturale monitorato, con vantaggi anche sul costruito ordinario.

Lo stato dell'arte del monitoraggio e suoi possibili sviluppi

Il progresso nello sviluppo tecnologico degli strumenti di misura e l'ancóra maggiore sviluppo nel campo dell'informatica hanno reso possibili applicazioni di monitoraggio prima impensabili e ne hanno esteso il campo di applicazione. Tuttavia, rimane necessaria l'applicazione di tale monitoraggio sulla scorta di un adeguato progetto, che deve necessariamente prevedere una fase di analisi e di studio preventivo per comprendere il fenomeno in atto e la possibile velocità della sua evoluzione, oltre che per definire dei valori soglia che possano fornire allertamenti tempestivi. Spesso, infatti, il monitoraggio è predisposto senza la necessaria fase di studio preventivo e senza una *back-analysis* dei risultati, che serve a definire sempre meglio la problematica in atto. Tuttavia, solo la conoscenza preventiva del problema permette di inserire i dati ottenuti dal monitoraggio in una modellazione a posteriori che possa consentire di comprendere l'evoluzione in senso quantitativo dei fenomeni in atto.

1.1 Elementi tenuti in considerazione per l'aggiornamento

Di particolare rilevanza per l'aggiornamento sono stati:

- l'integrazione della Traiettorie nel quadro delle iniziative europee sviluppate negli ultimi anni attorno al tema della valorizzazione del patrimonio culturale: si segnalano in particolare il progetto *European Collaborative Cloud for Cultural Heritage* (ECCCH – bando chiuso nel settembre 2023); il progetto europeo *Data Space for Cultural Heritage*, iniziativa chiave promossa dalla Commissione Europea che ha già trascorso il suo primo anno di implementazione nel periodo 2022-2023 e che mira a creare uno spazio comune europeo dei dati dedicato al patrimonio culturale, facilitando l'accesso e il riutilizzo delle risorse digitalizzate;
- gli sviluppi dei progetti congruenti più innovativi nel panorama europeo, ad esempio *Triquetra*, un progetto per la conservazione del patrimonio culturale che mira alla creazione di un toolbox per la valutazione e la mitigazione dei rischi legati ai cambiamenti climatici e ai rischi naturali che ne minacciano la preservazione; *Thetida* - Tecnologie e metodi per una migliore resilienza e sostenibile conservazione del patrimonio culturale sottomarino e costiero contro il cambiamento climatico, i rischi naturali e l'inquinamento ambientale; *AURORA* - Riconoscimento Unico delle Opere e Tracciatura Attraverso la Chimica di dati codificati, dispositivi miniaturizzati e alleanza blockchain, che si avvicina agli obiettivi della Traiettorie nell'identificazione di strategie innovative e basate su mezzi tecnologici per la preservazione del patrimonio culturale e la mitigazione del rischio a cui esso è sottoposto legato soprattutto a macro-fattori naturali e ambientali e all'azione antropica; *Space to Tree*, un progetto finanziato da ESA che vede coinvolti CNR ISPC, CNR IMAA e DIGIMAT Spa per la definizione di una traiettoria metodologica basata su tecnologie integrate OT e 5G per il monitoraggio biomeccanico della vegetazione nei parchi urbani all'interno e in prossimità di aree di interesse storico-archeologico.

Analisi SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats)	
Punti di forza	Punti di debolezza
<ul style="list-style-type: none"> - Presenza di un enorme patrimonio culturale - Elevata professionalità negli operatori del restauro - Elevato livello di conoscenze di base sui meccanismi di degrado - Ottime competenze a livello accademico e industriale 	<ul style="list-style-type: none"> - Scarso livello di applicazione delle conoscenze di base - Assenza nel quadro occupazionale di figure specifiche per il monitoraggio dei beni culturali - Carenza di studi interdisciplinari - Tematica non ancora riconosciuta come un vero e proprio settore industriale
Opportunità	Minacce
<ul style="list-style-type: none"> - Sviluppo di tecnologie specifiche e di applicazioni di metodologie innovative per beni culturali - Creazione di nuove figure professionali (es: tecnico del monitoraggio dei beni culturali) - Creazione di uno protocollo per il monitoraggio dei beni culturali che possa essere riconosciuto come standard dalla comunità scientifica e dagli <i>stakeholder</i> - Creazione di un database 	<ul style="list-style-type: none"> - Sviluppo di ricerche volte a monitorare singoli aspetti e mancanza di un'analisi e di una tecnologia che permetta di monitorare il monumento nei confronti delle differenti problematiche del degrado - Scarsità dei fondi a disposizione - Interpretazione del monitoraggio delle strutture esclusivamente dal punto di vista dell'acquisizione dei dati che rappresenta solo una fase del processo di valutazione della sicurezza della costruzione

2 Definizione delle sotto-traiettorie

Il monitoraggio non riguarda solo la raccolta di dati, ma l'applicazione intelligente e consapevole dell'intero processo alla problematica della mitigazione del rischio. Infatti, la progettazione del monitoraggio richiede l'impiego di misure e tecnologie diverse, per differenziare l'approccio in base all'estensione del problema.

Si propone dunque una suddivisione del tema in tre sotto-traiettorie:

- Sotto-traiettoria 5.1: Monitoraggio su scala di paesaggio,
- Sotto-traiettoria 5.2: Monitoraggio su scala di sito,
- Sotto-traiettoria 5.3: Monitoraggio a scala del contenuto o del dettaglio del bene.

Questa suddivisione non dipende dal rischio considerato, poiché gli strumenti e le tecniche di monitoraggio sono spesso simili o condivisi tra le diverse scale.

SOTTO-TRAIETTORIA	DEFINIZIONE
5.1. Monitoraggio su scala di paesaggio	In Italia esistono ampie realtà territoriali che necessitano di un attento studio quantitativo delle loro condizioni e del Rischio cui sono soggette per eventi naturali. Il monitoraggio su area vasta corrisponde ad una tipologia di monitoraggio da utilizzare in tali situazioni, dove è necessario prevedere un approccio "macro", caratterizzato da una maggiore attenzione all'ambito territoriale piuttosto che al singolo manufatto o alla singola situazione naturale.
5.2. Monitoraggio su scala di sito	In situazioni nelle quali è necessaria la conoscenza e la valutazione del comportamento della singola costruzione o della singola situazione naturale che può essere considerata parte del patrimonio culturale, si possono applicare le metodologie offerte dal monitoraggio alla scala della singola costruzione o della singola situazione naturale. Tale monitoraggio può, e spesso deve, interessare non solo la costruzione ma anche la sorgente con cui interagisce (come ad esempio il sottosuolo, le sorgenti antropiche come il traffico, ecc), monitorando il suo stato di salute e la sua evoluzione nel tempo.
5.3. Monitoraggio alla scala del contenuto o del dettaglio	Le alterazioni su un prodotto culturale sono ben conosciute e documentate, insieme alle loro cause; tuttavia, risulta ancora complesso stabilire una chiara relazione causa-effetto tra di esse, basata non solo su una corretta interpretazione delle modifiche osservabili, ma anche un monitoraggio preciso di tutti i parametri che potrebbero causare tali alterazioni. Il monitoraggio alla scala del contenuto o del dettaglio si concentra sulla fornitura di strumenti per il monitoraggio delle alterazioni del bene culturale e delle relative cause, cercando di stabilire una corrispondenza chiara e possibilmente univoca tra causa ed effetto.

2.1 Sotto-traiettoria 5.1: *MONITORAGGIO SU SCALA DI PAESAGGIO*

In Italia, dal momento che l'intero territorio nazionale è noto per essere soggetto a una varietà di rischi di origine naturale e antropica, diverse realtà territoriali come centri storici e zone naturali di valore paesaggistico richiedono uno studio quantitativo accurato delle loro condizioni e dei rischi a cui sono esposte. Le tecnologie di monitoraggio su diverse scale sono fondamentali per comprendere le dinamiche spazio-temporali di tali fenomeni; tuttavia, le tradizionali tecniche puntuali di monitoraggio, sebbene precise, ancora mancano nel fornire una visione d'insieme. Pertanto, in queste situazioni, è necessario adottare un approccio "macro", in grado di prestare maggiore attenzione all'ambito territoriale rispetto a singoli manufatti o situazioni naturali isolate.

La Sotto-traiettoria 5.1 si propone dunque di descrivere sinteticamente le tecniche avanzate di monitoraggio del territorio che ospita e circonda i beni culturali e mettere in evidenza le tecniche relative al monitoraggio dei vari rischi del territorio, con un accenno alla necessaria interazione con le tecniche di monitoraggio dei singoli elementi, come edifici e monumenti. Un particolare riguardo verrà dedicato alla disponibilità di dati utili per il monitoraggio su vasta area, descrivendo sinteticamente le

tecnologie disponibili; all'esamina di eventuali lacune di conoscenza da colmare, indicando l'interazione tra tecnologie diverse ma convergenti per il monitoraggio; e infine nel fornire alcuni esempi virtuosi di applicazione.

Per quanto riguarda il primo punto, qui di seguito vengono introdotte, a titolo esemplificativo e senza pretesa di esaustività, diverse tecnologie utilizzate nel monitoraggio del patrimonio culturale. Queste comprendono l'osservazione da satellite, aereo e drone, nonché l'utilizzo di reti di sensori a terra e sistemi IoT su vasta scala. Tali approcci consentono l'identificazione di aree a rischio, la creazione di dettagliate mappe spazio-temporali e la focalizzazione sulle strutture più esposte. Essi permettono inoltre la raccolta e consultazione di dati, grezzi o elaborati, come quelli disponibili, a livello europeo, nei portali online del programma Sentinel e dal programma Copernicus.

In primo luogo, in un approccio di monitoraggio su larga scala, oltre alle tecnologie tradizionali, è ora possibile beneficiare delle tecnologie a distanza, che includono risultati dal settore aerospaziale dell'osservazione remota della Terra (*remote sensing, earth observation*), comprendendo l'interferometria SAR satellitare, LiDAR, vibrometria laser a scansione, fotogrammetria digitale e tecniche di imaging ottico multispettrale e iper-spettrale. Un esempio notevole in questo contesto è il Programma Europeo di osservazione della Terra Copernicus, che fornisce informazioni da diverse fonti, tra cui satelliti di osservazione della Terra e sensori terrestri, marini e aerei per il supporto alle politiche pubbliche europee. Inoltre, a complemento delle tecniche fotogrammetriche tradizionali, le tecnologie digitali consentono la creazione di modelli 3D da immagini digitali 2D delle aree esaminate, che supportano sia il controllo del territorio su larga scala sia il monitoraggio conservativo del patrimonio storico, delle opere d'arte e del paesaggio in cui sono inseriti.

Inoltre, la prospettiva di monitoraggio su macro-aree permette di non focalizzarsi sulla stima della vulnerabilità di lungo termine di un sito o un monumento solo come risposta a un rischio ambientale, ma di monitorare la sua esposizione al rischio anche e soprattutto in riferimento a parametri di aree più ampie, considerando le dinamiche geologiche, geotecniche e geofisiche del sito e delle zone in prossimità. Nonostante sia largamente riconosciuta la vulnerabilità del patrimonio culturale a fronte di eventi catastrofici quali terremoti, inondazioni, grandi frane, è necessario tenere in considerazione anche altri fenomeni lenti, come i movimenti di subsidenza oppure frane lente ma progressive, che possono danneggiare seriamente i monumenti (Rohn et al, 2005; Canuti et al, 2009; hadjimitsis et al. 2020 DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-10979-0>; Fattore et al. 2021 DOI: [10.3390/s21051791](https://doi.org/10.3390/s21051791)).

La sfida, a livello nazionale e internazionale, su questo campo riguarda lo sviluppo di prodotti su misura che consentano il monitoraggio di vaste aree e la valutazione dei rischi. Diversi progetti H2020 stanno cercando di dare una risposta sostenibile alla necessità di monitorare in modo efficace e a basso costo il patrimonio culturale. Tra questi, il progetto PROTHEGO (PROTection of European Cultural HEritage from GeO-hazards - <http://www.prothego.eu/downloads.html>), che ha come obiettivo quello di fornire un contributo innovativo attraverso l'analisi dei geo-rischi in tutte le aree del patrimonio culturale europeo. Il progetto utilizza le tecnologie di telerilevamento basate sull'interferometria radar (InSAR) per monitorare monumenti e siti in Europa che potrebbero essere esposti a rischi geologici, combinando le informazioni tele-rilevate sulla stabilità del terreno e sul movimento con i dati di geo-hazard per identificare le aree più a rischio in tutta Europa. Interessante inoltre notare come il progetto prenda in considerazione anche fattori di monitoraggio legati ai cambiamenti climatici, considerando anche applicazioni modellistiche per prevedere aree alluvionali sotto diversi scenari climatici. Il progetto sottolinea infine l'importanza di una caratterizzazione geologica e geotecnica del territorio, utilizzando metodi di classificazione della suscettibilità del terreno al geo-hazard. Inoltre, promuove la costruzione di un database dettagliato sul patrimonio culturale per valutare correttamente la vulnerabilità e il rischio.

Parallelamente, il Sistema di Supporto alle Decisioni – CIPCast, con funzioni operative e di simulazione, funge da piattaforma per la sicurezza delle Infrastrutture Critiche, calcolando gli impatti su territorio e opere in risposta a eventi naturali estremi, fornendo supporto agli operatori delle Reti di Infrastrutture Critiche e alla Pubblica Amministrazione nella previsione e gestione delle emergenze. Il suo software, sviluppato per affrontare eventi meteorologici gravi in contesti urbani, integra dati geospaziali e previsioni meteo a breve termine con informazioni sull'assetto idrogeologico e sulla ricorrenza di eventi sismici. Questo permette di valutare gli impatti sulle Infrastrutture Critiche, stimare le conseguenze sia da dati reali che attraverso scenari simulati, inclusa la simulazione di terremoti con il modulo CIPCastES, utilizzando le "shakemaps" dell'INGV e modelli semplificati per la risposta sismica del costruito.

Dall'analisi della letteratura emerge che la strategia ottimale per il monitoraggio delle deformazioni superficiali del territorio integra monitoraggi locali con tecniche tradizionali o avanzate, come GNSS, inclinometri, sensori elettrici, radar differenziale terrestre, rilevamenti da drone e laser scanning terrestre, insieme al monitoraggio su vasta area mediante acquisizioni satellitari, in particolare utilizzando la tecnica interferometrica differenziale. Sebbene vi siano limitazioni legate alla disponibilità di un dataset adeguato di immagini SAR, la recente incrementata disponibilità di tali immagini consente una buona stima delle deformazioni su vaste aree. Inoltre, per superare alcune limitazioni legate alla coerenza delle immagini SAR, è stata sviluppata la tecnica dei *permanent scatter points*, in grado di restituire una serie temporale degli spostamenti in punti opportunamente individuati nel territorio. L'evoluzione verso l'IoT suggerisce che l'impatto sulla prevenzione e gestione post-evento dovrebbe essere valutato attraverso l'integrazione di sensori, intelligenza artificiale, big data e rete, permettendo la produzione di mappe dettagliate in tempo reale identificando con estrema precisione le aree colpite.

Per la sicurezza del territorio, sono inoltre sempre più diffusi sistemi di sensori distribuiti e *data logger* con controllo remoto e trasferimento dati wireless, monitorando continuamente edifici, monumenti, infrastrutture critiche e instabilità del terreno. Le reti di sensori accelerometrici MEMS a basso costo e alta densità sono ampiamente utilizzate, comunicando wireless con un'unità di elaborazione per monitorare l'inclinazione degli elementi. Alcuni progetti sperimentali, come quello nel Comune di Borca di Cadore (piano comunale di protezione Civile http://cdn1.regione.veneto.it/alfstreamingservlet/streamer/resourceId/41a6b1d8-ad73-4b58-9e96-58a8670204ab/Piano%20Comunale%20di%20Protezione%20Civile_2015), si concentrano su sistemi autonomi dal punto di vista energetico, basati su reti dedicate per il monitoraggio in tempo reale di eventi ambientali critici, come frane e colate detritiche.

Inoltre, la Traiettoria 5, e la Sotto-traiettoria 5.1. in particolare, presenta forti possibilità di integrazione nel quadro di diverse iniziative europee sviluppate negli ultimi anni attorno al tema della valorizzazione del patrimonio culturale.

In primo luogo, si segnala la sinergia con il progetto denominato European Collaborative Cloud for Cultural Heritage (ECCCH)ⁱ, la cui la chiusura del bando risale a settembre 2023. Esso si configura come un'iniziativa per lo sviluppo di una piattaforma in grado di offrire un'infrastruttura per la collaborazione transdisciplinare, facilitando la digitalizzazione avanzata e la conservazione innovativa nel campo del patrimonio culturale digitale, con un grosso impatto nello sviluppo di soluzioni innovative per la sua scoperta, recupero, conservazione, digitalizzazione e valorizzazione. In risposta al bando della Commissione Europea, inoltre, il Consiglio Nazionale delle Ricerche italiano (Cnr) insieme all'Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "A. Faedo" e l'Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale, in collaborazione con il Centro Nazionale delle Ricerche francese (Cnrs) e la Fondation des Sciences du

Patrimoine (Fsp), ha elaborato la proposta del progetto European Cloud for Heritage OpEn Science (ECHOES). Esso mira a creare la piattaforma di base sulla quale si innesteranno i futuri servizi del cloud, prestando attenzione alla sua progettazione come uno strumento in continua evoluzione, capace di accogliere nuovi dati e mezzi digitali per facilitare il lavoro degli operatori del settore, offrendo formazione, strumenti e servizi adeguati alle loro esigenze. In secondo luogo, una particolare comunanza di obiettivi e metodologie è stata riscontrata anche con il progetto europeo noto come Data Space for Cultural Heritageⁱⁱ, un'iniziativa chiave promossa dalla Commissione Europea che ha già trascorso il suo primo anno di implementazione nel periodo 2022-2023. Essa mira a creare uno spazio comune europeo dei dati dedicato al patrimonio culturale, facilitando l'accesso e il riutilizzo delle risorse digitalizzate innovative, in particolare legate a tecnologie avanzate come il 3D e l'intelligenza artificiale per aggregare, arricchire e promuovere dati digitali di alta qualità, rendendoli accessibili a un pubblico diversificato. L'obiettivo è favorire l'accesso ai dati e il riutilizzo delle risorse culturali digitalizzate per stimolare la creazione di servizi arricchiti, promuovendo la trasformazione digitale delle istituzioni culturali e facilitando il riutilizzo di tali contenuti in settori come il turismo, l'istruzione, ma anche la preservazione e la valorizzazione del patrimonio culturale.

Infine, nel panorama più recente di progetti europei dedicati al monitoraggio e alla mitigazione del rischio del patrimonio culturale derivato da fattori naturali e ambientali, emergono due progetti di particolare interesse per le affinità con la Traiettorie proposta.

Il primo di questi è *Triquetra* (<https://cordis.europa.eu/project/id/101094818>), un progetto per la conservazione del patrimonio culturale che mira alla creazione di un toolbox per la valutazione e la mitigazione dei rischi legati ai cambiamenti climatici e ai rischi naturali che ne minacciano la preservazioneⁱⁱⁱ. L'obiettivo principale è quello di creare un sistema che consentirà una precisa stratificazione del rischio, esplorando gli effetti dei cambiamenti climatici e dei rischi naturali sul patrimonio culturale, compresi i rischi legati al clima, i rischi estremi legati all'acqua, alla neve e al ghiaccio, i rischi geologici e geofisici, i rischi di danni strutturali, i rischi chimici e biologici, così come i relativi effetti composti e a cascata. Tale sistema si basa su una definizione del rischio attraverso un approccio articolato in tre fasi: identificazione, quantificazione e mitigazione del rischio, con il fine ultimo di realizzare una piattaforma condivisa e un database di misure e strategie di mitigazione disponibili come strumenti di supporto alle decisioni verso un'efficiente mitigazione del rischio e la bonifica del sito.

Un altro progetto di grande interesse è *Thetida* (<https://cordis.europa.eu/project/id/101095253>), mirato allo sviluppo di tecniche e metodi per una migliore resilienza e conservazione del patrimonio culturale sottomarino e costiero contro il cambiamento climatico, i rischi naturali e l'inquinamento ambientale^{iv}. L'obiettivo nasce dalla volontà di migliorare le strategie di gestione, protezione e conservazione del patrimonio costiero e sottomarino europeo, ad oggi in grave pericolo a causa dei forti rischi ambientali, aggravati dal cambiamento climatico. La soluzione proposta da *Thetida* si basa sulla possibilità di impiegare tecnologie digitali e metodi innovativi per supportare un team interdisciplinare di ricercatori, esperti e professionisti del progetto che svilupperà e convaliderà un sistema integrato di valutazione e protezione dei rischi multipli del patrimonio.

Gli approcci e gli obiettivi identificati da *Triquetra* e *Thetida* presentano molte affinità con la Traiettorie 5, ed in particolare con gli scopi di mitigazione del rischio attraverso una prospettiva ad ampia scala caratterizzanti la sotto-traiettorie 5.1.

Infine, si è tenuto e si terrà conto in futuro dei temi e degli obiettivi legati alle attività di CHANGES, la più importante compagine culturale nata dal PNRR in Italia. In particolare, specifiche sinergie con la Traiettorie 5 e con la Sotto-traiettorie 5.1. sono state rilevate nell'ambito del progetto Space to Tree (S23), nato da una partnership tra ESA, CNR-IMAA, CNR-ISPCII e Digimat Spa e inserito nello Spoke 7 "Protection and Conservation of Cultural Heritage against Climate Changes, Natural and Anthropic

Risks". Il suo obiettivo risiede nello sviluppo e nella validazione di un sistema dedicato alla gestione dei parchi storici e archeologici su territorio nazionale basato su tecnologie EO e 5G per il monitoraggio biomeccanico della vegetazione nelle zone di rilevanza storico-archeologica, al fine di preservarne il valore culturale e garantire la sicurezza dei visitatori e dei cittadini. Attivo già a partire dal 2021, il progetto opera su diversi fronti di individuazione e analisi delle criticità ed eventuali scenari di rischio grazie ad un sistema di supporto alle decisioni e di allerta basato su tecnologie integrate di osservazione della Terra, impiegate in modo innovativo per la salvaguardia del territorio e del suo valore culturale.

Date le importanti affinità tra queste interessanti iniziative e la traiettoria qui proposta, ci si propone di mantenere uno sguardo costante su questi nuovi progetti e sui loro sviluppi futuri.

SOLUZIONI TECNOLOGICHE	
Telerilevamento	<p>Le tecnologie di telerilevamento si suddividono in:</p> <ul style="list-style-type: none"> - telerilevamento radar satellitare (interferometria differenziale, tecnica dei <i>permanent scatters</i>) particolarmente idoneo per lo studio delle deformazioni superficiali del suolo dovute a diverse cause: terremoti, frane, subsidenza e deformazioni di infrastrutture, quali dighe, argini, edifici e assi viari. - telerilevamento radar satellitare per la mappatura delle aree allagate a seguito di eventi estremi. Questa ultima tecnologia risulta particolarmente efficace, data la grande disponibilità di immagini ad alta risoluzione spaziale e temporale (ad esempio, Sentinel 1) e la relativa insensibilità alla presenza di corpi nuvolosi, pioggia, ecc.; - telerilevamento satellitare per il monitoraggio delle aree incendiate e per l'individuazione delle aree soggette a rischio incendio. Le tecniche di telerilevamento satellitare si prestano particolarmente alla individuazione di aree vegetate in condizioni di stress idrico, e quindi particolarmente predisposte agli incendi. È ovvio che il dato va incrociato con dati meteo e morfologici del territorio. Anche in questo caso il programma Copernicus (Emergency Management Service) fornisce prodotti utilizzabili in tal senso (si veda il portale EFFIS); - telerilevamento radar terrestre, particolarmente idoneo per lo studio delle deformazioni di strutture e infrastrutture. Viene utilizzato sia in campo di rischio frana e rischio vulcanico, sia per la stima precisa degli spostamenti di strutture (interferometria terrestre).
Rilevamento LiDAR	<p>La sequenza di rilievi LiDAR permette di valutare l'evoluzione delle condizioni di ambiti territoriali estesi. Generalmente le applicazioni più diffuse fanno uso di laser a doppia frequenza installati su piattaforma aerea (<i>airborne remotesensing</i>).</p>
Rilevamento Fotogrammetrico via Drone	<p>Mediante la definizione di modelli 3D digitali, sotto forma di nuvole di punti, curve di livello e modelli digitali del terreno, consente di ottenere un rilievo speditivo ed economico, di buona precisione in termini di dati metrici, utile ai fini del monitoraggio del cambiamento del territorio. Si pensi alle possibili applicazioni realizzate per la messa in sicurezza delle zone colpite dai sismi, per il censimento e classificazione delle macerie post terremoto, per il monitoraggio delle aree a rischio da frana o da inondazioni. Risulta molto utile per il monitoraggio pre- e post evento. Si tratta di un campo in fortissima evoluzione, sia dal punto di vista tecnologico (sensoristica miniaturizzata) sia da quello normativo.</p>

Rilevamento Termografico da Drone	Si utilizzano termocamere miniaturizzate e tali da permettere un rilievo ad alta risoluzione. Lo scopo è quello di individuare anomalie termiche nel territorio e/o nel monumento che si intende analizzare;
Monitoraggio per Applicazioni Early-warning	Si tratta di tecniche differenziate, caratterizzate dalla necessità di processamento rapido delle misure (generalmente provenienti da sensori distribuiti sul territorio), se confrontato con l'evoluzione del fenomeno: in tempo reale per rischio sismico, più lento per rischio vulcanico, alluvioni o maremoti, dipendente dalla velocità della fase parossistica dell'evento nel caso di rischio frana.
Remote Sensing	Remote sensing distribuiti mediante sensori in fibra ottica o sensori di diversa natura.
STAKEHOLDER	
Università, EPR, IR, Distretti	<p><i>Università:</i> Department of Archaeology, Ghent University, Sint-Pietersnieuwstraat 35, 9000, Gent, Belgium; Università di Palermo, Dipartimento di Fisica e Chimica e Dipartimento di Ingegneria; Università di Genova, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale; Università di Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria e Dipartimento di Architettura; Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica.</p> <p><i>Centri di ricerca:</i> ENEA; Dipartimento di Tecnologie Energetiche: Laboratorio di Analisi e Protezione delle Infrastrutture Critiche; Laboratorio del Calcolo Scientifico ad Alte Prestazioni della divisione ICT; Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi produttivi e Territoriali; Laboratorio delle tecnologie per la Dinamica delle Strutture e la PREVENZIONE del rischio sismico e idrogeologico; Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare; Laboratorio Micro e Nano Strutture per la Fotonica, Divisione di Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute; INFN Sede di Catania; ISPC CNR; CNR - A. Faedo - Pisa (Girardi - Pellegrini)</p> <p><i>Distretti:</i> Centro di Eccellenza del DTC Lazio (www.dtclazio.it)</p> <p><i>Unità di ricerca:</i> (https://dtclazio.it/unità-di-ricerca); UR1: Nuove metodologie, tecnologie e strumenti diagnostici e di analisi per il miglioramento di tecniche di protezione del bene culturale finalizzate alla conservazione e monitoraggio degli artefatti. R1, R6, R8; UR2: Nuovi materiali, tecnologie, strumenti e dispositivi per il monitoraggio, la conservazione, la protezione e il restauro dei beni culturali. R7, R12; UR5: Restauro, riqualificazione e valorizzazione di edifici e luoghi vincolati di elevato interesse storico, culturale e paesaggistico, sostenibilità ed efficientamento energetico, qualità dell'ambiente. R5, R9; Distretto Tecnologico Sicilia Micro e Nano Sistemi S.C.a r.l.; Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Scienza e Tecnologia dei Materiali (INSTM); Distretto Culturale evoluto Regione Marche (http://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Cultura/Distretto-Culturale-Evoluto); Distretto ad Alta Tecnologia per le Costruzioni Sostenibili STRESS (www.stresscarl.com); Recupero e Valorizzazione del Costruito Storico: Tecnologie di rilievo e monitoraggio, dalla scala territoriale a quella del singolo edificio; Tecnologie per la mitigazione dei rischi naturali ed antropici; Tecnologie per valorizzazione del costruito storico.</p>
Imprese	AIPnD - Associazione Italiana Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica; A.L.I.G. Associazione Laboratori d'Ingegneria E Geotecnica; OICE Associazione nazionale delle società di ingegneria e architettura; Federcostruzioni; ANCE Associazione Nazionale Costruttori Edili.

Altri portatori di interesse	MiC; Musei; Soprintendenze Archeologiche
RISULTATI ATTESI DALLA SOTTO-TRAIETTORIA	
<p>La sotto-traiettoria 5.1 prevede in sintesi di affrontare i seguenti punti:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Evidenziare la disponibilità di dati utili per il monitoraggio su area vasta; - Descrivere sinteticamente le tecnologie disponibili; - Descrivere l'eventuale presenza di gap di conoscenza da colmare; - Indicare l'interazione tra tecnologie diverse ma concorrenti allo scopo del monitoraggio; - Indicare alcuni esempi virtuosi di applicazione 	

2.2 Sotto-traiettoria 5.2: *MONITORAGGIO SU SCALA DI SITO*

Il bene culturale, considerato una risorsa non rinnovabile imprescindibile per la trasmissione del patrimonio alle generazioni future, richiede sforzi dedicati alla conservazione e prevenzione da eventi estremi. L'attenzione a questa tematica è stata sottolineata a livello internazionale fin dalla Convenzione UNESCO del 1972 e dal più recente European Framework for Action on Cultural Heritage. Riguardo, inoltre, alla specificità del nostro territorio, gli impatti catastrofici di eventi naturali, come l'alluvione di Firenze del 1966 e il terremoto dell'Aquila del 2009, evidenziano la fragilità delle città d'arte italiane e pertanto la necessità della loro cura e preservazione. L'approccio al monitoraggio alla scala dell'edificio o della situazione naturale richiede un approccio differente rispetto a quello precedentemente descritto, nel quale è essenziale adottare un approccio specifico che consideri misure dirette sull'oggetto d'interesse. Questa sotto-traiettoria si concentra sullo sviluppo di metodologie per valutare la singola costruzione o situazione naturale come parte del patrimonio culturale, con l'obiettivo di definire criteri o linee guida che indichino la necessità di interventi, manutenzione o misure di protezione.

La sotto-traiettoria propone dunque l'impiego di strumentazioni, tradizionali e innovative, che affrontano l'intero processo, dalla preliminare analisi del comportamento del manufatto alla progettazione del sistema di monitoraggio, inclusi processi di acquisizione e combinazione di misure da diverse strumentazioni. L'utilizzo di modellazione numerica e analisi strutturale agli elementi finiti è essenziale per il monitoraggio conservativo di edifici storici e opere d'arte, consentendo la definizione di modelli preliminari e la calibrazione in base alle condizioni di acquisizione. Il monitoraggio dovrebbe considerare non solo la costruzione, ma anche le sorgenti con cui interagisce, come il sottosuolo e le fonti antropiche come il traffico. Esempi in Italia includono il monitoraggio della Torre di Pisa per la subsidenza e il caso dell'abside del Duomo di Pienza soggetto a una frana lenta, insieme alla rete accelerometrica nazionale per la valutazione dell'azione sismica.

Inoltre, anche il degrado dei materiali costituisce una sfida significativa per la preservazione e la conservazione dei beni culturali, impattando la valutazione della loro vulnerabilità e generando conseguenze economiche rilevanti. Questo fenomeno coinvolge diversi aspetti, compresi quelli strutturali, e richiede un'attenta valutazione della capacità strutturale globale effettiva nelle strutture esistenti. È essenziale monitorare il degrado dei materiali lapidei naturali e artificiali, utilizzati in varie epoche storiche, per comprendere i fenomeni che possono comprometterne la valorizzazione e fruizione. Lo sviluppo di modelli per la simulazione del comportamento strutturale e dei materiali, ottenuti attraverso il monitoraggio, è cruciale per comprendere la vita residua e la resistenza dei beni culturali. L'intervento e la conservazione delle strutture esistenti richiedono un approccio multidisciplinare, considerando aspetti storico-filologici, fisico-chimici mineralogico-petrografici e ingegneristico-strutturali, insieme alla scelta di materiali appropriati. L'approccio interdisciplinare è

fondamentale anche per le tecniche di monitoraggio, garantendo un adeguato follow-up degli interventi e l'individuazione preventiva delle priorità per la pianificazione.

Lo stato dell'arte sulla sotto-traiettoria 5.2 può essere valutato, alla luce della bibliografia scientifica (vedi in seguito), sulla base di alcune macrocategorie tematiche:

- Prestazioni strutturali del patrimonio culturale, effetti del degrado ed errati interventi del passato;
- Analisi strutturale del patrimonio culturale storico;
- *Structural Health Monitoring* – SHM;
- Tecniche di monitoraggio per l'analisi del degrado dei materiali rispetto alle diverse caratteristiche.

Prestazioni strutturali del patrimonio culturale, effetti del degrado ed errati interventi del passato

Gli eventi naturali e quelli provocati dall'uomo generano vari rischi alle costruzioni e alle situazioni naturali che fanno parte del patrimonio culturale. Nel caso di eventi naturali, la Banca Mondiale ha riferito che il numero di disastri e di persone colpite a livello mondiale è aumentato rapidamente, raggiungendo un aumento percentuale approssimativamente del 400% e del 500% dal 1975 al 2005. Inoltre, l'aumento della popolazione e dell'urbanizzazione ha prodotto un aumento drammatico dell'esposizione, con conseguenze catastrofiche anche dopo eventi relativamente minori. L'Italia, che ha il più alto numero di siti del patrimonio mondiale dell'UNESCO, ha pagato un enorme tributo in termini di danni sismici al patrimonio culturale, che si aggiungono ai danni prodotti da altri fenomeni naturali, quali ad esempio le frane e le alluvioni (vd. prima sotto-traiettoria). In questo contesto, si insinuano talvolta degli interventi effettuati nel passato in modo errato, che oggi rappresentano una fonte aggiuntiva di vulnerabilità, come gli scavi per nuove life-lines, scavi e gallerie superficiali, ad esempio per nuove linee metropolitane nei centri urbani storici, che hanno stimolato varie indagini sperimentali e teoriche. Il degrado dei materiali è una delle principali cause dei danni strutturali e nel campo archeologico, e ha spesso portato a riduzioni significative dei livelli di sicurezza o addirittura a collassi catastrofici.

Analisi Strutturale del Patrimonio Culturale Storico

Il complesso stato delle strutture monumentali, caratterizzato da dimensioni e geometrie eterogenee e diverse tipologie murarie, rende la valutazione del loro stato di salute complessa. Le Linee Guida sismiche del Ministero della Cultura del 2010 sono fondamentali per la sicurezza sismica. Approcci combinati qualitativi e quantitativi sono raccomandati, integrando l'analisi storica e la conoscenza dei dettagli costruttivi. La modellazione FE è ampiamente utilizzata, ma le sfide computazionali restano un problema, specialmente per l'identificazione in tempo reale dei danni. Gli attuali metodi semplificati sono limitati e orientati principalmente agli edifici residenziali.

Structural Health Monitoring (SHM)

Lo SHM è un sistema che fornisce informazioni in tempo reale sulle prestazioni strutturali mediante l'acquisizione continua di dati statici e dinamici. Si basa su strumenti statistici o di machine learning per rivelare automaticamente danni strutturali, separando gli effetti ambientali. Sebbene ampiamente studiato per ponti, le applicazioni su strutture storiche sono limitate, spesso concentrate sul rilevamento di danni da terremoti in strutture snelle come torri civiche. Gli approcci di identificazione del danno richiedono ulteriori sviluppi per adattarsi alle costruzioni storiche, e le applicazioni innovative includono il monitoraggio con fibre ottiche.

Monitoraggio del Degrado dei Materiali:

La ricerca sull'analisi del degrado dei materiali lapidei nel patrimonio culturale è attiva, focalizzandosi sui rapporti tra microstruttura, composizione mineralogica e condizioni ambientali. La classificazione delle forme di degrado è essenziale, con approfondimenti quantitativi più dettagliati rispetto alle normative standard. Fitzner ha categorizzato le forme di degrado in base agli effetti, tra cui perdita di materiale, modifiche del colore e distacchi. Gli studi sui sistemi di monitoraggio continuo o discontinuo delle variabili causanti il degrado, delle forme di degrado e dei loro effetti sui monumenti sono meno frequenti ma di rilevanza.

SOLUZIONI TECNOLOGICHE	
<ul style="list-style-type: none"> - Tecnologie di monitoraggio mediante sistemi ottici di tipo Motion Capture 3D - Tecnologie di monitoraggio a lungo termine mediante FBG - Tecnologie non invasive e tecnologie lievemente invasive - Tecnologie digitali per la definizione del quadro fessurativo e il calcolo strutturale - Tecnologie per il rilievo di dettaglio (Laser Scanner) - Tecniche Scan-to-BIM per la corretta codifica in ambiente BIM dei dati da rilievo Laser 3D o da Fotogrammetria - Tecnologie di monitoraggio e di identificazione strutturale con numero ridotto di misurazioni - Tecnologie di analisi e monitoraggio a bassi costi e rapida (facile)implementazione - Tecnologie di analisi monitoraggio a breve e a lungo termine - Tecnologie di monitoraggio statico e dinamico 	
STAKEHOLDER	
Università, EPR, IR, Distretti	<p><i>Università:</i> Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura; Università di Napoli Federici II, Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura; Università di Napoli Federico II Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse; Università di Napoli Parthenope, Dipartimento di Ingegneria; Università di Napoli Parthenope, Dipartimento di Scienze e Tecnologie; Università di Cassino e del Lazio Meridionale, Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica; Università di Catania, Dipartimento di Scienze Biologiche Geologiche e Ambientali; Dipartimento di Fisica e Astronomia "Ettore Majorana"; Università della Calabria Dipartimento di Biologia Ecologia e Scienze della Terra; Università di Bari Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali; Department of Mineralogy and Petrology of the University of Granada (Spain); Institute of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Resources, Charles University in Prague, Faculty of Science, Albertov 6, 12843 Prague, Czech Republic; Department of Archaeology, Ghent University, Sint-Pietersnieuwstraat 35, 900, Gent, Belgium; Università di Palermo Dipartimento di Fisica e Chimica e Dipartimento di Ingegneria; Università di Genova, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Dipartimento di Ingegneria; Università di Genova, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale; Università di Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria e Dipartimento di Architettura; Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica.</p> <p><i>Centri di ricerca:</i> ENEA – Dipartimento di Tecnologie Energetiche: Laboratorio di Analisi e Protezione delle Infrastrutture Critiche; Laboratorio del Calcolo Scientifico ad Alte Prestazioni della divisione ICT – Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi produttivi e territoriali; Laboratorio delle tecnologie per la Dinamica delle Strutture e la PREVENZIONE del rischio sismico e idrogeologico – Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare; Laboratorio Micro e Nano Strutture per la Fotonica, Divisione di Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute; INFN Sede di Catania; ISPC CNR; CNR – A. Faedo – Pisa</p>

	<p>(Girardi – Pellegrini)</p> <p><i>Distretti:</i> Centri di Eccellenza del DTC Lazio (www.dtclazio.it) Unità di Ricerca (https://dtclazio.it/unità-di-ricerca) UR1: Nuove metodologie, tecnologie e strumenti diagnostici e di analisi per il miglioramento di tecniche di protezione del bene culturale finalizzate alla conservazione e monitoraggio degli artefatti. R1. R6, R8. UR2: Nuovi materiali, tecnologie, strumenti e dispositivi per il monitoraggio, per la conservazione, la protezione e il restauro dei beni culturali. R7, R12. UR5: Restauro, riqualificazione e valorizzazione di edifici e luoghi vincolati di elevato interesse storico, culturale e paesaggistico, sostenibilità ed efficientamento energetico, qualità dell'ambiente. R5, R9. Distretto Tecnologico Sicilia Micro e Nano Sistemi S.C.a r.l. 3. Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Scienza e la Tecnologia dei Materiali (INSTM). Distretto Culturale evoluto Regione Marche (http://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Cultura/Distretto-Culturale-Evoluto). Distretto ad Alta Tecnologia per le Costruzioni Sostenibili STRESS (www.stress-scarl.com) Recupero e Valorizzazione del Costruito Storico: Tecnologie di rilievo e monitoraggio; dalla scala territoriale a quella del singolo edificio; Tecnologie per la mitigazione dei rischi naturali ed antropici; Tecnologie per la valorizzazione del costruito storico.</p> <p><i>Reti di ricerca:</i> Reti di ricerca del DTC Lazio (https://dtclazio.it/infrastruttura-di-ricerca): R1 – Tecnologie specializzate per le scienze dell'antichità, l'archeologia, la storia dell'arte. R4 – Internet-of-things, robotica, intelligenza artificiale applicata alla cura e valorizzazione. R5 – Analisi e consolidamento strutturale, monitoraggio geomatico, rilevamento e modellazione 3D dispositivi. R6 – Scienze e tecnologie chimico- . R7 – Nanotecnologie, materiali, sensori e dispositivi. R8 – Biotecnologie applicate, archeobotanica, biologia ambientale, antropologia molecolare dispositivi. R9 – Monitoraggio e qualità dell'ambiente outdoor e indoor, sostenibilità ed efficientamento energetico. R12 – Fablab, rapid prototyping, additive manufacturing. Digital Research Infrastructure for the Arts and Humanities (DARIAH-ERIC), European Research Infrastructure for Heritage Science (E-RIHS). ECTP – European Construction Technology Platform – Heritage and regeneration Committee (http://heritage.ectp.org). ERANET – European Research Area Network.</p>
Imprese	AIPnD - Associazione Italiana Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica. A.L.I.G. Associazione Laboratori d'Ingegneria E Geotecnica. OICE Associazione nazionale delle società di ingegneria e architettura. Federcostruzioni ANCE Associazione Nazionale Costruttori Edili.
Altri portatori di interesse	MIC, Musei, Soprintendenze Archeologiche.
RISULTATI ATTESI DALLA SOTTO-TRAIETTORIA	
<p>La sotto-traiettorie 5.2 prevede, in sintesi, di affrontare i seguenti punti:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La promozione della consapevolezza del valore dei beni culturali quali elementi di identità e riconoscibilità delle nostre comunità; - La previsione (ove possibile) degli eventi naturali (eventi sismici, eventi atmosferici intensi, eventi franosi) che possono interessare il nostro patrimonio; - La mappatura dei beni culturali maggiormente a rischio; 	

- Lo sviluppo di strumenti di controllo non distruttivi e non invasivi per una conoscenza preliminare dello stato di salute delle costruzioni e delle situazioni naturali, classificabili come patrimonio culturale;
- Lo sviluppo di tecniche semplificate per l'analisi della risposta e l'identificazione del danno da effettuarsi con tempi rapidi e bassi costi e, pertanto, implementabili anche su campioni estesi di manufatti (numero ridotto di misurazioni, ecc.);
- Lo sviluppo di tecniche per il monitoraggio e l'identificazione, localizzazione e/o quantificazione del danno più approfondite che interessano manufatti singoli ben individuati e di cui si abbiano a disposizione modelli raffinati per la simulazione della risposta alle azioni attese dalla sorgente;
- Lo sviluppo di tecniche di monitoraggio per l'analisi del degrado dei materiali rispetto alle diverse caratteristiche (fisico- chimico mineralogico-petrografico, strutturale, ecc.); - Lo sviluppo di tecniche di diagnosi e ispezione volte a verificare lo stato di salute dei beni culturali; La definizione di metodologie per la creazione di un database che possa essere rappresentativo del patrimonio oggetto di studio e che fornisca in modo semplice ed efficace alcune fondamentali informazioni sul patrimonio culturale esistente necessarie alla fase conoscitiva e diagnostica dei manufatti stessi (tecnologia GIS);
- Lo sviluppo di Repository per l'archiviazione, la condivisione, la memorizzazione a lungo termine e la messa in sicurezza dei dati sperimentali prodotti da differenti laboratori di ricerca distribuiti geograficamente per favorire la conoscenza integrata, l'analisi e successive elaborazioni;
- Lo sviluppo di specifiche tecniche per la strutturazione di un modello HBIM – Historical Building Information Model, in grado di archiviare tutti i dati relativi agli edifici storici, siano essi relativi al monitoraggio strutturale che ambientale;
- Lo sviluppo di procedure automatizzate e speditive che da immagini digitali 2D possano restituire modelli 3D, scalati sulla base delle misure reali, per la definizione del rilievo geometrico, del quadro fessurativo e il controllo della sua possibile evoluzione nel tempo.
- Lo sviluppo di strumenti di calcolo e di linee guida di supporto agli attori dei processi decisionali nell'ambito delle strategie di prevenzione e di pianificazione delle risorse. - Lo sviluppo di strategie e metodi speditivi di analisi della vulnerabilità di beni culturali ad eventi estremi quale base conoscitiva per la razionalizzazione delle attività di mitigazione;
- L'integrazione di metodi di rilevamento mediante tecnologie innovative a metodi avanzati di analisi del comportamento strutturale e di stima della risposta del monumento ad eventi estremi;
- Lo sviluppo e l'integrazione di metodi di simulazione quali strumenti di conoscenza e previsione del comportamento di beni culturali ad eventi catastrofici; - Il recupero e la valorizzazione delle tradizioni e della cultura costruttiva come chiave di protezione del bene culturale ad eventi naturali;
- Lo sviluppo di tecnologie tradizionali e innovative per le fasi di emergenza e di messa in sicurezza del patrimonio al verificarsi di un evento;
- Lo sviluppo di tecnologie tradizionali e innovative per la mitigazione del rischio di perdita del bene culturale, in ottemperanza ai principi di compatibilità reversibilità e durabilità;
- Lo sviluppo di azioni di prevenzione e mitigazione della vulnerabilità per garantire la resilienza dei beni culturali ad eventi catastrofici.

2.3 Sotto-traiettoria 5.3: **MONITORAGGIO ALLA SCALA DEL CONTENUTO O DEL DETTAGLIO**

Lo stato di conservazione delle opere d'arte, e in particolare la sua evoluzione nel tempo e la sua interdipendenza con fattori esterni (temperatura, umidità relativa, ecc.) impatta fortemente sulle loro alterazioni. Il monitoraggio delle alterazioni può trovare risposta attraverso specifici prodotti tecnologici, capaci di rispondere con accuratezza anche al variare dei fattori e dell'ambiente di conservazione dei beni. Lo sviluppo di tali tecnologie spinge inoltre ad una forte interazione e

integrazione con le tecnologie già consolidate di monitoraggio ambientale, per creare una corretta correlazione tra alterazione, evoluzione dell'alterazione e dati ambientali.

Le tecnologie ormai consolidate, basate soprattutto su IoT e sensoristica, si riscontrano nel settore del monitoraggio continuo dei parametri ambientali (temperatura, umidità relativa dell'aria, luci, polveri...), mentre sussistono ancora possibilità di sviluppo nel settore relativo alla comunicazione dei dati. In particolare, si rivela necessario superare le attuali modalità di trasmissione dei dati su rete WiFi, in quanto potenzialmente limitate dall'ambiente circostante (es. la conformazione di un edificio storico che impedisce la riproduzione del segnale e quindi un'adeguata copertura del segnale). Infine, si riscontra una grossa carenza nello sviluppo di tecnologie per il monitoraggio continuo dello stato di conservazione delle opere d'arte, di fatto rilevato esclusivamente dalla ricognizione, periodica o spot, del loro stato da parte di personale specializzato (i.e. restauratori, conservatori, tecnici del restauro).

Lo sviluppo di sistemi innovativi di monitoraggio delle alterazioni sui beni culturali dovrà necessariamente prevedere l'integrazione tra tecnologie per la raccolta di dati relativi all'evoluzione delle alterazioni e della loro intensità nel tempo e tecnologie per il monitoraggio dei dati riguardanti l'ambiente in cui il bene è custodito e preservato. Inoltre, essi dovranno essere in grado di stabilire correlazioni causa-effetto in grado di stabilire a quali dati di monitoraggio ambientali corrispondano le alterazioni rilevate. A questo fine, sembra esserci grande spazio per l'integrazione dell'Intelligenza Artificiale in questo tipo di sistemi. In secondo luogo, tali sistemi dovranno essere progettati in modo da essere integrati con l'ambiente di preservazione del bene culturale: non impattanti da un punto di vista estetico e di fruizione dei materiali, e sostenibili economicamente. Infine, è necessario prevedere una piattaforma di raccolta, organizzazione ed elaborazione dei dati, configurabile sotto differenti livelli di profilazione, in cui far confluire i dati rilevati da questi sistemi di monitoraggio.

Da questo punto di vista, nel panorama europeo più recente emerge come progetto interessante per affinità con la Sotto-traiettorie 5.3. il progetto AURORA (<https://cordis.europa.eu/project/id/101094245>), mirato a preservare oggetti del patrimonio culturale dai rischi legati all'azione antropica, e in particolare all'interazione, soprattutto illecita, che caratterizza tali oggetti nel corso della loro storia. AURORA intende dimostrare come la marcatura chimica, i dispositivi miniaturizzati, la tecnica di scansione profonda dell'arte e le piattaforme basate su cloud e blockchain possono essere combinati per creare una contromisura economica e non invasiva contro le attività illegali preservando al contempo i manufatti da danneggiamenti e dissociazioni delle loro informazioni rilevanti. Sebbene il focus del progetto sia principalmente sulle attività illecite che spesso minacciano la conservazione dei beni culturali, si crede in questo ambito che alcune delle soluzioni proposte possano essere di interesse per la preservazione del patrimonio anche nell'ambito della mitigazione del rischio a cui esso è esposto nella normale interazione con le attività umane, siano esse di studio, analisi o semplice fruizione.

Per quanto riguarda bibliografia scientifica, essa mette in luce due ampie macro-categorie tematiche attraverso le quali può essere analizzato lo stato dell'arte della sotto-traiettorie 5.3:

- a) Monitoraggio ambientale degli edifici-museo e delle residenze storiche;
- b) Monitoraggio delle collezioni e delle opere d'arte

Per entrambi i temi, l'Italia risulta il paese con il maggior numero di pubblicazioni.

Monitoraggio ambientale degli edifici-museo e delle residenze storiche

In questa macro-categoria, il monitoraggio ambientale viene affrontato nella prospettiva di conservazione preventiva e risk-assessment, in particolare per quanto riguarda il rilevamento e la

comunicazione dei dati. Da un lato, la ricerca si concentra sullo sviluppo di sensori e modalità di rilevamento dei dati; dall'altro su tecnologie di trasmissione dei dati, con una grande crescita negli ultimi anni sulla ricerca di tecnologie wireless abbinate a sistemi cloud.

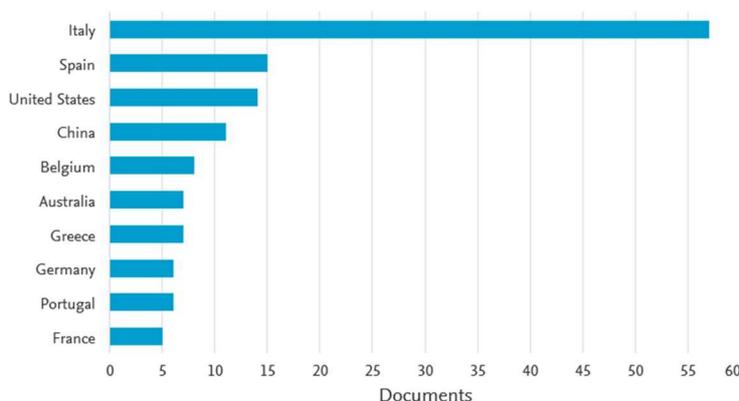


Figura 37. Il numero di documenti su Scopus per paese di pubblicazione per le parole chiave "environmental monitoring cultural heritage" (anni 2016-2019).

Monitoraggio ambientale delle collezioni e delle opere d'arte

Il monitoraggio delle opere d'arte con tecnologie di rilevamento continuo dei dati è poco sviluppato in letteratura, come dimostrano i pochi contributi scientifici a disposizione. Ciononostante, l'Italia risulta essere il paese con il maggior numero di pubblicazioni.

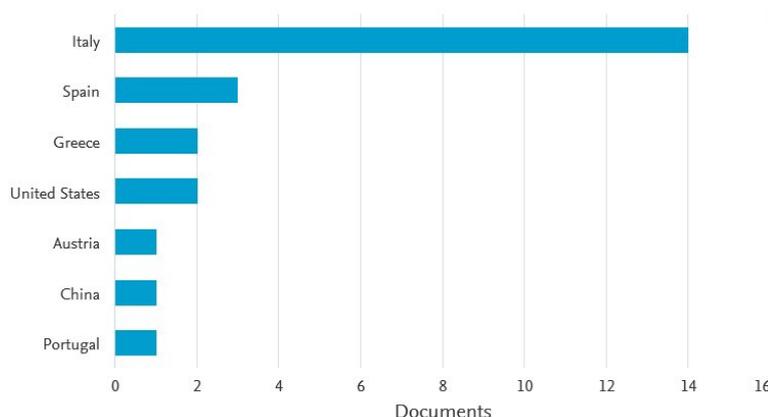


Figura 38. Il numero di documenti su Scopus per paese di pubblicazione per le parole chiave "cultural heritage artwork monitoring" (anni 2016-2019).

SOLUZIONI TECNOLOGICHE	
Tecnologie di Rilevamento (Sensori)	Tecnologie di rilevamento (sensori) per il monitoraggio ambientale degli edifici-museo e delle residenze storiche
Tecnologie di Trasmissione dei Dati	Tecnologie di trasmissione dei dati, quest'ultima sempre più orientata verso la modalità wireless abbinate a sistemi cloud per il monitoraggio ambientale degli edifici-museo e delle residenze storiche.
Tecnologie di Rilevamento Continuo	Il tema del monitoraggio delle opere d'arte con tecnologie di rilevamento in continuo
STAKEHOLDER	
Università, EPR, IR, Distretti	Università: Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura; Università di Napoli Federico II,

Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura; Università di Napoli Federico II Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse; Università di Cassino e del Lazio Meridionale, Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica; Università di Catania Dipartimento di Scienze Biologiche Geologiche e Ambientali; Dipartimento di Fisica e Astronomia "Ettore Majorana"; Università della Calabria Dipartimento di Biologia Ecologia e Scienze della Terra; Università di Bari Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali; Department of Mineralogy and Petrology of the University of Granada (Spain); Institute of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Institute of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Resources, Charles University in Prague, Faculty of Science, Albertov 6, 12843 Prague, Czech Republic; Department of Archaeology, Ghent University, Sint-Pietersnieuwstraat 35, 900, Gent, Belgium; Università di Palermo Dipartimento di Fisica e Chimica e Dipartimento di Ingegneria; Università di Genova, Dipartimento di Ingegneria Civile Chimica e Ambientale; Università di Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria e Dipartimento di Architettura; Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica.

Centri di ricerca: ENEA Dipartimento di Tecnologie Energetiche: Laboratorio di Analisi e Protezione delle Infrastrutture Critiche, Laboratorio del Calcolo Scientifico ad Alte Prestazioni della divisione ICT, Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi produttivi e territoriali, Laboratorio delle tecnologie per la Dinamica delle Strutture e la PREVENZIONE del rischio sismico idrogeologico, Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare, Laboratorio Micro e Nano Strutture per la Fotonica, Divisione di Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute; INFN Sede di Catania; IBAM CNR; CNR – A. Faedo – Pisa (Girardi – Pellegrini).

Distretti: Centro di Eccellenza del DTC Lazio (www.dtclazio.it). Unità di Ricerca (<https://dtclazio.it/unità-di-ricerca>): UR1: Nuove metodologie, tecnologie e strumenti diagnostici e di analisi per il miglioramento di tecniche di protezione del bene culturale finalizzate alla conservazione e monitoraggio degli artefatti. R1, R6, R8 [attinente alla sottotraiettoria 5.3]. UR2: Nuovi materiali. Tecnologie, strumenti e dispositivi per il monitoraggio, la conservazione, la protezione e il restauro dei beni culturali. R7, R12 [attinente alle sottotraiettorie 3 e 2]. UR5: Restauro, riqualificazione e valorizzazione di edifici e luoghi vincolati di elevato interesse storico, culturale e paesaggistico, sostenibilità ed efficientamento energetico, qualità dell'ambiente. R5, R9 [attinente alla sotto-traiettoria 5.2]. Distretto Tecnologico Sicilia Micro e Nano Sistemi S.C.a r.l. Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Scienza e Tecnologia dei Materiali (INSTM). Distretto Culturale evoluto Regione Marche (<https://www-regione.marche.it/Regione-Utile/Cultura/Distretto-Culturale-Evoluto>). Distretto ad Alta Tecnologia per le Costruzioni Sostenibili STRESS (www.stress-scarl.com). Recupero e Valorizzazione del Costruito Storico: Tecnologie di rilievo e monitoraggio, dalla scala territoriale a quella del singolo edificio; Tecnologie per la mitigazione dei rischi naturali ed

	antropici; Tecnologie per valorizzazione del costruito storico.
Imprese	AIPnD - Associazione Italiana Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, A.L.I.G. – Associazione Laboratori d’Ingegneria E Geotecnica, OICE – Associazione nazionale delle società di ingegneria e architettura, Federcostruzioni ANCE – Associazione Nazionale Costruttori Edili.
Altri portatori di interesse	Beneficiari di questo sviluppo tecnologico saranno i gestori dei Musei\Residenze\Collezioni, che potranno fornire indicazioni su come sviluppare in particolare l’interfaccia di front-end per la gestione e l’elaborazione dei dati. Potranno inoltre indicare vincoli e limiti di applicabilità delle tecnologie negli ambienti espositivi: MIC, Musei, Soprintendenze Archeologiche.
RISULTATI ATTESI DALLA SOTTO-TRAIETTORIA	
<p>La sotto traiettoria 5.3 prevede, in sintesi, di affrontare i seguenti temi:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Analisi delle migliori soluzioni tecnologiche per il monitoraggio continuo delle opere d’arte; - Sviluppo di metodologie e protocolli per la comunicazione dei dati derivanti dal monitoraggio dell’opera; - Integrazione dell’IA nella strumentazione adottata per il monitoraggio del patrimonio culturale; - Mappatura delle tecnologie a presidio del monitoraggio ambientale degli edifici e delle collezioni; - Sviluppo di una piattaforma per la raccolta e la gestione centralizzata dei dati dei sistemi di monitoraggio. 	

2.4 Congruenze e sinergie con Horizon Europe, PNR, PNRR

Le linee di ricerca di tutta la Traiettoria 5 sono coerenti con il contesto di riferimento generale del PNRR, e nello specifico con gli obiettivi di alcune delle Missioni con le relative component. La seguente tabella riporta più nel dettaglio i progetti e le iniziative europee che dimostrano particolare sinergia sia con la Traiettoria 5 sia con le singole sotto-traiettorie.

CONGRUENZE E SINERGIE CON HORIZON EUROPE, PNR, PNRR
<p>M1C3.2 Rigenerazione di piccoli siti culturali, patrimonio culturale, religioso e rurale con specifico riferimento ai seguenti investimenti: Investimento 2.1: Attrattività dei borghi, Investimento 2.2: Tutela e valorizzazione dell’architettura e del paesaggio rurale, Investimento 2.3: Programmi per valorizzare l’identità dei luoghi: parchi e giardini storici, Investimento 2.4: Sicurezza sismica nei luoghi di culto, restauro del patrimonio culturale del Fondo Edifici di Culto (FEC) e siti di ricovero per le opere d’arte (Recovery Art); M4C2.1 - Rafforzamento della ricerca e diffusione di modelli innovativi per la ricerca di base e applicata condotta in sinergia tra università e Imprese con specifico riferimento all’Investimento 1.3: Partenariati Estesi e alla tematica 5. Cultura umanistica e patrimonio culturale come laboratori di innovazione e creatività. Network for Territorial Development and Cohesion), Med, ENPI Programma ENPI CB MED; Cosme, Life, Europa Cultura umanistica e patrimonio culturale come laboratori di innovazione e creatività.</p> <p>Le linee di ricerca di tale sotto-traiettoria, così come di tutta la traiettoria 5, sono, altresì, coerenti con il contesto di riferimento generale del PNR 2021-27, e nello specifico con gli obiettivi dei alcuni dei Grandi ambiti di ricerca e innovazione con le relative aree d’intervento e, più nello specifico, articolazioni ed, in particolare: <i>Cultura umanistica, creatività, trasformazioni sociali, società dell’inclusione - Patrimonio Culturale</i> con specifico riferimento alle articolazioni Articolazione 1. Digitalizzazione dei processi di tutela, conservazione e valorizzazione, Articolazione 2. Sbloccare il pieno potenziale delle scienze del patrimonio, Articolazione 3.</p>

Sviluppo di tecnologie a sostegno del patrimonio diffuso e meno conosciuto; *Sicurezza per i sistemi sociali - Sicurezza delle strutture, infrastrutture e reti* con specifico riferimento alle seguenti articolazioni Articolazione 1. Analisi e valutazione dei rischi e della resilienza, Articolazione 2. Metodi, tecniche e tecnologie per il monitoraggio e la prevenzione dei rischi; *Sicurezza per i sistemi sociali - Sicurezza sistemi naturali* con specifico riferimento alle seguenti articolazioni Articolazione 2. Monitoraggio dei sistemi naturali, Articolazione 3. Strategie multirischio per la difesa da eventi naturali dove proprio Il Ministero per i Beni e le Attività Culturali e per il Turismo ha fornito contributi per la definizione di tale articolazione 3 di questa area d'intervento.

Dal momento che i grandi ambiti di ricerca e innovazione del PNR sono stati mutuati dai pilastri di Horizon Europe e riproposti secondo le specificità del sistema nazionale dal Ministero dell'Università e della Ricerca, è, altresì, evidente la coerenza della traiettoria con gli obiettivi dei pilastri 2. Culture, Creativity and Inclusive Society e 3. Civil Security for Society oltre che con alcuni degli obiettivi tematici (OT) del Green Deal Europeo quali ad esempio i OT 1 e OT4.

Infine, gli obiettivi della traiettoria si rivelano e in sinergia con diverse iniziative elaborati dall'Unione Europea in questo ambito: l'European Collaborative Cloud for Cultural Heritage (ECCCH); e l' European data space for cultural heritage.

Altri progetti: ITN-ESPON, ESPON 2020 (European Observatory Network for Territorial Development and Cohesion), Med, ENPI Programma ENPI CB MED; Cosme, Life, Europa Cultura.

3. Roadmapping

Gestione dei dati di monitoraggio

Negli ultimi anni sono diventati disponibili enormi quantità di dati (big data), ma molto spesso mancano o sono insufficienti le procedure e le tecniche di sintesi di tali dati. A partire da quanto già disponibile, diversi margini di miglioramento riguardano:

- La messa a punto di procedure semi-automatiche di elaborazione di immagini satellitari e aeree ad alta risoluzione quasi in real-time, per l'analisi dei possibili cambiamenti del territorio (es. mappa deformazioni superficiali, individuazione aree allagate, individuazione aree incendiate), e delle condizioni deformative degli edifici presenti nell'area;
- Lo sviluppo di procedure di integrazione di dati spazialmente distribuiti (imaging) con dati puntuali (calibrazione e validazione);
- La possibilità di risolvere il problema dei big-data attraverso la possibilità di accedere a dati sempre più ricchi e precisi in termini di risoluzione geometrica, bande spettrali, frequenza temporale;
- La creazione di un repository dei dati per la messa in rete delle mappe di rischio per la fruizione da parte di enti pubblici e privati preposti alla sicurezza del territorio e dei beni presenti,
- La proposta, come possibile soluzione, di usare come base il Geoportale Nazionale per rendere i prodotti accessibili anche ai non addetti ai lavori.

Valutazione degli effetti del degrado sulla sicurezza del patrimonio culturale

Il monitoraggio dello stato delle strutture (Structural Health Monitoring, o SHM) può fornire risultati di maggior impatto se supportato da modelli computazionalmente efficienti che limitano l'uso di modellazione FE 3D raffinate e seguono un approccio multi-scala affine agli obiettivi di volta in volta posti per la salvaguardia del patrimonio culturale. Inoltre, ulteriori benefici potrebbero essere apportati nei casi di ridotte quantità di misurazioni o di misurazioni a sorgenti multiple dovute a sollecitazioni ambientali (es. vibrazioni da traffico in aree urbane).

Monitoraggio dei processi di degrado dei materiali lapidei naturali e artificiali utilizzati nei beni culturali

Nel monitoraggio dei fenomeni di degrado è utile distinguere tra a) il monitoraggio dei principali fattori che producono danni ai beni culturali e b) il monitoraggio degli effetti dei processi di alterazione.

Relativamente al primo tema, sono da segnalare:

- Le tecnologie per il monitoraggio ambientale con dispositivi di sensoristica che permettono di evidenziare le variazioni degli agenti inquinanti atmosferici;
- Il monitoraggio delle condizioni climatiche con sensori T dell'aria e del manufatto, RH, piovosità, radiazione solare, vento, termometria IR;
- Il monitoraggio dell'attività biologica;
- La variazione dell'acqua all'interno del sistema poroso dei materiali e la sua composizione chimica.

Relativamente al secondo tema, secondo la classificazione delle forme di degrado di Fitzner, è possibile segnalare: a) variazione di volume attraverso laser scanner e sistemi digitali di mappatura 3D sia a scala di monumento sia a scala di dettaglio; b) modificazione del colore e depositi grazie a analisi di immagine anche multispettrale, analisi di spettrometria Raman in remoto e spettroscopia LIBS; c) distacchi, fessurazioni e deformazioni attraverso tecniche di analisi di immagine, laser scanner, sistemi digitali di mappatura 3D e sistemi di rilevazione di raggi cosmici muoni, che permette di osservare in continuo lo scostamento del monumento o di porzioni di esso con precisione dell'ordine del centesimo di cm.

La specificità dell'oggetto bene culturale richiede lo sviluppo di tecnologie non-invasive. La miniaturizzazione dei sistemi di monitoraggio e l'uso di nano-tecnologie per la creazione di sistemi di rilevazione delle variazioni del sistema sono frontiere aperte e di alto interesse per il progetto. Allo stesso modo, una particolare attenzione va riferita anche a metodologie innovative di monitoraggio in remoto attraverso sistemi wireless, o metodologie innovative già sperimentate in altri campi come, ad esempio, la scansione attraverso i raggi cosmici. Inoltre, indispensabile è un sistema di integrazione dei dati attraverso appositi software che diano la possibilità di controllare i parametri in tempo reale e con continuità per il monitoraggio dei processi di degrado.

ⁱ The Cultural Heritage Cloud (https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/social-sciences-and-humanities/cultural-heritage-and-cultural-and-creative-industries-ccis/cultural-heritage-cloud_en)

ⁱⁱ Data Space for cultural heritage (https://hadea.ec.europa.eu/calls-proposals/data-space-cultural-heritage_en)

ⁱⁱⁱ Descrizione del progetto Triqueta in DRIVING A GREEN, DIGITAL & INNOVATIVE EUROPEAN CULTURAL HERITAGE - Projects from the 2021 & 2022 calls for proposals of Cluster 2 "Culture, Creativity & Inclusive Society". 1st edition. July 2023.

^{iv} Descrizione del progetto Tethida in DRIVING A GREEN, DIGITAL & INNOVATIVE EUROPEAN CULTURAL HERITAGE - Projects from the 2021 & 2022 calls for proposals of Cluster 2 "Culture, Creativity & Inclusive Society". 1st edition. July 2023.