

e-Journal
degli
Scavi di Pompei



2026.

03

La manutenzione come cura: un modello innovativo e digitale per il monitoraggio del sito archeologico di Pompei.

Gabriel Zuchtriegel¹, Vincenzo Calvanese¹, Luigi Petti², Arianna Spinosa¹, Alessandra Zambrano¹

1. Monitoraggio a supporto della Manutenzione

Il Parco Archeologico di Pompei rappresenta un patrimonio di inestimabile valore, la cui tutela e salvaguardia richiedono l'adozione di modelli di gestione della conoscenza e della manutenzione integrati e multidisciplinari, orientati verso approcci innovativi, sostenibili e supportati da processi digitali. In tal senso, l'implementazione di approcci data-driven e data-based nei processi decisionali rappresenta un paradigma metodologico fondato sull'impiego sistematico di dati quantitativi e qualitativi per supportare e orientare le scelte strategiche e operative, in un'ottica di organizzazione e programmazione delle attività e delle risorse. Un siffatto approccio si articola in una sequenza strutturata di fasi che comprendono la raccolta, la validazione, l'analisi e l'interpretazione di differenti tipologie di dati ai fini della conoscenza, e una successiva programmazione mirata, individuando le priorità per l'intervento. L'obiettivo principale consiste nel ridurre l'incertezza decisionale, migliorare l'efficacia delle scelte e programmare in maniera preventiva, sostituendo logiche intuitive o esperienziali con evidenze empiriche. L'efficacia di un approccio data-driven dipende dalla quantità e soprattutto dalla qualità dei dati disponibili.

Un momento storico di transizione, nell'ambito delle attività di tutela e conservazione del sito, è stato indubbiamente il Grande Progetto Pompei (GPP), la cui esigenza era quella di integrare le attività di tutela e manutenzione in un processo gestionale straordinario sostenuto da risorse ordinarie. La sfida attuale per Pompei consiste nel preservare e migliorare ulteriormente gli elevati standard qualitativi raggiunti dal GPP, soprattutto in termini di conservazione e restauro, mediante un "Processo di Gestione Sostenibile". In tale processo, fondamentale è la gestione delle attività di manutenzione.

L'implementazione di un processo di manutenzione efficace, efficiente e di tipo preventivo, fondato sulla conoscenza dei manufatti e dell'uso ottimale dei sussidi, consente di gestire in maniera più proficua la conservazione e la salvaguardia del complesso ed esteso patrimonio riportato alla luce [1].

Al fine di organizzare, coordinare e programmare le attività di manutenzione del sito è stato concepito ed implementato un processo di monitoraggio multi-scala e multi-livello [2] con il supporto del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Salerno. L'obiettivo del monitoraggio è produrre un quadro conoscitivo sempre aggiornato e storicizzato sulle condizioni di fatto, in funzione della reale evoluzione del degrado e dello stato di sicurezza del patrimonio.

¹ Parco Archeologico di Pompei.

² Università di Salerno.

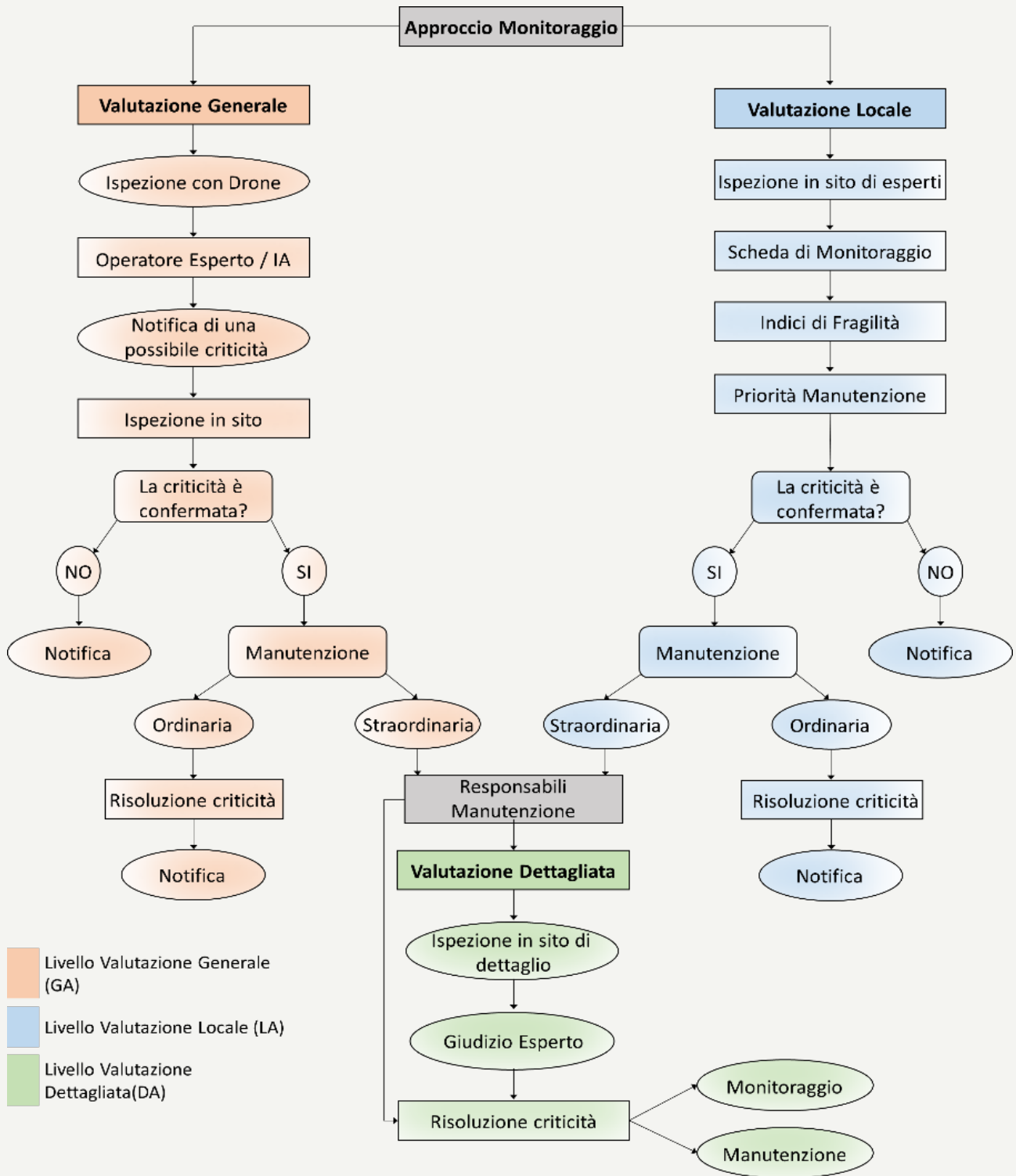


Figura 1. Diagramma di flusso sintetico del processo di monitoraggio multi-livello e multi-scala

L'approccio messo in atto prevede l'integrazione di differenti metodologie e tecniche, ottimizzate per varie risoluzioni spaziali e temporali e per i diversi livelli di approfondimento nella valutazione [3].

In particolare, la strategia di monitoraggio segue il diagramma di flusso descritto in figura.

Il processo si articola in particolare in tre distinti livelli. I livelli di Valutazione Generale e di Valutazione Locale si sviluppano in parallelo, mentre il livello di Valutazione Dettagliata è attivato in maniera selettiva, in funzione degli esiti delle analisi condotte nei primi due livelli. In particolare:

- **Valutazione Locale (LA):** consente una caratterizzazione estesa delle condizioni del sito mediante la definizione di indici di fragilità, assoluti e relativi, derivati dalla compilazione di schede ispettive standardizzate, basate su rilievi speditivi on-site eseguiti con cadenza annuale da team multidisciplinari di esperti;
- **Valutazione Generale (GA):** fornisce una visione complessiva dello stato del sito attraverso acquisizioni mensili basate sull'impiego di piattaforme UAV e tecniche di analisi automatizzata dei dati. Tale livello può essere considerato un metodo efficace per gestire rapidamente situazioni di emergenza, quali ad esempio eventi calamitosi;
- **Valutazione Dettagliata (DA):** è attivata in modo mirato sulla base delle evidenze emerse dai livelli precedenti e consente l'esecuzione di analisi approfondite, finalizzate alla definizione di interventi specifici, anche mediante l'impiego di sensori dedicati.

All'interno del processo sono coinvolte diverse figure, ciascuna con specifici ruoli e responsabilità. In particolare, vi partecipano operatori e professionisti sul campo, tecnici ed esperti in analisi dei dati, informatici, ricercatori, figure tecniche specialistiche, sia interne che esterne al Parco.

L'obiettivo principale del processo di monitoraggio, finalizzato alla gestione della manutenzione, è quello di coordinare e ottimizzare le attività da implementare, attraverso un sistema che consente di generare interventi speditivi e organizzati, per la manutenzione ordinaria proattiva. Il processo attuato consente, inoltre, la gestione della manutenzione straordinaria mediante l'attivazione di specifiche procedure in considerazione delle priorità e della rilevanza delle potenziali criticità rilevate.

L'implementazione della suddetta strategia di monitoraggio, oltre a garantire una conoscenza ampia e costantemente aggiornata del sito, contribuisce a una pianificazione strutturata delle attività di manutenzione e di intervento. Essa mira, infatti, ad assicurare la sostenibilità nell'uso delle risorse economiche e una gestione più consapevole degli investimenti, permettendo di valutare l'efficacia delle misure adottate e di orientare la pianificazione della manutenzione e dei futuri interventi [4]. Si evidenzia, infine, che il monitoraggio del Parco archeologico di Pompei è stato sviluppato in parallelo con lo sviluppo e l'applicazione da parte dell'Università di Salerno di sistemi di sorveglianza di asset e sistemi complessi, tra cui le opere d'arte presenti sulle infrastrutture autostradali [5].

2. Il livello di Valutazione Locale

Il Livello di Valutazione Locale (LA) si fonda su ispezioni speditive on-site, finalizzate all'acquisizione di una conoscenza puntuale delle condizioni del patrimonio. L'attività è orientata all'individuazione delle criticità che interessa il patrimonio costruito a Pompei mediante il riconoscimento di fenomeni di riferimento di degrado e la conseguente definizione di indici di fragilità, sia assoluti che relativi, utili alla caratterizzazione dello stato di fatto e alla classificazione delle priorità di attenzione di ciascuna componente del patrimonio. Il livello LA, condotto generalmente con cadenza annuale, prevede sopralluoghi eseguiti da team multidisciplinari di esperti, tra cui ingegneri, architetti, archeologi e restauratori, secondo un approccio strutturato. La raccolta dei dati avviene tramite schede di monitoraggio standardizzate, articolate per macrotipologie di elementi per l'identificazione sistematica dei principali e più significativi fenomeni di degrado. Il processo adotta un'impostazione gestionale multilivello, finalizzata alla restituzione sintetica dei fattori

di rischio associati ai singoli elementi. In particolare, la metodologia prevede una prima fase in cui vengono eseguite le ispezioni visive dirette ed il rilievo speditivo dei degradi, ed una fase successiva che prevede il calcolo di indici, atti a classificare gli elementi del patrimonio in termini di attenzione e priorità.

2.1. Le Ispezioni Speditive

Le attività di valutazione speditiva mirano all'individuazione dei difetti maggiormente significativi, al fine di individuare condizioni potenzialmente critiche e supportare la programmazione degli interventi e le preliminari attività di conoscenza più dettagliate.

Ai fini del rilievo sono utilizzate, come detto, schede di ispezione specifiche per ciascuna tipologia di elemento censito nel WebGIS del Parco, ossia "Paramento Murario", "Pavimento" e "Struttura Isolata". Tale classificazione deriva dallo sviluppo del piano della conoscenza [6] già implementato nel Parco, che ha consentito la definizione e l'organizzazione del costruito secondo referenti topografici, sulla base dei quali gli elementi sono classificati all'interno del database WebGIS.

Le schede, per ognuna delle suddette tipologie, sono suddivise in più parti che individuano gli elementi salienti suscettibili di degrado:

- Per il "Paramento Murario (PM)" si distinguono gli elementi di degrado associati alle "Strutture Murarie (SM)", agli "Apparati Decorativi/Rivestimenti Verticali (AD)" e agli "Architravi (AR)";
- Per il "Pavimento (PA)" gli elementi di degrado sono associati agli "Apparati Decorativi/Rivestimenti Pavimentali (AD)";
- Per la "Struttura Isolata (SI)" si distinguono gli elementi di degrado associati alla "Struttura Muraria (SM)", agli "Apparati Decorativi/Rivestimenti/Elementi lapidei architravi elementi isolati (AD)" e agli "Architravi su elementi isolati (AR)".

Al fine di individuare l'elemento oggetto di ispezione, all'interno della relativa scheda ispettiva vengono considerate le informazioni che individuano geograficamente l'elemento in accordo alla nomenclatura adottata dal parco all'interno del database WebGIS. In particolare, l'identificazione è condotta considerando Sito, Regio, Insula, Civico, Ambiente, Elemento e Referente Topografico. Ogni scheda riporta, inoltre, i nomi dei componenti della squadra e la data di ispezione.

Nel dettaglio, la scheda riporta per ogni tipologia di difetto le informazioni di seguito descritte:

- *CODICE DEGRADO*: riporta la codifica stabilita per il singolo difetto;
- *DESCRIZIONE DEGRADO*: riporta il nome del difetto;
- *ESTENSIONE (k1)*: descrive l'estensione del difetto rispetto alla totalità dell'elemento considerato. Il suo valore varia tra 0.2 (poco esteso), 0.5 (estensione media) e 1 (molto esteso);
- *INTENSITÀ (k2)*: descrive l'intensità del difetto e/o l'effetto dello stesso sullo stato di conservazione. Il suo valore varia tra 0.2 (intensità/effetto minima), 0.5 (intensità/effetto medio) e 1 (intensità/effetto elevato);
- *FOTO*: riporta la numerazione delle foto descrittive dello specifico difetto;
- *G*: coefficiente descrittivo dell'importanza relativa di ciascun difetto, variabile da 1 a 5 in funzione dell'incidenza del difetto sulla conservazione dell'elemento investigato;
- *NOTE*: spazio per riportare eventuali annotazioni e osservazioni.

All'interno della scheda di ispezione, per ciascun difetto sono definiti i valori ammissibili degli indici di estensione e di intensità, nonché il corrispondente peso G associato. Tale impostazione tiene conto della natura intrinseca dei diversi fenomeni di degrado, che presentano modalità di manifestazione differenti, influenzando sia i valori ammissibili degli indici sia il contributo alla valutazione complessiva.

In particolare, alcuni difetti sono caratterizzati da una variabilità in termini di estensione e intensità, mentre altri si configurano in condizioni non, o solo limitatamente, graduabili. Ad esempio, il difetto di “Umidità” nella struttura muraria può manifestarsi secondo differenti livelli di estensione e intensità. Inoltre, si evidenzia che tipologie di difetti differenti possono determinare condizioni di aggravio differenti ai fini della conservazione, sia in termini di sicurezza che di prestazioni dell’elemento; tale aspetto è considerato mediante l’attribuzione di pesi *G* distinti.

Al fine di rendere quanto più oggettive le fasi di rilievo dei degradi, per ogni tipologia di difetto è stata predisposta una scheda difettologica descrittiva del difetto con le indicazioni per la compilazione. In figura è riportato un estratto della scheda ispettiva del “Paramento Murario” ed un esempio di scheda difettologica per la tipologia di degrado PM_SM 010, ovvero “Polverizzazione della Malta”.

SCHEDE ISPETTIVE PARAMENTO MURARIO							
REGIONE:	INSULA:	CIVICO:	AMBIENTE:	ELEMENTO:	REFERENTE TOPOGRAFICO:		
SITO:		Squadra di rilievo:			Data:		
CODICE DEGRADO	DESCRIZIONE DEGRADO	ESTENSIONE	INTENSITÀ	FOTO	G	NOTE	
STRUTTURA MURARIA							
PM_SM							
SM 001	Lesione orizzontale	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 002	Lesione verticale	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 003	Lesione diagonale	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 004	Fuori piombo	0,5	1,0		0,5	1,0	5
SM 005	Spaziamento muratura	0,2	0,5	1,0		0,5	1,0
SM 006	Umidità	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 007	Infiltrazione	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 008	Lacuna/alveolizzazioni/porzione di muratura mancante	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 009	Scomposizione cantonale	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 010	Polverizzazione della malta	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 011	Esfollazione elementi in pietra/laterizio	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 012	Frattura/fessurazione laterizi o elementi in pietra	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 013	Distacco su creste murarie	0,2	0,5	1,0		1,0	3
SM 014	Superficie danneggiata (efflorescenza/patina biologica)	0,2	0,5	1,0		1,0	2
SM 015	Vegetazione su creste murarie	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 016	Degrado catena metallica	0,2	0,5	1,0		0,5	1,0
SM 017	Presenza di presidio inefficace (puntellature legno/ferro)			1,0		1,0	4
APPARATI DECORATIVI/RIVESTIMENTI VERTICALI							
PM_AD							
AD 001	Vegetazione	0,2	0,5	1,0		1,0	3
AD 002	Lacuna da crollo	0,2	0,5	1,0		1,0	2
AD 003	Colonizzazione biologica	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
AD 004	Distacco	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
AD 005	Spolvero/Erosione/Decoazione	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
AD 006	Deformazione	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
AD 007	Fessurazione	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
AD 008	Salvabordo superiore assente/degradato	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
AD 009	Salvabordo inferiore assente/degradato	0,2	0,5	1,0		0,5	1,0
AD 010	Efflorescenze/subefflorescenze saline	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
AD 011	Sollevamento pellicola pittorica	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
ARCHITRAVI							
PM_AR							
AR 001	Marcescenza legno	0,2	0,5	1,0		0,5	1,0
AR 002	Fratturazione/fessurazione	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
AR 003	Lesione orizzontale	0,2	0,5	1,0		0,5	1,0
AR 004	Lesione verticale	0,2	0,5	1,0		1,0	5
AR 005	Lesione diagonale	0,2	0,5	1,0		0,5	1,0
AR 006	Umidità	0,2	0,5	1,0		0,5	1,0
AR 007	Presenza di funghi	0,2	0,5	1,0		1,0	3
AR 008	Attacco di insetti xilofagi	0,2	0,5	1,0		1,0	4
AR 009	Appoggi deteriorati e/o insufficienti	0,2	0,5	1,0		1,0	4
AR 010	Espulsione capifermo	0,2	0,5	1,0		1,0	2
AR 011	Ossidazione armature o profilati metallici	0,2	0,5	1,0		0,5	1,0
AR 012	Deformazione	0,2	0,5	1,0		0,5	1,0
AR 013	Distacco del rivestimento	0,2	0,5	1,0		1,0	2
AR 014	Giunti di malta polverizzata	0,2	0,5	1,0		1,0	3
NOTA CONCLUSIVA							

Schede Difettologiche **PARAMENTO MURARIO – STRUTTURA MURARIA**

PM_SM 010 POLVERIZZAZIONE DELLA MALTA

Peso del difetto

G=1	G=2	G=3	G=4	G=5
-----	-----	-----	------------	-----

Estensione k_1

0,2	0,5	1,0
-----	-----	-----

Intensità k_2

0,2	0,5	1,0
-----	-----	-----

Descrizione

Malta polverulenta al tatto soggetta ad erosione a causa dei fenomeni meteorologici, acqua e vento. L'intensità (K_2) è funzione della profondità della polverizzazione della malta tra i giunti: 0,2 quando la profondità della malta polverulenta è minore di 2cm rispetto al giunto originario; 0,5 tra 2 a 4cm; 1,0 maggiore di 4cm.


Cause

Esposizione delle malte tra i giunti ai fenomeni meteorologici senza protezione dell'intonaco; variazioni termiche ambientali; crescita di vegetazione; sviluppo di patine biologiche.

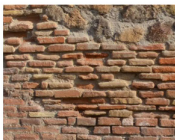
Fenomeni di degrado correlati

Lacune; distacco su creste murarie; superficie danneggiata.


Esempi



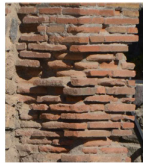
Polverizzazione della malta intensità 0,2





















Polverizzazione della malta intensità 0,5



Polverizzazione della malta intensità 1,0



Polverizzazione della malta intensità 1,0

POMPEII                  

Indice di Attenzione

L'Indice di Attenzione (IA) rappresenta il potenziale deterioramento degli elementi, ed è legato alla gravità della tipologia di difetti rilevati. Tale indice può assumere cinque valori (intervalli): ALTO, MEDIO-ALTO, MEDIO, MEDIO-BASSO e BASSO.

L'indice IA viene definito per ogni componente in funzione del peso del difetto (G) e dall'estensione (k1) e dall'intensità (k2) dello stesso. Le analisi condotte su un campione preliminare hanno consentito di realizzare la seguente matrice logica per l'attribuzione dell'indice.

IA	k1 = 0,2	k1 = 0,5	k1 = 1,0
ALTO	-	-	se G = 5 e k2 = 1,0
MEDIO-ALTO	-	se G = 5 e k2 = 1,0	se G = 5 e k2 = 0,5 se G = 4 e k2 = 1,0
MEDIO	se G = 5 e k2 = 1,0	se G = 5 e k2 = 0,5 se G = 4 e k2 = 1,0	se G = 5 e k2 = 0,2 se G = 4 e k2 = 0,5 se G = 3 e k2 = 1,0
MEDIO-BASSO	se G = 5 e k2 = 0,5 se G = 4 e k2 = 1,0	se G = 5 e k2 = 0,2 se G = 4 e k2 = 0,5 se G = 3 e k2 = 1,0	se G = 4 e k2 = 0,2 se G = 3 e k2 = 0,5 se G = 2 e k2 = 1,0
BASSO	se G = 5 e k2 = 0,2 se G = 4 e k2 ≤ 0,5 se G = 3 e k2 ≤ 1,0 se G = 2 e k2 ≤ 1,0	se G = 4 e k2 = 0,2 se G = 3 e k2 ≤ 0,5 se G = 2 e k2 ≤ 1,0	se G = 3 e k2 = 0,2 se G = 2 e k2 ≤ 0,5

Figura 3. Matrice Logica per la definizione dell'Indice di Attenzione (IA)

In figura sono descritti, ad esempio, i livelli degli Indici di Attenzione calcolati nel caso di Struttura Muraria di un Paramento Murario.

STRUTTURA MURARIA											
CODICE DEGRADO	DESCRIZIONE DEGRADO	G	k1=0,2			k1=0,5			k1=1,0		
PM_SM			k2			k2			k2		
SM 001	Lesione orizzontale	4	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 002	Lesione verticale	3	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 003	Lesione diagonale	3	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 004	Fuori piombo	5					0,5	1,0		0,5	1,0
SM 005	Spianciamento muratura	4		0,5	1,0		0,5	1,0		0,5	1,0
SM 006	Umidità	2	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 007	Infiltrazione	2	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 008	Lacuna/alveolizzazione/porzione di muratura mancante	3	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 009	Sconnessione cantonale	3								0,5	1,0
SM 010	Polverizzazione della malta	4	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 011	Esfoliazione elementi in pietra/laterizio	2	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 012	Frattura/fessurazione laterizi o elementi in pietra	2	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 013	Distacco su creste murarie	3			1,0			1,0			1,0
SM 014	Superficie danneggiata (efflorescenza/patina biologica)	2			1,0			1,0			1,0
SM 015	Vegetazione su creste murarie	3	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0	0,2	0,5	1,0
SM 016	Degrado catena metallica	4		0,5	1,0		0,5	1,0		0,5	1,0
SM 017	Presenza di presidio inefficace (puntellature legno/ferro)	4									1,0

Figura 4. Indice di Attenzione (IA) valutato nel caso di Struttura Muraria di un Paramento Murario (i colori delle celle fanno riferimento ai livelli descritti in figura 3).

La valutazione dell'indice IA consente di individuare in modo speditivo gli elementi che potrebbero richiedere un ulteriore approfondimento in considerazione della tipologia di degrado e dell'estensione e dell'intensità dello stesso.

Difettosità Relativa

La Difettosità Relativa (DR) è un parametro descrittivo dello stato di degrado, ovvero di danno potenziale complessivo di ciascun elemento, ed è valutato attraverso una somma pesata delle caratteristiche del singolo difetto sulla base del peso (G), dell'estensione (k1) e dell'intensità (k2).

$$DR = \sum_{i=0}^n (k1_i \cdot k2_i \cdot G_i) \quad (1)$$

DR rappresenta una "misura" delle condizioni complessive di conservazione di ciascun elemento.

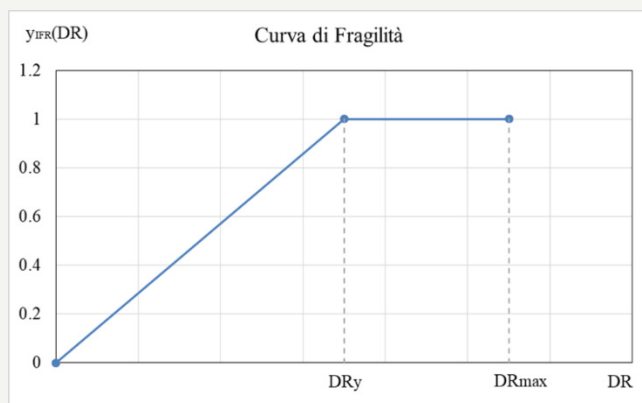
Indice di Fragilità Relativa

L'Indice di Fragilità Relativa (IFR) permette di ottenere un elenco di priorità degli elementi oggetto di analisi in considerazione del livello di degrado, ovvero di danno potenziale complessivo rilevato per ciascun elemento che costituisce il patrimonio del Parco. L'indice IFR è funzione della Difettosità Relativa (DR) e può assumere cinque valori (intervalli): ALTO, MEDIO-ALTO, MEDIO, MEDIO-BASSO e BASSO.

La valutazione dell'IFR considera un'analisi di fragilità dei singoli elementi. Una funzione di fragilità descrive in generale la probabilità (P) di superare un determinato livello di danno (stato limite - LS) in funzione di un parametro rappresentativo dell'intensità del fenomeno (misura d'intensità - IM). Questa condizione può essere espressa tramite la seguente equazione [7].

$$\text{Fragilità} = P[\text{LS} | \text{IM} = y] \quad (2)$$

Lo sviluppo e la caratterizzazione delle funzioni di fragilità, da letteratura, può essere condotta attraverso diversi approcci. Tra questi vi è l'approccio basato sul giudizio di esperti, il quale si fonda sulla raccolta di valutazioni qualitative e quantitative, attraverso l'uso di schede/questionari standardizzati. In particolare, il metodo prevede che gli esperti siano chiamati ad attribuire punteggi o probabilità che un determinato elemento o una specifica tipologia strutturale raggiunga un certo livello di danneggiamento al crescere dell'intensità del fenomeno considerato [8].



$$\begin{cases} y_{IFR}(DR) = m \cdot DR & \text{per } 0 < DR < DR_y \\ y_{IFR}(DR) = 1 & \text{per } DR_y < DR < DR_{max} \end{cases}$$

Figura 5. Curva di Fragilità. Descrizione Funzione $y_{IFR}(DR)$.

Nel caso specifico, ai fini della valutazione delle curve di fragilità dei singoli elementi, è stata adottata una funzione di tipo bilineare $y_{IFR}(DR)$, descritta nella seguente figura. In particolare, è stato assunto che, a partire dalla condizione $y_{IFR}(DR)=0$ (nessun danno), la funzione $y_{IFR}(DR)$ cresca linearmente con pendenza m , fino al valore $y_{IFR}(DR)=1$ (perdita potenziale del bene), in corrispondenza del valore di Difettosità Relativa DR_y , rappresentativa del massimo livello di difettosità rilevabile.

Per valori superiori di DR la funzione si mantiene costante fino al raggiungimento del valore ultimo DR_{max} , corrispondente al massimo livello di difettosità teorico.

Il valore soglia DR_y può essere espresso dalla seguente relazione.

$$DR_y = \rho \bullet DR_{max} \quad (3)$$

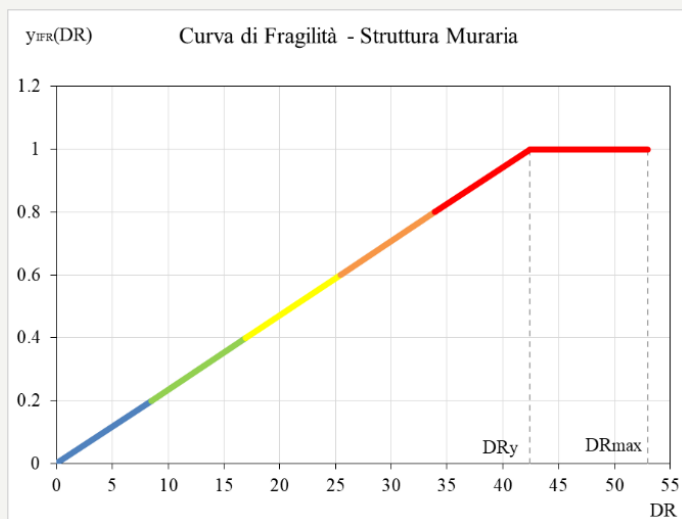
In accordo al metodo di caratterizzazione delle curve di fragilità basato sul giudizio degli esperti e delle esperienze condotte nella fase iniziale di applicazione della metodologia sul patrimonio di Pompei, è stato fissato un valore di ρ pari a 0,8.

In figura è descritta la matrice che consente di definire l'intervallo assunto dall'indice IFR.

IFR	SOGLIE
ALTO	$0,80 < y_{IFR}(DR) < 1,00$
MEDIO-ALTO	$0,60 < y_{IFR}(DR) < 0,80$
MEDIO	$0,40 < y_{IFR}(DR) < 0,60$
MEDIO-BASSO	$0,20 < y_{IFR}(DR) < 0,40$
BASSO	$0,00 < y_{IFR}(DR) < 0,20$

Figura 6. Matrice per la definizione dell'Indice di Fragilità Relativa (IFR)

Nel caso degli elementi "Struttura Muraria" del Paramento Murario, sono state individuate 17 tipologie di degradi, ovvero danni potenziali, che nel caso siano tutti contemporaneamente presenti con la massima intensità ed estensione, condurrebbero ad un valore del parametro DR_{max} pari a 53. Pertanto, tenuto conto delle assunzioni riportate, è possibile definire le classi per gli Indici di Fragilità Relativa come descritto in figura.



PM_SM		
IFR	Soglia DR	y
ALTO	53,00	1,0
MEDIO-ALTO	33,92	0,8
MEDIO	25,44	0,6
MEDIO-BASSO	16,96	0,4
BASSO	8,48	0,2

Figura 7. Curva di fragilità e soglie dell'Indice di Fragilità Relativa (IFR) nel caso della Struttura Muraria del Paramento Murario

2.3. Analisi dei dati di monitoraggio

Il risultato della valutazione locale è descritto mediante mappe colorate, rappresentative dei livelli degli indici considerati.

Le Figure di seguito riportano rispettivamente un esempio di rappresentazione dell'Indice di Attenzione (IA), della Difettosità Relativa (DR) e dell'Indice di Fragilità Relativa, nel caso di una Struttura Muraria di un Paramento Murario.

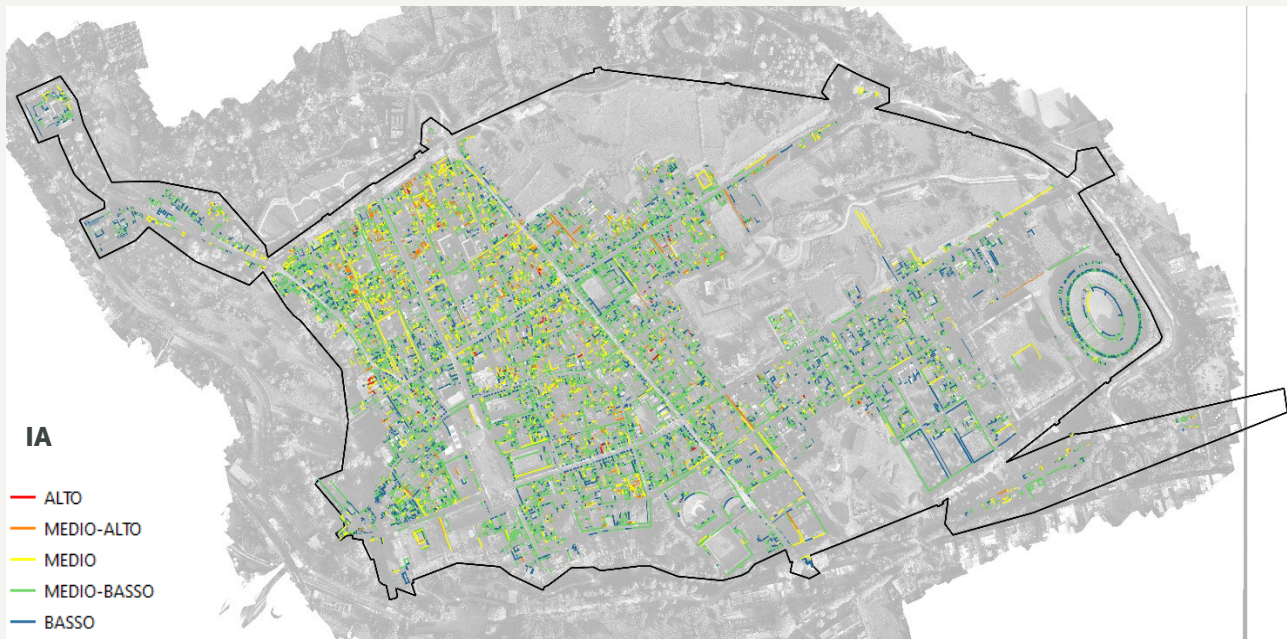


Figura 8. Rappresentazione dei livelli associati all'Indice di Attenzione nel caso di Struttura Muraria di un Paramento Murario



Figura 9. Rappresentazione della Difettosità Relativa (DR) nel caso di Struttura Muraria di un Paramento Murario

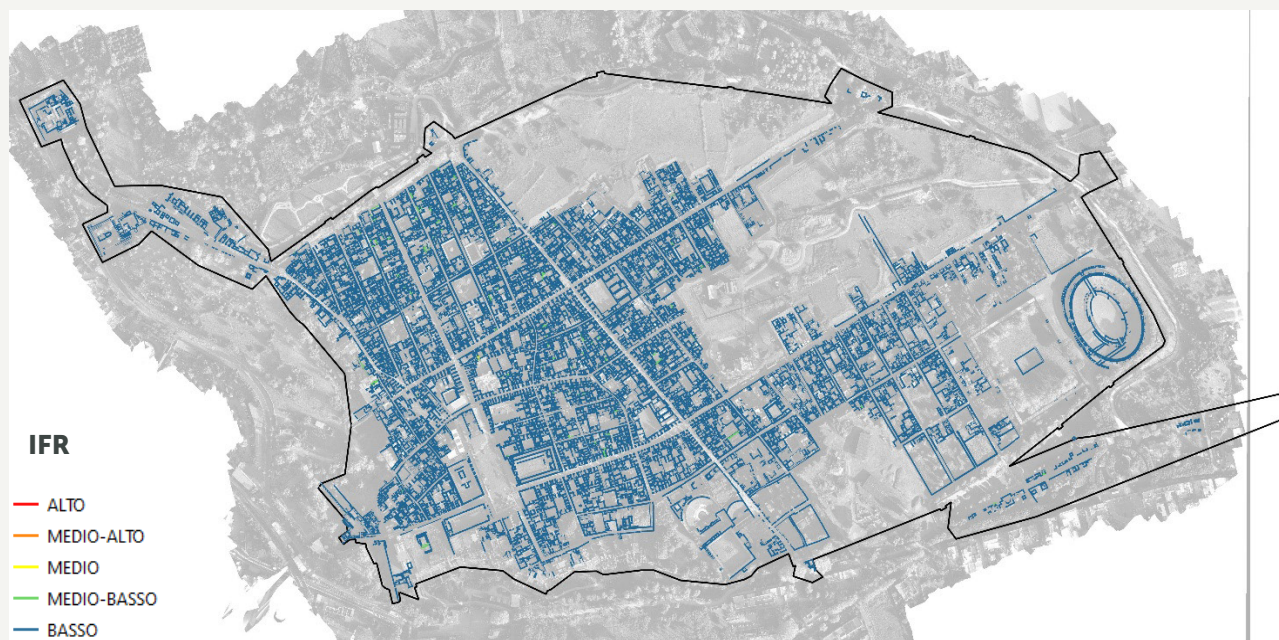


Figura 10. Rappresentazione dei livelli associati all'Indice di Fragilità Relativa (IFR) nel caso di Struttura Muraria di un Paramento Murario

Le attività condotte nell'implementazione del livello di Valutazione Locale nel Parco Archeologico di Pompei hanno consentito di acquisire una panoramica complessiva sullo stato di fatto, di conservazione del Patrimonio, inoltre hanno permesso di individuare quali sono gli elementi più fragili che necessitano un'attenzione, in termini di priorità, maggiore o minore rispetto agli altri.

Le analisi preliminari condotte nel livello di monitoraggio locale hanno restituito in totale 167.310 occorrenze di degrado, distribuite nelle diverse Regio del Parco. La distribuzione dei degradi non è risultata uniforme e mostra una forte polarizzazione territoriale. Infatti, le sole Regiones VI e VII, rispettivamente costituite da 17.173 e 15.756 referenti topografici (elementi), concentrano rispettivamente 42.120 e 40.144 occorrenze, pari complessivamente a 82.264 registrazioni, cioè circa il 49% dell'intero dataset. Se a queste si aggiungono la Regio I con 23.544 occorrenze su 10.147 referenti e la Regio IX con 21.973 occorrenze su 8.281 referenti, si raggiungono 127.781 osservazioni, corrispondenti a oltre il 76% del totale del Parco. All'estremo opposto si collocano la Regio IV con 4 occorrenze e tutte le aree ricadenti "Fuori Porta", con un totale di 2004 occorrenze, pari circa al solo 1% del totale.

Per quanto attiene alle varie tipologie di degrado, dai dati raccolti si evince che in quasi tutte le Regio c'è una netta predominanza dei fenomeni appartenenti alle famiglie PM_SM (Paramenti Murari_Superfici Murarie) e PM_AD (Paramenti Murari_Apparati Decorativi).

Nella Regio VI, che rappresenta la porzione numericamente più consistente del dataset, i degradi PM_SM raggiungono 21.168 occorrenze (50,26%), mentre PM_AD ne registra 16.863 (40,04%). Una configurazione analoga si osserva nella Regio VII, dove PM_SM arriva a 21.334 occorrenze (53,14%) e PM_AD a 14.981 (37,32%). La stessa struttura si ripete anche nelle altre Regio principali.

Le altre tipologie di degrado, pur essendo presenti, mostrano incidenze generalmente contenute e raramente superiori a pochi punti percentuali all'interno delle singole Regio. Ad esempio, nella Regio VI i degradi PA (Pavimento_Apparati Decorativi/Rivestimenti Pavimentali) rappresentano appena il 3,07%, mentre SI_AD (Struttura Isolata_Apparati Decorativi) e SI_SM (Struttura Isolata_Superfici Murarie) si collocano rispettivamente intorno al 2,80% e al 2,85%. Nella maggior parte delle altre aree del Parco tali famiglie assumono valori ancora più ridotti.

L'analisi dei dati di monitoraggio consente, pertanto, di individuare il nucleo dominante dei fenomeni di deterioramento, costituito principalmente dai processi che interessano le strutture murarie ed i rivestimenti. Su questa base è stata condotta una normalizzazione del dataset dei degradi, finalizzata a isolare le componenti statisticamente più rappresentative del fenomeno osservato. Di fatti, si è notato che, anche se il dataset è estremamente ricco in termini di tipologie di degrado presenti, sono poche le tipologie di fenomeno/ degrado su cui si concentrano la maggior parte delle osservazioni.

Prendendo in considerazione i 45.578 referenti topografici, coincidenti con la sola tipologia "Superficie verticale", la distribuzione dei codici ha confermato la forte concentrazione del dataset su un insieme ristretto di fenomeni, sostanzialmente riferiti alle sole partizioni SM (struttura muraria) e AD (apparati decorativi/rivestimenti verticali).

Nella lettura delle singole tipologie di degrado afferenti alla categoria Strutture Murarie (SM), si può evincere che, la tipologia di degrado più presente è il **PM_SM010 (Polverizzazione della malta)**, con 23.717 occorrenze e una copertura pari al 52,04% dei referenti, seguito dal degrado **PM_SM014 (Superficie danneggiata (efflorescenza/patina biologica))**, con 23.126 occorrenze e una copertura del 50,74%. Anche **PM_SM015 (Vegetazione su creste murarie)**, con 9.617 occorrenze (21,10%), si colloca stabilmente nel nucleo centrale del dataset, seguito da **PM_SM008 (Lacuna/alveolizzazione/porzione di muratura mancante)** con 7.582 occorrenze, pari al 16,64%.

Per quanto concerne gli apparati decorativi, la tipologia più presente è il **PM_AD004 (Distacco)** con 16.819 occorrenze (36,90%), seguito dal **PM_AD003 (Colonizzazione biologica)** con 11.759 occorrenze (25,80%), **PM_AD007 (Fessurazione)** con 10.081 occorrenze (22,12%) e **PM_AD008 (Salvabordo superiore assente/degradato)** con 9.789 occorrenze (21,48%).

Tale analisi mette in evidenza il fatto che una parte molto consistente del contenuto conoscitivo del monitoraggio è sostenuta da pochi codici (tipologie di degrado), diffuse e che consentono già da sola una importante capacità descrittiva dello stato complessivo del patrimonio. In figura sono sintetizzati le tipologie di degrado più presenti a livello Parco, per referenti topografici.

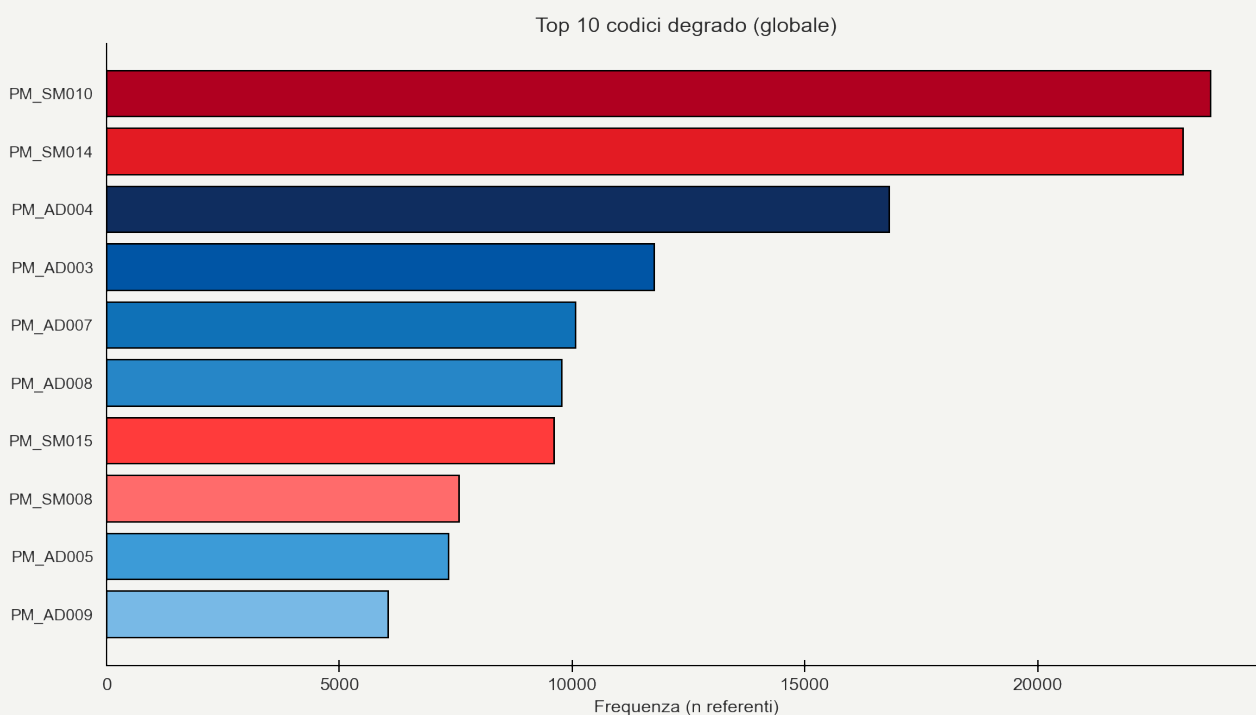


Figura 11. Tipologie di degrado maggiormente presenti a livello Parco per referenti topografici.

Al fine di meglio interpretare la distribuzione dei fenomeni di degrado presenti, l'analisi dei degradi è stata approfondita valutando la presenza delle coppie di difetto che compaiono in maniera congiunta sugli stessi referenti topografici/elementi. Di fatti, in numerosi casi i degradi non si manifestano in modo isolato, ma tendono a formare configurazioni ricorrenti, riconducibili a processi fisici e ambientali comuni. A tal proposito è stata costruita una matrice di co-occorrenza, nella quale ogni coppia di fenomeni è stata analizzata considerando il numero di referenti in cui i due degradi compaiono insieme e il numero di referenti in cui compare almeno uno dei due fenomeni.

A tal fine è stato calcolato l'indice di Jaccard [9], indicatore statistico che misura il grado di sovrapposizione tra due fenomeni con valori compresi tra 0 e 1: valori prossimi allo zero indicano associazioni deboli o occasionali, mentre valori elevati segnalano relazioni strutturali tra fenomeni di degrado.

Dall'analisi dei dati di monitoraggio risulta che i degradi più frequenti non sono soltanto diffusi individualmente, ma tendono anche a presentarsi insieme secondo configurazioni ricorrenti e non episodiche. Di seguito si riportano ad esempio le coppie di difetti principali:

- *PM_SM010 + PM_SM014* compare in 11.124 referenti;
- *PM_AD004 + PM_SM010* compare in 8.426 referenti;
- *PM_AD003 + PM_AD004* compare in 8.255 referenti;
- *PM_AD004 + PM_AD007* compare in 8.166 referenti;
- *PM_AD004 + PM_AD008* compare in 7.439 referenti;
- *PM_AD004 + PM_SM014* compare in 6.549 referenti;
- *PM_SM010 + PM_SM015* compare in 5.788 referenti;
- *PM_AD003 + PM_AD007* compare in 5.590 referenti;
- *PM_AD008 + PM_SM010* compare in 5.396 referenti;
- *PM_AD003 + PM_SM014* compare in 5.372 referenti.

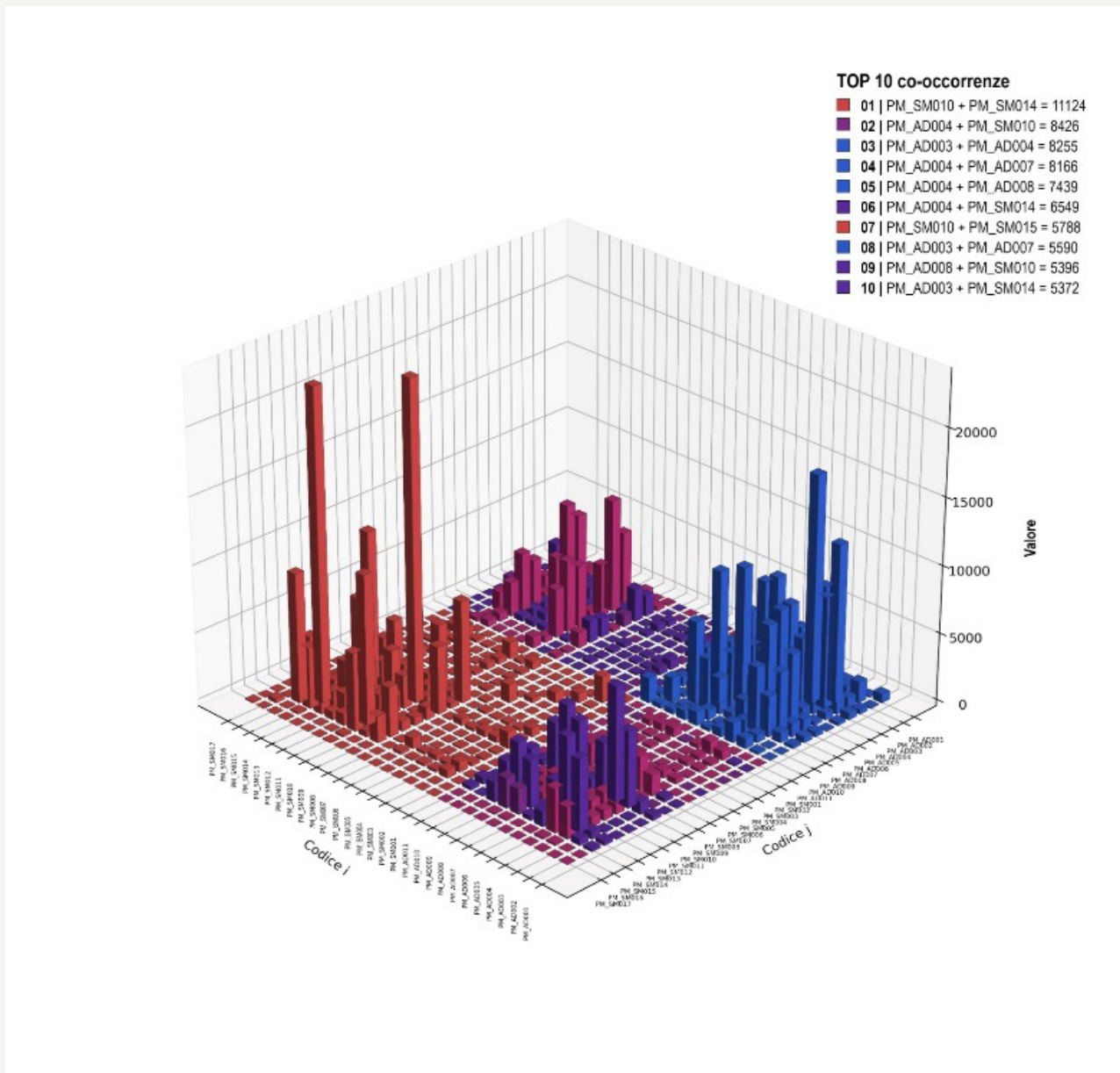
L'indice di Jaccard consente di affinare ulteriormente questa lettura, distinguendo le semplici compresenze dovute all'alta frequenza assoluta dalle associazioni realmente strutturate. I valori più elevati si concentrano ancora una volta su un gruppo ristretto di combinazioni, ossia:

- *PM_AD004 + PM_AD007* → 0,44;
- *PM_AD003 + PM_AD004* → 0,41;
- *PM_AD004 + PM_AD008* → 0,39;
- *PM_AD003 + PM_AD007* → 0,32;
- *PM_SM010 + PM_SM014* → 0,31;
- *PM_AD008 + PM_AD005* → 0,31;
- *PM_AD004 + PM_AD005* → 0,28;
- *PM_AD007 + PM_AD008* → 0,26;
- *PM_AD004 + PM_AD009* → 0,26;
- *PM_AD004 + PM_SM010* → 0,26.

Ne emerge con chiarezza una doppia struttura relazionale, dove da un lato è presente un insieme molto coeso di coppie di codici PM_AD, con una presenza importante in termini assoluti dei codici PM_SM, con alcuni punti di contatto trasversali tra le due famiglie. Questo passaggio è particolarmente significativo perché consente di passare da una lettura per frequenze a una lettura per pattern di degrado.

Alla scala dell'intero Parco l'analisi non restituisce un semplice elenco di difettosità/criticità, ma una vera e propria mappa delle relazioni ricorrenti tra fenomeni di degrado, la quale determina un'informazione robusta ed utile ai fini dell'avvio di programmi sostenibili di manutenzione proattiva.

In figura si riporta una rappresentazione grafica tridimensionale delle 10 co-occorrenze più presenti per referenti topografici (sinistra) e in funzione dell'indice di Jaccard (destra).



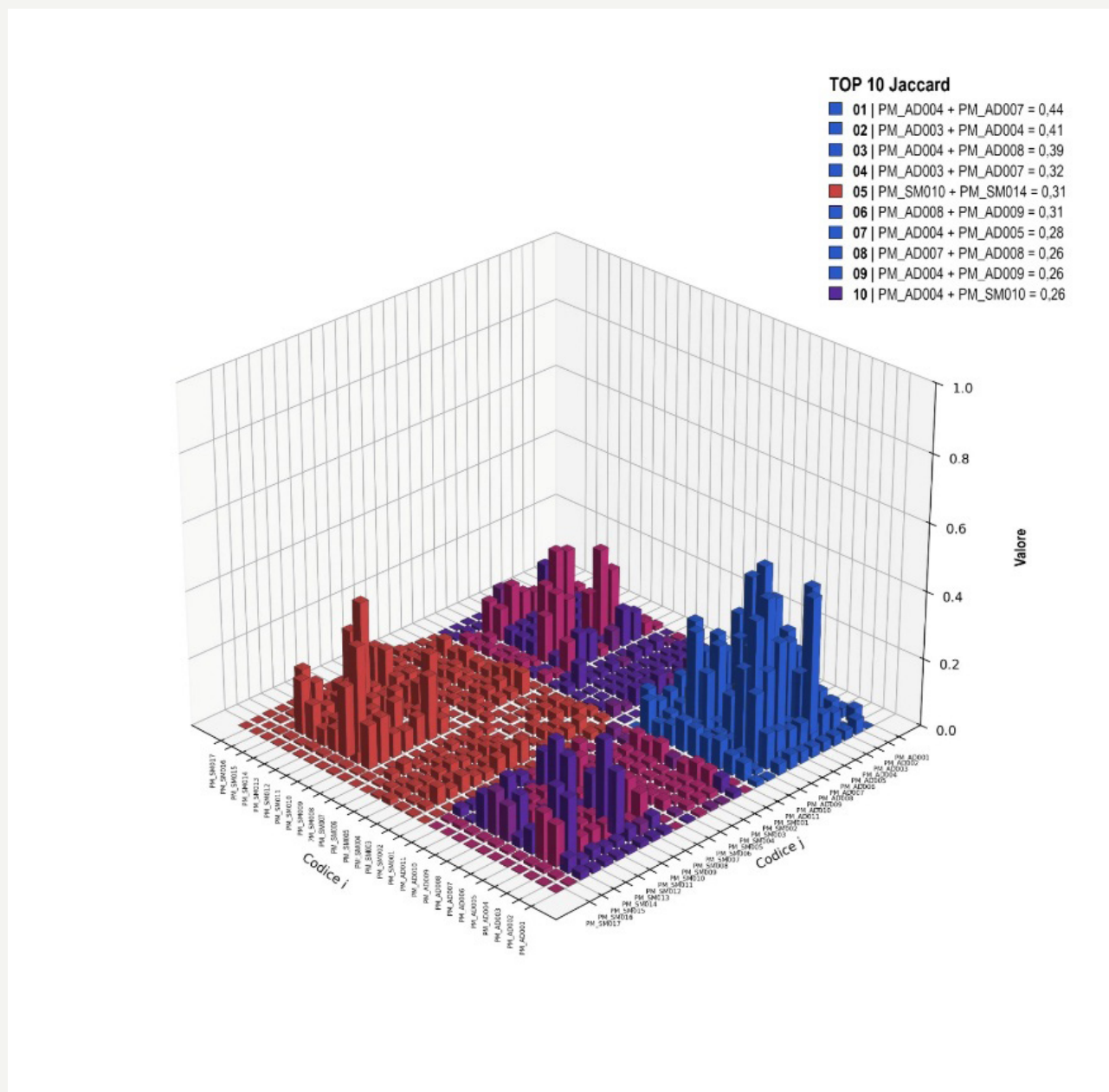


Figura 12. Grafici 3D delle 10 co-occorrenze più presenti a livello Parco per referenti topografici ed in funzione dell'indice di Jaccard

Le stesse elaborazioni sono state replicate alla scala delle singole Regio, consentendo di verificare la stabilità dei fenomeni di degrado osservati a livello di Parco. In tal modo è possibile distinguere i pattern di degrado diffusi in tutto il Parco dalle configurazioni legate a condizioni territoriali specifiche. La lettura territoriale mostra come la struttura generale delle relazioni tra degradi rimanga sostanzialmente coerente nelle principali Regio, confermando che i processi individuati non sono episodici ma rappresentano dinamiche conservative ricorrenti. Per esempio, in figura si riporta una vista grafica dei difetti più presenti e la vista tridimensionale delle co-occorrenze, per referente topografico ed in funzione dell'indice di Jaccard, nel caso della Regio VI.

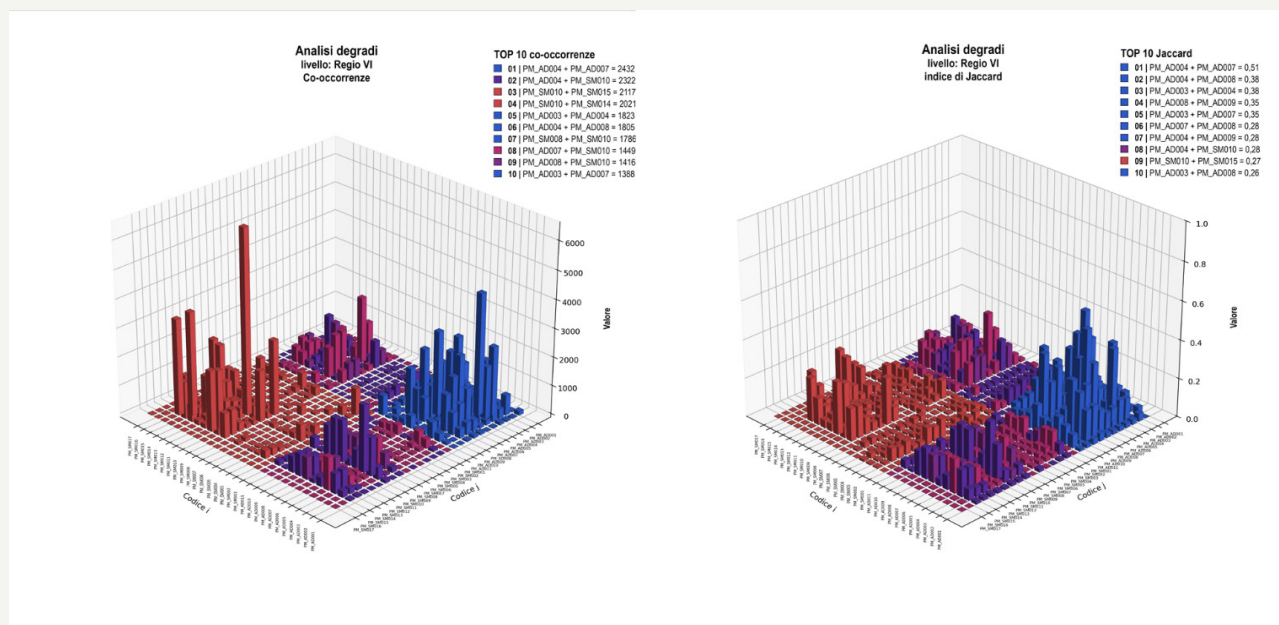
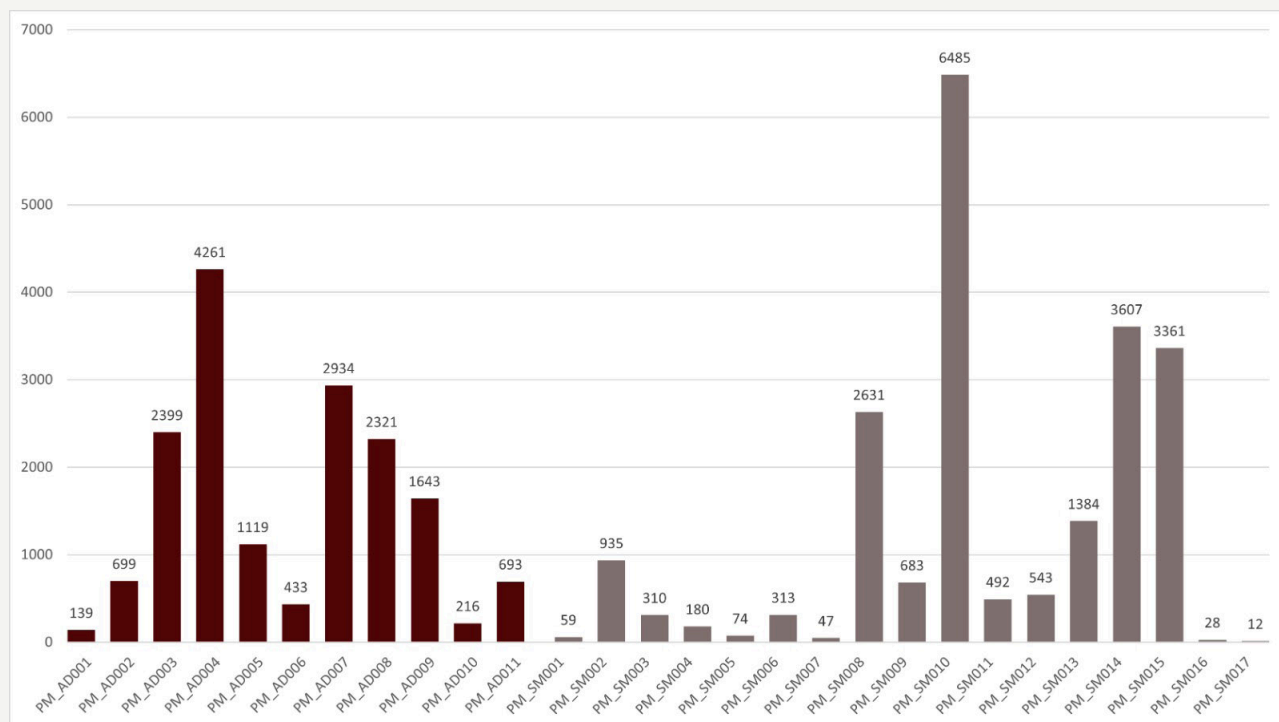


Figura 13. Vista grafica dei difetti più presenti (in alto) e grafici 3D delle co-occorrenze (in basso), per referente topografico ed in funzione dell'indice di Jaccard, nel caso della Regio VI

In definitiva, le analisi dei dati ottenuti dal monitoraggio consentono di pervenire ad una base informativa capace di descrivere la struttura sistemica del degrado, consentendo di introdurre una chiave di lettura delle condizioni del sito come un sistema di relazioni tra processi di deterioramento che si manifestano con configurazioni ricorrenti. In tal modo è possibile, pertanto, interpretare i fenomeni in chiave sistemica al fine di orientare in modo più consapevole le strategie di manutenzione programmata del Parco Archeologico di Pompei, integrando le risultanze delle analisi su larga scala, ovvero a livello di Parco, con le evidenze a livello di Regio e, successivamente, a scala locale.

3. Il livello di Valutazione Generale

Il Livello di Valutazione Generale consiste in un'indagine ad ampio raggio orizzontale che fornisce una conoscenza adeguata delle condizioni generali del sito. Viene effettuato da operatori esperti tramite droni e, se necessario, applicazioni di intelligenza artificiale (IA). Questo livello mira a monitorare costantemente le possibili aree a rischio, o criticità, che potrebbero influire sul patrimonio archeologico e a gestire rapidamente eventuali condizioni di emergenza, associate ad eventi eccezionali di pioggia e di vento, frane, incendi, sisma, ecc. In generale, il monitoraggio previsto in tale livello di valutazione viene condotto mensilmente, ovvero subito dopo un evento eccezionale, e consiste in un rilievo del sito tramite drone, in cui viene ottenuta una ortofoto (ortopiano) ad alta risoluzione che consente di individuare sia potenziali criticità che monitorare le evoluzioni del patrimonio.

Da un punto di vista tecnico, il rilievo viene condotto mediante drone da un'altezza di circa 90 m su di un'area di 3,6 km². Le immagini raccolte mensilmente da aprile 2022 consentono di realizzare ortofoto con risoluzione a terra pari a circa 1cm.

Successivamente, la sovrapposizione temporale delle scansioni consente di individuare le eventuali evoluzioni dell'intero sito. A tal fine, le immagini georeferenziate vengono analizzate con l'obiettivo di identificare e segnalare, attraverso un valore di intensità (basso, medio, alto), elementi di degrado significativi, con individuazione dell'evoluzione della vegetazione, di potenziali elementi di distacco, delle condizioni di fatto delle coperture e dell'evoluzione a terra dei cantieri e delle aree oggetto di fruizione.

Per individuare le criticità, l'analisi dell'ortofoto può essere condotta secondo due approcci: il primo si basa sul giudizio di operatori esperti; il secondo utilizza algoritmi di riconoscimento automatico. In particolare, l'analisi delle evoluzioni viene condotta sovrapponendo l'ultima ortofoto georeferenziate disponibile con quelle precedenti, con l'obiettivo di riconoscere criticità in evoluzione e valutare l'efficacia/risoluzione di criticità già riscontrate. In tale fase, l'operatore segnala le eventuali criticità riscontrate, associandogli un valore d'intensità, e notifica la risoluzione o la non risoluzione di quelle già precedentemente segnalate.

Attraverso tale procedura, ad oggi è stato possibile analizzare cinque tipologie di criticità: accumulo d'acqua (WA), guaine danneggiate (DS), presenza di vegetazione (PV), elementi in crollo (FE) ed elementi sconnessi (DE).



Figura 14. Sovrapposizione ortofoto georeferenziate con mappatura dell'alzato archeologico da database QGIS (a sinistra). Esempio di possibili criticità (a destra): presenza di vegetazione (a), guaine danneggiate (b), elementi in caduta (c).

Le ortofoto sono tutte disponibili nella piattaforma agli operatori. Tali informazioni vengono condivise sia mediante report in formato tabellare sintetico, sia tramite shapefile creati con gli attributi sopra elencati. Questi shapefile hanno il vantaggio di poter essere visualizzati sull'ortofoto stessa, consentendo così di avere una visione d'insieme dei risultati dell'analisi. In figura è riportato un esempio di Ortofoto analizzata con vista dei tag colorati rappresentativi delle criticità riscontrate ed il relativo livello d'intensità.

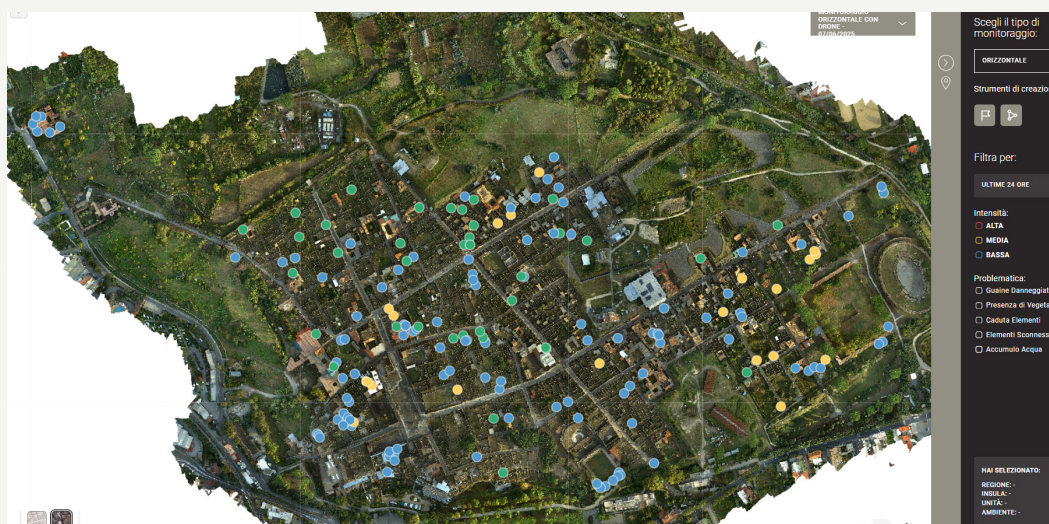


Figura 15. Ortofoto analizzata con vista dei tag colorati rappresentativi delle criticità riscontrate ed il relativo livello d'intensità.

Nell'ambito delle attività di monitoraggio globale, vengono condotte anche analisi di interferometria satellitare mediante radar ad apertura sintetica (SAR). Le immagini acquisite dai sistemi SAR sono comunemente utilizzate, ai fini del monitoraggio, per analizzare gli effetti misurabili di fenomeni naturali o antropici in atto. Ad esempio, nel caso di Palermo [10], questa tipologia di analisi ha consentito di monitorare il fenomeno di subsidenza che interessa parte del centro storico della città. Nel sito archeologico di Pompei, lo stesso approccio, basato sui dati acquisiti dalla missione COSMO-SkyMed dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), è stato impiegato per mappare con precisione gli spostamenti verticali di alcune aree del sito, evidenziando quelle caratterizzate da fenomeni di cedimento e di sollevamento. Inoltre, l'attività ha consentito lo sviluppo di una procedura dedicata alla determinazione delle direzioni principali, nel piano orizzontale, delle antiche mura [11].

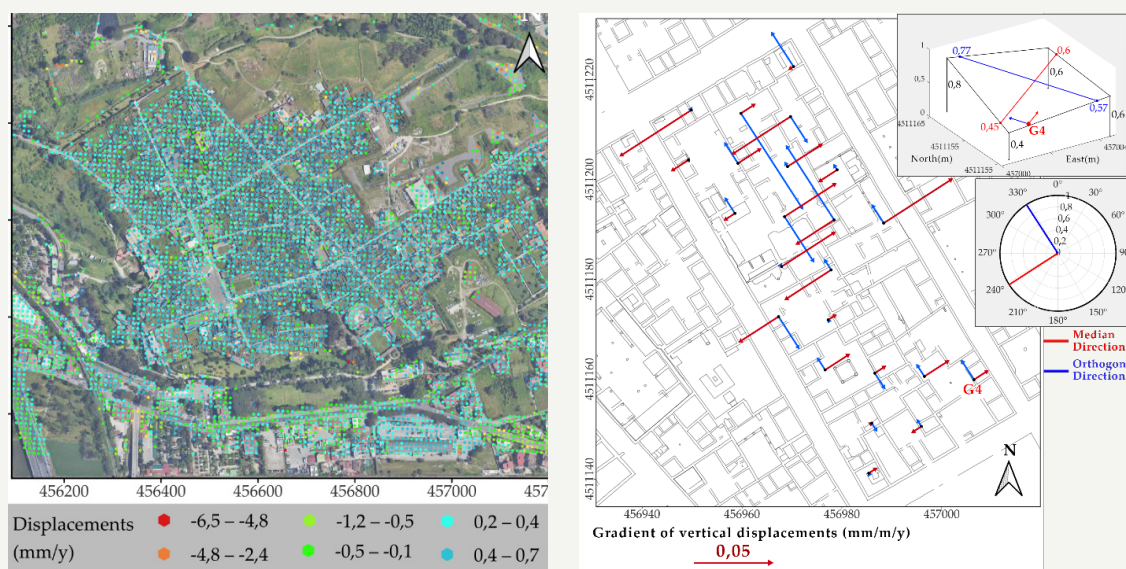


Figura 16. Analisi di interferometria satellitare nel caso del sito Archeologico di Pompei [10]. Spostamento verticale medio annuo (sinistra) e gradienti di spostamento lungo le direzioni principali (destra)

4. Analisi critica dei risultati per la programmazione della manutenzione

L'implementazione delle attività di monitoraggio, come detto, ha consentito di acquisire una conoscenza approfondita delle condizioni di fatto del patrimonio, e consente, inoltre, un aggiornamento continuo su eventuali evoluzioni.

Per quanto attiene al livello di Valutazione Generale, una vista ad alta risoluzione e a larga scala delle aree del Parco consente di individuare rapidamente eventuali evoluzioni, risultando particolarmente utile per la gestione ordinaria delle attività di manutenzione del sito. Inoltre, tale approccio permette una valutazione speditiva delle possibili criticità insorte a seguito di eventi eccezionali o emergenziali, supportando efficacemente la pianificazione e la gestione delle attività post-evento.

I risultati del monitoraggio condotto (Valutazione Locale) hanno consentito, come detto, di costruire una banca dati in cui sono raccolte e progressivamente aggiornate le condizioni di degrado che interessano il patrimonio nella sua completezza, analizzando nel dettaglio le correlazioni tra differenti tipologie di degrado. Per meglio comprendere le distribuzioni dei degradi, ai fini della progettazione di un programma di manutenzione, è interessante definire un parametro "classe di complessità del degrado k ", descrittivo del numero di fenomeni di degrado distinti contemporaneamente presenti sul generico elemento/referente topografico. Un elemento caratterizzato da un solo fenomeno di degrado appartiene alla classe $k = 1$, gli elementi per i quali sono osservati più degradi appartengono a classi di complessità progressivamente maggiori ($k = 2, 3, 4, \dots$). L'impiego e la caratterizzazione di tale parametro per il singolo elemento consente di comprendere se i fenomeni che compaiono frequentemente in coppia continuino a rappresentare il nucleo dominante anche quando il numero di degradi presenti su uno stesso elemento aumenta.

Nella Tabella 1 sono riportati, per le classi di complessità pari o inferiori a 5, il numero di elementi e la relativa incidenza percentuale rispetto al totale analizzato.

k	Numero elementi	%
1	9174	20,1
2	10406	22,8
3	8558	18,8
4	6086	13,3
5	4470	9,8

Tabella 1. Elementi (Referenti Topografici) e relative percentuali appartenenti alle prime 5 classi di complessità del degrado k

Le analisi dei dati evidenziano che le prime cinque classi comprendono oltre l'84% delle superfici analizzate nel caso delle pareti. Le classi superiori di complessità superiore risultano progressivamente meno frequenti, come descritto in termini percentuali nella tabella 2. Oltre la classe $k = 10$ la presenza di configurazioni diventa marginale.

k	%
6	6,9
7	4,1
8	2,2
9	1,0
10	0,5

Tabella 2. Percentuali di referenti topografici appartenenti alle classi di complessità del degrado k dalla 6 alla 10.

Al fine di esaminare la struttura dei degradi, è stata analizzata la distribuzione dei degradi all'interno delle diverse classi k. In particolare, sono stati individuati, per ciascuna classe compresa tra $k = 2$ e $k = 6$, i dieci codici di degrado più ricorrenti e la loro incidenza percentuale all'interno della classe:

- Nelle classi di complessità più basse (2 e 3) risultano più frequenti i fenomeni riconducibili alle strutture murarie, mentre i degradi degli apparati decorativi compaiono in maniera più contenuta;
- Per la classe 3 i fenomeni riconducibili alle strutture murarie sono ancora dominanti, ma cresce il peso dei degradi associati agli apparati decorativi;
- Per la classe 4 risulta una distribuzione è più equilibrata, con alcuni degradi delle superfici murarie che restano tra i più diffusi, ma i degradi degli apparati decorativi assumono un ruolo sempre più rilevante;
- Passando alle classi di complessità più elevate (5 e 6), i fenomeni associati agli apparati decorativi diventano prevalenti. In particolare, il codice PM_AD004 diventa il degrado più diffuso, con incidenze che arrivano a coinvolgere oltre il 70% degli elementi nella classe 5 e oltre l'85% nella classe 6. I fenomeni associati alle superfici murarie, invece, continuano a essere presenti ma con un ruolo relativamente meno dominante.

L'analisi condotta evidenzia che le configurazioni semplici di degrado sono prevalentemente associate alle murature, mentre l'aumento della classe di complessità corrisponde a una progressiva concentrazione dei degradi sugli apparati decorativi.

Nella seguente figura si riporta, a titolo esemplificativo, la distribuzione dei degradi per l'intero parco archeologico per le classi di complessità 2, 4 e 6, unitamente a un grafico che illustra le percentuali dei casi in cui i degradi interessano esclusivamente le strutture murarie, esclusivamente gli apparati decorativi oppure entrambe le categorie.

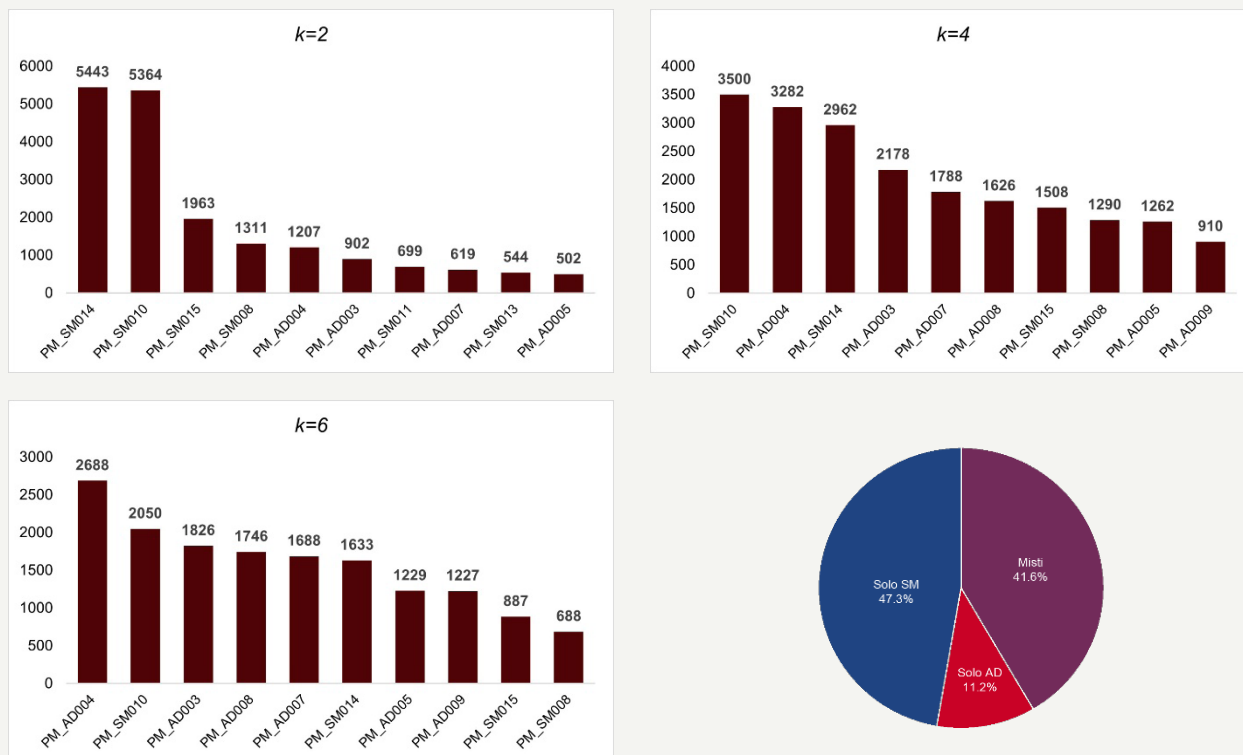


Figura 17. Composizione classi di complessità livello Parco

L'analisi dei risultati evidenzia che, in generale, i paramenti murari sono interessati da fenomeni di degrado delle superfici murarie diffusi, ma tra loro relativamente indipendenti; al contrario, gli apparati decorativi presentano configurazioni di degrado più articolate, in cui più fenomeni coesistono sullo stesso elemento. Inoltre, si evidenzia la presenza di fenomeni dominanti che si combinano tra loro secondo configurazioni ricorrenti. In particolare, le superfici con pochi degradi sono prevalentemente caratterizzate da fenomeni associati alle superfici murarie, mentre le configurazioni più complesse sono progressivamente dominate dai degradi degli apparati decorativi, che rappresentano i principali fattore di complessità ai fini della conservazione del sito.

L'approccio di analisi metodologico illustrato può essere declinato alle singole Regio. Di seguito si riportano, ad esempio, i risultati ottenuti per la Regio VI.

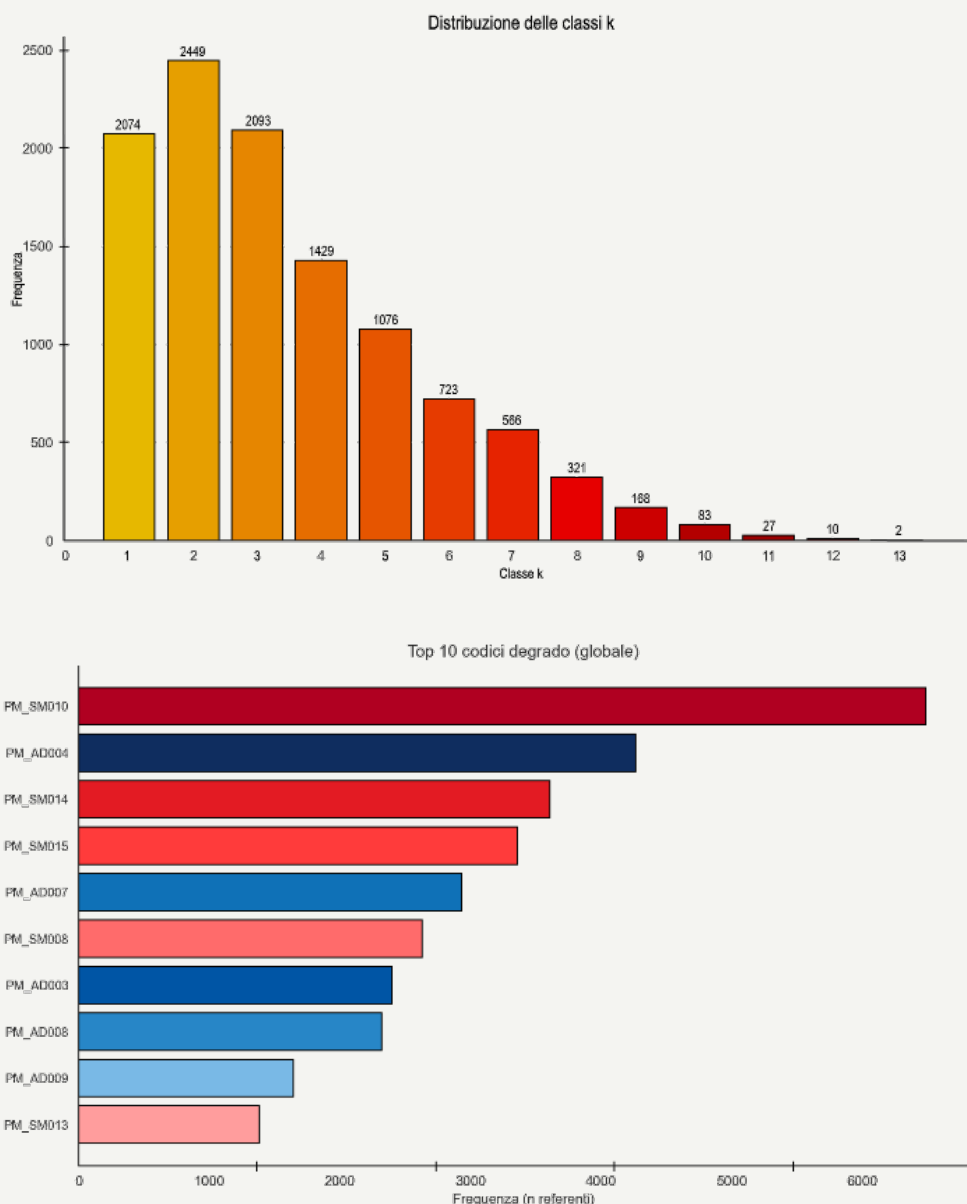


Figura 18. Composizione classi di complessità (in alto) e tipologie di degrado maggiormente presenti (in basso) per referente topografico nel caso della Regio VI.

L'analisi delle figure mostra una distribuzione dei degradi in linea con quanto descritto per l'intero parco archeologico. In questo caso, le classi di complessità 1, 2 e 3 comprendono circa il 60% degli elementi. Per quanto attiene alla tipologia dei degradi più diffusi, anche in questo caso si rispecchia il quadro generale con una prevalenza di fenomeni riconducibili alle superfici murarie e agli apparati decorativi.

Nella seguente figura si riporta, ad esempio, la distribuzione dei degradi per le classi di complessità 2, 3 e 5, e un grafico che illustra le percentuali dei casi in cui i degradi interessano esclusivamente le strutture murarie, esclusivamente gli apparati decorativi oppure entrambe le categorie.

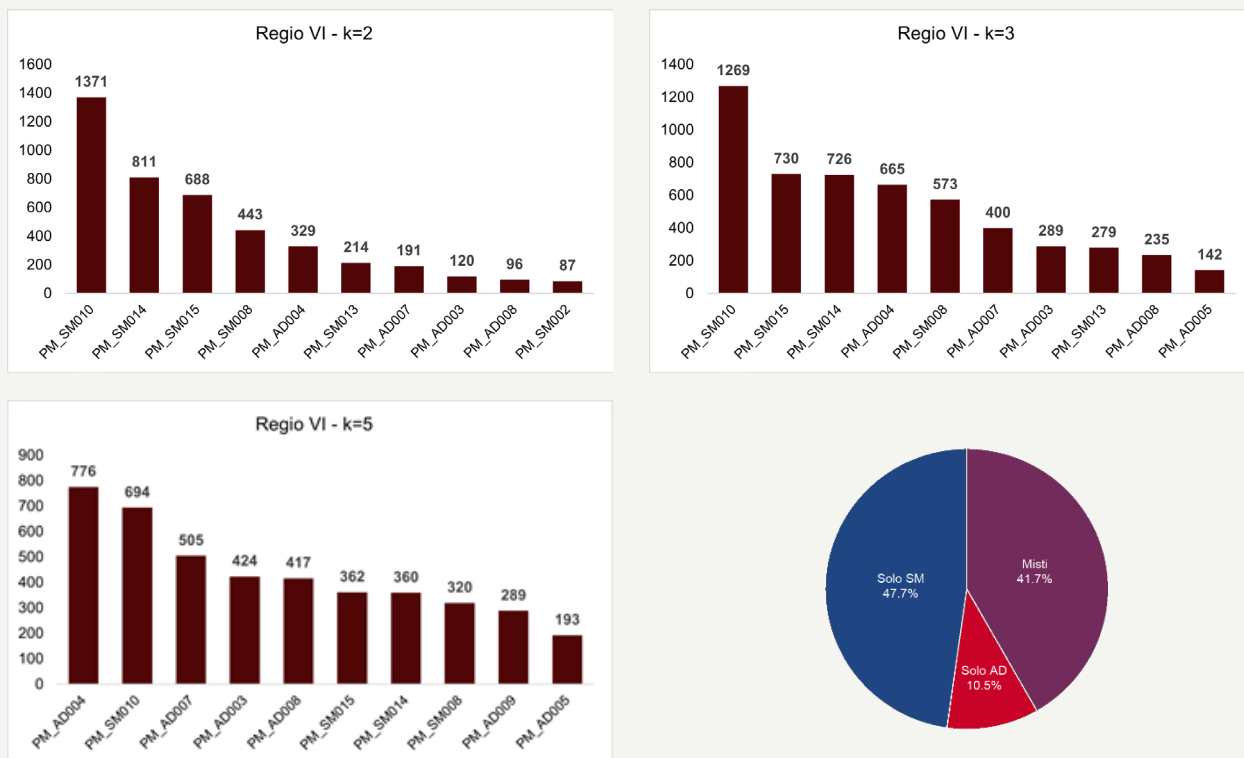


Figura 19. Composizione classi di complessità (2, 3 e 5) e combinazione delle tipologie di degrado per la Regio VI

L'analisi dei risultati evidenzia che classi di complessità evidenzia più basse ($k = 2$ e $k = 3$) sono dominate da fenomeni di degrado associati alle superfici murarie, mentre all'aumentare della classe di complessità si osserva un progressivo incremento del peso dei degradi degli apparati decorativi. L'analisi delle combinazioni di degrado mostra, infine, che circa il 47,7% degli elementi è interessato esclusivamente da fenomeni relativi alle superfici murarie (SM), il 10,5% riguarda solo gli apparati decorativi, mentre il restante 41,7% presenta configurazioni miste.

PARCO ARCHEOLOGICO DI POMPEI

Il Direttore Generale Gabriel Zuchtriegel

RUP: ing. Vincenzo Calvanese

DEC e coordinamento: ing. Alessandra Zambrano

Supporto al RUP: arch. Arianna Spinosa, arch. Paolo Mighetto, dott.ssa Stefania Giudice, dott. archeol. Antonino Russo, Dott. archeol. Giuseppe Scarpati, arch. Maria Pia Amore

Ufficio Informatica: arch. Raffaele Martinelli

Commissione di verifica: arch. Marianna Mascolo, dott.ssa Teresa Argento, dott. Alessandro Russo

Supporti ALES: arch. Jlenia Graziuso, geom. Angelo Capasso, arch. Anita Bianco, Mauro Santelia

ALES SPA

R.G.O.: dott. Mattia De Luca

Struttura tecnica ALES: arch. Gaetano De Simone, arch. Rossella Mazza, ing. Davide Tessitore, archeol. Mariangela Esposito, archeol. Teresa Virtuoso

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO - DICIV

Responsabile scientifico: prof. Luigi Petti

Gruppo di Lavoro: ing. Carmine Lupo, ing. Costanza Maria De Gaetano, ing. Francesco Auffero, ing. Alessandro Di Benedetto, prof.ssa Margherita Fiani, ing. Michele Tenore, ing. Filomena Nuccio

OPERATORE ECONOMICO AGGIUDICATARIO ACCORDO QUADRO
MONITORAGGIO E PROGETTAZIONE

RTP: GMN Engineering (mandataria)

Mandanti: JBPS srl Engineering & Consulting, CGA Studio associato di architettura Carafa e Guadagno, FCR Fabbrica conservazione e Restauro s.c.p.l., Tecno In srl, ing. Michele Candela, archeol. Antonio De Simone, archeol. Girolamo De Simone, archeol. Salvatore Ciro Nappo, archeol. Alfredo Moraci, arch. Cristiana Tarantino
coordinamento ing. Michele Candela

OPERATORE ECONOMICO AFFIDAMENTO SERVIZI INFORMATICA & INNOVAZIONE
TECNOLOGICA E PROGETTAZIONE

VISIVALAB

Riccardo Auci, Cristiano De Vita, Cristina Nosti, Sinhue Rossi

Bibliografia

- [1] Carandini, A. 2017. *La forza del contesto*. Gius. Laterza & Figli Spa.
- [2] Zuchtriegel G, Petti L, Calvanese V, De Gaetano CM, Lupo C, Spinosa A & Zambrano A. 2025. *The Pompeii sustainable management model - Monitoring and maintenance of cultural heritage using a processual approach*, articolo scientifico per l'E-journal Scavi di Pompei, n.28.
- [3] Petti L, Zuchtriegel G, Lupo C, Calvanese V & De Gaetano CM. 2024. *A sustainable monitoring approach to manage complex archaeological sites – The example of Pompeii*, *Procedia Structural Integrity*, vol 64, pp 629-636, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.320>.
- [4] Zuchtriegel G, Petti L, Nesticò A, Maselli G, Calvanese V, Onesti A, Spinosa A. 2024. *Economic and management issues concerning archaeological sites: cost analysis, study of tourist flows and sustainability perspectives for the Archaeological Park of Pompeii*. *Valori e Valutazioni*, 36, 101- 124; <https://doi.org/10.48264/VVSIEV-20243607>
- [5] Petti L, Lupo C and De Gaetano C M, 2023, *A Methodological Framework for Bridge Surveillance*. *Applied Sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Basel, Switzerland, vol. 13, DOI: <https://doi.org/10.3390/app13084975>
- [6] Mauro A, 2019. *From the extraordinary nature of the Great Pompeii Project to planned conservation*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 867-871.
- [7] Nielson BG, 2005, *Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones*, PhD dissertation, Georgia Institute of Technology.
- [8] Porter KA, Kennedy RP and Bachman RE. 2006. *Developing Fragility Functions for Building Components*, Report to ATC-58, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- [9] Fletcher S & Islam MZ. 2018. *Comparing sets of patterns with the Jaccard index*. *Australasian Journal of Information Systems*, 22.
- [10] Famiglietti NA, Miele P, Petti L, Guida D, Guadagno FM, Moschillo R, Vicari A. 2023. *What Have We Learned from the Past? An Analysis of Ground Deformations in Urban Areas of Palermo (Sicily, Italy) by Means of Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar Interferometry Techniques*. *Geosciences*, 13(10):298. <https://doi.org/10.3390/geosciences13100298>
- [11] Aufiero F, Calvanese V, Di Benedetto A, Fiani M, Petti L, Zambrano A & Zuchtriegel G. 2025. *Assessment of Masonry Wall Deformation through Vertical Displacement Gradients Using COSMO-SkyMed SAR Interferometry: The Case Study of Archaeological Park of Pompeii*. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 29-37.