

COLLANA
3D MODELING & BIM

PROLIFERAZIONI

A CURA DI TOMMASO EMPLER,
ADRIANA CALDARONE, ALEXANDRA FUSINETTI

PUBLICA

ISBN 9788899586591



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPARAZIONE E RESILIENZA



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Moving
Italianness

PIANO NAZIONALE RIPRESA E RESILIENZA (PNRR), INIZIATIVE EDUCATIVE TRANSNAZIONALI (TNE), PREVISTE DALLA SOTTOMISURA T4 "INIZIATIVE TRANSNAZIONALI IN MATERIA DI ISTRUZIONE", INVESTIMENTO 3.4 "DIDATTICA UNIVERSITARIA E COMPETENZE AVANZATE" DEL PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA, MISSIONE 4 "ISTRUZIONE E RICERCA" – COMPONENTE 1 "POTENZIAMENTO DELL'OFFERTA DEI SERVIZI ALL'ISTRUZIONE: DAGLI ASILI NIDO ALL'UNIVERSITÀ"

Titolo del progetto

TNE AdvancedSkills

Comunicazione e Valorizzazione del Patrimonio
Culturale

Finanziamento

Finanziato dall'Unione europea- Next Generation EU,
Missione 4 Componente 1

TNE23-00080 CUP F31I24000320006

Soggetto attuatore

Dipartimento di Storia Disegno e Restauro
dell'Architettura
SAPIENZA UNIVERSITA' DI ROMA
Piazza Borghese, 9
CAP 00186

Tommaso Empler, Adriana Caldarone, Alexandra Fusinetti (a cura di)

3D Modeling & BIM 2025 - Proliferazioni

© PUBBLICA, Alghero, 2025

ISBN 9788899586591

Pubblicazione Ottobre 2025

Questa pubblicazione è distribuita in modalità Open Access.

La valutazione dei contributi pubblicati è avvenuta con la modalità del double blind review da parte di referee facenti parte di un apposito comitato scientifico.

The evaluation of the published contributions was carried out through a double-blind review process by referees belonging to a dedicated scientific committee.

Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura
Sapienza Università di Roma

DIPARTIMENTO DI STORIA
DISEGNO E RESTAURO
DELL'ARCHITETTURA



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Progetto grafico: Pasquale Micelli, Silvia Ridolfi
Crediti immagine di copertina: Rinaldo D'Alessandro

PUBLICA

Dipartimenti di Architettura, Design e Urbanistica
Università degli Studi di Sassari
www.publicapress.it



A cura di:
Tommaso Emler, Adriana Caldarone, Alexandra Fusinetti

3D MODELING & BIM

PROLIFERAZIONI

Il volume raccoglie i contributi, dei relatori e degli studiosi, pervenuti in occasione del *Workshop 3DModeling&BIM. Proliferazioni*, che si è svolto a Roma in data 17-18 aprile 2025.

Il workshop e i presenti atti rientrano tra le attività previste dal progetto "Comunicazione e valorizzazione del Patrimonio Culturale" del PNRR, Iniziative Educative Transnazionali (TNE), Missione 4, Investimento 3.4, Sottomisura T4.

This book collects contributions, of speakers and scholars, received during the *Workshop 3Dmodeling & BIM. Proliferations*, which took place in Rome on April 17th-18th 2025.

The workshop and the present proceedings are part of the activities envisaged by the project "Communication and Enhancement of Cultural Heritage" within the framework of the National Recovery and Resilience Plan (PNRR), Transnational Educational Initiatives (TNE), Mission 4, Investment 3.4, Submeasure T4.

Organizing Committee

Director

- Tommaso Empler

Scientific Coordinator 3D Modeling

- Alexandra Fusinetti

Scientific Coordinator HBIM, Data and Semantics

- Adriana Caldarone

Leonardo Baglioni
Carlo Bianchini
Michele Calvano
Andrea Casale
Emanuela Chiavoni
Elena D'Angelo
Carlo Inglese
Elena Ippoliti
Alfonso Ippolito
Marta Salvatore
Graziano Mario Valenti

Scientific Committee

- Massimo Babudri, Ordine degli Ingegneri di Roma (Italy)
- Salvatore Barba, Università degli Studi di Salerno (Italy)
- Carlo Bianchini, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Fabio Bianconi, Università di Perugia (Italy)
- Cecilia Maria Bolognesi, Politecnico di Milano (Italy)
- Stefano Brusaporci, Università dell'Aquila (Italy)
- Adriana Caldarone, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Michele Calvano, Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale CNR (Italy)
- Maria Grazia Cianci, Università Roma Tre (Italy)
- Enrico Cicalò, Università degli Studi di Sassari (Italy)
- Tommaso Empler, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Marco Filippucci, Università di Perugia (Italy)

- Donatella Fiorani, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Alexandra Fusinetti, Università degli Studi di Sassari (Italy)
- Elena Gigliarelli, Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale CNR (Italy)
- Elena Ippoliti, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Massimiliano Lo Turco, Politecnico di Torino (Italy)
- Giovanna Massari, Università di Trento (Italy)
- Javier Nuñez, FADU - UBA (Argentina)
- Anna Osello, Politecnico di Torino (Italy)
- Ivan Paduano, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Leonardo Paris, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Sandro Parrinello, Università di Pavia (Italy)
- Bernardo Pérgamo, Universidad Nacional de Córdoba (Argentina)
- Fabio Quici, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Alberto Raimondi, Università Roma Tre (Italy)
- Manuel Ròdenas, UPCT Universidad Politécnica de Cartagena (Spain)
- Maria Laura Rossi, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Michela Rossi, Politecnico di Milano (Italy)
- Francesco Ruperto, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Mario Sacco, BIM Expert (Italy)
- Cettina Santagati, Università di Catania (Italy)
- Alberto Sdegno, Università degli studi di Udine (Italy)
- Graziano Mario Valenti, Sapienza Università di Roma (Italy)
- Michele Valentino, Università degli Studi di Sassari (Italy)
- Valeria Zacchei, PhD BIM Expert (Italy)

Editorial Manager

- Pasquale Micelli, Sapienza Università di Roma (Italy)

CUMA. SPACE INFORMATION MODELLING

Cuma.
Space information modelling

Authors

Leopoldo Repola¹, Giovanni Varriale¹, Silvia Ilacqua¹, Diego Di Martire¹, Fabio Pagano²,
Maria Alessandra Letizia¹

¹DISTAR - Università Federico II di Napoli

²Parco Archeologico dei Campi Flegrei

Email

leopoldo.repola@unina.it
giovanni.varriale@unina.it
silvia.ilacqua@unina.it
diego.dimartire@unina.it
fabio.pagano@cultura.gov.it
alelet2021@gmail.com

Keywords

3D SCANNING
DIGITAL TWIN
FOTOGRAMMETRIA
MODELLAZIONE 3D
MONITORAGGIO

Abstract

La ricerca presenta le attività di digitalizzazione 3D e monitoraggio delle cavità del sito archeologico di Cuma mediante procedure di gestione e visualizzazione dei modelli all'interno di una piattaforma *GIS* a supporto delle fasi di studio e di progetto degli interventi di conservazione del bene.

The research presents the 3D digitalisation and cavity monitoring activities carried out at the archaeological site of Cuma, integrating a 3D data management and visualisation workflow within a *GIS* platform to support the study and design phases of the site's conservation work.

Introduzione

Campo di applicazione della ricerca è il sito archeologico di Cuma, all'interno del Parco Archeologico dei Campi Flegrei, città fondata nel VIII secolo a.C. da genti provenienti dall'Eubea. Kyme fu la più antica colonia greca del Mediterraneo occidentale, sita in posizione strategica sulla costa campana. I coloni utilizzarono le fortificazioni naturali dell'acropoli e stabilirono il dominio sulla regione circostante, compreso il Golfo di Napoli, diventando un centro di cultura e commercio greco, introducendo l'alfabeto calcidico alle popolazioni italiche ed estendendo la propria influenza su gran parte dei Campi Flegrei [1-3]. Il particolare contesto geologico, con la sua significativa attività vulcanica, conferì un particolare fascino ai luoghi, facendo sì che si fondessero geologia, storia e mito. Sono molte, infatti, le connessioni attestate tra questi luoghi e gli Inferi, fu qui che, secondo Virgilio, la Sibilla Cuma concesse ad Enea la discesa nel regno dei morti.

Diversi grandi eventi eruttivi hanno segnato la storia geologica di questa regione, permettendo da un lato la messa in posto dell'Ignimbrite Campana o del Tufo Giallo Napoletano, dall'altro modellare in maniera significativa il territorio con i resti delle caldere a tutt'oggi peculiarità di questa regione [4-6]. Sono proprio queste peculiarità che hanno fortemente caratterizzato il sito, influenzandone le architetture e causandone la sua fragilità.

La ricerca presenta le attività di digitalizzazione 3D di ampie aree del sito a supporto delle attività di studio, monitoraggio, mitigazione del rischio e valorizzazione delle cavità maggiori del sito di Cuma: l'Anfro della Sibilla, il Grottone e la Crypta Romana. Obiettivo del progetto è la gestione integrata all'interno di una piattaforma GIS3D dei modelli digitali prodotti con tecnologie Lidar da UAV, laser scanner a tempo di volo e a differenza di fase, sistemi fotogrammetrici terrestri e da drone, scanner a luce strutturata.

Tecnologie e metodi. Rilievo tridimensionale

Negli ultimi decenni, la documentazione, l'analisi e la conservazione del patrimonio archeologico si sono affidate sempre più all'integrazione di tecnologie digitali in grado di affrontare la complessità di siti stratificati e vulnerabili dal punto di vista ambientale. Questo cambiamento segna una profonda riconfigurazione della pratica archeologica, guidata dalla necessità di garantire sia l'accuratezza scientifica che la resilienza di fronte all'instabilità ambientale, alla pressione antropica e ai cambiamenti climatici. Il sito di Cuma, situato nell'area geologicamente attiva dei Campi Flegrei, è emblematico di queste sfide e ha permesso lo sviluppo di un progetto volto a preservare, documentare e divulgare il patrimonio unico del parco. Inoltre, essendo soggetto a bradisismo, frane e deterioramento strutturale, il sito archeologico di Cuma ha richiesto un approccio multiscalare, interdisciplinare e tecnologicamente avanzato.

L'evoluzione della documentazione del patrimonio culturale dai rilievi statici ai sistemi digitali integrati e dinamici appare evidente nella gestione dei flussi di lavoro basati sulla scansione laser terrestre (TLS), sulla fotogrammetria digitale terrestre e aerea mediante UAV e sulla modellazione 3D. Questi metodi consentono l'acquisizione rapida e accurata di dati morfologici, architettonici e ambientali, che possono poi essere elaborati in gemelli digitali ad alta risoluzione di elementi archeologici [7-10]. La loro applicazione a Cuma ha permesso una comprensione completa dell'organizzazione spaziale, dei modelli

Introduction

The field of application of the research is the archaeological site of Cuma, within the Campi Flegrei Archaeological Park, a city founded in the 8th century BC by people from Euboea. Kyme was the oldest Greek colony in the western Mediterranean, strategically located on the Campania coast. The colonists used the natural fortifications of the acropolis and established dominion over the surrounding region, including the Gulf of Naples, becoming a centre of Greek culture and trade, introducing the Chalcidian alphabet to the Italic populations and extending their influence over much of the Phlegraean Fields [1-3]. The unique geological context, shaped by significant volcanic activity, endowed the area with a distinctive fascination, interweaving its geological, historical, and mythological dimension. In fact, numerous sources document associations between these places and the Underworld. According to Virgil, it was here that the Cumaean Sibyl granted Aeneas permission to descend into the realm of the dead.

Several major eruptive events have marked the geological history of this region, allowing, on the one hand, the formation of the Campanian Ignimbrite or Neapolitan Yellow Tuff, and on the other, significantly shaping the territory with the remains of calderas that are still a distinctive feature of this region [4-6]. It is precisely these peculiarities that have strongly characterised the site, influencing its architecture and contributing to its fragility.

The research presents the 3D digitisation of large areas of the site to support the study, monitoring, risk mitigation and enhancement of the major cavities of the Cuma site: the Anfro della Sibilla, the Grottone and the Crypta Romana. The aim of the project is the integrated management within a GIS3D platform of digital models produced with Lidar technologies from UAVs, time-of-flight and phase-shift laser scanners, terrestrial and drone photogrammetric systems, and structured light scanners.

Technologies and methods. Three-dimensional surveying

In recent decades, the documentation, analysis, and preservation of archaeological heritage have increasingly relied on the



Fig. 1: Rilievo mediante GPS dei ground control point.

Fig. 1: GPS surveying of ground control points.

di degrado e delle dinamiche del sito, gettando al contempo le basi per strategie di monitoraggio in tempo reale.

Garantire l'accuratezza richiede flussi di lavoro rigorosi e procedure di allineamento mediante punti topografici, il controllo della propagazione degli errori e delle procedure di calibrazione degli strumenti. Questo rigore metodologico si riflette nella presente ricerca attraverso una sequenza accurata di acquisizione dati, georeferenziazione e ottimizzazione del modello, garantendo affidabilità geometrica e coerenza topologica.

Rilievo topografico

Nel dicembre 2019 è stato effettuato il rilievo topografico dell'intera area archeologica materializzando cinque punti topografici, selezionati strategicamente per garantire la continuità dell'impianto poligonale e il rilievo diretto dei marker concentrati per lo più in prossimità del Capitolium (per la scarsa presenza di alberi ad alto fusto e quindi visibili dal drone), della Cavità della Sibilla e dell'ingresso occidentale della Crypta Romana – dove erano state condotte procedure di rilievo dettagliate sia per le cavità che per le aree esterne circostanti – e del duomo lavico (per consentire la valutazione dello stato fessurativo dei versanti verso il mare, oggetto di uno specifico studio strutturale)[11]. Il rilievo di questi punti è stato condotto utilizzando una stazione totale Leica TS16 mentre la loro localizzazione in coordinate globali è stata determinata utilizzando un sistema di posizionamento satellitare differenziale GNSS, allineando i dati all'interno del sistema di coordinate geografiche WGS84. Questa metodologia ha consentito l'integrazione dei dati raccolti sul campo in ambiente CAD-GIS, preparandoli per la successiva attività di segmentazione ed estrazione di dati vettoriali 2-3D.

integration of digital technologies capable of addressing the complexity of stratified and environmentally vulnerable sites. This shift marks a profound reconfiguration of archaeological practice, driven by the need to ensure both scientific accuracy and resilience in the face of environmental instability, anthropogenic pressure, and climate change. The site of Cumae, located in the geologically active area of the Phlegraean Fields, exemplifies these challenges and has prompted the development of a project aimed at preserving, documenting, and disseminating of the park's unique heritage. Moreover, being subject to bradyseism, landslides, and structural deterioration, the archaeological site of Cumae demands a multi-scalar, interdisciplinary, and technologically enhanced approach.

The evolution of cultural heritage documentation from static surveys to integrated, dynamic digital systems is reflected in the central role of digital workflows based on terrestrial laser scanning (TLS), terrestrial and UAV-based digital photogrammetry, and 3D modeling. These methods enable the rapid and accurate acquisition of morphological, architectural, and environmental data, which can then be processed into high-resolution digital twins of archaeological features [7-10]. Their application at Cumae has facilitated a comprehensive understanding of spatial organization, degradation patterns, and site dynamics, while also laying the foundation for real-time monitoring strategies.

Accuracy is ensured through rigorous workflows and alignment procedures employing topographic points, error propagation control and instrument calibration. This methodological rigor is reflected in the present research through a carefully calibrated sequence of data acquisition, geo-referencing, and model optimization, ensuring geometric reliability and topological consistency.

Topographical survey

In December 2019, the topographical survey of the entire archaeological area was carried out and five topographic points were materialized, strategically selected to guarantee the continuity of the polygonal framework and the direct survey of the markers. These markers were

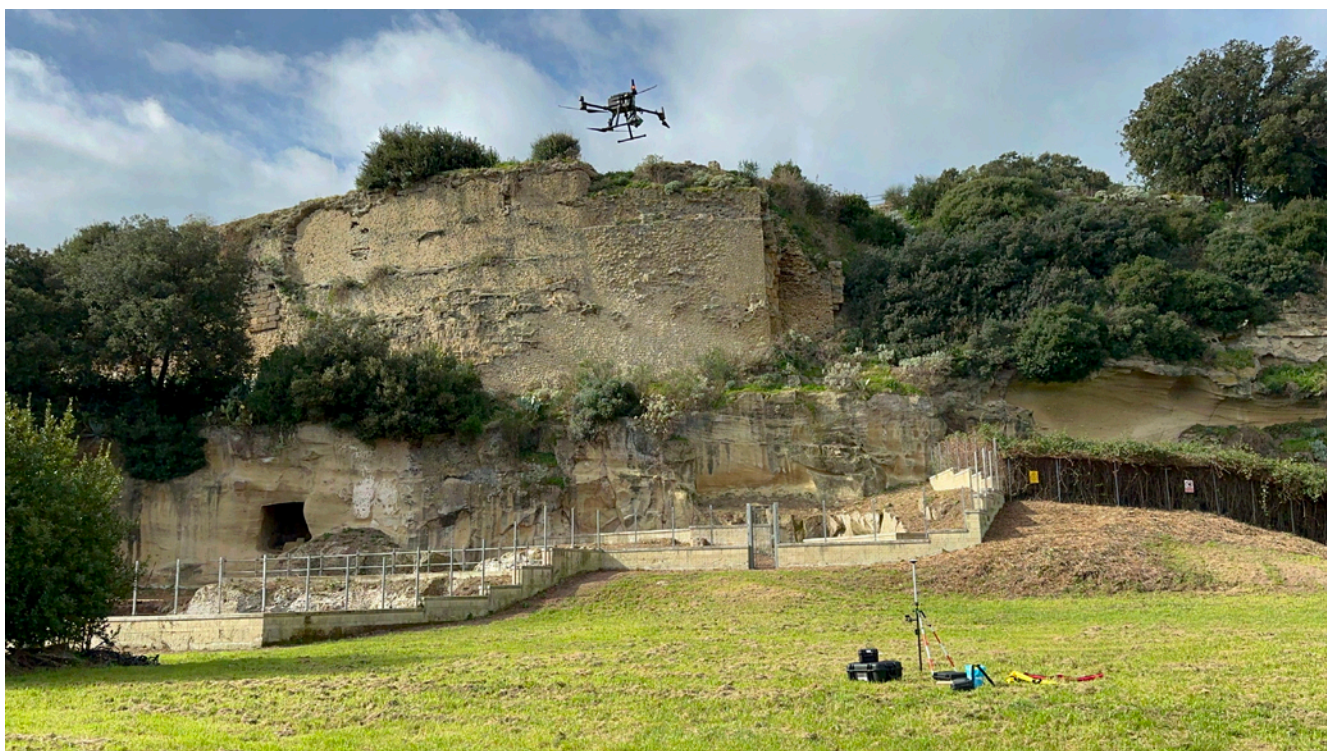


Fig. 2: Volo mediante Drone Matrice 300 con payload L1.

Fig. 2: Flight using a Matrice 300 drone with L1 payload.

Fotogrammetria aerea

A supporto delle fasi di rilievo su larga scala, è stata condotta una campagna di rilievo utilizzando un drone DJI Matrice 300. Il piano di volo è stato preimpostato per consentire sia l'acquisizione dell'intera area mediante scansione *LiDAR* sia sequenze di immagini zenitali scattate a un'altezza di circa 60 m. Sono stati inoltre effettuati rilievi dettagliati di specifiche località target e di aree di studio selezionate tramite foto scattate con un angolo di ripresa compreso tra 30 e 45°, in particolare presso i costoni tufacei che delimitano la città alta, le mura all'ingresso occidentale della Crypta Romana e la cupola lavica rivolta verso il mare.

Tempo di volo (TOF)

La campagna di digitalizzazione tridimensionale mediante scanner è stata inizialmente condotta utilizzando un Riegl VZ400i. Questo strumento è un sistema di scansione laser 3D TOF che combina un'architettura di elaborazione innovativa e una suite di sensori MEMS con la più recente tecnologia *Laser Scanning Engine*.

Le attività di rilievo sono state condotte lungo l'intero percorso di accesso all'area archeologica, all'interno e all'esterno della Grotta della Sibilla, lungo la scalinata e il sentiero che conduce al mare fino al versante settentrionale del fronte lavico, all'interno di tutti gli ambienti ipogei della Crypta Romana, lungo la strada che collega la galleria al Capitolium della città bassa, per poi tornare all'area di ingresso rivolta verso le mura tufacee della città alta, verso est. Sono state eseguite complessivamente 165 scansioni, texturizzate e allineate all'interno di un unico modello digitale e filtrate manualmente per rimuovere con precisione vegetazione ed elementi di disturbo. Il rilievo e la localizzazione di tutte le posizioni di scansione hanno seguito un programma operativo elaborato in base alla complessità geometrica dei siti e ai requisiti di rapidità delle procedure di acquisizione sul campo,

mostly concentrated near the Capitolium, where the sparse presence of tall trees allowed clear visibility from the drone, as well as near the Sybil's Cavity and the western entrance to the Crypta Romana, where detailed surveys were conducted for both the cavities and the surrounding external areas. A further point was placed on the lava dome to allow assessment of slope cracking towards the sea, which was the focus of a specific structural study [11]. The survey of these points was conducted using a Leica TS16 total station while their localization in global coordinates was determined using a differential GNSS satellite positioning system, aligning data within the WGS84 geocoordinate system. This methodology enabled the integration of field-collected data into the CAD-GIS environment, preparing them for the following activity of segmentation and extraction of 2-3D vector data.

Aerial Photogrammetry

To support the large-scale site survey phases, a campaign was carried out using a DJI Matrice 300 drone. The flight plan was preset to allow both the acquisition of the entire area using LiDAR scanning and sequences of zenithal images taken

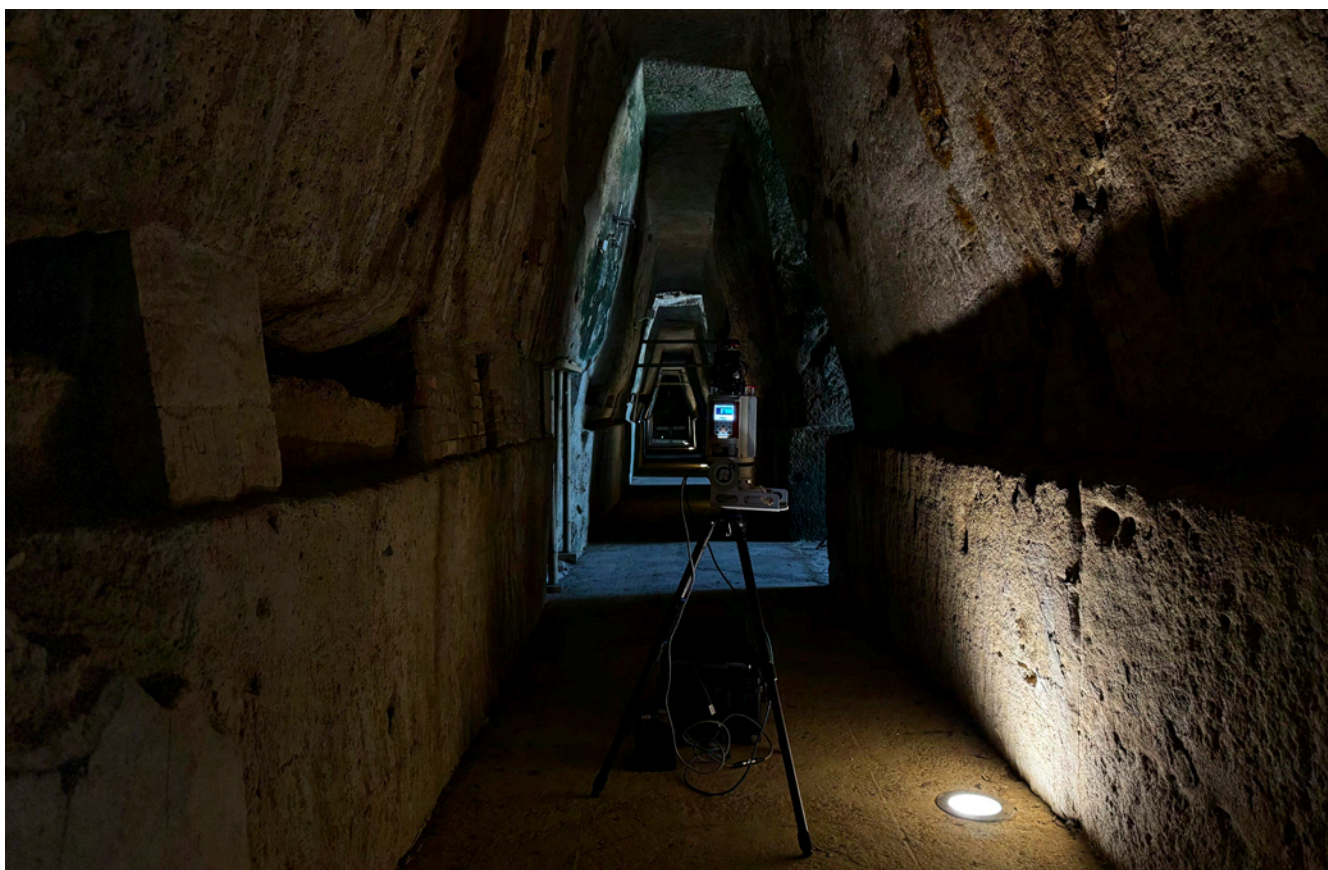


Fig.3: . Rilievo 3D con laser scanner TOF Riegl VZ400.

Fig. 3: 3D surveying using a Riegl VZ400 TOF laser scanner.

all'efficacia delle procedure automatiche di allineamento delle nuvole, alla densità dei punti e all'uniformità della luce ambientale per un corretto contrasto delle texture.

In particolare, la possibilità di gestire procedure automatiche per il riconoscimento e la scansione ad altissima risoluzione di marker predefiniti tramite il *software Riscan Pro v.2.9* ha guidato verso la scelta di utilizzarli come punti di collineazione delle diverse nuvole di punti.

Differenza di fase

Le estese campagne di digitalizzazione tridimensionale condotte in precedenza sono state successivamente potenziate nell'area dell'Antro della Sibilla grazie all'integrazione di nuove acquisizioni tramite lo scanner a differenza di fase Z+F IMAGER 5016A.

Il suo utilizzo è stato motivato dai grandi vantaggi che offre nel medio-corto raggio, infatti, pur coprendo distanze inferiori rispetto al laser TOF, garantisce maggiori precisioni - nell'ordine dei millimetri - e una maggiore velocità di acquisizione, nonché una maggiore densità di punti.

Per sfruttarne appieno il potenziale, l'IMAGER 5016A è stato utilizzato sia in modalità statica per dettagliare la distribuzione delle fratture, in particolare dell'Antro, e per rilevare i sensori installati nell'area, sia in modalità dinamica per ottenere un modello più dettagliato dell'area appena sopra l'Antro, attività questa di particolare complessità se condotta con altri strumenti a causa della vegetazione estremamente fitta.

Sono state registrate 45 posizioni di scansione statiche e 2 procedure dinamiche SLAM; il percorso di rilevamento e la posizione di tutte le posizioni di scansione hanno seguito un programma operativo elaborato in base alla complessità geometrica dei siti e ai requisiti di

at approximately 60 m altitude. Additionally, detailed surveys of specific target locations and selected study areas were conducted with photos acquired with a camera angle of 30-45°, particularly at the tuffaceous ridges delimiting the upper city, the walls at the western entrance to the Crypta Romana and the lava dome facing the sea.

Time-of-flight (TOF)

The three-dimensional digitization campaign by scanner was initially conducted using a Riegl VZ400i TOF scanner. This instrument is a TOF 3D laser scanning system that combines innovative processing architecture and a suite of MEMS sensors with the latest Laser Scanning Engine technology.

The survey activities were conducted along the entire entrance path to the archaeological area, inside and outside the Sybil's Cavity. They also included the steps and the path leading to the sea up to the northern slope of the lava front, all the hypogeic spaces of the Crypta

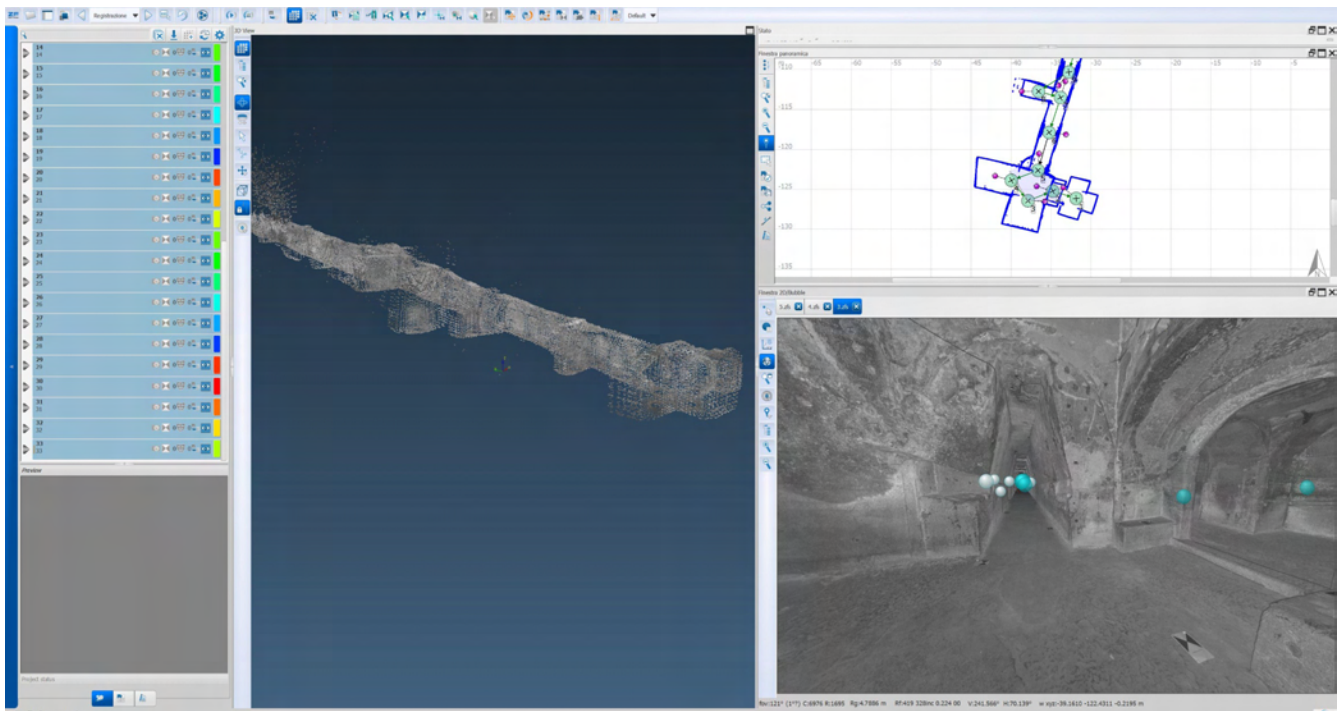


Fig. 4: Modello dell'Anfro prodotto mediante acquisizione statiche e dinamiche con sistema Z+F FlexScan.

Fig. 4: Model of the cave produced using static and dynamic acquisitions through Z+F FlexScan system.

velocità delle fasi di acquisizione sul campo, all'efficacia delle procedure di allineamento automatico delle nuvole e alla densità dei punti. In particolare, sono state registrate 37 posizioni di scansione per gli scatti all'interno della Cavità della Sibilla, 2 per il percorso d'ingresso e 6 per le parti esterne, mentre i 2 percorsi SLAM hanno riguardato la zona laterale e superiore della grotta. Anche in fase di acquisizione, è stato possibile gestire il flusso di dati in tempo reale tramite il software Z+F LaserControl Scout, che consente operazioni preliminari di registrazione e georeferenziazione: il sistema di posizionamento automatico, infatti, ha permesso la registrazione sul campo senza la necessità di target e l'orientamento automatico del sistema anche in assenza di segnale GPS grazie all'innovativa funzione Cloud to Cloud.

Fotogrammetria terrestre

A complemento della scansione laser, è stato effettuato un rilievo fotogrammetrico dell'interno dell'Anfro della Sibilla. Per uno studio approfondito che fornisse informazioni sulle condizioni superficiali del tufo, sulle texture e sui colori, a supporto della pianificazione della conservazione e della risoluzione di problemi di degrado o deterioramento, sono state utilizzate diverse fotocamere, tra cui:

- GoPro HERO10, dotata di obiettivo con lunghezza focale di 15 mm;
- Sony ILCE-7M4, dotata di obiettivo con lunghezza focale di 16 mm;
- Nikon D750, dotata di obiettivo con lunghezza focale di 28 mm.

Il processo di acquisizione delle immagini che ha portato alla produzione di 3000 fotogrammi è stato meticolosamente progettato per garantire la coerenza tra i fotogrammi e l'alta risoluzione in uscita, con un approccio sistematico durante l'acquisizione. Gli operatori hanno seguito percorsi predeterminati, mantenendo una distanza costante di circa 2 m dalla superficie della parete e un passo longitudinale di 1 m per garantire una sovrapposizione sufficiente (circa il 60-80% sia lateralmente che longitudinalmente). Questo metodo riduce al minimo le lacune nella copertura e cattura tutte le prospettive necessarie,

Romana, the road connecting the tunnel to the Capitolium of the lower city, and finally, the entrance area facing the tuffaceous walls of the upper city towards the east. A total of 165 scans were acquired, textured and aligned within a single digital model and manually filtered to accurately remove vegetation and disturbing elements. The surveying and location of all scan positions followed an operating program designed according to the geometric complexity of the locations, the speed of field acquisition, the effectiveness of automatic cloud alignment, the density of the points, and the uniformity of the ambient light to ensure proper texture contrast.

In particular, the possibility to perform automated recognition and very high-resolution scanning of predefined markers through the Riscan Pro v.2.9 software led to their use as collineation points of the various point clouds.

Phase-shift

The extensive three-dimensional digitization campaigns previously conducted were subsequently enhanced in the area of the Anfro della Sibilla through the integration of new data acquired with the Z+F IMAGER 5016A phase-shift 3D laser scanner.

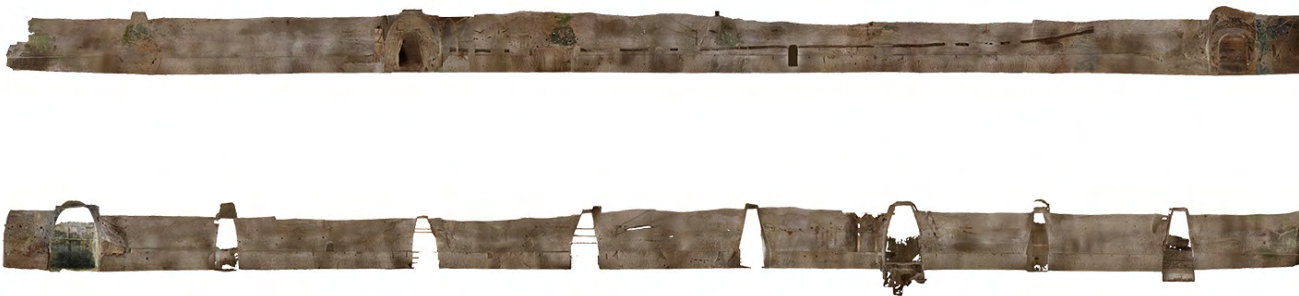


Fig. 5: Ortofoto longitudinali dell'Antro da rilievo fotogrammetrico mediante Sony ILCE.

Fig. 5: Longitudinal orthophotos of the cave from photogrammetric survey using Sony ILCE.



Fig. 6: Modello ad alta risoluzione del calendario lunare interno all'Antro prodotto con scanner a luce strutturata Artec Eva.

Fig. 6: High-resolution model of the lunar calendar inside the cave produced with Artec Eva structured light scanner.

facilitando un buon allineamento e ricostruzioni 3D di alta qualità nei successivi processi di elaborazione.

Scanner a luce strutturata

Sono state condotte attività di rilievo mediante scanner a luce strutturata Artec EVA per la digitalizzazione ad alta risoluzione delle fratture in punti specifici della Antro della Sibilla e dei cosiddetti calendari lunari in prossimità dell'ingresso della cavità e al suo interno. In particolare, i rilievi dei calendari lunari hanno tenuto conto dei diffusi fenomeni di esfoliazione ed erosione delle superfici tufacee. Le procedure di acquisizione sono state condotte sia con scanner in posizione ortogonale al piano, sia inclinato di circa 45° per documentare al meglio le aree coperte da polvere e piccoli distacchi ancora *in situ*.

Gestione dei modelli

La gestione dei modelli, una volta processate le nuvole di punti e tradotte in *mesh* e *NURBS*, è stata effettuata all'interno di unico spazio

This choice is motivated by its significant advantage at medium to short range. While its range is shorter than that of TOF scanners, it offers millimeter-range precision, higher acquisition speed, and increased point density.

To exploit its full potential, the IMAGER 5016A was employed both in static mode to capture detailed fracture patterns, particularly those of the Antro, and to survey the sensors installed in the area. It was also used in dynamic mode to obtain a more detailed model of the area just above the Antro, a task challenging for other instruments due to the extremely dense vegetation.

A total of 45 static scan positions and 2 SLAM runs were recorded. The survey route and the scan positions followed an operating program designed according to the geometric complexity of the locations, the need for rapid field acquisitions, the effectiveness of the automatic cloud alignment, and the required density of the points. In particular, 37 scan positions were recorded for the inside the Sybil's Cavity, 2 along the entrance path, and 6 in the external areas, while the 2 SLAM runs cover the side and upper area of the cave.

During acquisition, the data flow was managed in real time using the Z+F Laser Scout, enabling preliminary recording and georeferencing. Its automatic positioning system allows field recording without targets, and can self-orient even in the absence of a GPS signal, thanks to the innovative Cloud to Cloud function.

Terrestrial photogrammetry

As a complement to laser scanning, a photogrammetric survey of the interior of the Antro della Sibilla was carried out. This aimed to support an in-depth study of tuff surface conditions, textures and colors, providing informations for conservation

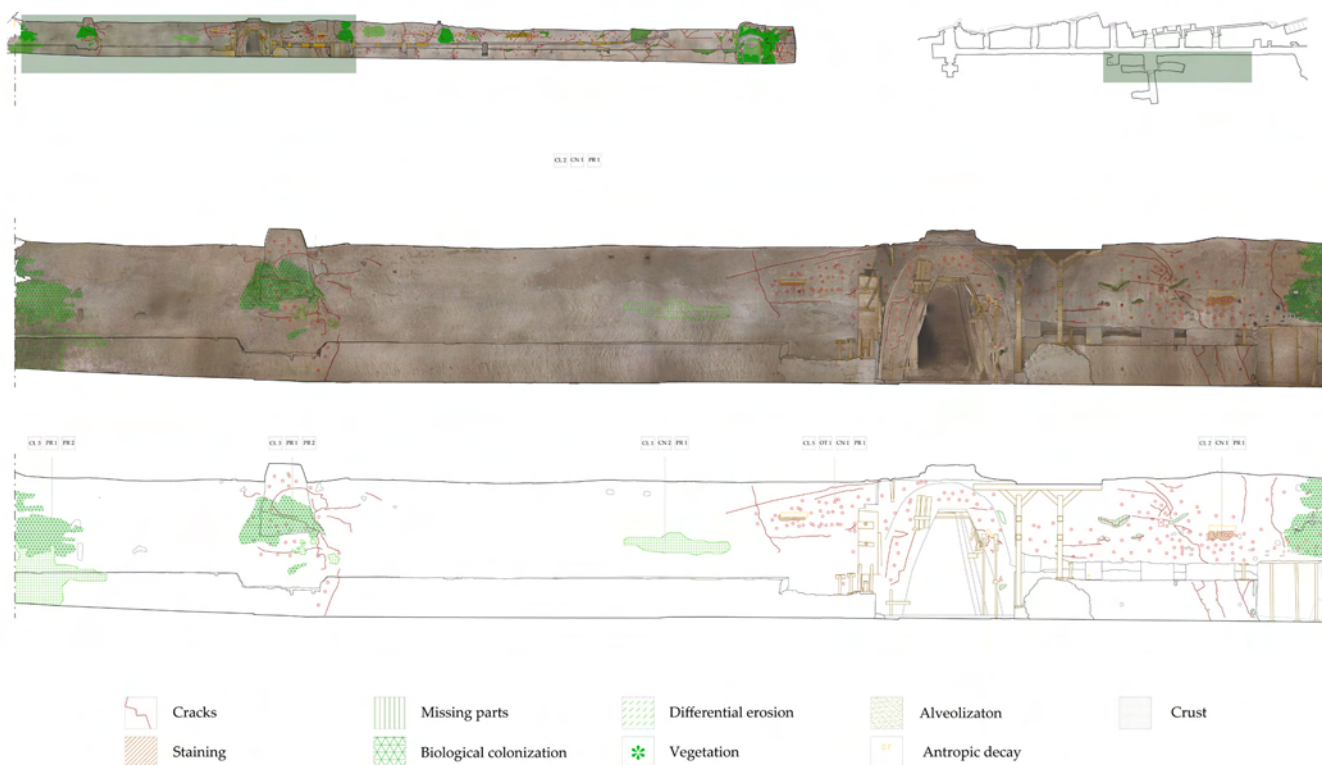


Fig. 7: Analisi del degrado.

Fig. 7: Degradation analysis.

virtuale, garantendo procedure di analisi dei dati a diversi livelli di risoluzione e scale di rappresentazione. È stato così possibile produrre elaborati grafici bidimensionali, ortofoto ad alta risoluzione e *rendering* su cui sono state mappate le fratture presenti nel tufo e le diverse tipologie di dissenti in atto, sulla base dei quali sono stati definiti i possibili interventi di mitigazione. In particolare, sulla base dei modelli, sono state analizzate e mappate le differenti tipologie di discontinuità (quali fratture e distacchi), riconducibili a cause naturali e a passati interventi di restauro; è stato definito con esattezza lo spessore della copertura piroclastica dell'Antro della Sibilla, anche grazie all'interpolazione di indagini geofisiche condotte all'esterno e sull'intradosso della cavità.

A partire dai modelli, inoltre, è stato definito un piano di monitoraggio delle cavità mediante l'installazione di sensori triassiali di spostamento e un accelerometro per lo studio degli effetti delle sollecitazioni indotte dai terremoti connessi al bradisismo dell'area. Al fine di garantire un monitoraggio continuo e una analisi progressiva delle informazioni, i modelli, sono stati importati all'interno di una piattaforma *GIS 3D*, e sono stati collegati alla rete dei sensori, permettendo una visualizzazione e interpolazione del flusso dati in tempo reale.

Piattaforma di analisi e visualizzazione dei dati

L'integrazione di dati 3D con piattaforme *GIS* consente simulazioni spazio-temporali del degrado, mentre il monitoraggio basato su sensori (ad esempio, reti IoT) facilita il monitoraggio in tempo reale del movimento strutturale e delle variazioni microclimatiche, valutando gli interventi passati e informando le strategie di restauro [12]. Questi strumenti supportano l'integrazione di set di dati multidisciplinari che comprendono informazioni strutturali, materiali, ambientali e storiche

planning and assessment of degradation. Several cameras were employed, including:

- GoPro HERO10, equipped with 15mm focal length lens;
- Sony ILCE-7M4, equipped with 16mm focal length lens;
- Nikon D750, equipped with 28 mm focal length lens.

Using different cameras allows for better spatial coverage. Wide-angle lenses, such as the HERO10, can document large areas with fewer shots, reducing survey time and effort while enhancing the quality, accuracy and adaptability of the data capture process. DSLR cameras, such as the Sony ILCE-7M4, provide high-resolution images with excellent detail and low distortion, making them ideal for documenting architectural features or intricate textures.

The image capture process, which resulted in the acquisition of 3000 frames, was meticulously designed to ensure frame-to-frame consistency and high resolution in the output.. Operators followed predetermined paths at an approximate distance of 2 m from the wall surface, advancing 1 m longitudinally to achieve sufficient overlap (around 60–80% both laterally and longitudinally).



Fig. 8: Piattaforma web-GIS3D www.proximatterra.it

Fig. 8: www.proximatterra.it web-GIS3D platform.

[13]. Siti come Cuma, dove architettura, paesaggio e instabilità geologica convergono [14], dimostrano l'importanza della fusione di dati multisensore per la rappresentazione completa di siti culturali complessi.

GIS e remote sensing consentono l'analisi non invasiva del sito e il monitoraggio a lungo termine, cruciali in ambienti dinamici come le aree vulcaniche o le regioni interessate dall'attività umana. In effetti, le tecnologie digitali svolgono oggi un ruolo centrale nella conservazione e nella mitigazione del rischio del patrimonio culturale, soprattutto nelle aree di conflitto o soggette a disastri. In tali scenari, strumenti come i gemelli digitali, il monitoraggio basato sull'IoT e i registri basati su blockchain offrono sia soluzioni diagnostiche in tempo reale che di archiviazione sicura dei dati [15].

Questa convergenza interdisciplinare di tecnologie incarna la direzione verso cui si sta muovendo la conservazione del patrimonio culturale. Queste metodologie non solo migliorano la precisione e l'efficienza della documentazione archeologica, ma propongono anche un modello replicabile per altri siti del patrimonio che affrontano sfide simili. Applicato a Cuma, questo approccio supporta la conservazione e consente nuove forme di coinvolgimento del pubblico attraverso la narrazione digitale e le esperienze immersive. In sintesi, esemplifica una visione olistica per il futuro della pratica archeologica, che riguarda tanto la conservazione quanto la partecipazione.

This method minimizes gaps in coverage and captures all necessary perspectives, facilitating accurate feature matching and high-quality 3D reconstructions during the post processing.

Structured light scanner

Survey activities using Artec EVA structured light scanner were carried out for the high-resolution digitization of the fractures in specific points of the Sybil's Cavity, as well as for the documentation of the so-called lunar calendars near the entrance and within the cavity. In particular, the surveys of the lunar calendars took into account the widespread phenomena of exfoliation and erosion of the tuffaceous surfaces. Acquisition were conducted both orthogonally and at approximately 45° inclinations to better document the areas covered by dust and small detachments still *in situ*.

Models management

Once the point clouds had been processed and converted into meshes and NURBS, the models were integrated within a single virtual environment, enabling data analysis at multiple resolution and representation scales. This approach allowed the production of two-dimensional graphics, high-resolution orthophotos

and renderings on which tuff fractures and different types of ongoing instabilities were mapped, forming the basis for defining potential mitigation measures. In particular, the models facilitated the analysis and mapping of different types of discontinuities - such as fractures and detachments - attributable to both natural processes and previous restoration interventions.. Additionally, the thickness of the pyroclastic cover of the Antro della Sibilla was precisely determined, partly to the interpolation of geophysical surveys conducted both outside and on the intrados of the cavity.

Furthermore, based on the models, a cavity monitoring plan was established through the installation of triaxial displacement sensors and an accelerometer to investigate the effects of stress induced by earthquakes related to bradyseism in the area. To enable continuous monitoring and progressive analysis of the information, the models were imported into a 3D GIS platform and integrated with the sensor network, allowing real-time visualisation and interpolation of the measurements.

Data analysis and visualisation platform

Integrating 3D data with GIS platforms enables spatio-temporal simulations of degradation, while sensor-based monitoring (e.g., IoT networks) facilitates real-time tracking of structural movement and microclimatic variation, supporting the evaluation of past interventions and informing restoration strategies [12]. These tools support the integration of multidisciplinary datasets encompassing structural, material, environmental, and historical information. Sites such as Cumae, where architecture, landscape, and geological instability intersect [14], highlight the importance of multi-sensor data fusion for the complete representation of complex heritage sites.

GIS and RS (remote sensing) allow for non-invasive site analysis and long-term monitoring, which are particularly crucial in dynamic environments such as volcanic areas or regions affected by human activity. Indeed, digital technologies today play a central role in the preservation and risk mitigation of cultural heritage, especially in conflict or disaster-prone contexts.

In these scenarios, tools such as digital twins, IoT-based monitoring systems, and blockchain-based registries provide both real-time diagnostics and secure data archiving solutions [15].

This interdisciplinary convergence of technologies embodies the trajectory of cultural heritage preservation. These methodologies not only enhance the precision and efficiency of archaeological documentation but also propose a replicable model for other heritage sites facing similar challenges. Applied to Cumae, this approach supports conservation and further enables new forms of public engagement through digital storytelling and immersive experiences. In summary, it represents a holistic vision for the future of archaeological practice—one that is equally concerned with preservation and participation.

Bibliografia

- [1] BELOCH, K.J. *Campania: storia e topografia della Napoli antica e dei suoi dintorni*; Bibliopolis: Napoli, Italy, 1989; pp. 145-189.
- [2] AMALFITANO, P., CAMODECA, G., MEDRI, M. *I Campi Flegrei: un itinerario archeologico*, 1st ed.; Marsilio: Venezia, Italy, 1990; pp. 289-294.
- [3] MAIURI, A. *I Campi Flegrei. Dal Sepolcro Di Virgilio All'antro Di Cuma*; 3rd ed.; Istituto Poligrafico dello Stato, Roma, Italy, 1981; pp.108-143
- [4] CAPUTO, P. *Cuma: e il suo Parco Archeologico ; un territorio e le sue testimonianze*; 2nd ed.; Scienze e Lettere: Roma, Italy, 2010; pp. 15-21.
- [5] NATALE, J.; VITALE, S.; ISAIA, R. Simultaneous Normal and Reverse Faulting in Reactivating Caldera Faults: A Detailed Field Structural Analysis from Campi Flegrei (Southern Italy). *Journal of Structural Geology* 2024, 181, 105109, doi:10.1016/j.jsg.2024.105109.
- [6] VITALE, S.; ISAIA, R. Fractures and Faults in Volcanic Rocks (Campi Flegrei, Southern Italy): Insight into Volcano-Tectonic Processes. *International Journal of Earth Sciences* 2014, 103, doi:10.1007/s00531-013-0979-0.
- [7] CRISAN, A.; PEPE, M.; COSTANTINO, D.; Herban, S. From 3D Point Cloud to an Intelligent Model Set for Cultural Heritage Conservation. *Heritage* 2024, 7, 1419–1437, doi:10.3390/heritage7030068.
- [8] DI LUGGO, A.; CAMPI, M.; REPOLA, L.; CERA, V.; SCANDURRA, S.; PULCRANO, M.; FALCONE, M. Evaluation of historical heritage documentation: Reality based survey and derivative models. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2019, XLII-2/W17, 115–122.
- [9] JO, Y.H.; HONG, S. Three-Dimensional Digital Documentation of Cultural Heritage Site Based on the Convergence of Terrestrial Laser Scanning and Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2019, 8, doi:10.3390/ijgi8020053.
- [10] REMONDINO, F. Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. *Remote Sensing* 2011, 3, 1104–1138, doi:10.3390/rs3061104.
- [11] DESTEFANO, R.; REPOLA, L.; GUERRIERO, L.; IOVANE, D.; MORRA, V.; PAGANO, F.; DI MARTIRE, D. Rockfall Threatening Cumae Archeological Site Fruition (Phlegraean Fields Park—Naples). *Sustainability* 2021, 13, 15.
- [12] ADAMOPOULOS, E.; TSILIMANTOU, E.; KERAMIDAS, V.; APOSTOLOPOULOU, M.; KAROGLU, M.; TAPINAKI, S.; IOANNIDIS, C.; GEORGOPOULOS, A.; MOROPOULOU, A. MULTI-SENSOR DOCUMENTATION OF METRIC AND QUALITATIVE INFORMATION OF HISTORIC STONE STRUCTURES. 2017, IV-2/W2, 1–8, doi:10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-1-2017.
- [13] YAO, Y.; WANG, X.; LUO, L.; WAN, H.; REN, H. An Overview of GIS-RS Applications for Archaeological and Cultural Heritage under the DBAR-Heritage Mission. *Remote Sensing* 2023, 15, 5766, doi:10.3390/rs15245766.

[14] ALTUNTAS, C.; YILDIZ, F.; SCAIONI, M. Laser Scanning and Data Integration for Three-Dimensional Digital Recording of Complex Historical Structures: The Case of Mevlana Museum. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2016, 5, doi:10.3390/ijgi5020018.

[15] NEGLIA, G.; ANGRISANO, M.; MECCA, I.; FABBROCINO, F. Cultural Heritage at Risk in World Conflicts: Digital Tools' Contribution to Its Preservation. *Heritage* 2024, 7, 6343–6365, doi:10.3390/heritage7110297.