

Digitalizzazione per la conservazione e la valorizzazione dei dipinti murali: il romitorio di Santa Chelidonia a Subiaco

Marta Salvatore
Michele Calvano
Francesca Lembo Fazio
Martina Trentani
Talin Talin

Abstract

Il contributo illustra una sperimentazione dedicata alla digitalizzazione dell'eremo di Santa Chelidonia presso Subiaco, per finalità di conservazione e valorizzazione, con particolare riferimento al dipinto duecentesco del Cristo che si trova al suo interno. Si inserisce in un progetto più ampio orientato alla valorizzazione del sistema seminascosto delle grotte eremitiche dipinte che caratterizzano i percorsi del sacro nella valle dell'Aniene, che prevede la costruzione di un sistema conoscitivo digitale concepito in forma prototipale per finalità di conservazione e di fruizione di questi siti.

In questo contesto, la ricerca sperimenta una metodologia di mappatura e monitoraggio del degrado su modelli tridimensionali in alta risoluzione, basata sull'analisi visuale e sull'annotazione diretta delle superfici texturizzate. Il processo ha previsto la realizzazione di modelli in alta definizione a risoluzione controllata conformi alle indicazioni del Piano Nazionale di Digitalizzazione del Patrimonio culturale, capaci di restituire, con elevati livelli di accuratezza, le caratteristiche morfologiche e cromatiche delle superfici acquisite. Al pari di una fonte documentaria, questi modelli sono stati il supporto per la definizione di un sistema di annotazione e metadattazione aperto e scalabile, capace di descrivere lo stato di conservazione del bene coniugando forme di rappresentazione verbale e visuale, concepito per supportare nel tempo le attività di documentazione e monitoraggio dei fenomeni di degrado in contesti ambientali complessi.

Parole chiave

Dipinti murali, digitalizzazione, fotogrammetria digitale, modellazione informativa, conservazione.



La grotta dell'eremo di Santa Chelidonia presso Subiaco (elaborazione grafica degli autori).

Introduzione

Lo studio presentato si inquadra nel progetto di digitalizzazione di una selezione di grotte eremitiche presenti in val d'Aniene caratterizzate dalla presenza di affreschi e pitture murali, per finalità di documentazione, conservazione e valorizzazione [1]. Il sistema frammentato delle grotte ha caratterizzato e caratterizza fortemente ancora oggi i percorsi del sacro nella valle, poiché espressione e immagine degli effetti del monachesimo e della cultura monastica benedettina, profondamente radicati sul territorio [Branciani 2012]. Per via del carattere eremitico che contraddistingue queste grotte, il sistema appare frammentario, disomogeneo e difficilmente accessibile, ad eccezione dei grandi monasteri e dei santuari edificati sui luoghi di eremitaggio. La ricerca si pone l'obiettivo di valorizzare questo paesaggio semi-nascosto attraverso un'operazione di digitalizzazione finalizzata alla documentazione, alla conservazione e alla comunicazione di queste strutture, che risultano particolarmente esposte ai fenomeni di degrado tipici degli spazi aperti e semi-ipogei.

L'eremo di Santa Chelidonia fa parte di questo sistema ed è caratterizzato da una pittura murale su intonaco del tipo del "Cristo in mandorla" (fig. 1). Il contributo descrive il processo di digitalizzazione che ha interessato la grotta e in particolare il dipinto e propone una strategia di monitoraggio del degrado attraverso un sistema sperimentale di mappatura su modelli fotogrammetrici in alta risoluzione. Questi modelli, che descrivono lo stato di conservazione del bene, operano come palinsesti informativi dinamici, nei quali l'integrazione tra elementi visuali e verbali produce una narrazione stratificata e accessibile del bene, che svolge una funzione ecfrastica, restituendone la complessità materiale e percettiva.

La grotta dell'eremo di Santa Chelidonia

Così presentava l'eremo della Santa la cronaca ottocentesca del canonico Jannuccelli, Cameriere d'onore di Sua Santità e Custode della Piana Biblioteca Sublacense, e così si presenta ancora oggi: "Da ultimo al nord di Subiaco ascendendo per malvagio sentiero su erta montagna cinta di precipizi, dopo circa tre miglia di cammino si presenta agli occhi come vaste torre una rupe, sotto cui s'interna un'orrida grotta, dove, come altrove si è accennato, visse e compì i suoi giorni la vergine Santa Chelidonia; vi si trova un povero altare. Questo è il santuario della celeste protettrice di Subiaco, termine a devoti pellegrinaggi" [Jannuccelli 1856, p. 416].

Forse faremmo fatica a definire 'orrida' la grotta, ma le sole vie per raggiungerla costringono a lunghe passeggiate per sentieri montani. Situato lungo le vie della transumanza, in prossimità dei grandi Monasteri di Santa Scolastica e del Sacro Speco in una posizione privilegiata sopra la via Sublacense, l'eremo fu meta di pellegrinaggio dei fedeli a partire dalla fine dell'anno Mille, quando fu abitato per cinquantanove anni dalla Santa, il cui culto è ancora oggi particolarmente sentito in seno alla comunità sublacense.



Fig. 1. La grotta dell'eremo di Santa Chelidonia e il dipinto del Cristo in mandorla (elaborazione grafica degli autori).

Fig. 2. Le rovine del monastero di Santa Maria Maddalena e la facciata d'accesso alla grotta (foto degli autori).



La storia del sito è legata alla collocazione delle spoglie di Chelidonia. Dopo un primo periodo di conservazione presso la morra, queste vennero trasferite nella chiesa di Santa Maria Nuova, vicina al Monastero di Santa Scolastica, per essere riportate qualche anno dopo nella grotta, che era stata inglobata, nella seconda metà del XII secolo, nel Monastero di Santa Maria Maddalena [Salvatori 2012, p. 483; Polidori 1842, pp. 8-10]. Il Monastero fu attivo per circa 250 anni, per poi cadere in rovina e arrivare ai giorni nostri in forma di rudere (fig. 2). Nel 1557 la grotta subì dei restauri dei quali preserva memoria l'iscrizione sopra il portale d'ingresso. L'avancorpo in muratura e le finestre furono realizzate per illuminare l'interno della grotta ed eliminare l'umidità che arrecava danni alla struttura e ai dipinti, i cui resti sono costituiti da piccoli lacerti che comprendono un frammento più ampio che rappresenta il Cristo e che si trova in corrispondenza dell'altare, databile presumibilmente intorno alla metà del XIII secolo [Salvatori 2012]. Le spoglie della Santa vennero successivamente riportate in Santa Scolastica, ma la grotta ha continuato ad essere luogo di venerazione spontanea da parte della popolazione. In tempi recenti l'area è stata oggetto di un intervento di restauro e messa in sicurezza terminato nel 2013.

Il processo di digitalizzazione

Riconosciute le necessità di conservazione e accessibilità del sito, è stata condotta una campagna di digitalizzazione del romitorio e del dipinto, con l'obiettivo di realizzare una copia digitale in



Fig. 3. La lettura dello spazio della grotta, sezioni orizzontali e sezioni verticali (elaborazione grafica degli autori).

alta risoluzione per finalità documentali, di conservazione e comunicazione (fig. 3). La necessità di documentare nel tempo i fenomeni di degrado che affliggono le pareti della grotta, dipinte e irregolari, ha portato a sperimentare una metodologia di mappatura del degrado finalizzata a monitorarne l'avanzamento attraverso l'acquisizione periodica di modelli fotogrammetrici. La caratteristica di questi modelli, di veicolare dati morfologici, metrici e cromatici con linguaggi visuali altamente definiti li ha resi, negli ultimi anni, strumenti privilegiati di sperimentazione nell'ambito conoscitivo della documentazione e della comunicazione dei beni culturali.

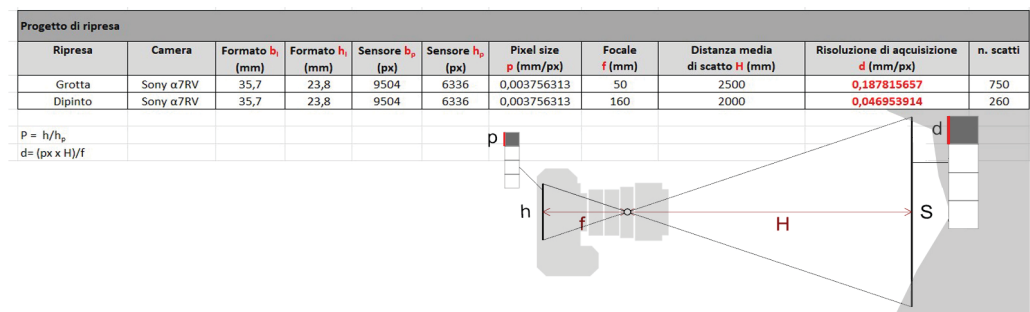


Fig. 4. Calcolo della risoluzione di acquisizione della ripresa fotogrammetrica (elaborazione grafica degli autori).

L'alta risoluzione, esito di processi selettivi di acquisizione, consente di considerarli al pari di una fonte documentaria, fruibile e implementabile per finalità di disseminazione scientifica e divulgazione. L'idea di considerare il modello fotogrammetrico al pari di una fonte ha portato ad approfondire la misura dei parametri che concorrono alla definizione della qualità complessiva del modello e che ne garantiscono l'affidabilità. Considerando in termini metodologici le indicazioni contenute nelle Linee guida per la digitalizzazione del patrimonio culturale [2] del Piano Nazionale di Digitalizzazione (PND 2022-23) dell'Istituto Centrale per la Digitalizzazione del Patrimonio culturale [MIC-ICDP 2022], sono state esplicitate le caratteristiche di qualità del processo di digitalizzazione, riferibili in particolare alla definizione del 'Dato grezzo', e cioè del set di ripresa, e del 'Modello master' [MIC-ICDP 2025; Gaiani 2012], e cioè dei parametri di qualità del modello fotogrammetrico, che è possibile esprimere in termini di Risoluzione di acquisizione, Risoluzione geometrica e Risoluzione cromatica. Il progetto di digitalizzazione del romitorio ha previsto l'acquisizione di due riprese fotogrammetriche, una per la grotta, l'altra per il dipinto, entrambe eseguite con una camera full-frame del tipo Sony Alpha 7RV con un pixel size (p) di 0.0037 mm/px. Per la ripresa della grotta è stato utilizzato un obiettivo con una focale da 50mm (f) a una distanza di scatto media (H) pari a 2,5 m, per ottenere una risoluzione media di acquisizione (d) pari a 0,185 mm per px; per la ripresa del dipinto è stato utilizzato un obiettivo con una focale (f) da 160mm a una distanza di scatto media (H) di 2 m, per ottenere una Risoluzione media di acquisizione pari a 0,046 mm per px [3] (fig. 4). Dal set è stato ricavato un modello fotogrammetrico composto da più di due miliardi di poligoni, ridotto poi a circa 100.0M, per essere editato per finalità di metadattazione. La Risoluzione geometrica del modello, esprimibile in termini di dettaglio delle caratteristiche geometriche del soggetto digitalizzato, è stata stimata calcolando la media della lunghezza degli spigoli della mesh poligonale. Il valore ottenuto, pari a 1,4 mm, rientra negli standard previsti dalle linee guida del PND per oggetti di dimensioni superiori a 2 m di lunghezza (valore soglia pari a 1,5 mm) [MIC-ICDP 2025, p. 24]. L'analisi dei fenomeni di degrado delle superfici dipinte ha focalizzato l'attenzione sulla definizione e sulla misura delle caratteristiche di qualità del dato cromatico rilevato, e cioè della texture. Molti software di elaborazione fotogrammetrica automatizzano i processi di genesi della mappatura escludendo la possibilità di intervenire a priori, in termini progettuali, sulla misura della qualità attesa del dato cromatico da acquisire. La limitazione è significativa, perché oltre ad inibire la progettualità del rilievo, compromette l'aggiornamento periodico del modello, per il quale la parità delle condizioni di ripresa e restituzione risulta determinante.

Le caratteristiche di qualità della *texture* riguardano parametri fotografici riferibili alla nitidezza e all'accuratezza cromatica e parametri che coniugano le caratteristiche fotografiche dello scatto con la cinematica della ripresa, esprimibili in termini di Risoluzione cromatica della *texture* e quantificabili in termini di unità di lunghezza per *texel*. La risoluzione di una *texture* dipende infatti dalla dimensione del *texel*, unità di misura della *texture* sul modello, analoga al *pixel* in un'immagine bidimensionale. La corrispondenza fra la Risoluzione di acquisizione e la Risoluzione cromatica della *texture*, unita alla possibilità, data da alcuni strumenti di restituzione fotogrammetrica, di intervenire sulle dimensioni del *texel* in termini di unità di lunghezza, ha consentito di progettare la ripresa definendo parametri di scatto e cinematica in funzione della risoluzione da ottenere [4] (fig. 5).

Per il modello dell'eremo di Santa Chelidonia sono state realizzate due serie di mappature, una per la grotta da 13 *texture* UV da 16384x16384 px per una risoluzione pari a 0.187 mm/*texel*, l'altra per il dipinto, da 68 *texture* UV da 16384x16384 px per una superficie pari a circa 1/3 del modello, per una risoluzione pari a 0.047 mm/*texel* (figg. 6, 7).

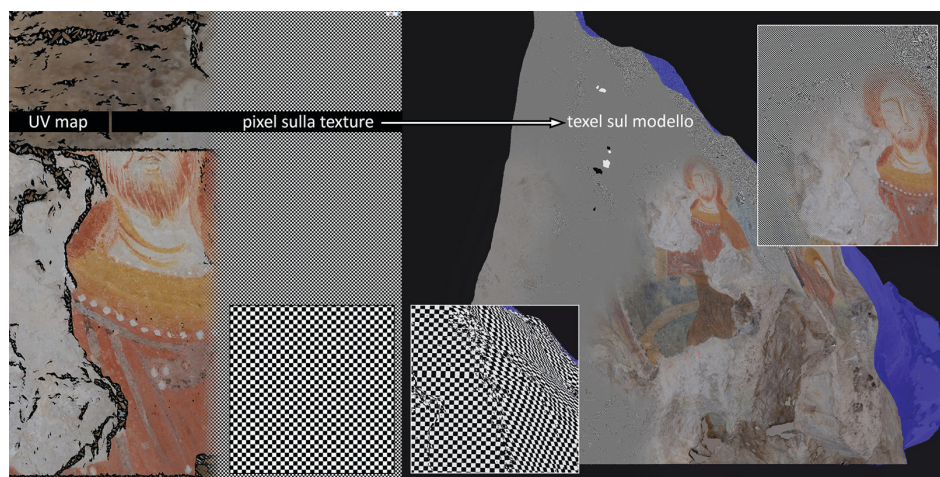


Fig. 5. Esempificazione del rapporto *pixel-texel* nella costruzione della *UV map* del modello fotogrammetrico (elaborazione grafica degli autori).



Fig. 6. Livello di dettaglio della mappatura della grotta su una vista esterna del modello (elaborazione grafica degli autori).



Fig. 7. Livello di dettaglio del modello della ripresa della grotta su una vista interna del modello (elaborazione grafica degli autori).

Modelli informativi per il monitoraggio e la conservazione

Le caratteristiche di qualità definite in fase di acquisizione e di elaborazione del dato consentono di valutare l'affidabilità del modello, e perciò della fonte, in relazione a specifiche applicazioni. Nel caso del dipinto dell'eremo la misura della risoluzione del modello e quella della *texture* sono state il presupposto per la sperimentazione di una metodologia di mappatura del degrado sul modello texturizzato capace di descrivere e monitorare nel tempo l'avanzamento dei fenomeni di ammaloramento in base ai quali pianificare gli interventi di conservazione.

Il progetto è stato animato dalla necessità, rilevata nell'ambito del restauro, di interagire con la superficie irregolare del dipinto nello spazio tridimensionale, con l'obiettivo di costruire una copia digitale altamente definita, attraverso cui analizzare, registrare e monitorare, tramite il disegno e la metadateazione, lo stato del degrado, la programmazione degli interventi diagnostici, la pianificazione degli interventi di conservazione (fig. 8). L'idea del monitoraggio è portante. La definizione dei parametri di qualità della fonte, e cioè del Modello master, ne consentono infatti l'aggiornamento periodico, fondamentale, in termini comparativi, per registrare nel tempo lo stato di avanzamento del degrado.

La costruzione in forma prototipale di modelli semantici sperimentali della grotta e del dipinto si inserisce in un ambito di sperimentazione ampio e in espansione dedicato alla



Fig. 8. Schema del processo di analisi, programmazione diagnostica e monitoraggio proposto (elaborazione grafica degli autori).

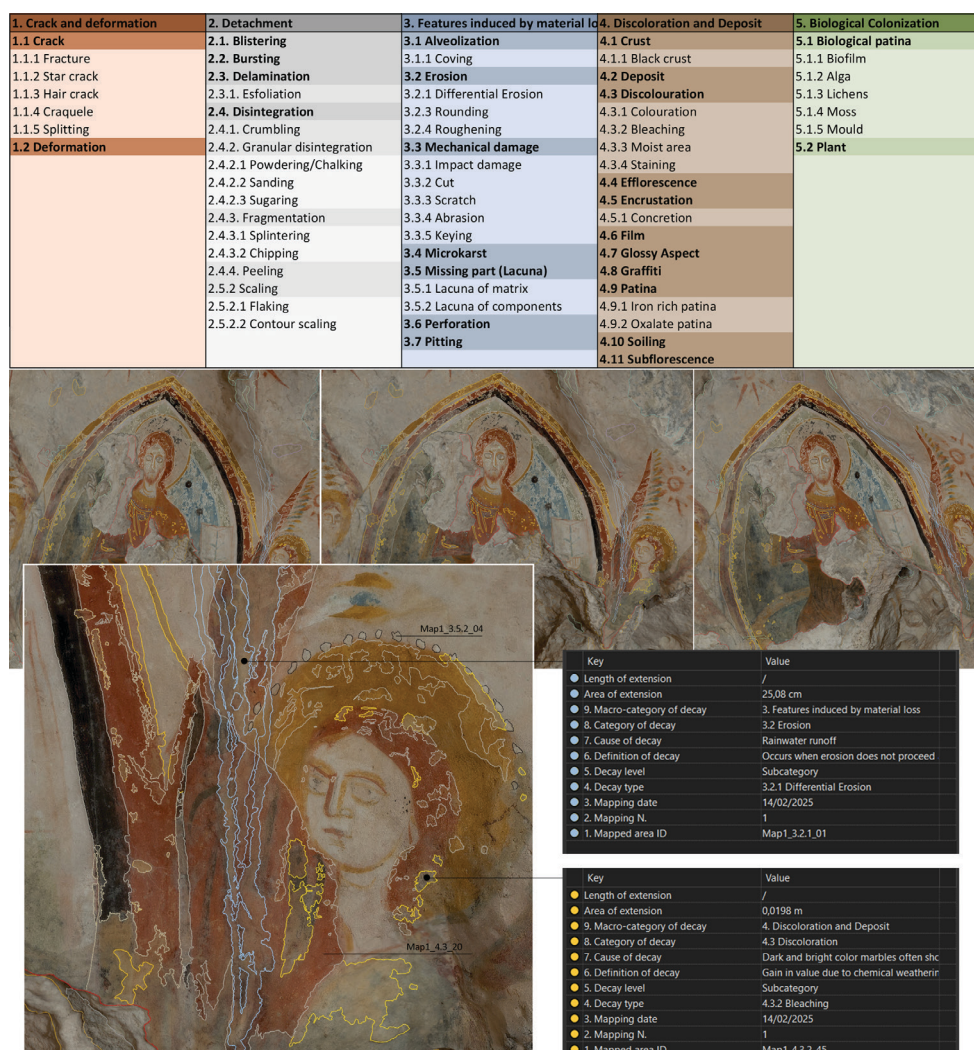


Fig. 9. Categorie di analisi dei fenomeni di degrado, mappatura e relativo sistema informativo (elaborazione grafica degli autori).

modellazione informativa per la conservazione. Sono molte le sperimentazioni sul tema, alcune delle quali operano su modelli condizionati da interventi autoriali anche invasivi volti ad ottenere geometrie continue a partire da un dato discreto, altre operano invece su Modelli master o su Modelli derivati, e cioè alleggeriti per specifiche finalità di utilizzo, intervenendo direttamente sul dato discreto con l'obiettivo di preservarne quanto possibile la neutralità [5]. Per la costruzione prototipale del modello semantico dell'eremo di Santa Chelidonia si è scelto dunque di operare tramite metadattazione di un Modello derivato, risultante dall'ottimizzazione del Modello master condotta nel rispetto della neutralità del dato, attraverso il riconoscimento grafico, sulla superficie del modello, delle aree interessate dai fenomeni di degrado. Il modello, alleggerito nella geometria per essere gestito in diversi ambienti *software* senza riduzione della qualità cromatica tramite l'uso di *Normal Map*, è stato strutturato in due parti, una a risoluzione maggiore descrittiva del dipinto, una a risoluzione minore riferibile alla grotta. Il carattere prototipale della sperimentazione, le dimensioni ridotte del soggetto, e l'accuratezza richiesta dal dettaglio pittorico, hanno favorito la mappatura vettoriale della texture sul modello poligonale (realizzata in ambiente NURBS), capace di assicurare un controllo rigoroso e capillare delle aree dipinte [6]. Aree omogenee sono state oggetto di riconoscimento e metadattazione attraverso la scrittura di un sistema informativo aperto e scalabile, strutturato in funzione delle forme di degrado riscontrabili per i materiali lapidei naturali e artificiali e concepito per accogliere diverse categorie di dipinti su roccia (fig. 9).

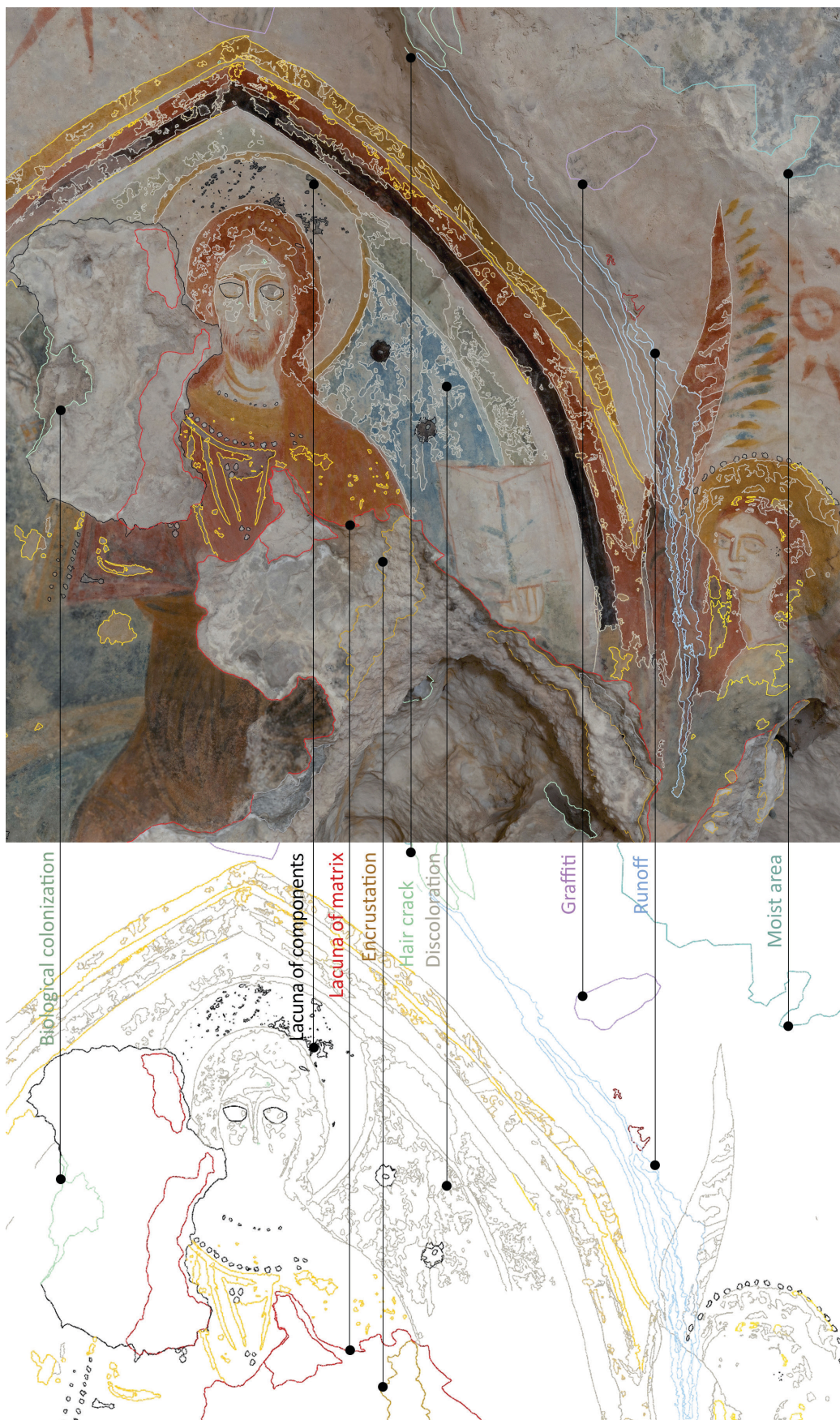


Fig. 10. Mappatura del degrado sul modello (elaborazione grafica degli autori).

La definizione dei fenomeni di degrado è stata condotta a partire dall'analisi dei glossari nazionali e internazionali correntemente in uso, riferibili in particolare alle alterazioni e alle degradazioni dei materiali descritte nelle Raccomandazioni NorMaL relative al lessico per le alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei, del CNR-ICR (1991) e nel glossario dell'ICOMOS-ISCS, sulle forme del degrado della pietra (2008) [Normal 1991; Vergès-Belmin 2008; Mora, Mora, Philippot 1999]. A partire da questa ricognizione e dall'analisi di casi affini, relativi al tema della conservazione degli ambienti ipogei, sono state identificate e approfondite specifiche forme di degrado, che interessano in maniera ricorrente le superfici dipinte in grotta [7]. Per ognuna di esse sono stati definiti campi di denominazione, definizione e causa, con relative sottocategorie, finalizzate al rilevamento di specifiche manifestazioni all'interno della medesima forma di degrado, con particolare riferimento alle alterazioni del colore (fig. 10). In linea con i principi guida espressi nelle linee guida del PND, il progetto coniuga il concetto di tutela con quello di fruizione in un modello di sintesi orientato alla preservazione materiale e alla fruizione digitale dei medesimi originali. Il Modello master, navigabile in alta risoluzione attraverso suoi Modelli derivati, è attualmente parte di una sperimentazione volta alla costruzione di un itinerario digitale di esplorazione delle grotte eremitiche tramite sistemi di navigazione immersiva per finalità conoscitive di fruizione inclusiva del patrimonio.

Conclusioni

La ricerca, interdisciplinare, integra le competenze della rappresentazione con quelle del restauro con l'obiettivo di sviluppare una metodologia di mappatura del degrado per la conservazione, il monitoraggio e la valorizzazione delle superfici dipinte in grotta, attraverso la metadattazione di copie digitali ad alta risoluzione.

Questi modelli, che contribuiscono alla mappatura delle grotte eremitiche dipinte della valle nell'ambito di un sistema conoscitivo digitale orientato alla co-valorizzazione delle testimonianze materiali dei paesaggi sacri che la caratterizzano, si configurano come strumenti progettuali interoperabili per l'analisi delle superfici dipinte, la registrazione dello stato di conservazione, la programmazione degli interventi diagnostici, la pianificazione delle azioni di conservazione. Attraverso un linguaggio visuale-verbale strutturato, questi modelli assumono una connotazione efrasica, traducendo l'oggetto reale in una narrazione multiforme capace di restituirne la complessità.

Note

[1] Lo studio espone parte dei risultati della ricerca svolta nell'ambito del progetto PNRR PE5 - CHANGES, Cultural Heritage Active Innovation for Sustainable Society - PE_0000020-CUP_B53C22003780006, Spoke 1 "Historical Landscape, tradition and cultural identities", WPS, Linea Tematica 2 (Dipartimento di Storia, disegno e restauro dell'architettura, Sapienza Università di Roma; responsabile scientifica Daniela Esposito): *I percorsi del 'sacro' fra la valle del Giovenzano, la valle dell'Empiglione e la valle Sublacense: conoscenza, conservazione, valorizzazione*.

[2] La ricerca ha fatto riferimento in particolare alle *Linee guida per la digitalizzazione 3D di beni storico-artistici e museali*, appendice tecnica delle *Linee guida per la Digitalizzazione del patrimonio culturale* allegate al PND, attualmente in fase di pubblica consultazione, promosse dall'Istituto Centrale per la Digitalizzazione del Patrimonio culturale – Digital Library e sviluppate con il contributo scientifico dell'Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale - ISPC e dell'Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Informazione - ISTI del CNR [MIC-ICDP 2025].

[3] Si tratta di un valore medio per via delle irregolarità caratteristiche delle superfici della grotta. Stabilita la dimensione del sensore e scelte le ottiche, la risoluzione dipende dalla distanza fra il punto nodale della camera e la superficie acquisita $d = (H \times p)/f$: Baglioni, Migliari, Salvatore 2014.

[4] La restituzione delle riprese del romitorio è stata eseguita con un software di elaborazione fotogrammetrica (Reality Capture) che consente di intervenire in termini progettuali in tutte le fasi del processo di restituzione.

[5] Questi ultimi, in particolare, trovano applicazione nelle sperimentazioni dedicate ai processi automatici di segmentazione semantica su base cromatica, dove la qualità del dato colore risulta determinante: Grilli, Remondino 2019.

[6] Il carattere prototipale del processo ha favorito la sperimentazione in contesti consolidati, utili a testare la capacità di interrogazione semantica del modello ai fini della conservazione, ponendo le basi per successivi sviluppi del processo, supportati dall'integrazione di algoritmi automatici di riconoscimento delle aree.

[7] A questo riguardo si vedano in particolare, in ambito italiano, i casi degli interventi sulle tombe ipogee a Tarquinia [Caneva 2021], la Cripta del Peccato Originale a Matera [Caneva 2019] e gli ambienti ipogei delle *domus* romane al Celio [Isola 2023].

Riferimenti bibliografici

- Baglioni, L., Migliari, R., Salvatore, M. (2014). Calcolo della risoluzione delle riprese panoramiche delle quadrature piane. In Valenti, G.M. (a cura di). *Prospettive architettoniche. Conservazione digitale, divulgazione e studio*, pp. 809-816. Roma: Sapienza Università Editrice.
- Branciani, Luchina. 2012. Origine e sviluppo dell'eremitismo nella valle sublacense. In L. Ermini Pani (a cura di). *Le valli dei monaci*. Atti del Convegno internazionale di studio. Roma-Subiaco, 17-19 maggio 2010, pp. 585-635. Spoleto: Fondazione Centro Italiano di studi sull'alto medioevo.
- Caneva, G., Bartoli, F., Fontani, M., Mazzeschi, D., Visca, P. (2019). Changes in biodeterioration patterns of mural paintings: Multi-temporal mapping for a preventive conservation strategy in the Crypt of the Original Sin (Matera, Italy). In *Journal of Cultural Heritage*, 40, pp. 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.05.011>.
- Caneva, G., Isola, D., Lee, H.J., Chung, Y.J. (2020). Biological risk for hypogea: shared data from Etruscan tombs in Italy and ancient tombs of the Baekje dynasty in Republic of Korea. In *Applied Sciences*, 10 (17), 6104. <https://doi.org/10.3390/app10176104>.
- Gaiani, M. (2012). Methods and techniques for building information systems to study, store, manage and communicate architectural heritage and archaeological complex systems. In *DisegnareCon*, vol. 5, n.10. Methods and techniques for building information systems to study, store, manage and communicate architectural heritage and archaeological complex systems.
- Grilli, E., Remondino, F. (2019). Classification of 3D digital heritage. In *Remote Sensing*, 11(7), 847. <https://doi.org/10.3390/rs11070847>.
- Isola, D., Bartoli, F., Morretta, S., Caneva, G. (2023). The roman houses of the Caelian Hill (Rome, Italy): multitemporal evaluation of biodeterioration patterns. In *Microorganisms*, 11(7), 1770. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11071770>.
- Jannuccelli, G. (1856). *Memorie di Subiaco e sua Badia raccolte dal Canonico Jannuccelli, Cameriere d'onore di Sua Santità, Custode della Piana Biblioteca Sublacense*. Genova: Stabilimenti tipografico di Giovanni Fassicomo.
- Ministero della Cultura (MIC), Istituto Centrale per la Digitalizzazione del patrimonio culturale (ICDP). (2022). *Linee guida per la digitalizzazione del patrimonio culturale. Versione 1.0* - giugno 2022, all. 1 al Piano Nazionale di Digitalizzazione del patrimonio culturale 2022-23. <https://docs.italia.it/italia/icdp/icdp-pnd-digitalizzazione-docs/it/v1.0-giugno-2022/index.html>.
- Ministero della Cultura (MIC), Istituto Centrale per la Digitalizzazione del patrimonio culturale (ICDP) - Digital Library. (2025). *Linee guida per la digitalizzazione 3D. Beni storico-artistici e museali*. Appendice tecnica alle *Linee guida per la digitalizzazione del patrimonio culturale*, all. 1 al Piano Nazionale di Digitalizzazione del patrimonio culturale 2022-23. Ministero della Cultura. <https://partecipa.gov.it/processes/Linee-Guida-Digitalizzazione-3D>.
- Mora, P., Mora, L., Philippot, P. (1999). *La conservazione delle pitture murali*. Editrice Compositori.
- Normal, Commissione. (1991). *Raccomandazioni Normal: 1/88 Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico*. Roma: CNR-ICR.
- Polidori, P. (1842). *Cenni storici di S. Chelidonia vergine monaca benedettina nella solitudine di Subiaco*. Roma: Tipografia Salviucci.
- Salvatori, L. (2012). Il monastero di Santa Chelidonia. In L. Ermini Pani (a cura di). *Le valli dei monaci*. Atti del Convegno internazionale di studio. Roma-Subiaco, 17-19 maggio 201, pp. 479-529. Spoleto: Fondazione Centro italiano di studi sull'alto medioevo.
- Vergès-Belmin, Véronique. (2008). *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*. Icomos. https://www.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf.

Autori

Marta Salvatore, Sapienza Università di Roma, marta.salvatore@uniroma1.it
Michele Calvano, Sapienza Università di Roma, michele.calvano@uniroma1.it
Francesca Lembo Fazio, Sapienza Università di Roma, francesca.lembofazio@uniroma1.it
Martina Trentani, Sapienza Università di Roma, martina.trentani@uniroma1.it
Talin Talin, Sapienza Università di Roma, talin.talin@uniroma1.it

Per citare questo capitolo: Marta Salvatore, Michele Calvano, Francesca Lembo Fazio, Martina Trentani, Talin Talin. (2024). Digitalizzazione per la conservazione e la valorizzazione dei dipinti murali: il romitorio di Santa Chelidonia a Subiaco. In L. Carlevaris et al. (a cura di). *Èkphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/èkphrasis. Descriptions in the space of representation*. Atti del 46° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Milano: FrancoAngeli, pp. 3323-3342. DOI: 10.3280/oa-1430-c927.

Digitisation for the Conservation and Valorisation of Mural Paintings: the Hermitage of Santa Chelidonia in Subiaco

Marta Salvatore
Michele Calvano
Francesca Lembo Fazio
Martina Trentani
Talin Talin

Abstract

This paper presents an experimental project focused on the digitisation of the Hermitage of Santa Chelidonia in Subiaco, aimed at its conservation and enhancement, with particular attention to the 13th century painting of Christ located within it. The initiative is part of a broader project dedicated to the promotion of the semi-hidden system of painted hermit caves that define the sacred paths of the Aniene Valley. The project foresees the creation of a prototype digital knowledge system for the preservation and accessibility of these sites.

Within this framework, the research explores a method for mapping and monitoring deterioration through high-resolution 3D models, based on visual analysis and direct annotation of textured surfaces. The process involved producing high-definition models with controlled resolution, in accordance with the guidelines of the National Plan for the Digitisation of Cultural Heritage. These models, similar to documentary sources, provided the basis for developing an open and scalable system of annotation and metadata, designed to describe the state of conservation of the site by combining verbal and visual forms of representation. The system is intended to support the ongoing documentation and monitoring of deterioration processes over time, particularly in complex environmental contexts.

Keywords

Mural paintings, digitisation, digital photogrammetry, information modeling, conservation.



The cave of the Hermitage of Saint Chelidonia near Subiaco (graphic elaboration by the authors).

Introduction

The study presented is part of a digitisation project focusing on a selection of hermit caves located in the Aniene Valley, characterised by the presence of frescoes and mural paintings, with the aim of documentation, conservation, and enhancement [1]. The fragmented system of caves has strongly influenced, and continues to shape, the sacred paths of the valley, as it represents the effects of monasticism and Benedictine monastic culture, deeply rooted in the region [Branciani 2012]. Due to the eremitic nature of these caves, the system appears fragmented, heterogeneous, and difficult to access, except for the large monasteries and sanctuaries built on hermitage sites. The research aims to enhance this semi-hidden landscape through a digitisation operation focused on the documentation, conservation, and communication of these structures, which are particularly vulnerable to the typical degradation phenomena affecting open and semi-subterranean spaces.

The Hermitage of Santa Chelidonia is part of this system and is characterised by a mural painting on plaster of the *Christ in Mandorla* type (fig. 1). This paper describes the digitisation process of the cave, specifically focusing on the painting, and proposes a strategy for monitoring degradation through an experimental mapping system using high-resolution photogrammetric models. These models, which document the conservation state of the site, function as dynamic informational palimpsests, where the integration of visual and verbal languages creates a layered and accessible narrative of the site, serving an ecphrastic function that conveys its material and perceptual complexity.

The cave of the Hermitage of Santa Chelidonia

Thus, the 19th century chronicle of Canon Jannuccelli, Honorary Chamberlain to His Holiness and Keeper of the Sublacense Library, described the hermitage of the Saint, and this is how it still appears today: "*Da ultimo al nord di Subiaco ascendendo per malvagio sentiero su erta montagna cinta di precipizi, dopo circa tre miglia di cammino si presenta agli occhi come vaste torre una rupe, sotto cui s'interna un'orrida grotta, dove, come altrove si è accennato, visse e compì i suoi giorni la vergine Santa Chelidonia; vi si trova un povero altare. Questo è il santuario della celeste protettrice di Subiaco, termine a divoti pellegrinaggi*" [Jannuccelli 1856, p. 416].

Perhaps we would not describe the cave as 'grim,' but the only paths to reach it require a lengthy walk along mountain trails. Located along the transhumance routes, near the great Monasteries of Santa Scolastica and the Sacro Speco, in a privileged position above the Sublacense road, the hermitage became a pilgrimage site for the faithful from the end of the first millennium, when it was inhabited for fifty-nine years by the Saint, whose cult is still strongly felt within the Sublacense community.

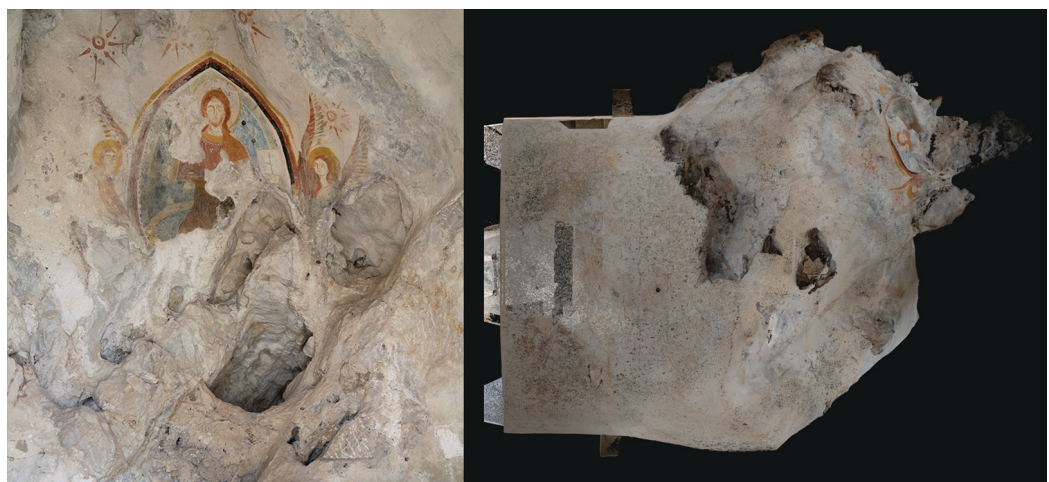


Fig. 1. The cave of the Hermitage of Saint Chelidonia and the painting of Christ inside the cave (graphic elaboration by the authors).

Fig. 2. The ruins of the Monastery of Santa Maria Maddalena and the entrance façade to the cave (photos by the authors).



The history of the site is tied to the location of Chelidonia's remains. After an initial period of preservation at the cave, they were transferred to the Church of Santa Maria Nuova, near the Monastery of Santa Scolastica, only to be returned to the cave a few years later, which had been incorporated into the Monastery of Santa Maria Maddalena in the second half of the 12th century [Salvatori 2012, p. 483; Polidori 1842, pp. 8-10]. The Monastery remained active for about 250 years, eventually falling into ruin and surviving to the present day as a ruin (fig. 2).

In 1557, the cave underwent restoration work, as recalled by the inscription above the entrance portal. The masonry protrusion and windows were created to illuminate the interior of the cave and reduce the moisture that was damaging the structure and the paintings, which remain in small fragments, including a larger piece depicting Christ, located near the altar, presumably dated to the mid-13th century [Salvatori 2012]. The Saint's remains were later returned to Santa Scolastica, but the cave continued to be a site of spontaneous veneration by the local population. In recent years, the area underwent restoration and consolidation work, completed in 2013.

The digitisation process

Acknowledging the need to ensure both conservation and accessibility of the site, a digitisation campaign of the hermitage and its painting was undertaken, with the aim of producing a



Fig. 3. Reading the space of the cave: horizontal and vertical sections (graphic elaboration by the authors).

high-resolution digital copy for documentation, preservation, and communication purposes (fig. 3). The need to monitor, over time, the degradation phenomena affecting the cave's painted and irregular walls led to the testing of a degradation mapping methodology, intended to track their progression through the periodic acquisition of photogrammetric models. The ability of these models to convey morphological, metric, and chromatic data through highly defined visual languages has, in recent years, made them key tools for experimentation in the fields of heritage documentation and communication.

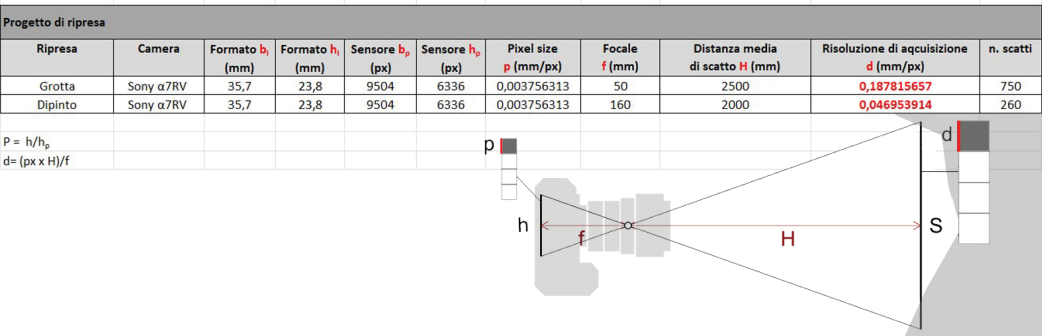


Fig. 4. Calculation of the acquisition resolution for photogrammetric capture (graphic elaboration by the authors).

Their high resolution, resulting from selective acquisition processes, allows them to be regarded as documentary sources, accessible and expandable for both scientific dissemination and divulgation. The notion of treating the photogrammetric model as a source in its own right prompted a deeper investigation into the parameters that determine the overall quality and reliability of the model.

Taking into account the methodological framework provided by the Guidelines for the Digitisation of Cultural Heritage [2] of the National Digitisation Plan (PND 2022–23) from the Central Institute for the Digitisation of Cultural Heritage [MIC-ICDP 2022], the quality characteristics of the digitisation process were made explicit, referring in particular to the definition of the ‘Raw Data’, namely the image acquisition set, and of the ‘Master Model’ [MIC-ICDP 2025; Gaiani 2012], meaning the quality parameters of the photogrammetric model, which can be expressed in terms of Acquisition resolution, Geometric resolution, and Chromatic resolution.

The digitisation project of the hermitage involved two photogrammetric surveys: one for the cave and one for the painting, both carried out using a Sony Alpha 7RV full-frame camera with a pixel size (p) of 0.0037 mm/px. For the cave survey, a 50 mm focal length (f) was used at an average shooting distance (H) of 2.5 m, resulting in an Average acquisition resolution (d) of 0.185 mm/px. For the painting survey, a 160 mm focal length was used at an average shooting distance of 2 meters, achieving an Average acquisition resolution of 0.046 mm/px [3] (fig. 4). The resulting dataset generated a photogrammetric model of over two billion polygons, later reduced to approximately 100 million for editing and metadata purposes.

The Geometric resolution of the model, defined by the level of detail in the digitised object's geometric features, was estimated by calculating the average edge length of the polygon mesh. The resulting value, 1.4 mm, falls within the standards defined by the PND guidelines for objects longer than 2 m (threshold value: 1.5 mm) [MIC-ICDP 2025, p. 24].

The analysis of the degradation affecting the painted surfaces focused on the definition and measurement of the quality characteristics of the recorded chromatic data, namely the texture. Many photogrammetric software tools automate the texture mapping process, preventing the possibility of predefining the expected quality of the chromatic data at the planning stage. This is a significant limitation, as it restricts design flexibility and compromises the model's periodic updating, for which consistent acquisition and rendering conditions are essential.

Texture quality characteristics involve photographic parameters related to sharpness and chromatic accuracy, as well as parameters that combine photographic data with the kinematics of acquisition. These can be expressed in terms of Chromatic resolution and quantified in units of length per texel. Texture resolution, in fact, depends on the size of the texel, the measurement unit for textures on the model, analogous to pixels in a two-dimensional image. The correlation between Acquisition resolution and Chromatic resolution, of the texture, together with the possibility offered by some photogrammetric tools to control texel size in terms of length units, made it possible to design the shooting parameters and camera movement according to the resolution to be achieved [4] (fig. 5).

For the model of the Hermitage of Santa Chelidonia, two sets of UV texture maps were produced: one for the cave, consisting of 13 textures at $16,384 \times 16,384$ pixels, with a resolution of 0.187 mm/texel; and one for the painting, made up of 68 textures at the same size, covering approximately one-third of the model, with a resolution of 0.047 mm/texel (figs. 6, 7).

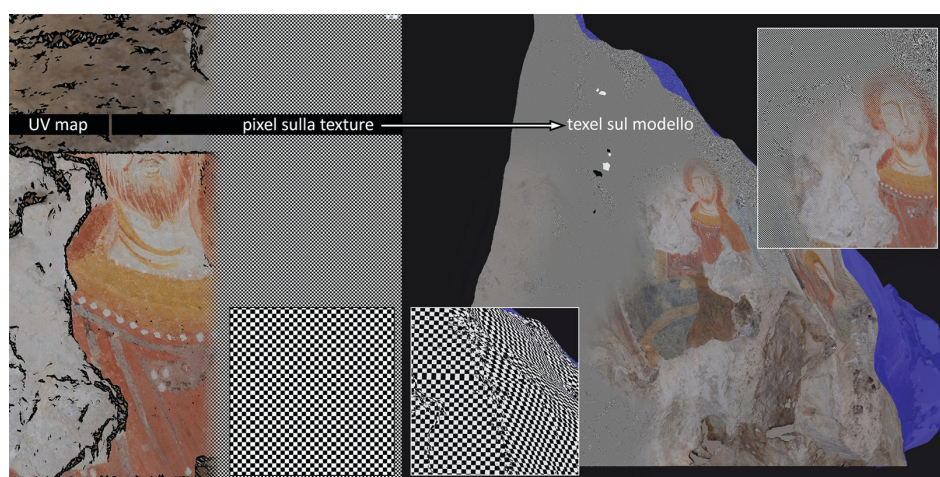


Fig. 5. Example of the pixel-to-texel ratio in the construction of the UV map of the photogrammetric model (graphic elaboration by the authors).



Fig. 6. Level of detail in the painting mapping shown on an external view of the model (graphic elaboration by the authors).



Fig. 7. Level of detail in the painting mapping shown on an internal view of the model (graphic elaboration by the authors).

Information models for monitoring and conservation

The quality characteristics defined during data acquisition and processing enable the assessment of the model's reliability in relation to specific applications. In the case of the hermitage painting, the measurement of the model's resolution and that of its texture served as the foundation for testing a degradation mapping methodology on the textured model, capable of describing and monitoring the progression of deterioration phenomena over time, on which conservation interventions can be planned.

The project was driven by the need, identified within the context of restoration, to interact with the irregular surface of the painting in three-dimensional space, with the objective of creating a highly detailed digital copy through which to analyse, record, and monitor –by means of drawing and metadata annotation– the state of deterioration, the scheduling of diagnostic procedures, and the planning of conservation interventions (fig. 8). The idea of monitoring is fundamental. The definition of the source's quality parameters –that is, of the Master Model– makes its periodic updating possible, which is essential, in comparative terms, for recording the state of degradation over time.

The prototypical construction of experimental semantic models of the cave and the painting fits within a broad and expanding field of experimentation dedicated to information modelling for conservation. Numerous research projects have been carried out on this topic, some of



Fig. 8. Diagram of the proposed process for analysis, diagnostic planning, and monitoring (graphic elaboration by the authors).

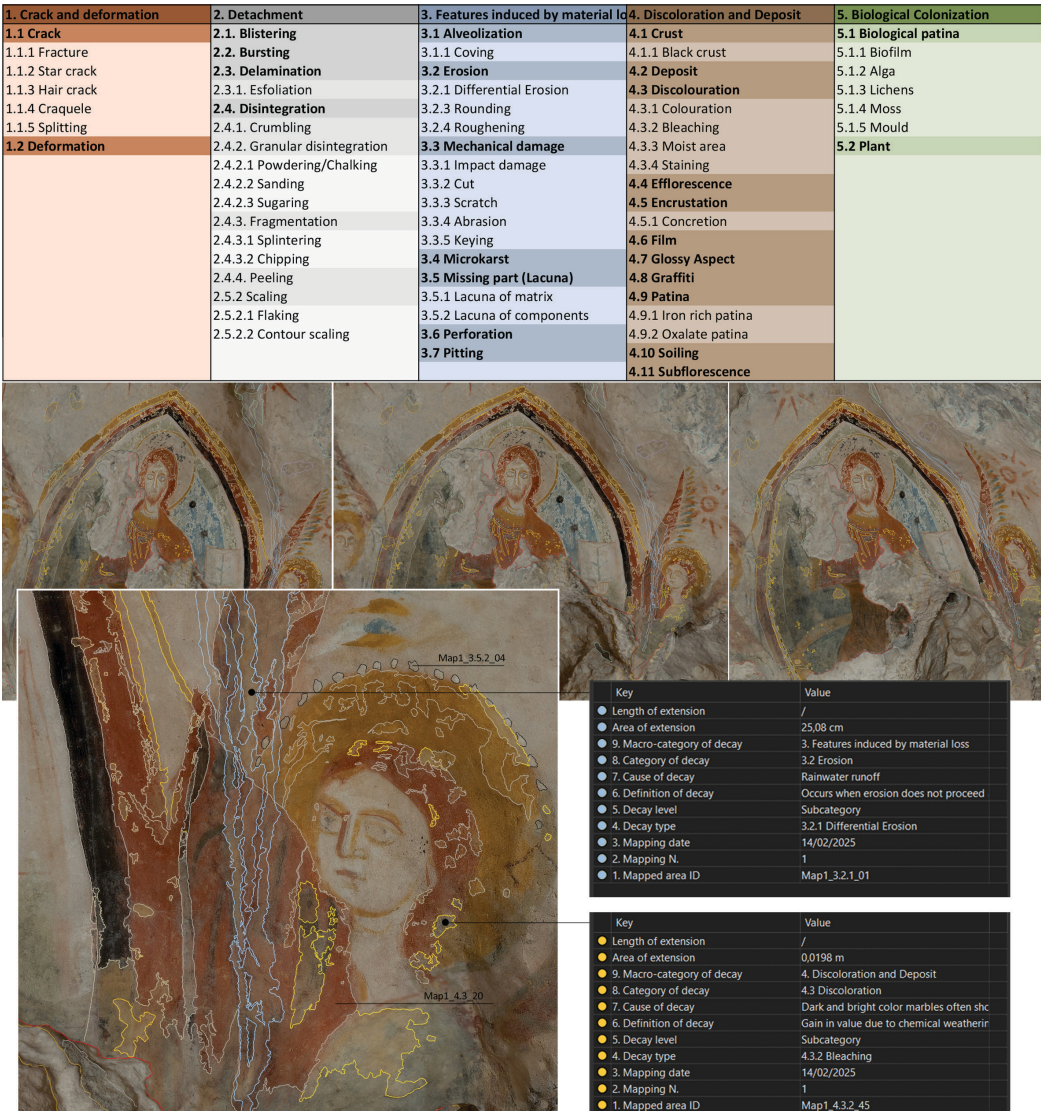


Fig. 9. Categories of analysis of degradation phenomena, mapping, and related information system (graphic elaboration by the authors).

which work with models shaped by authorial interventions, even invasive ones, aimed at obtaining continuous geometries from discrete data; others, instead, operate on Master Models or Derived Models –i.e., simplified for specific use cases– and intervene directly on the discrete data with the aim of preserving its neutrality as much as possible [5].

For the prototypical construction of the semantic model of the Hermitage of Santa Chelidonia, it was decided to operate via metadata annotation of a Derived Model, resulting from the optimisation of the Master Model conducted with respect to data neutrality, by means of graphical recognition of the areas affected by degradation phenomena on the model's surface. The model, geometrically simplified to ensure compatibility across various software environments without compromising chromatic quality –thanks to the use of Normal Maps– was structured in two parts: a higher-resolution section focused on the depiction of the painting, and a lower-resolution one representing the cave. The prototypical nature of the experiment, the small scale of the subject, and the level of detail required by the pictorial elements all favoured the use of vector-based texture mapping onto the polygonal model (created in a NURBS environment), which allows for precise and meticulous control over the painted areas [6]. Homogeneous areas were identified and annotated through the development of an open and scalable information system, structured around types of deterioration typically observed in natural and artificial stone materials, and designed to encompass various categories of rock paintings (fig. 9).

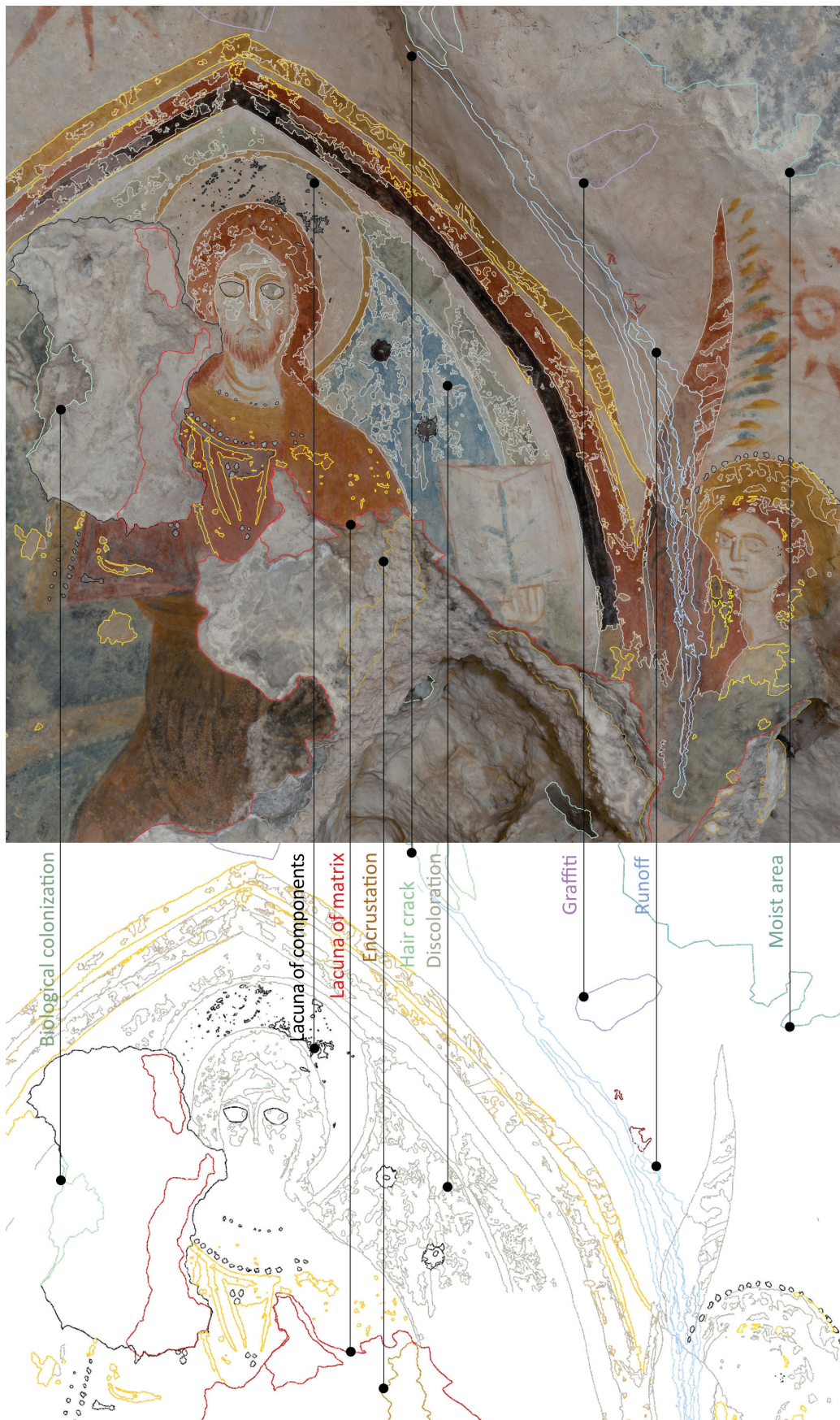


Fig. 10. Degradation mapping on the model (graphic elaboration by the authors).

The definition of degradation phenomena was conducted starting from the analysis of national and international glossaries currently in use, particularly those related to the alterations and degradations of materials described in the NorMaL Recommendations regarding the lexicon for macroscopic alterations of stone materials, from CNR-ICR (1991), and in the ICOMOS-ISCS glossary on the forms of stone degradation (2008) [Normal 1991; Vergès-Belmin 2008; Mora, Mora, Philippot 1999]. Based on this survey and the analysis of similar cases concerning the conservation of underground environments, specific forms of degradation affecting painted cave surfaces were identified and further explored [7]. For each of these forms, fields of nomenclature, definition, and cause were defined, with corresponding subcategories aimed at detecting specific manifestations within the same form of degradation, with particular reference to colour alterations (fig. 10).

According to the guiding principles outlined in the PND guidelines, the project combines the concept of conservation with that of enjoyment in a synthesis model focused on both the material preservation and the digital accessibility of the same originals. The Master Model, navigable in high resolution through its derivative models, is currently part of an experimental project aimed at developing a digital itinerary for the exploration of hermitage caves, using immersive navigation systems to promote knowledge dissemination and inclusive engagement with cultural heritage.

Conclusions

This interdisciplinary research combines expertise in the fields of representation and restoration, aiming to experiment with a methodology for mapping degradation for the purposes of conservation, monitoring, and enhancement of painted cave surfaces through the metadata annotation of high-resolution digital copies.

These models, which contribute to the mapping of the valley's hermitic painted caves within a digital knowledge system oriented toward the co-valorisation of the material evidence of its sacred landscapes, are conceived as interoperable design tools for the analysis of painted surfaces, the documentation of their conservation status, the planning of diagnostic activities, and the scheduling of conservation actions. Through a structured visual-verbal language, these models acquire an ekphrastic character, translating the real object into a multifaceted narrative capable of conveying its full complexity.

Notes

[1] This study presents part of the results from the research conducted within the framework of the PNRR PES - CHANGES, Cultural Heritage Active Innovation for Sustainable Society - PE_0000020-CUP_B53C22003780006, Spoke 1 "Historical Landscape, Tradition, and Cultural Identities," VWP5, Thematic Line 2 (Department of History, Representation and Restoration of Architecture, Sapienza University of Rome; Scientific Coordinator: Daniela Esposito): *The Sacred Paths of the Giovenzano Valley, the Empiglione Valley, and the Sublacense Valley: Knowledge, Conservation, and Enhancement*.

[2] The research specifically referred to the *Guidelines for the 3D characterisation of Historical-Artistic and Museum Heritage*, the technical appendix to the *Guidelines for the Digitisation of Cultural Heritage* attached to the PND, which is currently in the public consultation phase. These guidelines were promoted by the Central Institute for the Digitisation of Cultural Heritage – Digital Library and developed with the scientific contribution of the Institute for Cultural Heritage Sciences (ISPC) and the Institute of Information Science and Technology (ISTI) of the CNR [MIC-ICDP 2025].

[3] This is an average value due to the characteristic irregularities of the cave surfaces. Once the sensor size has been established and the lenses selected, the resolution depends on the distance between the camera's nodal point and the acquired surface, according to the formula $d = (H \times p)/f$: Baglioni, Migliari, Salvatore 2014.

[4] The processing of the hermitage shooting was carried out using photogrammetric software (*Reality Capture*), which allows for project-level intervention at every stage of the reconstruction process.

[5] These, in particular, are applied in experiments dedicated to automatic semantic segmentation processes based on color, where the quality of the colour data is crucial: Grilli, Remondino 2019.

[6] The prototypical nature of the process favoured experimentation within established contexts, useful for testing the model's capacity for semantic interrogation for conservation purposes, laying the foundations for subsequent developments of the process, supported by the integration of automatic algorithms for area recognition.

[7] In this regard, particularly noteworthy in the Italian context are the interventions on the hypogean tombs at Tarquinia [Caneva 2021], the Crypt of Original Sin in Matera [Caneva 2019], and the underground environments of the Roman houses on the Celian Hill [Isola 2023].

Reference List

- Baglioni, L., Migliari, R., Salvatore, M. (2014). Calcolo della risoluzione delle riprese panoramiche delle quadrature piane. In Valenti, G.M. (a cura di). *Prospettive architettoniche. Conservazione digitale, divulgazione e studio*, pp. 809-816. Roma: Sapienza Università Editrice.
- Branciani, Luchina. 2012. Origine e sviluppo dell'eremitismo nella valle sublacense. In L. Ermini Pani (a cura di). *Le valli dei monaci*. Atti del Convegno internazionale di studio. Roma-Subiaco, 17-19 maggio 2010, pp. 585-635. Spoleto: Fondazione Centro Italiano di studi sull'alto medioevo.
- Caneva, G., Bartoli, F., Fontani, M., Mazzeschi, D., Visca, P. (2019). Changes in biodeterioration patterns of mural paintings: Multi-temporal mapping for a preventive conservation strategy in the Crypt of the Original Sin (Matera, Italy). In *Journal of Cultural Heritage*, 40, pp. 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.05.011>.
- Caneva, G., Isola, D., Lee, H.J., Chung, Y.J. (2020). Biological risk for hypogea: shared data from Etruscan tombs in Italy and ancient tombs of the Baekje dynasty in Republic of Korea. In *Applied Sciences*, 10 (17), 6104. <https://doi.org/10.3390/app10176104>.
- Gaiani, M. (2012). Methods and techniques for building information systems to study, store, manage and communicate architectural heritage and archaeological complex systems. In *DisegnareCon*, vol. 5, n.10. Methods and techniques for building information systems to study, store, manage and communicate architectural heritage and archaeological complex systems.
- Grilli, E., Remondino, F. (2019). Classification of 3D digital heritage. In *Remote Sensing*, 11(7), 847. <https://doi.org/10.3390/rs11070847>.
- Isola, D., Bartoli, F., Morretta, S., Caneva, G. (2023). The roman houses of the Caelian Hill (Rome, Italy): multitemporal evaluation of biodeterioration patterns. In *Microorganisms*, 11(7), 1770. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11071770>.
- Jannuccelli, G. (1856). *Memorie di Subiaco e sua Badia raccolte dal Canonico Jannuccelli, Cameriere d'onore di Sua Santità, Custode della Piana Biblioteca Sublacense*. Genova: Stabilimenti tipografico di Giovanni Fassicomio.
- Ministero della Cultura (MIC), Istituto Centrale per la Digitalizzazione del patrimonio culturale (ICDP). (2022). *Linee guida per la digitalizzazione del patrimonio culturale. Versione 1.0 - giugno 2022*, all. 1 al Piano Nazionale di Digitalizzazione del patrimonio culturale 2022-23. <https://docs.italia.it/italia/icdp/icdp-pnd-digitalizzazione-docs/it/v1.0-giugno-2022/index.html>.
- Ministero della Cultura (MIC), Istituto Centrale per la Digitalizzazione del patrimonio culturale (ICDP) - Digital Library. (2025). *Linee guida per la digitalizzazione 3D. Beni storico-artistici e museali*. Appendice tecnica alle *Linee guida per la digitalizzazione del patrimonio culturale*, all. 1 al Piano Nazionale di Digitalizzazione del patrimonio culturale 2022-23. Ministero della Cultura. <https://partecipa.gov.it/processes/Linee-Guida-Digitalizzazione-3D>.
- Mora, P., Mora, L., Philippot, P. (1999). *La conservazione delle pitture murali*. Editrice Compositori.
- Normal, Commissione. (1991). *Raccomandazioni Normal: 1/88 Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico*. Roma: CNR-ICR.
- Polidori, P. (1842). *Cenni storici di S. Chelidonia vergine monaca benedettina nella solitudine di Subiaco*. Roma: Tipografia Salviucci.
- Salvatori, L. (2012). Il monastero di Santa Chelidonia. In L. Ermini Pani (a cura di). *Le valli dei monaci*. Atti del Convegno internazionale di studio. Roma-Subiaco, 17-19 maggio 201, pp. 479-529. Spoleto: Fondazione Centro italiano di studi sull'alto medioevo.
- Vergès-Belmin, Véronique. (2008). *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*. Icomos. https://www.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf.

Authors

Marta Salvatore, Sapienza Università di Roma, marta.salvatore@uniroma1.it
Michele Calvano, Sapienza Università di Roma, michele.calvano@uniroma1.it
Francesca Lembo Fazio, Sapienza Università di Roma, francesca.lembofazio@uniroma1.it
Martina Trentani, Sapienza Università di Roma, martina.trentani@uniroma1.it
Talin Talin, Sapienza Università di Roma, talin.talin@uniroma1.it

To cite this chapter: Marta Salvatore, Michele Calvano, Francesca Lembo Fazio, Martina Trentani, Talin Talin. (2024). Digitisation for the Conservation and Valorisation of Mural Paintings: the Hermitage of St. Chelidonia in Subiaco. In L. Carlevaris et al. (Eds.). *Ekphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/ekphrasis. Descriptions in the space of representation*. Proceedings of the 46th International Conference of Representation Disciplines Teachers. Milano: FrancoAngeli, pp. 3323-3342. DOI: 10.3280/oa-1430-c927.