

Ortofoto e modelli 3D ad alta risoluzione per la valutazione del degrado di murature affrescate. Il Cappellone della basilica di San Nicola a Tolentino

*Original*

Ortofoto e modelli 3D ad alta risoluzione per la valutazione del degrado di murature affrescate. Il Cappellone della basilica di San Nicola a Tolentino / Antonia, Spanò; Perri, Stefano. - In: ATTI E RASSEGNA TECNICA. - ISSN 0004-7287. - STAMPA. - LXXIII:3(2019), pp. 222-229.

*Availability:*

This version is available at: 11583/2844156 since: 2020-09-06T23:06:06Z

*Publisher:*

Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

# Ortofoto e modelli 3D ad alta risoluzione per la valutazione del degrado di murature affrescate. Il Cappellone della basilica di San Nicola a Tolentino

## *High resolution orthophotos and 3D models for health evaluation of frescoed masonries. The Cappellone in the San Nicola basilica in Tolentino*

**STEFANO PERRI, NANNINA SPANÒ**

### Abstract

Nannina Spanò, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD  
antonia.spano@polito.it

Stefano Perri, laureato magistrale in Architettura per progetto sostenibile, Politecnico di Torino, DAD  
stefano.perri@polito.it

I modelli bidimensionali e 3D derivati dalle innovazioni e dalle integrazioni delle tecnologie geomatiche *image based* o *range based* hanno dimostrato negli ultimi anni di aver sviluppato in modo notevole le capacità di descrivere i beni culturali, rendendo più rapide e sostenibili le fasi di acquisizione, più ricche e approfondite quelle di rappresentazione e analisi fino a poter contribuire in modo significativo le indagini che riguardano ad esempio le anomalie dell'architettura storica, potendo descrivere in modo accurato alterazioni dei sistemi costruttivi e dei materiali.

Il contributo presenta un'applicazione conseguente il rilievo metrico 3D del Cappellone del complesso conventuale della basilica di San Nicola a Tolentino, nell'ambito delle attività di studio della task force del Politecnico di Torino nelle aree del terremoto del Centro Italia, a partire dalle acquisizioni eseguite dal team DIRECT nel febbraio del 2017.

*The two-dimensional and 3D models derived from the innovations and integrations of image based or range based geomatics technologies have demonstrated in recent years that they have significantly developed the ability to describe cultural heritage. Such techniques make the acquisition phases faster and more sustainable, more rich and in-depth those of representation and analysis up to being able to contribute significantly to the investigations concerning, for example, the anomalies of historical architecture, being able to accurately describe alterations of construction systems and materials.*

*The contribution presents an application resulting from the 3D metric survey of the Cappellone of the convent complex of the basilica of San Nicola in Tolentino, as part of the study activities of the task force of the Politecnico di Torino in the areas of the earthquake in Central Italy, starting from the acquisitions made by the DIRECT team in February 2017.*

### **1. Tecniche integrate basate su immagini e su scansioni laser per la documentazione del patrimonio costruito**

Tra le innovazioni tecnologiche e gli sviluppi metodologici che hanno riguardato le tecniche di indagine che concorrono alla conoscenza materica e tematica del patrimonio costruito e che quindi contribuiscono in modo trasversale alla matrice interdisciplinare della conservazione, le tecniche del cosiddetto *3D recording* ricoprono una posizione rilevante.

I metodi laser scanning e quelli basati su immagini, cioè legati alla fotogrammetria digitale che ha efficacemente integrato le tecniche di *dense matching* di immagini e la tecnologia *Structure from Motion* (SfM) messi a punto nell'ambito della *computer vision*, offrono oltre al tradizionale valore metrico dei prodotti fotogrammetrici, anche elevate produttività e tempi rapidi per via delle modalità semiautomatiche introdotte nel *workflow*; le continue recenti innovazioni hanno potuto sviluppare maggiori capacità descrittive, sia in riferimento alla sfera morfologica e dimensionale dei manufatti<sup>1</sup>, sia nella caratterizzazione materica e inerente il complesso delle alterazioni delle fabbriche<sup>2</sup>.

La tecnologia laser scanning è tuttora quella che garantisce i più elevati livelli di dettaglio e accuratèzze e per questo motivo generalmente preferita per le valutazioni strutturali<sup>3</sup>, non essendo inoltre influenzata da parametri ambientali come la luce. Dal momento però che attualmente non sono integrate camere ad alta risoluzione nella medesima strumentazione, la fusione delle nuvole di punti e il valore dell'alta risoluzione di immagini RGB avviene in processi di integrazione e fusione nelle fasi di elaborazione.

Se possibile, più rilevanti degli aspetti tecnici sono le esigenze da soddisfare; quando le superfici da documentare

siano rappresentate da murature storiche affrescate, come il presente caso del Cappellone della basilica di Tolentino, e quindi il dettaglio, la cromia, i valori stilistici e il possibile degrado siano gli elementi da analizzare attentamente nei conseguenti prodotti, il metodo fotogrammetrico e le ortoproiezioni di fotogrammi orientati che possono facilmente garantire dimensioni del pixel pari a 1mm, sono di gran lunga le più consigliabili e preferite<sup>4</sup>.

## 2. Il Cappellone e le relazioni spaziali con il contesto

La posizione del Cappellone è nell'ala orientale del convento, l'unica edificata agli inizi del XIV secolo. La prima funzione fu quella di sacrestia, e solo nel terzo decennio del Trecento iniziò la trasformazione in cappella memoriale di San Nicola, con l'inserimento nobilitante e conforme ai canoni dell'ordine mendicante della volta ogivale quadripartita<sup>5</sup>.

Il Cappellone è riferito come il luogo di maggior interesse dell'intero complesso della basilica tolentine, per la decorazione pittorica della sala, tra le più estese e meglio conservate dell'inizio del Trecento in Italia, realizzata da maestranze dirette dal pittore Pietro da Rimini, si pensa subito dopo la canonizzazione del santo, che avvenne nel 1325<sup>6</sup>.



Figura 1. Due fotogrammi ritraggono la volta e una parete affrescata (la più danneggiata) che riportano cicli della vita del santo, di Gesù e altri repertori storico-religiosi.

Al centro di questo spazio si trova l'Arca lapidea e la statua policroma di San Nicola, realizzata per per deporvi le spoglie del Santo, ma che in realtà mai le ospitarono. I valori che distinguono questo ambiente e gli studi che hanno evidenziato l'appartenenza di questa sala alla prima fase agostiniana del convento e il suo ruolo chiave nel corso delle trasformazioni trecentesche e del secolo successivo, hanno sin dal principio direzionato la pianificazione del rilievo 3D del team DIRECT nella primavera del 2017.

La rete topografica è stata pianificata per restituire in un unico sistema di riferimento il modello aereo dell'intero complesso, della basilica, del chiostro, della parte di convento destinata all'accoglienza e appunto del Cappellone, come riferito nel contributo esteso in questo volume dedicato alle attività interdisciplinari realizzate sulla basilica (Figura 9, p. 107).

La determinazione della rete topografica principale, che distribuisce una serie di vertici all'esterno del complesso e nel chiostro è stata determinata con tecnica GNSS (*Global Navigation Satellite System*), mentre una poligonale vincolata agli estremi determinata mediante stazione totale distribuisce vertici topografici di coordinate note negli interni, compreso il cappellone.

L'unicità del sistema di riferimento, oltre a determinare la georeferenziazione di ogni parte del rilievo, consente la possibilità di mettere in relazione dimensionale e spaziale i diversi ambienti e i singoli elementi architettonici della fabbrica, e spesso consente di supportare e fornire elementi di valutazione ulteriore alla generale interpretazione delle fasi costruttive e stratificazioni diacroniche delle componenti dell'edificazione<sup>7</sup>.

Nel caso del Cappellone, la sezione trasversale del complesso, riportata in Figura 2, rappresenta efficacemente la scelta trecentesca di interrompere gli ambienti di abitazione degli spazi conventuali al piano superiore, per fornire sviluppo verticale alla sala che si estende con la grandiosa volta costolonata in doppia altezza rispetto agli ambienti limitrofi<sup>8</sup>.

### 3. Elaborazione delle ortofoto e del modello 3D

Il rilievo 3D del Cappellone è stato pianificato per consentire di valutare lo stato di salute delle murature e della volta,

per chiarire se soprattutto quest'ultima presentasse anomalie di forma e se queste fossero eventualmente ascrivibili ai fenomeni sismici che in altre zone del complesso hanno causato evidenti danni strutturali. Soprattutto, si è colta occasione per prevedere di documentare lo stato di conservazione superficiale degli affreschi, quantificando il degrado tramite una attenta restituzione da ortofoto.

Per questi motivi innanzitutto si è prevista un'opportuna illuminazione artificiale dell'interno, per consentire la massima qualità delle immagini acquisite, che sono state scattate con camera Nikon D800E (obiettivo Nikon 24 mm, dimensione pixel 4.89 mm, dimensioni del fotogramma 4912x7360 px, per un totale di 36 Mp) montata su treppiede e azionata in remoto, con riprese registrate con asse della camera orizzontale, nadirale e con inclinazione di 45° verso le superfici del manufatto, al fine di massimizzare la sovrapposizione stereoscopica (*overlapping*).

Delle 142 immagini originalmente acquisite e fatte oggetto di una preliminare ottimizzazione radiometrica, solo 102 hanno passato il vaglio e sono state impiegate per le elaborazioni fotogrammetriche; inoltre sono stati acquisiti 52 punti di controllo distribuiti tra volta e pareti, rigorosamente senza l'uso dei consueti marker e sfruttando pienamente quindi la potenzialità "senza contatto" prevista dal metodo. I risultati della prima fase di *dense matching* di immagini sono stati sorprendenti, dal momento che la nuvola rada dei *tie-point* è stata calcolata con un totale di più di un milione di punti. L'ottimizzazione della stima dei centri di presa conseguita con il *bundle adjustment* successivo con l'uso dei punti di controllo topografici ha consentito di generare una nuvola di punti che conta addirittura 98 milioni di punti, caratterizzata da una accuratezza metrica stimata con un valore medio dello scarto quadratico medio sui punti di controllo pari 1,4 mm. (GSD – dimensione di pixel pari a 1,3 mm).

### 4. Valutazione dei risultati e analisi delle murature

La prima valutazione della nuvola densa generata, e soprattutto la sua trasformazione in superficie triangolata (*mesh*), ha consentito di stimare l'elevata qualità del risultato; la Figura 3c mostra come la superficie continua denunci la presenza

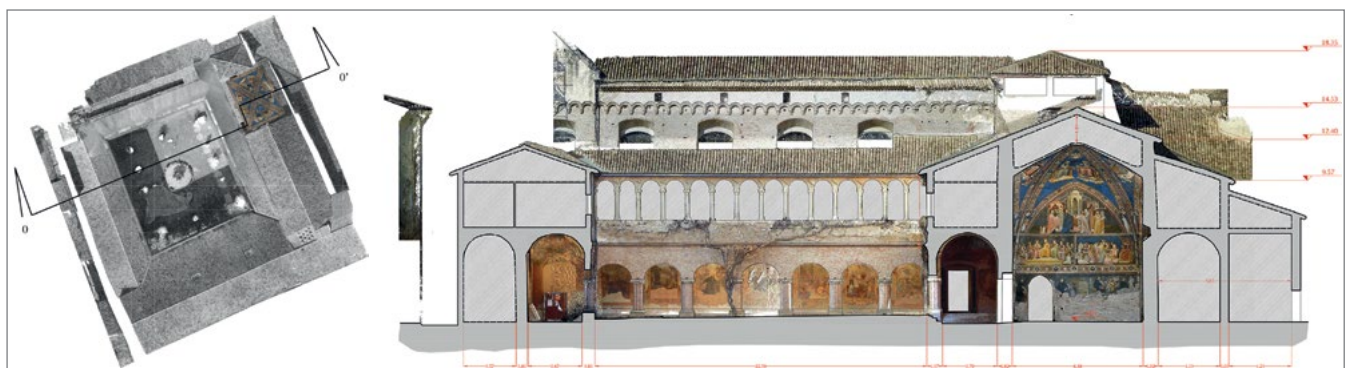


Figura 2. Sezione architettonica trasversale del chiostro, con modello volumetrico della manica orientale che ospita il Cappellone (integrazione di viste delle nuvole di punti e ortofoto, nella sezione vettoriale dei corpi di fabbrica).

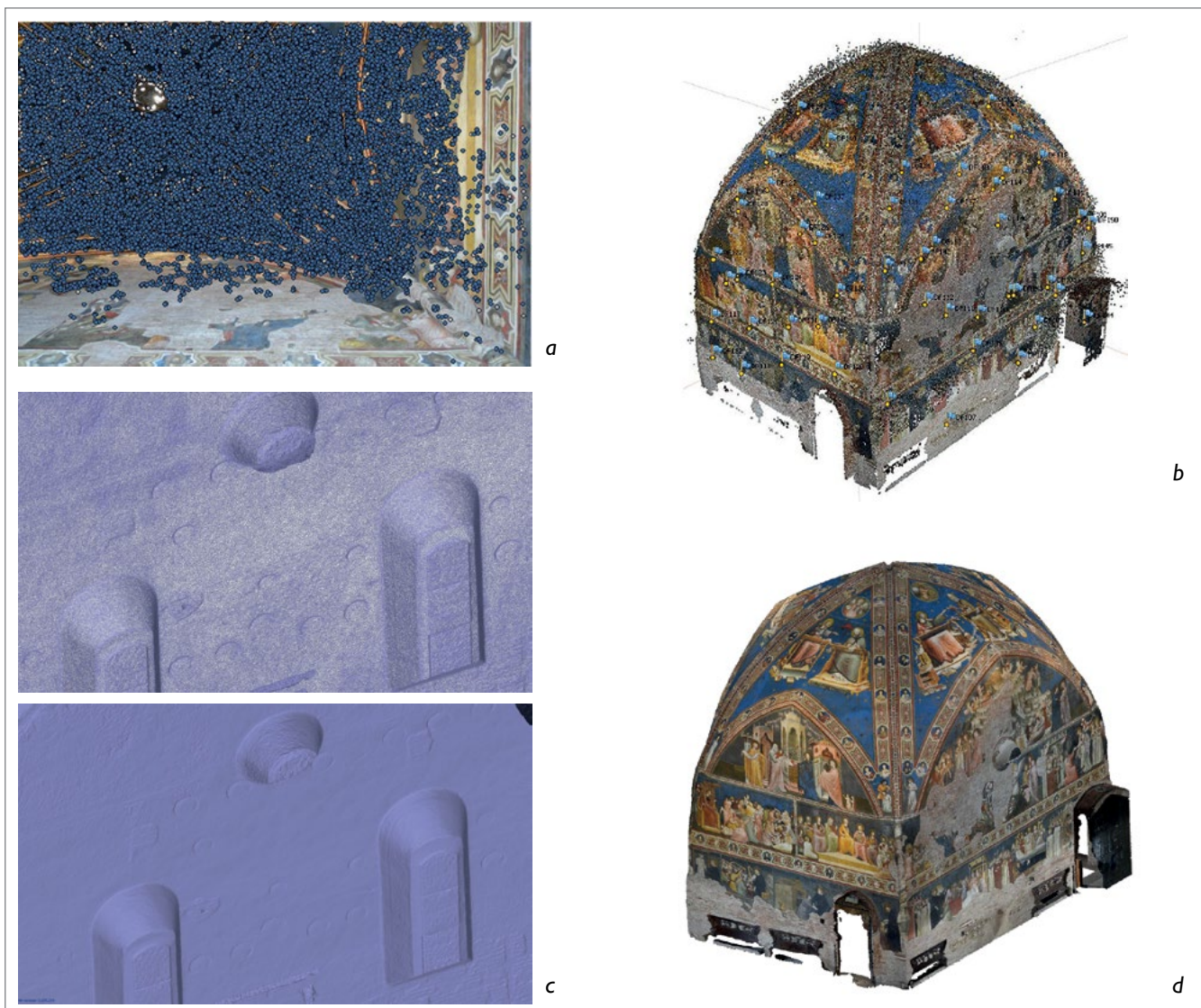


Figura 3. Elaborazioni fotogrammetriche con tecnica SfM: (a) densità dei tie points in una porzione della nuvola sparsa; (b) distribuzione dei punti di controllo collimati (c) confronto tra superficie triangolata visualizzata in wireframe e come solido (d) modello 3D con texture.

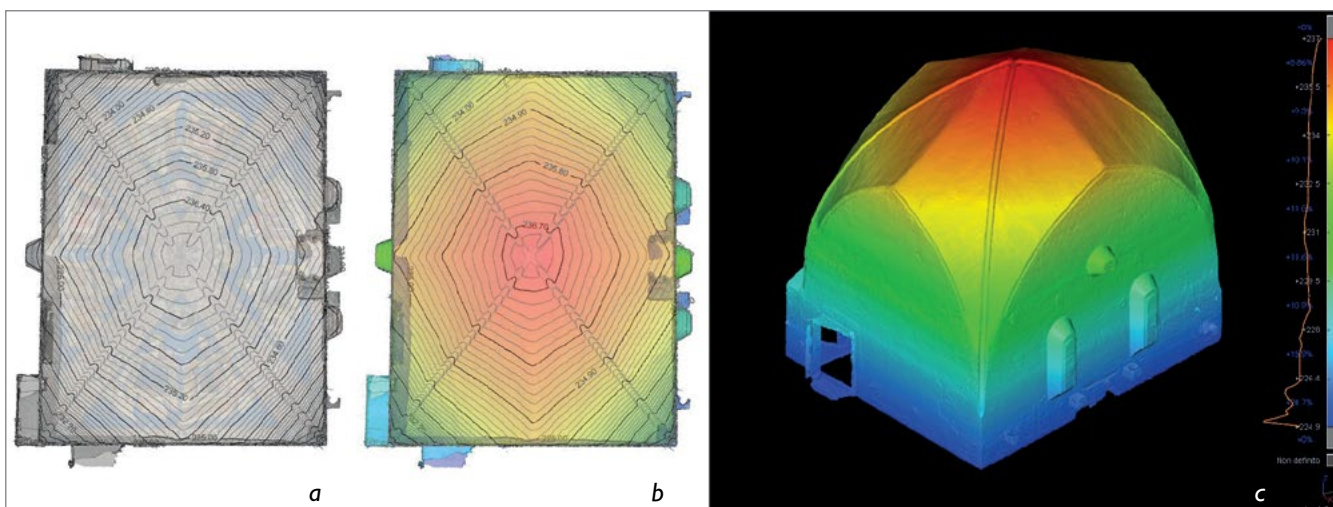


Figura 4. Analisi del DEM ed estrazione di curve isoipse per valutare la geometria ed eventuali variazioni di forma della volta costolonata; (a) sovrapposizione delle curve isoipse (equidistanza 90 cm) all'ortofoto; (b) sovrapposizione di isoipse con DEM, (c) calcolo del DEM sull'intero modello della sala.

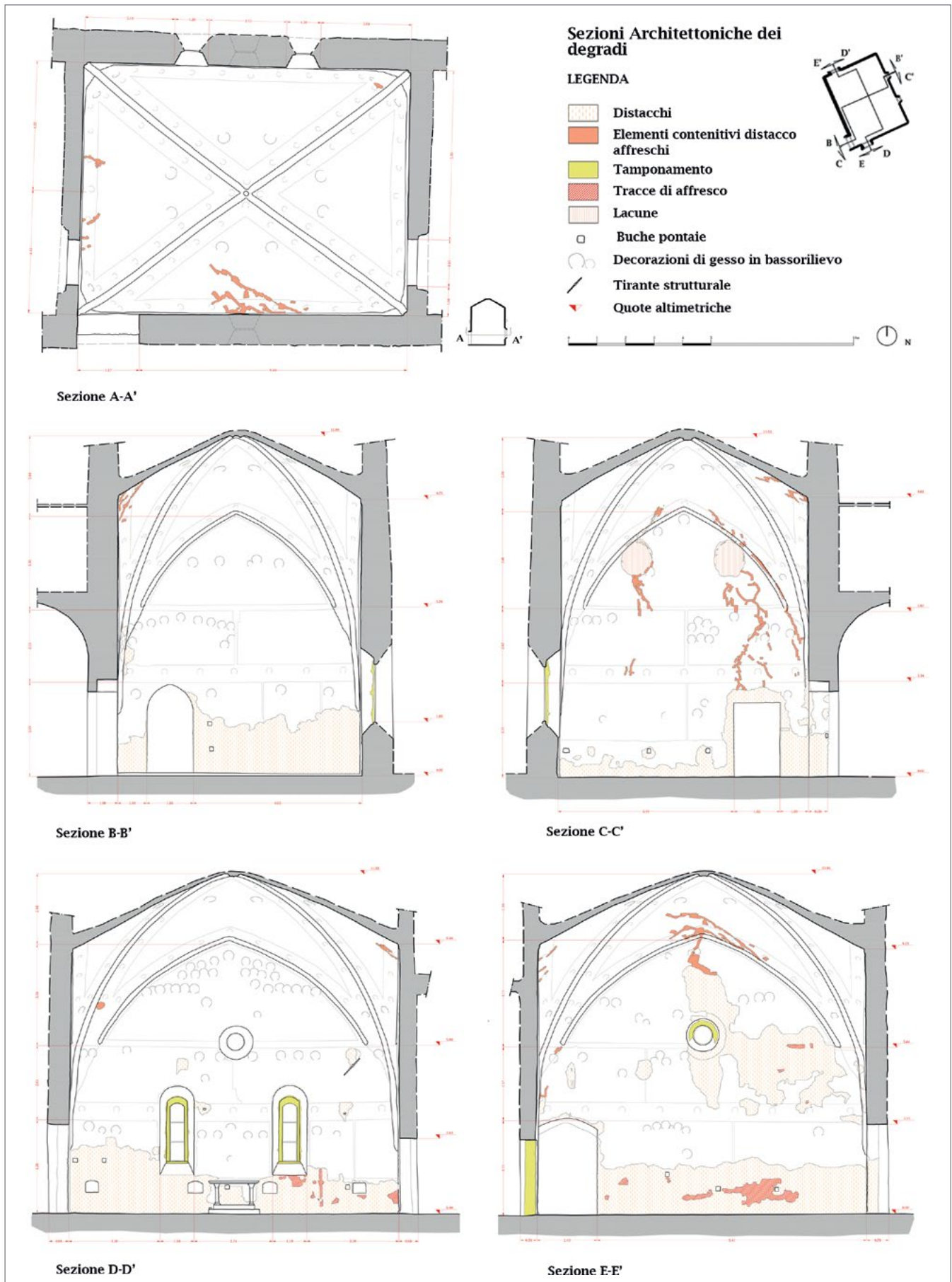


Figura 5. Restituzione della proiezione della volta e prospetti delle pareti con identificazione degli elementi tecnologici e di degrado.

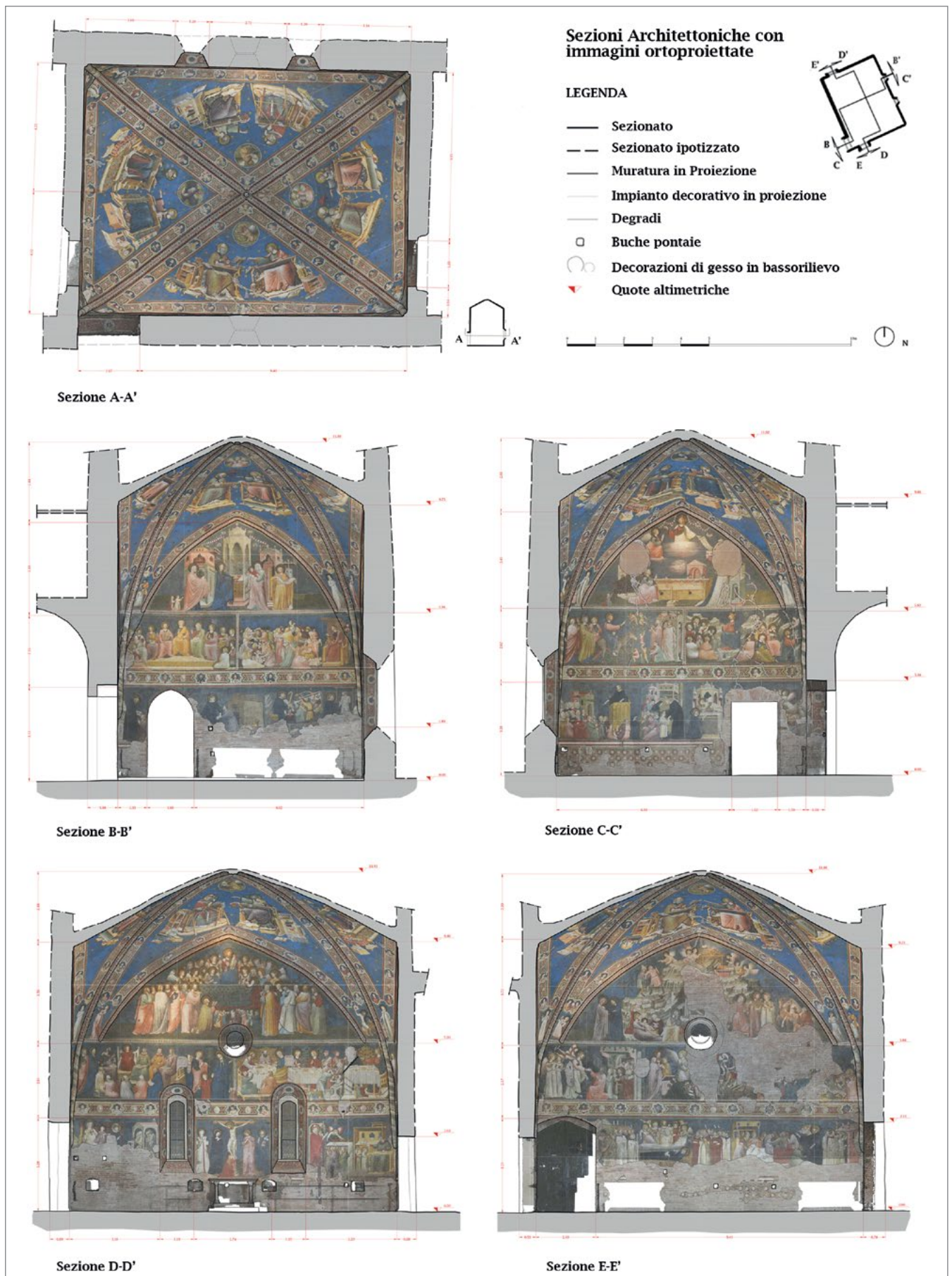


Figura 6. Elaborati architettonici della sala del Cappellone (proiezione della volta a direttrici ogivali e prospetti delle pareti della sala). Restituzione vettoriale con integrazione delle ortofoto calcolate con una dimensione del pixel pari a 1 mm.



Figura 7. Particolari delle ortofoto della volta e della parete sud-est, che mostrano l'applicazione di nastri protettivi sulle fessurazioni.

dell'enfaticizzazione delle aureole di tutte le figure affrescate tramite stucco a rilievo, particolare che non era visibile a occhio nudo, data anche la scarsa illuminazione della sala.

L'estrazione di ortofoto ad alta risoluzione (1 mm per pixel), costituite da mosaici di fotogrammi ortoproiettati sui piani medi delle pareti della sala ha consentito la restituzione completa degli elaborati architettonici in proiezioni ortogonali, anche della proiezione della volta dal basso verso l'alto (Figura 6), consentendo inoltre la precisa descrizione di elementi tecnologici e del degrado (distacchi, elementi di contenimento del distacco posizionati in recenti attività di restauro, tamponamenti, lacune degli affreschi, buche puntaie, rilievi a stucco delle aureole dei santi) (Figura 5).

Una volta ottenuto il modello 3D, sotto forma di nuvola di punti o di modello di superficie continuo, con evidenziazione dei caratteri di rugosità o *smoothness* della superficie, ancorché con l'ulteriore proiezione controllata dal punto di vista metrico delle immagini orientate, può ulteriormente essere analizzato derivando il DEM (*Digital Elevation Model*) che permette di esaminare in dettaglio, tramite un *range* di colori, il valore delle quote dei punti rispetto ad un piano di riferimento, che per l'analisi della volta è ovviamente orizzontale. L'analisi del DEM e l'ulteriore analisi tramite l'estrazione di isoipse (Figura 4) consente di valutare che la struttura non presenta anomalie morfologiche e sicuramente la geometria di progetto è conservata, dal momento che le curve isoipse (equidistanza 90 cm) dimostrano un andamento del tutto regolare.

### 5. Valutazioni conclusive

Gli elaborati grafici architettonici che integrano le ortofoto e l'esame del modello 3D, nelle diverse configurazioni, hanno consentito di mettere in luce le caratteristiche geometriche e spaziali della sala anche in relazione al contesto costruito, permettendo inoltre un approfondimento degli elementi principali del degrado materico delle superfici affrescate.

È stato possibile identificare due importanti categorie di degrado: il deterioramento delle superfici affrescate tipicamente dovuto al tempo, per esempio la risalita capillare dell'umidità dal terreno e, un secondo da ascrivere al sisma del 2016. Il primo degrado ha condotto al distacco continuo dello strato superficiale di finitura a ridosso del pavimento e delle aperture, con la conseguente esposizione dei laterizi della muratura, la riduzione della malta tra le fughe, la presenza a tratti di patina biologica scura ed efflorescenze saline. Altri degradi dovuti al tempo sono lacune di superficie affrescata, sia sulle pareti (come si nota sulla parete S-E) sia sulle superfici ogivali della volta. Per completezza sono stati segnalati gli interventi di restauro degli intonaci, in prossimità delle finestre circolari e delle monofore, e i segni di rimaneggiamenti agli infissi, o adeguamenti dopo il distacco degli intonaci.

Per quanto riguarda le conseguenze dovute al sisma e i danni portati alle pitture murarie, si può asserire si siano formate svariate micro-crepe, in alcuni casi distribuite sulla quasi totalità delle pareti, che quindi rendono più complesso il quadro degli interventi necessari, e che si aggiungono alle fessurazioni già riscontrate e trattate con nastri da restauro in carta per contenere il loro propagarsi (Figura 7).

Dal momento che l'analisi dei modelli 3D – come già chiarito<sup>9</sup> – non hanno evidenziato sofferenze strutturali, si può concludere che è sicuramente l'apparato decorativo murario e i mirabili affreschi che mostrano i segni della loro fragilità, che, in caso di terremoto, dimostrano purtroppo l'estrema vulnerabilità.

Oltre alla valutazione dello stato di conservazione, un possibile impiego dei modelli digitali 2D e 3D ottenuti è sicuramente la possibilità di impiego come mezzo di diffusione della conoscenza, considerato che il luogo risulta momentaneamente inaccessibile; gli stessi modelli o un loro impiego ulteriore in progetti di comunicazione virtuale potranno supportare la descrizione della sala anche quando sarà possibile ristabilirne la piena e sicura fruibilità.

Note

<sup>1</sup> Alcuni riferimenti bibliografici: Josè Luis Lerma, Santiago Navarro, Miriam Cabrelles, Ana Elena Seguí, Naif Haddad, Talal Akasheh, *Integration of laser scanning and imagery for photorealistic 3D architectural documentation*, in Chau-Chang Wang (a cura di), *Laser Scanning, Theory and Applications*, InTech, 2011; DOI: 10.5772/14534. Athanasios Voulodimos, Nikolaos Doulamis, Dieter Fritsch, Michael Klein, Konstantinos Makantasis, Anastasios Doulamis, *Four-dimensional reconstruction of cultural heritage sites based on photogrammetry and clustering*, in «Journal of Electronic Imaging», 26(1):011013, 2016; DOI: 10.1117/1.JEI.26.1.011013. Fabrizio Apollonio, Marco Gaiani, W. Basilissi, Laura Rivaroli, *Photogrammetry driven tools to support the restoration of open-air bronze surfaces of sculptures: an integrated solution starting from the experience of the Neptune Fountain in Bologna*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W3, 2017, pp. 47-54; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-47-2017.

<sup>2</sup> Cfr. in questo volume il contributo a p. 147. Ed anche: Fabio Radicioni, Pietro Matracchi, Raffaella Brigante, Andrea Brozzi, Manuela Cecconi, Aurelio Stoppini, Grazia Tosi, *The Tempio della Consolazione in Todi: integrated geomatic techniques for a monument description including structural damage evolution in time*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-5/W1, 2017, pp. 433-440, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-433-2017. Antonia Spanò, Filiberto Chiabrando, Elisabetta Donadio, Giulia Sammartano, *Tecnologia laser scanning per la valutazione statica delle strutture storiche*, in «Geomedia», 4, 2016.

<sup>3</sup> Giovanni Castellazzi, Antonio D'Altri, Gabriele Bitelli, Ilenia Selvaggi, Alessandro Lambertini, *From laser scanning to finite element analysis of complex buildings by using a semi-automatic procedure*, in «Sensors», 15, 8, 2015, pp. 18360-80; DOI: dx.doi.org/10.3390/s150818360.

<sup>4</sup> Marco Giorgio Bevilacqua, Gabriella Caroti, Isabel Martínez-Espejo Zaragoza, Andrea Piemonte, *Frescoed Vaults: Accuracy Controlled Simplified Methodology for Planar Development of Three-Dimensional Textured Models*, in «Remote Sensing», 8, 2016, p. 239. Giulia Sammartano, Antonia Spanò, *High scale 3d modelling and orthophoto of curved masonries for a multipurpose representation, analysis and assessment*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 42, 5W1, 2017, pp. 245-252; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-245-2017.

<sup>5</sup> Pio Francesco Pistilli, *Architettura medioevale del complesso monumentale*, in Centro Studi Agostino Trapè (a cura di), *La Basilica di San Nicola a Tolentino. Guida all'arte e alla storia*, Biblioteca Egidiana, Tolentino, 1995, p. 33.

<sup>6</sup> Pio Francesco Pistilli, *Architettura del Cappellone*, in Centro Studi Agostino Trapè (a cura di), *La Basilica...* cit., p. 82.

<sup>7</sup> Silvia Beltramo, Elisabetta Donadio, Antonia Spanò, *Stratigraphic Analyses, Historical Evidences, and 3D Documentation Tools: Deepening Built Heritage – New Researches for Historical Building Sites in Staffarda*, in Carlo Inglese, Alfonso Ippolito (a cura di), *Analysis, Conservation, and Restoration of Tangible and Intangible Cultural Heritage*, IGI Global, 2019, pp. 273-301; DOI: 10.4018/978-1-5225-6936-7.ch012.

<sup>8</sup> Gli elaborati complessivi del rilievo UAV e laser scanning della basilica e del chiostro sono frutto della campagna di misure del Team DIRECT nell'ambito della task force del Politecnico. Tutti gli elaborati del presente contributo sono stati parte della tesi di Stefano Perri, *Metodi di Rilievo metrico 3D multiscala per il patrimonio costruito. Applicazioni aeree e terrestri in differenti scenari*, tesi di laurea in Architettura per il progetto sostenibile, Politecnico di Torino, relatori Antonia Spanò, Filiberto Chiabrando, luglio 2018.

<sup>9</sup> Cfr. in questo volume il contributo a p. 102.