

Colore, riflettanza e temperatura.

Dal caso studio di Villa Trissino a nuove applicazioni integrate di dati lidar terrestri per il rilievo e la diagnostica

Paolo Clini
p.clini@univpm.it
Ramona Quattrini
r.quattrini@univpm.it
Romina Nespeca
r.nespeca@univpm.it
Luigi Sagone
l.sagone@univpm.it

Dipartimento Dicea,
Università Politecnica
delle Marche,

1. INTRODUZIONE

Le nuove tecnologie laser scanning “all in one” applicate al rilievo architettonico si stanno dimostrando efficaci, flessibili, economiche e speditive permettendo l’acquisizione, all’interno di prese omologhe, di differenti tipi di dati. La letteratura a riguardo è ampia e descrive dettagliatamente le potenzialità nel rilevamento morfologico, materico e anche colorimetrico dei manufatti. Le ormai note tecniche di mappatura delle immagini fotografiche alla nuvola di punti consentono di completare punto per punto il dato spaziale col dato colore (RGB), in fotografie HR. Di supporto alla buona lettura della superficie, l’operatore si serve del valore di riflettanza (R), generando delle mappe graduate che consentono il riconoscimento visivo degli elementi scansionati. Ne consegue che il concetto di modello solido applicato alle più “recenti” nuvole di punti può aggiornarsi nel considerare il modello stesso come un vero e proprio sistema informativo del manufatto in cui i livelli di analisi si integrano restituendo nel contempo esiti morfologici, geometrici, colorimetrici e materici. Quello della riflettanza è, in questo senso, forse il dato meno indagato.

L’intento di questa ricerca è di dimostrare come il dato di riflettanza da rilevamento scanner laser possa essere (in particolari condizioni) comparato a quello ottenibile da prove non distruttive comunemente applicate ai beni artistici, integrandone gli esiti con i dati qualitativamente rilevanti di carattere metrico, morfologico e geometrico restituiti dallo strumento laser. Il valore aggiunto, non trascurabile, è avere ampie portate dello strumento (fino a 300 metri), con notevoli potenzialità quindi nell’ispezione di superfici di difficile accesso.

In letteratura si dimostra che le variabili maggiormente influenti su R sono l’angolo di incidenza e l’indice di rifrazione del materiale, quest’ultimo determinato dalla microstruttura dello stesso. Pur nella consapevolezza che nel nostro campo di applicazione entrano in gioco anche la distanza dall’oggetto e la scabrezza della superficie, è possibile ottenere valutazioni comparate dei dati che indirizzino le più opportune prove diagnostiche dirette.

Le prime superfici indagate sono state quelle intonacate di Villa Trissino a Cricoli, Vicenza. E’ stata condotta un’analisi comparata relativa,

valutando lo scarto dell’indice all’interno di aree omogenee e correlandolo agli stati di degrado superficiale valutati di caso in caso.

A questo primo approccio sono seguiti ulteriori casi studio in cui sono state realizzate prese omologhe di scansioni laser e panoramiche all’infrarosso (Chiesa di San Filippo).

Il nostro emettitore laser a impulsi, Leica C10, genera un fascio nello spettro del visibile con λ pari a 532 nm. Il valore di riflettanza acquisito non può essere, nella maggior parte dei casi, confrontato in termini assoluti, ma valutando e controllando le variabili ambientali è possibile ricavarne conclusioni in merito allo stato di degrado del materiale in esame. Dal confronto con la termografia è possibile validare tali risultati per la realizzazione di mappe tematiche di degrado. La loro applicazione permette di rintracciare distacchi di intonaco, aree a rischio per contenuti di umidità non visibili, dilavamento, salinità delle murature sottostanti etc.

Le indagini visive finora utilizzate nella diagnosi dello stato di degrado superficiale possono ora servirsi di tali strumentazioni per una valutazione analitica dei meccanismi di degrado, con una metodologia di indagine speditiva e acquisibile nella fase di rilievo metrico.

2. STATO DELL’ARTE

Nel rilievo architettonico il laser scanner terrestre (TLS) è la tecnologia d’elezione; il remote sensing viene sfruttato in aggiunta o a integrazione di test non distruttivi. Sia nelle analisi sia nelle fasi di monitoraggio, diversi studi utilizzano tale strumentazione in geologia e geofisica [1], nel controllo del degrado da inquinamento atmosferico mediante telerilevamento aereo [2], per lo studio e la caratterizzazione di statue [3]. Ampia letteratura indaga i punti di forza e di debolezza dei TLS, identifica cause e fonti di errore e analizza potenziali usi degli output. I dati Lidar (terrestri e non) vengono utilizzati per la quantificazione e il monitoraggio del deterioramento di superfici architettoniche o archeologiche, ma anche per generare modelli 3D utili nella comunicazione delle informazioni [4].

L’uso dei dati di riflettanza da laser scanner è tuttora campo di sperimentazione e ricerca. Sembra possibile ottenere informazioni sullo stato delle discontinuità superficiali di monumenti

storici o nel campo della Meccanica delle Rocce [5]. Nell'uso di questi dati è importante gestire e correggere, se necessario, la precisione e l'influenza della distanza dell'oggetto, la sua rugosità o l'angolo di inclinazione [6].

Le immagini a infrarossi e termografiche sono molto spesso utilizzate nella diagnostica, nel monitoraggio e nel restauro del patrimonio culturale [7]. Esse mostrano l'energia emessa da un materiale (prova della sua temperatura), che può essere rilevata a distanza e utilizzata per definire la distribuzione termica. La termografia del materiale testato, ottenuto attraverso l'elaborazione di segnali ottici catturati da dispositivi sensibili alla radiazione infrarossa, offre informazioni sulle strutture stratificate, sulla presenza di materiali diversi, sulla umidità o salinità della muratura [8].

Questo non è sufficiente per l'analisi dei materiali ma, in associazione con altri test non distruttivi, i dati raccolti vengono poi elaborati per produrre schede appropriate per descrivere le proprietà ottiche e visive dei materiali studiati. Questo porta ad una mappatura delle antiche proprietà dei materiali [9]. Il crescente utilizzo di immagini a infrarossi spinge inoltre i ricercatori a migliorare gli algoritmi di elaborazione sulle immagini termiche per la rilevazione di difetti superficiali [10].

Recenti studi hanno dimostrato la corrispondenza tra i danni causati dal sisma e precedenti analisi basate sulla termografia. Questo ci indica un'ulteriore conferma sulla possibilità di utilizzare i termogrammi in diversi campi della diagnostica architettonica [11].

3. ANALISI ATTRAVERSO MAPPE DI RIFLETTANZA. IL CASO STUDIO DI VILLA TRISSINO A CRICOLI

Ancora oggi le acquisizioni laser scanning consentono principalmente analisi morfometriche; la ricerca su Villa Trissino a Cricoli introduce un approccio per la lettura del degrado materico e l'analisi a occhio nudo di sotto-strati invisibili. Inoltre, un'indagine qualitativa su superfici intonacate consente di ottenere ulteriori elementi di datazione per le murature dell'edificio e di valutare il valore storico dell'intonaco (Figura 1).

La campagna di rilievo è stata condotta nel mese di ottobre 2011 con il laser scanner Leica C10, con spot luminoso verde pari a $\lambda=532$ nm. Durante la fase di rilevamento, abbiamo organizzato 6 stazioni, 20 scansioni (max griglia 1 mm a 20 m). Dopo l'allineamento e la riduzione delle ridondanze, abbiamo ottenuto una registrazione della nuvola con 84 mln di punti (errore RMS 2 mm).

Il nostro studio si focalizza sullo sfruttamento delle immagini hue intensity, cosiddette "mappe di riflettanza". L'uso del valore di riflettanza, acquisito punto per punto, genera analisi visive che sono più performanti rispetto alla acquisizione fotografica e al relativo valore RGB. Se la griglia di acquisizione è accurata, possiamo apprezzare differenze sostanziali su materiali omogenei [14]. Per esempio, nella facciata principale intonacata, sono facilmente visibili in mappa di riflettanza, le differenze tra le torri e il blocco centrale, che non si percepiscono

Figura 1–Villa Trissino a Cricoli: fronte sud. a) disegno da www.epalladio.com b) foto ad alta risoluzione.



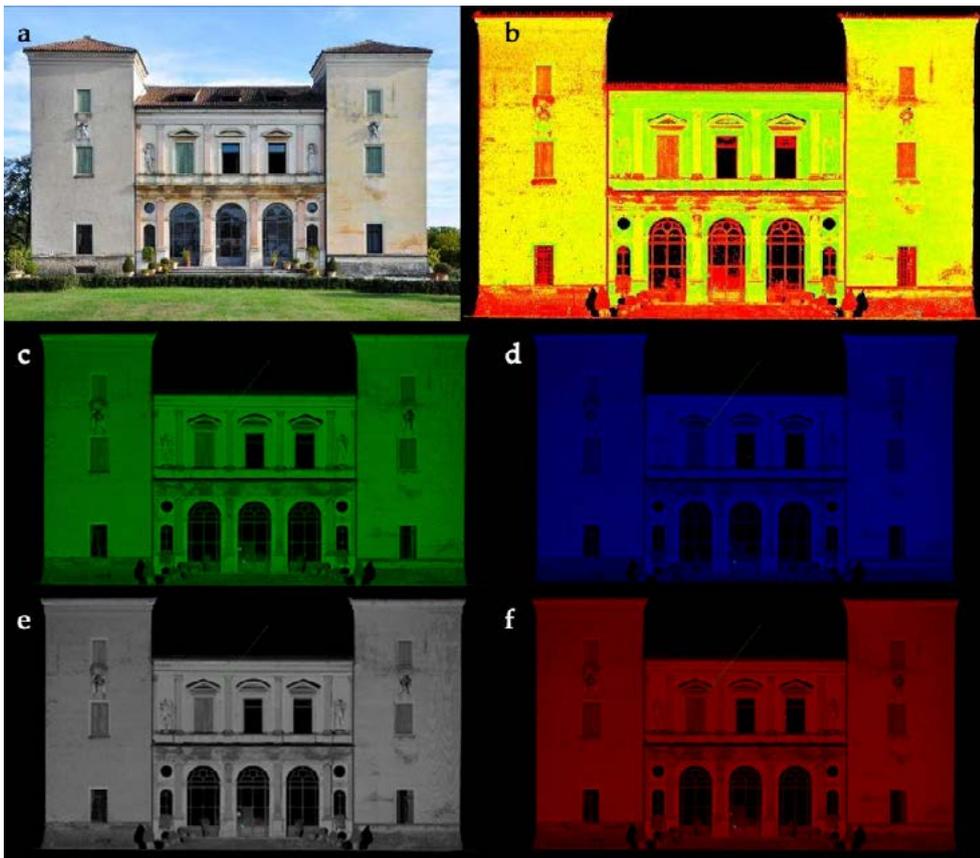


Figura 2 – a) e b) Villa Trissino a Cricoli: fronte sud. Comparazione tra ortofoto e mappa di riflettanza in range personalizzato. c) d) e) f) Mappe di riflettanza della facciata sud. Comparazione tra ranges monocromatici

dalla fotografia (Figura 2 a-b). Inoltre i vantaggi dell'uso della riflettanza sono evidenti in assenza di luce o nell'annullamento dell'influenza della luce, delle ombre o delle zone sovraesposte sul valore di intensità (Figura 2 c-d-e-f). I software di gestione della nuvola di punti facilitano la rappresentazione e il conseguente

uso del valore di riflettanza, grazie alla gamma di tonalità di assegnazione che può essere personalizzata per sottolineare zone interessanti. Lavorare su intervalli limitati può mettere in luce specifiche parti o fenomeni. L'output dei dati permette query interattive in ambiente proprietario Cyclone: utilizzando gli

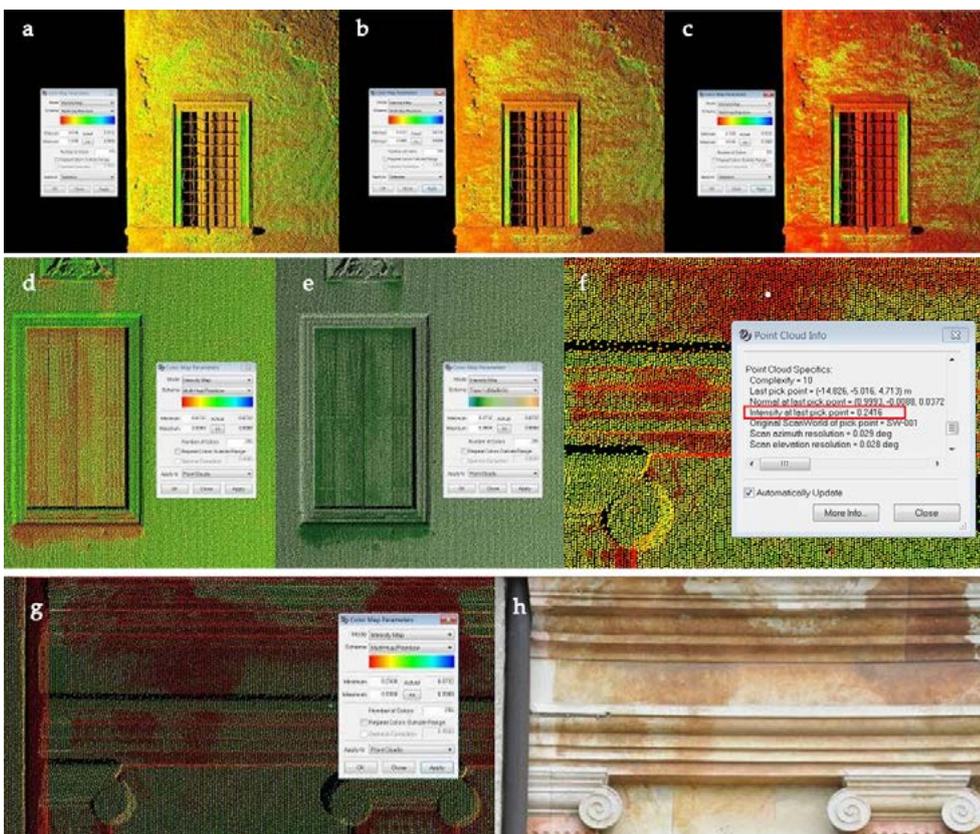


Figura 3 – a) b) c) Mappe di riflettanza in multi-hue intensity della facciata ovest. Comparazione di tre ranges personalizzati. d) e) Dettaglio del fronte sud: mappa di riflettanza in multi-hue intensity, confronto rainbow e BGrBrOr. f) Valore di riflettanza nella palette "point cloud info". g) h) Dettaglio del fronte sud: confronto tra mappa di riflettanza multi-hue e immagine RGB

Figura 4 –Villa Trissino a Cricoli: fronte sud. Disegni 2D di mappatura del degrado



strumenti sw per la gestione della nuvola di punti, è possibile effettuare la lettura del valore numerico ed estrarre i dati aggregati (Figura 3). Un altro uso interessante è quello dell'editor TruView, dove la corrispondenza tra forma e R può essere vista direttamente dalla nuvola di punti, in ambiente html open source lato client. Questo fatto allarga il campo sfruttamento del DDM (digital dense model) ai non esperti di rilievo. Dopo l'esame visivo, l'esportazione di 2D (ortoimmagine in mappa di riflettanza) consente una facile mappatura del degrado materico e facilita nella restituzione di disegni utilizzati tradizionalmente nel rilievo finalizzato al restauro (Figura 4).

Una lettura critica delle acquisizioni è necessaria per sviluppare un'analisi di tipo quantitativo: prima di tutto una singola scansione garantisce un'affidabilità migliore nel confronto dei valori di R tra aree omogenee. In realtà la questione principale, utilizzando diverse scansioni (modello allineato), è la variabilità della distanza della stazione e dell'angolo di inclinazione del raggio.

Abbiamo organizzato lo studio delle mappe di riflettanza sul fronte principale della Villa con i seguenti passi: scelta della griglia di forma quadrangolare, identificazione massimi e minimi in aree simili, calcolo della media. La gamma di variabilità della R, espressa in percentuale, è 20-40 per le torri, mentre per il corpo centrale è 20-50. La distanza di acquisizione, che va da 15 mt (parte inferiore) a 25 mt (parte superiore), non mostra influenze apprezzabili. Questi dati risultano coerenti con spettri di laboratorio in letteratura [11], da cui risulta un valore di riflettanza totale (corrispondente a $\lambda=532$ nm) pari a 25% per l'intonaco di calce oca giallo. Non è possibile ottenere risultati attendibili sulla natura dei materiali tramite i valori R; tuttavia con il potenziamento della ricerca in questo campo ci si può aspettare la codifica delle risposte di materiali diversi. Il metodo che qui suggeriamo genera datasets integrati per navigare, anche in modo dinamico, i modelli di rilievo architettonico: queste analisi sono utili e facili da impiegare.

4. INTEGRAZIONI TRA MAPPE DI RIFLETTANZA E IMMAGINI TERMOGRAFICHE. IL CASO STUDIO DELLA CHIESA DI SAN FILIPPO A CAGLI

L'impiego della termografia all'infrarosso in edilizia non è principalmente rivolto alla determinazione dell'umidità nelle murature, quanto piuttosto alla valutazione delle prestazioni di isolamento termico dell'edificio in esame. Tuttavia si è visto che tale sistema permette di individuare la presenza di umidità con la mappatura delle aree. Si presenta come un metodo indiretto, no-contact, perfettamente in linea quindi con l'idea di rilievo nel campo della diagnostica e del restauro di manufatti storici. Il principio si basa sulla misurazione della distribuzione di temperature superficiali di un oggetto. Un'anomalia nella distribuzione di temperature è indice di un possibile difetto, che sia esso un ponte termico, un distacco di intonaco, un materiale differente o la presenza di acqua all'interno della muratura. Si può affermare quindi che la termografia ha il vantaggio di essere un metodo non distruttivo molto efficace e di fornire una rapida lettura delle aree interessate da fenomeni di risalita capillare.

L'obiettivo di questo caso studio era la messa a punto di una procedura ad hoc di integrazione dei dati tale da creare un sistema informativo multilayer per l'analisi e la diagnosi. Primo risultato di questa sovrapposizione è la possibilità di operare una diagnostica preliminare tramite valore di riflettanza in situazioni di umidità evidente riscontrate a livello visivo prima, e con l'aiuto della termocamera poi. Naturalmente questa esperienza è concepita per fare una valutazione qualitativa riguardo una possibile

correlazione tra variazioni di riflettanza in presenza di infiltrazioni di acqua. Va ricordato infatti che, operando su una porzione di un edificio storico, in condizione reali non controllate in regime di temperatura stazionario, non è possibile ottenere risultati quantitativi.

Il manufatto in oggetto è chiuso al pubblico dal 16 febbraio 2012 per presunti danni provocati da abbondanti nevicate. In questo edificio monumentale di proprietà ecclesiastica oltre alle lesioni molto marcate su archi portanti, volte, controfacciata e cornicioni sono presenti copiose infiltrazioni d'acqua piovana che interessano in particolar modo la cupola (Figura 5). Gli strumenti utilizzati sono stati il laser scanner Leica C10 e la termocamera Infratec VarioCam HD, la cui risoluzione di 1024 x 768 pixel soddisfaceva al meglio le nostre esigenze. L'area scelta per l'acquisizione è quella maggiormente interessata dai fenomeni di degrado superficiale, al di sotto della cupola. La scelta del posizionamento della presa laser ha mirato alla riduzione delle zone d'ombra valutando adeguatamente l'angolo presa, in modo da garantire la copertura della maggior parte dell'area interessata. La griglia di scansione utilizzata doveva garantire una buona confidenza con l'oggetto e con la risoluzione dei termogrammi. Per ottimizzare la mappatura si è deciso di realizzare un'acquisizione termografica a panoramica sferica con centro nodale collimato al centro di presa laser, posizionando i due dispositivi sul medesimo cavalletto tripode e utilizzando la testa sferica Nodal Ninja 3 (Figura 5).

Prima dell'acquisizione in sito è stata necessaria una calibrazione dei macchinari in laboratorio. La testa sferica compensa in quota la posizione della termocamera e tramite le slitte di traslazione nei tre assi vengono calibrate le rotazioni yaw, pitch e roll per evitare l'errore di parallasse. Vanno poi determinati gli angoli di rotazione, verticale

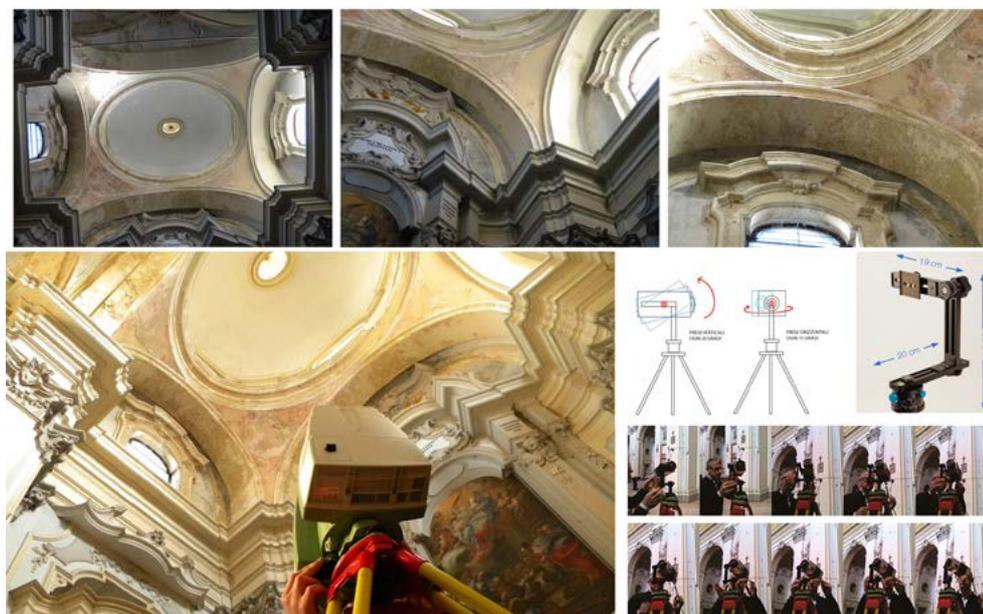


Figura 5 – (in alto) Chiesa di San Filippo a Cagliari: foto della cupola in cui emerge il degrado dovuto alla presenza di infiltrazioni. (in basso) Acquisizioni su tripode con laser scanner e termocamera.

e orizzontale, che garantiscano un adeguato overlap fra gli scatti.

In questo caso, si è scelto di acquisire prese orizzontali ogni 15° e prese verticali ogni 20°, a cui aggiungere scatti verticali a 90° e a -90°, in modo da coprire completamente la sfera.

L'elaborazione dei dati provenienti dalla scansione laser è affidata al software Leica Cyclone. Il processo di mappatura e sovrapposizione dei termogrammi e delle mappe di riflettanza, ha richiesto numerosi fasi e l'utilizzo di diversi software di unione e trasformazione delle immagini.

La prima fase è stata quella di esportare i termogrammi in formato bitmap in falsi colori (successivamente in scala di grigi) ed eseguire il montaggio delle varie immagini termografiche con il programma di stitching, PTGui Pro. Ottenuta l'immagine equirettangolare, è stata poi trasformata in cubica con Pano2 VR per l'importazione in Cyclone (Figura 6).

Ponendosi in una modalità di triplice lettura si hanno a disposizione diversi layers sovrapposti in cui poter registrare delle variazioni cromatiche (Figura 7).

Nel caso a è possibile osservare che il degrado, come si evince dall'immagine fotografica, è molto evidente: ci sono numerosi distacchi dell'intonaco dovuti a infiltrazioni di acque meteoriche. Correlando l'esame visivo fotografico con l'esame delle variazioni in falsi colori della mappe di riflettanza si può notare come le variazioni di intensità della riflettanza ricalcano in maniera molto fedele l'andamento del degrado. Dalla lettura termografica, invece, la parte esaminata risulta abbastanza omogenea, non sembrano esserci variazioni di temperatura. Questo ci fa ipotizzare che,

nonostante le infiltrazioni di umidità ci siano state e abbiano causato il distacco dell'intonaco in passato, al momento della presa la parte delle vele sotto la volta risulta asciutta. In questo caso la variazione di riflettanza è strettamente correlata alla variazione colorimetrica dovuta al degrado superficiale.

Nel caso b, la lettura su più livelli ci fornisce delle informazioni diagnostiche differenti. Stando alla sola immagine fotografica di una delle paraste sotto la volta si poteva dedurre che fosse una zona priva di particolari fattori a rischio. Grazie ai dati provenienti dalla termocamera, validati dalle variazioni di riflettanza laser, si può ipotizzare invece la presenza di umidità non visibile in superficie.

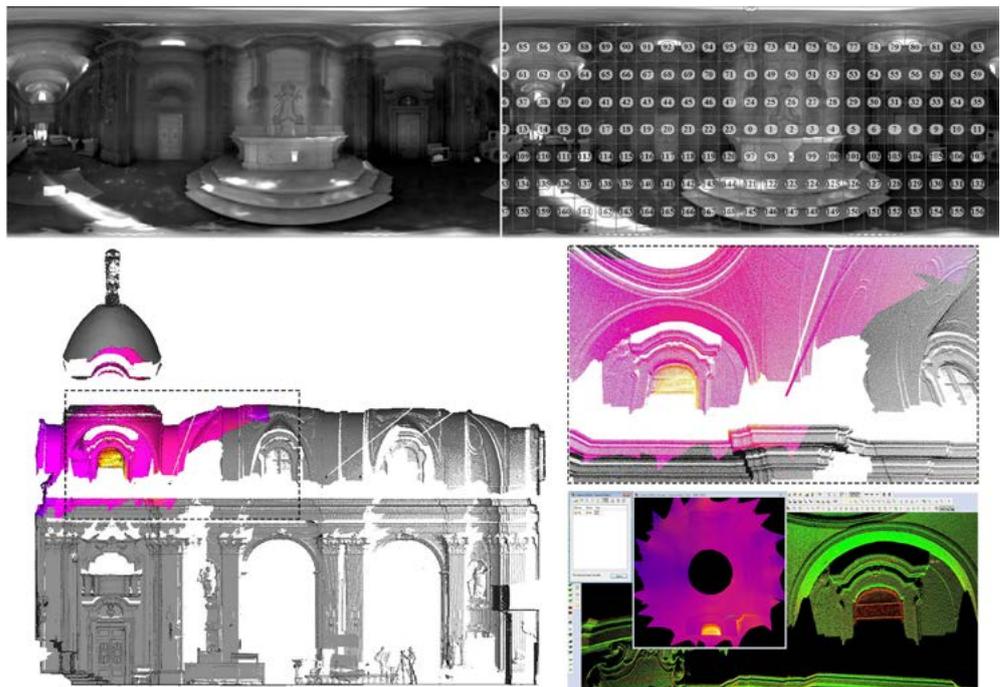
Si dimostra, quindi, come l'integrazione di dati geometrici e termici consente l'individuazione di zone a rischio di degrado superficiale a fronte della presenza di umidità invisibile ad occhio nudo.

5. CONCLUSIONI

La presente metodologia di studio sviluppa un approccio interattivo di conoscenza e analisi degli edifici antichi, permettendo di ottenere informazioni essenziali per l'intervento di recupero e restauro.

Il rilievo monostrumentale così condotto comprende anche una fase diagnostica sul manufatto nel suo complesso, indagandone tutti gli aspetti metrici, morfologici, materici e di degrado. Fornire letture multilayer, così come quelle presentate in questo studio, è un'opportunità straordinaria per una corretta e più accurata individuazione degli effetti del degrado di un manufatto storico.

Figura 6 – (in alto) Equirettangolare completa da acquisizione termocamera in scala di grigi. (in basso) Prima prova di mappatura della nuvola di punti nel software Cyclone. L'immagine termica colorata inquadra la sola area nei pressi della cupola, ma è stata acquisita ed inserita come panoramica sferica in proiezione cubica. La nuvola di punti è visualizzata in scala di grigio nella sezione a sinistra e in alto a destra, in falsi colori di riflettanza in basso a destra.



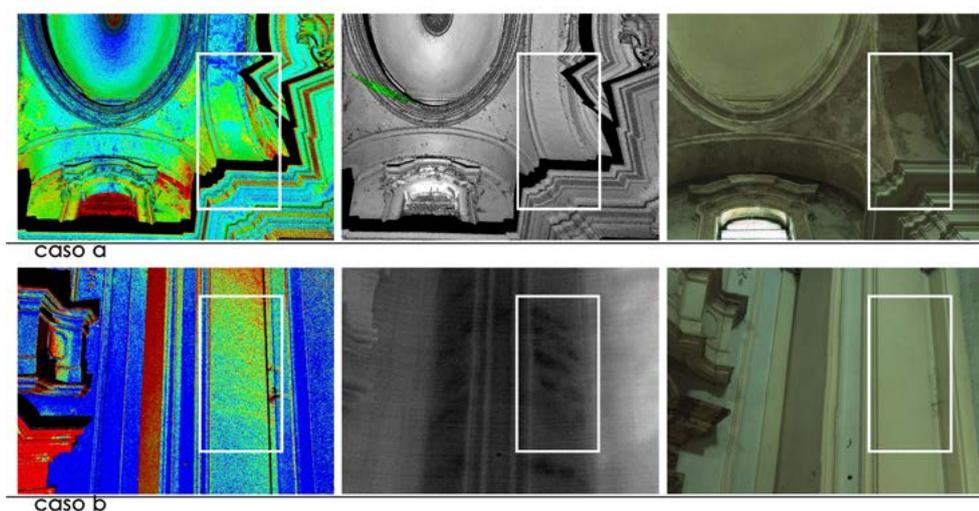


Figura 7 –Sistema multi-layer. Screenshot della nuvola in falsi colori di riflettanza, in mappatura termografica e a colori. I due casi mostrano nelle aree evidenziate interessanti risultati di correlazioni fra le grandezze.

L'indagine sulle cause rimane affidata a analisi specifiche. Ma l'innovatività del presente approccio consiste nel basso costo, nella molteplicità dei dati e nella loro accuratezza, che possono indirizzare le scelte più opportune per test a contatto e/o prove distruttive, su aree più ristrette e mirate, con il vantaggio di circoscrivere il campo di indagine e ridurre le fasi in situ, attraverso il massimo sfruttamento degli output del rilievo.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il CISA Palladio (Direttore Guido Beltramini) e il Sig. Vittorio Trettenero, proprietario di Villa Trissino, per aver permesso le acquisizioni laser. Il rilievo è stato realizzato all'interno del progetto Palladio Library, promosso da CISA Palladio e finanziato da Arcus (Responsabile scientifico: Marco Gaiani). Il caso studio della Chiesa di San Filippo a Cagliari è stato oggetto della tesi di laurea di Maria Elena Marani, Relatore Prof. Paolo Clini, correlatore Prof. Marco D'orazio; alcune delle fasi sperimentali sono state condotte con la collaborazione del Prof. Nicola Paone e del Dott. Edoardo Copertaro.

BIBLIOGRAFIA

[1] P.O. Gold, E. Cowgill, O. Kreylos, R.D. Gold, "A terrestrial lidar-based workflow for determining three-dimensional slip vectors and associated uncertainties", *Geosphere*, Volume 8, Issue 2, pp. 431-442, 2012.

[2] K. Themistocleous, A. Nisantzi, A. Agapiou, D. D. Alexakis, D. G. Hadjimitsis, V. Lysandrou, S. Perdikou, A. Retalis, N. Chrysoulakis, "Long Term Monitoring of Air Pollution on Monuments and Cultural Heritage Sites in Cyprus Using Satellite Remote Sensing", *International Journal of Heritage in the Digital Era* Volume 1, Number 1 / March 2012.

[3] C. E. Wittich, T. C. Hutchinson, R. L. Wood, F. Kuester, "A methodology for integrative documentation and characterization of culturally important statues to support seismic analysis", *Progress in Cultural Heritage*

Preservation Lecture Notes in Computer Science, Volume 7616, pp 825-832, 2012.

[4] J. Kotte, "An investigation of quantifying and monitoring stone surface deterioration using three dimensional laser scanning", *Scholarly Commons, repository.upenn.edu/hp_theses/128*, 2009.

[5] M. Zimbardo, "Valutazione dell'alterazione con laser scanner negli ammassi a struttura orientata e nella diagnostica dei beni monumentali", *Meccanica dei Materiali e delle Strutture*, 2011.

[6] F. Coren, D. Visintini, M. Balzani, P. Sterzai, G. Prearo, F. Uccelli, "Un algoritmo per la correzione radiometrica di dati laser terrestri", *ASITA conference proceedings 2005*, Catania; 11/2005.

[7] Rizzi A. et al., 2007 (b), "Digital preservation, documentation and analysis of paintings, monuments and large cultural heritage with infrared technology, digital cameras and range sensors", *Proceedings of the XXI CIPA Conference "AntiCIPAting the Future of Cultural Past"*, held in Athens, Greece, 1-6 October 2007.

[8] Avdelidis N. P., Moropoulou A., 2004, "Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures", *Journal of Cultural Heritage*, vol. 5, pp. 119 - 127.

[9] F. Gugliermetti, F. Bisegna, L. Monti, "The "ID card" of ancient materials: spectral signature, colour and thermal analysis. A tool for the monitoring and conservation of the archaeological heritage", *Journal of the International Colour Association* 8, 68-75, 2012

[10] Y. Huang, J. W. Wu, "Infrared thermal image segmentations employing the multilayer level set method for non-destructive evaluation of layered structures", *NDT&E International* 43, 34-44, 2010

[11] D.Paoletti, D.Ambrosini, S.Sferra, F. Bisegna, "Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation", *Journal of Cultural Heritage* 14 (2013) pp. 116-121

[12] G. Beltramini, P. Guidolotti, "Andrea Palladio. Atlante delle Architetture", Venezia, Marsilio Editore, 2001.

[13] L. Puppi, D. Battilotti, *Andrea Palladio*, Milano, Electa, Electa Architettura Paperback, 1999.

[14] http://www.portaleagentifisici.it/fo_ro_artificiali_riflettanza_materiali.php?&lg=IT (April 2013)