

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DICAM

DOTTORATO DI RICERCA IN

Ingegneria Geomatica e Trasporti

Ciclo XXIV

**Settore scientifico disciplinare: ICAR 06**

**Settore concorsuale di afferenza: 08/A4**

## **CONTRIBUTI DELLA GEOMATICA**

# **NELLA SALVAGUARDIA E GESTIONE DEI BENI CULTURALI**

tesi di Dottorato di:

**Ing. MARCELLA MANNINA**

Coordinatore:

**Prof. Ing. GABRIELE BITELLI**

Relatore:

**Prof. Ing. GABRIELE BITELLI**

**Esame finale anno 2012**



Benedetto sei tu, Signore, Dio dei nostri padri,  
degnò di lode e di gloria nei secoli.

Daniele 3,52

## **PAROLE CHIAVE**

BENI CULTURALI  
LASER SCANNER  
FOTOGRAMMETRIA  
TERMOCAMERE  
CLASSIFICAZIONE

# INDICE

Parole chiave	3
Indice	4
Riassunto	7
Abstract	9
Capitolo 1 – INTRODUZIONE	
1.1 Introduzione	11
1.2 Tecniche e metodologie della geomatica per la documentazione e la gestione del rischio	12
1.3 Obiettivi e organizzazione della tesi	13
1.4 Descrizione dei casi di studio affrontati	14
Capitolo2 – BENI CULTURALI: DOCUMENTAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO	
2.1 Alcune definizioni di bene culturale	16
2.2 Il patrimonio culturale e la normativa di riferimento	17
2.3 La catalogazione	17
2.4 La carta del rischio del patrimonio culturale	19
2.5 La documentazione dei beni culturali ed il progetto di ricerca europeo EU-CHIC	28
2.6 Il SIRBeC, un sistema regionale	33
2.7 Il monitoraggio del patrimonio culturale	36
2.8 La documentazione dei beni culturali e la Geomatica	38
2.9 Alcuni esempi tratti dalla letteratura	42
Capitolo 3 – SISTEMI PER IL RILIEVO TRIDIMENSIONALE	
3.1 Introduzione	47
3.2 Il sistema per il rilievo tridimensionale image-based	48
3.2.1 Le prese	49
3.2.2 Le Equazioni di collinearità modificate	51
3.2.3 Calcolo dell'orientamento esterno: bundle adjustment o triangolazione a stelle	
Proiettive	52
3.2.4 Space resection o modello a vertice di piramide	53
3.2.5 Self-calibration e considerazioni sulla geometria di progetto, alcuni risultati	

da bibliografia	54
3.2.6 L'ortofoto	56
3.3 Il sistema per il rilievo tridimensionale range-based	56
3.3.1 Ricezione ed elaborazione del segnale	58
3.3.1.1 I sistemi a triangolazione laser: laser con sensore a singol spot e coassiale col raggio laser	58
3.3.1.2 Sensori a lama di luce	60
3.3.1.3 Sensori a luce strutturata e codificata	61
3.3.2 Sensori basati sulla misura di distanza	62
3.3.3 La progettazione ed il rilievo laser scanner	67
3.3.4 Tecniche di allineamento delle nuvole di punti laser	70
3.3.4.1 Metodo punto-punto	71
3.3.4.2 Metodo punto-piano	72
3.3.5 Settori d'applicazione della tecnologia laser scanner	73
3.3.6 Integrazione tra i due sistemi di rilievo tridimensionale: Image-based e range based	74

#### Capitolo 4 – SISTEMI D'INDAGINE SPETTRALE: LE CAMERE TERMICHE

4.1 Le camere termiche	75
4.2 Aspetti geometrici delle immagini termiche	78
4.3 Problematiche sulla calibrazione del sensore di una camera termica	81
4.3.1 Approssimazione dei parametri con Photo-Modeler	82
4.3.2 Esempio di procedura di calibrazione del sensore termico con reticolo di calibrazione spaziale, eseguendo una self-calibration	82
4.4 Alcuni esempi di integrazione tra diverse tecnologie: laser scanner e termo camera	84
4.5 Calibrazione e orientamento delle immagini IR:alcune considerazione tratte da Bibliografia	85

#### Capitolo5 – CASO DI STUDIO: APPLICAZIONE DI ALGORITMI DI CLASSIFICAZIONE SU UN AFFRESCO RESTAURATO

5.1 La classificazione delle immagini	87
5.2 La classificazione pixel – based	90
5.3 La classificazione object – based	90

5.4	Algoritmi di classificazione non supervisionata e visionata	91
5.5	La valutazione dell'accuratezza della classificazione	93
5.6	La matrice di errore	95
5.7	Misure d'accuratezza	96
5.8	Defieniens Developer e l'approccio object– oriented	98
5.9	Esperienze di classificazione tratte da letteratura in ambiti di beni culturali	101
5.10	La cupola della basilica di Santa Maria del Monte di Cesena	105
Capitolo 6 – CASO DI STUDIO INTEGRAZIONE E TECNICHE NEL RILEVAMENTO DI UNA GRANDE PARTE AFFRESCATA		
6.1	Introduzione	115
6.2	L'affresco	116
6.3	Le operazioni di rilievo dell'affresco	120
6.3.1	Il posizionamento dei target multi – sensore	120
6.3.2	La calibrazione delle immagini termiche	123
6.3.3	Il rilievo laser acquisizione e registrazione	127
6.3.4	Il rilievo fotogrammetrico e termico	129
6.4	Ortofoto digitale	132
6.5	L'ortofotomosaico delle termiche	136
6.6	Conclusioni	140
Capitolo 7–CONCLUSIONI		142
Bibliografia		145
Appendice		151
Appendice 2		153
Ringraziamenti		156

## RIASSUNTO DELLA TESI

Il territorio italiano presenta una grandissima ricchezza nel campo dei Beni Culturali, sia mobili che immobili; si tratta di un patrimonio di grande importanza che va gestito e tutelato nel migliore dei modi e con strumenti adeguati, anche in relazione ai problemi ad esso legati in termini di manutenzione e di salvaguardia dai fattori di rischio a cui può essere esposto. Per una buona conoscenza del Patrimonio Culturale, è fondamentale un'acquisizione preliminare di informazioni condotte in modo sistematico e unitario, che siano diffuse ed organiche, ma anche utili ad una valutazione preventiva e ad una successiva programmazione degli interventi di restauro di tipo conservativo. In questo ambito, l'impiego delle tecniche e tecnologie geomatiche nel campo dei Beni Culturali, può fornire un valido contributo, che va dalla catalogazione e documentazione del bene culturale al suo controllo e monitoraggio. Oggigiorno il crescente sviluppo di nuove tecnologie digitali, accompagnato dai notevoli passi avanti compiuti dalle discipline della geomatica (in primo luogo topografiche e fotogrammetriche), rende possibile una efficace integrazione tra varie tecniche, favorita anche dalla diffusione di soluzioni per l'interscambio dati e per la comunicazione tra differenti dispositivi. Lo studio oggetto della presente tesi è maturato nel corso del Dottorato di Ricerca in Ingegneria Geomatica e dei Trasporti svolto presso il Dipartimento DICAM dell'Università di Bologna e si propone, di approfondire gli aspetti legati all'uso delle tecniche e tecnologie della Geomatica, per mettere in risalto le condizioni di un bene ed il suo stato di degrado. Per la gestione e la salvaguardia di un bene culturale, si presenta il SIT Carta del Rischio, che evidenzia le pericolosità legate al patrimonio, e come esse sommate alla vulnerabilità di un singolo bene, contribuiscano all'individuazione del grado di rischio. Nel primo capitolo, dopo un'introduzione generale riguardante i beni culturali, ed alcune problematiche legate al rischio ed alla loro gestione e salvaguardia, vengono presentati e discussi gli obiettivi della tesi, ed i casi di studio che sono stati affrontati negli ultimi capitoli. Il secondo capitolo è dedicato alla Carta del Rischio ed al progetto di ricerca europeo EU-CHIC (European Cultural Heritage Identity Card), riportando a seguire nelle ultime pagine, alcuni esempi tratti dalla letteratura, tra i più significativi sull'integrazione delle tecniche e tecnologie

geomatiche. Il terzo capitolo illustra le tecniche di misura adottate per il rilevamento (sensori attivi e passivi) dei beni culturali, descrivendo i sistemi di acquisizione tridimensionale image-based e range-based, adottati nelle operazioni di rilievo della sperimentazione del sesto capitolo. Nel quarto capitolo, vengono presentati i sistemi di acquisizione all'infrarosso "le termocamere", illustrandone i loro vantaggi soprattutto quando sono richiesti, con riferimento ad un particolare bene culturale, interventi di risanamento conservativo, condotti secondo operazioni di rilievo che supportano metodi d'indagine non invasivi e non distruttivi, tali da non comprometterne la sua integrità. Nel capitolo vengono fatte alcune considerazioni sulle tecniche di calibrazione del sensore termico, ponendo particolare attenzione verso la tecnica self-calibration, che è stata adottata nel corso della sperimentazione presentata nel sesto capitolo. Tale tematica, oggi è di notevole interesse, anche per l'ampia gamma di applicazioni per le quali le termocamere vengono comunemente utilizzate, specie in diversi settori di ricerca che vanno dal campo dell'ingegneria civile e industriale, all'architettura dei Beni Culturali. Il quinto capitolo si riferisce alle tecniche di classificazione pixel-based e image-based e presenta, oltre ad alcune esperienze di studio tratte dalla letteratura, un esempio di co-registrazione e di classificazione del dato, su un affresco settecentesco restaurato dopo la seconda guerra mondiale: il software adottato è Definiens Developer 7.0.

Nel sesto capitolo, sono state descritte le operazioni di rilievo tridimensionale, condotte su una grande parete decorata ad affresco, posta all'interno di una biblioteca carmelitana oggi sede del teatro San Martino di Bologna. L'affresco, opera di Lucio Massari (1569-1633), d'epoca barocca, si trova ad oggi in condizioni di degrado e non in un buono stato di conservazione, così la disponibilità di un rilievo rigoroso è utile per il supporto di eventuali operazioni di restauro. L'esperienza, si è avvalsa di tutte le tecniche e tecnologie illustrate in precedenza, adottando soluzioni di un certo interesse per potere realizzare l'effettiva integrazione dei diversi dataset adottati quali: la fotogrammetria, il laser a scansione e la termografia. Nelle conclusioni, si rimarca il beneficio dell'integrazione delle diverse tecniche e tecnologie geomatiche per la salvaguardia e la gestione dei Beni Culturali, e si esprimono alcune valutazioni sull'opportunità dell'adozione dell'una o dell'altra tecnica in differenti contesti, anche in base ai fattori economici, a differenti situazioni logistiche ed ai requisiti ed obiettivi degli interventi.

---

## ABSTRACT

The Italian territory offers a wide range of treasures in the field of Cultural Assets, both real property and personal property; it is a property of great importance which needs an accurate management and preservation in the best way and by means of appropriate tools, also with regard to problems linked to it in terms of maintenance and safeguard from risk factors to which it may be involved.

For a good knowledge of the Cultural Heritage it is fundamental to get a previous survey of information run in a systematic and unitary way which are widespread and organic but also useful for preventive assessment and a following planning of the conservative restoration work. In this case, the use of geomatic technologies and techniques in the field of cultural assets, can provide a substantial contribution which includes from the classification and documentation of the cultural asset to its check and monitoring. Nowadays the increasing development of new digital technologies, added by remarkable steps forward got by the subject of geomatic ( in the first place the topographic photogrammetric ones), makes possible an efficient integration among varied the techniques, helped also by spread of solutions to improve the data import-export movement and the communication of different devices.

The study, subject of this thesis, has grown during the P.H.D. in Geomatic and Trasport Engineering, carried out by DICAM Department of the University of Bologna. It intends to investigate the aspects linked to the use of the techniques and technologies of Geomatic to focalize the condition of the assets and its deterioration.

In order to gain the management and the safeguard of cultural asset we can use the Risk Map, which represents territorial interest sights, this map underlines the dangers linked to the heritage assets, and it explains how these dangers, added to the vulnerability of a single assets, can contribute to the determination of the risk degree.

In the 1<sup>st</sup> chapter, after a general introduction regarding the cultural assets and some considerations linked to the risk and to their management and safeguard, the objects of the thesis are presented and discussed and some cases are shown in the final chapters. The 2<sup>nd</sup> chapter is assigned to the risk map and to the project of European research EU-CHIC ( European Cultural Heritage Identity Card), reporting some examples from literature in the final pages, among the most relevant ones about the joining of the geomatic techniques and technologies.

The 3<sup>rd</sup> chapter shows the measure survey techniques (active and passive sensor) for the cultural assets describing the tridimensional image-based and range-based survey system used in the surveying procedure of the experiment of the sixth chapter.

In the 4<sup>th</sup> chapter the survey infrared systems, the thermocameras are shown describing their advantages particularly when they are required with reference to a specific cultural assets which asks for conservative restoration works done according to survey techniques which support research methods non-invasive and non-destructive such as not to damage its own integrity.

In this chapter some reflections about the calibration techniques of thermic sensor are reported, emphasizing especially the self-calibration technique which has been used during the experiment shown in the 6<sup>th</sup> chapter. This subject is extremely interesting today also for a wide range of application for which the thermocameras are usually utilized, particularly in different research sectors which go from the civil and industrial Engineering field to the architecture of the Cultural assets.

In the 5<sup>th</sup> chapter is referred to the pixel-based and image-based classification techniques and its shows, besides some study experiments taken from literature, an example of co-registration and classification of a datum on an eighteenth century fresco restored after the Second World War: the software taken is Definiens Developer 7.0.

In the 6<sup>th</sup> chapter, are described the tridimensional survey actions, done on a large wall decorated by fresco, situated inside a Carmelite library which is the seat of the “San Martino” theatre today in Bologna.

The fresco, work by Lucio Massari (1569-1633), belonging to Baroque period, is situated in condition of degradation and it doesn't show a good preservation so that the application of strict and accurate survey is useful for the following possible restoration works. In order operate in this case we make use of all the techniques and technologies described before, finding interesting solutions reach the real integration of different datasets adopted such as: photogrammetry, laser scanner and thermography.

In short, we underline the benefit and the help of the integration of different geomatic techniques and technologies for the safeguard and the management of the Cultural Assets, then assessment and reflectors are expressed about the opportunity of the use of this or that techniques in different context, also according to economic factors, to different logistic situations and to some requirements and objectives of restoration works.

**Capitolo 1****INTRODUZIONE****1. Introduzione**

Dagli inizi degli anni '90 ai nostri giorni l'uso integrato di sistemi digitali ha particolarmente investito il settore dell'architettura e dell'archeologia ed in speciale modo il campo dei Beni Culturali, ambito che ha suscitato un marcato interesse in società di ricerca internazionali (ISPRS), ministeri ed organi di tutela (MiBAC), organizzazioni internazionali indirizzate alla conservazione e alla protezione dei beni culturali (ICOMOS) e comitati scientifici per il rilevamento (CIPA), ricalcando il messaggio lanciato dall'UNESCO di collaborazione tra le nazioni nelle aree dell'istruzione, scienza, cultura e comunicazione. Secondo l'ultimo aggiornamento effettuato nella riunione del Comitato per il Patrimonio dell'Umanità a Parigi il 19 giugno 2011, l'Italia è la nazione a detenere il maggior numero di siti inclusi nella lista dei patrimoni dell'umanità (47 siti).[1]

Il territorio italiano presenta dunque una grandissima ricchezza nel campo dei Beni Culturali, sia mobili che immobili; si tratta di un patrimonio di grande importanza che va gestito e tutelato nel migliore dei modi e con strumenti adeguati, anche in relazione ai problemi ad esso legati in termini di manutenzione e salvaguardia dai fattori di rischio a cui può essere esposto. Per operare in tale maniera al livello nazionale e non solo, requisito essenziale per la valorizzazione di questo patrimonio è senza dubbio la sua conoscenza, sia nell'individuandone di una sua appartenenza storico-artistica che nella definizione di una sua fisicità rappresentata da parametri quali posizione geografica, geometria, caratteristiche radiometriche e di colore. Il campo dei beni culturali è oggi uno dei più significativi per le potenzialità offerte dalle tecniche e tecnologie geomatiche, che rappresentano l'evoluzione moderna dei metodi di rilevamento. Le nuove tecnologie informatiche su base digitale hanno reso possibile il fiorire di nuove tecniche di tipo geo-topo-cartografico sempre più affinate all'esigenza espressa da figure specializzate nel campo della diagnostica e della conservazione dei beni culturali. Al rilevatore compete spesso la risoluzione di problematiche specifiche sul campo, ad esempio il mancato o difficoltoso accesso diretto a porzioni di un particolare oggetto da misurare oppure la necessità di accuratezze diverse per parti diverse, sicché un approccio integrato delle tecniche, preceduto da un'attenta progettazione del rilievo, è spesso essenziale per condurre con successo un rilievo con risparmio di tempo e mezzi.

---

[1] Da [http://it.wikipedia.org/wiki/Patrimonio\\_dell'umanit%C3%A0](http://it.wikipedia.org/wiki/Patrimonio_dell'umanit%C3%A0) consultazione Febbraio 2012

E' evidente come il vantaggio nell'uso integrato delle nuove tecnologie minimizzi i limiti dati dall'uso delle singole strumentazioni e permetta di massimizzare il rendimento del sistema di rilievo. Tale approccio vede l'integrazione come aumento delle informazioni rese disponibili dal numero dei prodotti risultanti a fine processo e come aumento del grado di accuratezza per evitare il Per esempio, l'integrazione delle informazioni tridimensionali, attraverso dati acquisiti da diverse strumentazioni, introduce una certa quota di ridondanza che rende minima l'aliquota dell'incertezza sulla misura sia in fase di rilievo che in fase di creazione del modello digitale, permettendo così di raccogliere una quantità di dati geometrici per la riproduzione di modelli a risoluzione variabile. Così mentre singole tecniche presentano accuratezze più spinte, come nel caso della fotogrammetria rispetto ai sistemi di rilievo range based, l'integrazione delle tecniche permette di giungere ad uno studio d'indagine del modello più approfondito e di mettere in luce aspetti che non erano in principio noti o dei quali si volevano avvalorare le ipotesi d'indagine iniziali. E' il caso della costruzione di modelli fotorealistici dove le informazioni geometriche fornite da una strumentazione per l'acquisizione tridimensionale sono fuse insieme a quelle radiometriche fornite da una fotocamera. Oppure delle tecniche di data-fusion che permettono una rapida visualizzazione anche con variazione di scala; dalla totalità di un'area indagata fino al particolare dettaglio che si vuole preservare e monitorare nel tempo. Le nuove tecniche e tecnologie geomatiche offrono la possibilità di ottenere nuovi prodotti non solo in attività di rilievo, ma anche nella rappresentazione e nella visualizzazione, con l'obiettivo di fornire una descrizione metricamente rigorosa in sostegno delle attività di ricostruzione e di restauro.[2]

## **1.2 Tecniche e metodologie della geomatica per la documentazione e la gestione del rischio**

L'impiego delle tecnologie e tecniche geomatiche nel campo dei Beni Culturali, si colloca su due principali linee di intervento (Bitelli e Mannina, 2010):

- documentazione di beni mobili ed immobili a fini di studio, conoscenza, conservazione e restauro;
- controllo e monitoraggio dello stato di beni mobili ed immobili;

La documentazione e l'archiviazione dello stato di fatto di un monumento sono fondamentali in caso si verifichi la necessità di interventi di ricostruzione o conservativi.

La possibilità di rilevare con notevole accuratezza geometrie molto complesse permette lo studio approfondito delle tecniche costruttive, consentendo la percezione e l'analisi di particolari

---

[2][http://www.heritage.unibo.it/HeritageEn/research/Surveying\\_and\\_Monitoring\\_of\\_Cultural\\_Heritage.htm](http://www.heritage.unibo.it/HeritageEn/research/Surveying_and_Monitoring_of_Cultural_Heritage.htm)  
consultazione febbraio 2012.

geometrici difficilmente rilevabili con le tecniche tradizionali. Le discipline del rilevamento hanno affinato nel corso del tempo le tecniche di acquisizione dei dati al passo con lo sviluppo tecnologico; le tecnologie introdotte recentemente permettono addirittura di rilevare e rappresentare con notevole accuratezza oggetti tridimensionali come sculture e reperti archeologici, nonché elementi di grandi dimensioni quali strutture architettoniche. Tali tecnologie innovative consentono di svolgere una serie di operazioni di controllo e monitoraggio che si possono applicare sia all'oggetto che all'ambito territoriale in cui esso si trova. Simili applicazioni indirizzano verso una moderna gestione integrata del rischio; perché tutelare un bene significa infatti in primo luogo conoscere il livello di rischio a cui esso è esposto. Un interessante esempio di visione ad ampio spettro del bene nel suo contesto territoriale e delle situazioni di rischio a cui è esposto è nel nostro paese la Carta del Rischio, proposta dall'Istituto Centrale del Restauro.

### **1.3 OBIETTIVI ED ORGANIZZAZIONE DELLA TESI**

La tesi intende affrontare il problema dell'utilizzo della geomatica e di altre tecnologie che possano correlarsi all'uso degli strumenti geomatici nella documentazione e salvaguardia dei Beni Culturali, con un particolare interesse rivolto verso la tematica attuale della gestione del rischio.

A tal proposito nel prossimo capitolo vengono presentati la Carta del Rischio italiana ed il progetto di ricerca Europeo EU-CHIC; il primo, strumento significativo di gestione e controllo del nostro patrimonio culturale a livello nazionale (ha suscitato anche notevole interesse in ambito internazionale), ed il secondo, finalizzato alla stesura di un procedura di individuazione univoca di un bene immobile in particolare a livello europeo (la carta d'identità del bene culturale).

In particolare al fine di proporre una metodologia unificata, un'attività fondamentale del progetto EU-CHIC è stata quella di censire i sistemi di catalogazione dei Beni Culturali in uso nei vari paesi europei, elaborando un apposito censimento.

I due esempi considerano come fondamentale la raccolta di informazioni che possano essere una dettagliata documentazione, specie quando sono richieste singolari misure di tutela e di salvaguardia a livello del singolo bene immobile o a scala territoriale. Successivamente vengono passati in rassegna alcuni casi di studio significativi, individuati in letteratura come esempi di un modello di rilievo per produrre una rappresentazione rigorosa e corretta ai fini di studi particolareggiati di documentazione e controllo. Gli esempi riguardano tecniche integrate quali la fotogrammetria, topografia, laser scanner e termografia. Nel capitolo terzo vengono descritti i sistemi per l'acquisizione tridimensionale le tecniche image e range-based, mentre nel quarto capitolo vengono fatte alcune considerazioni sulle immagini multi-spettrali in particolare sulla

regione dell'infrarosso termico, discutendo alcuni aspetti legati alla geometria delle immagini termiche ed alcune problematiche legate alla calibrazione del sensore di una camera termica. Un moderno approccio geomatico integrato deve potere fare ricorso a tecniche digitali di uso generalizzato, attingendo anche a metodiche che non sono propriamente legate al settore dei Beni Culturali. Nel quinto capitolo vengono illustrate le tecnologie di classificazione ad oggetti e per pixel che vengono attualmente adottate nel telerilevamento satellitare e che sono qui usate nella classificazione di un affresco restaurato. Si tratta di un affresco settecentesco posto sulla cupola della basilica di S. Maria del Monte di Cesena e restaurato dopo la seconda guerra mondiale. La classificazione ha utilizzato immagini multispettrali (colore, fluorescenza, infrarosso) acquisite da parte del Laboratorio M2ADL (Microchemistry And Microscopy Art Diagnostic Laboratory) dell'Università di Bologna. Infine, il capitolo sesto riporta una sperimentazione condotta per l'analisi diagnostica del degrado superficiale presente su una grande parete affrescata del XVII secolo posta all'interno del teatro san Martino a Bologna. L'affresco, opera di Lucio Massari, necessita di interventi di restauro che non possono prescindere da un rilievo accurato, che è stato condotto integrando opportunamente le tecnologie del laser a scansione terrestre, della fotogrammetria e della termografia. Vengono discusse le problematiche incontrate, con particolare riguardo agli aspetti che influenzano la qualità dei singoli dati e della loro fusione, con in primo luogo le problematiche della calibrazione degli strumenti.



Fig.1.3-1 – La Cupola della chiesa di Santa Maria del Monte



Fig.1.3-2 – La sala teatro San Martino.



Fig.1.3-3 – L'affresco di Lucio Massari del XXVII secolo.

**Capitolo2****BENI CULTURALI: DOCUMENTAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO****2.1 Alcune definizioni di Bene Culturale**

La Carta d'Atene del 1931 tiene in considerazione la conservazione del patrimonio artistico e archeologico, mentre la Carta internazionale di Venezia del 1964 relativa alla conservazione e al restauro dei monumenti e siti è la prima documentazione esistente che ci fornisce una chiara definizione di patrimonio dell'umanità: "Intrisi di un messaggio dal passato, i monumenti storici di generazioni di individui permangono nel presente come testimoni viventi delle loro antiche tradizioni. Le persone sono divenute sempre di più consapevoli dell'unità dei valori umani e considerano i monumenti antichi come un patrimonio comune. Si riconosce la comune responsabilità di salvaguardarli per le generazioni future. E' nostro dovere trasmetterle in tutta la ricchezza della loro autenticità". Nell'articolo 1 viene fornita la definizione di monumento storico, specificando che: "essa riguarda non solo grandi opere ma anche più modeste opere del passato che hanno acquisito un significato culturale col passare del tempo". L'attenzione rivolta verso la conservazione del patrimonio culturale attraverso documentazioni internazionali ha visto i suoi primi esordi agli inizi degli anni '50. Tra queste è la Convenzione dell'Aja del 1954, durante la quale viene per la prima volta affrontato il concetto di bene culturale per quanto riguarda la protezione del patrimonio culturale nel caso di conflitti armati. La Convenzione dichiara che è necessario proteggere il patrimonio culturale di tutta l'umanità. La documentazione che segue la Carta di Venezia si concentra su due aspetti:

la definizione dei principi generali di salvaguardia per l'identificazione di nuovi campi per la conservazione e lo sforzo d'integrare i principi di salvaguardia con i sistemi di controllo del territorio e di sviluppo economico e sociale. I due aspetti sono fondamentali in una fase di programmazione delle attività di risanamento conservativo, che partendo da una documentazione completa ai fini della salvaguardia riconoscono la documentazione come fondamentale per un'azione di controllo, rafforzando le potenzialità racchiuse nella documentazione.

Come sottolineato in (Vecco 2010), nella Convenzione dell'Unesco del 1972 riguardante la protezione del patrimonio mondiale culturale e naturale, l'espressione "Patrimonio culturale" figura, includendo i monumenti, il complesso e i siti che sono di valore eccezionale ed universale dal punto di vista della storia, dell'arte e della scienza. La Carta ICOMOS del 2003 contiene i principi per l'analisi, la conservazione e il restauro strutturale del patrimonio architettonico. Secondo l'ultimo

aggiornamento effettuato nella riunione del Comitato per il Patrimonio dell'Umanità a Parigi il 19 giugno 2011, su un totale di 936 siti (di cui 725 beni culturali, 183 naturali e 28 misti) presenti in 153 Nazioni del mondo, l'Italia è la nazione a detenere il maggior numero di siti inclusi nella lista dei patrimoni dell'umanità (47 siti), seguita dalla Spagna (43 siti) e dalla Cina (41 siti).

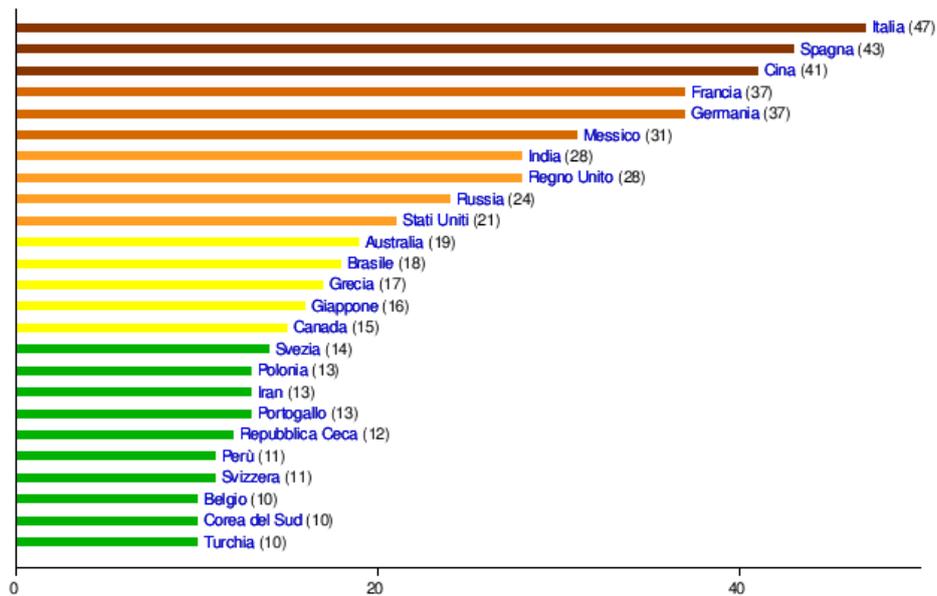


Fig.2.1-1– Nazioni con almeno 10 patrimoni riconosciuti dall'UNESCO.

## 2.2 PATRIMONIO CULTURALE E NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La normativa di riferimento sul patrimonio culturale è il Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 "Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137", che all'art.2 definisce il patrimonio culturale come l'insieme dei beni culturali e dei beni paesaggistici. L'art. 10 del D.Lgs n. 42/2004 riporta che sono definiti beni culturali le cose immobili e mobili appartenenti allo Stato, alle regioni, agli altri enti pubblici territoriali, nonché ad ogni altro ente ed istituto pubblico e a persone giuridiche private senza fine di lucro, che presentano interesse artistico, storico, archeologico o etnoantropologico. Possiamo in questo caso suddividere i beni culturali in tipologie di beni secondo le dispositive della legge Bottai L.1089/1939:

- Beni artistici e storici . Tutte le opere e i monumenti, mobili e immobili, che hanno un riconosciuto pregio artistico o una particolare rilevanza storica;
- Beni architettonici. Tutti gli edifici, gli insiemi architettonici e i monumenti: beni immobili, dunque, cui sia riconosciuta l'artisticità o la pregnanza storica;

- Beni archeologici. I beni e le testimonianze mobili o immobili del passato antico, portati alla luce attraverso lo scavo tecnico o non ancora rinvenuti, ma la cui presenza è accertata in un dato luogo;
- Centri storici. Un insieme urbanistico ed edilizio che non ha mai visto interrotta la sua viabilità abitativa e la sua funzione urbana, né ha mai subito quel processo di ampliamento esterno alle mura antiche che ne avrebbe alterato la veduta;
- Beni librari e biblioteche. Questi beni sono solitamente custoditi tra le mura di biblioteche, che raccolgono i libri, custodendone l'integrità e li rendono accessibili al pubblico. Le biblioteche possono essere statali o dipendenti da enti locali, da enti morali, da monasteri o appartenenti a privati.
- Beni archivistici. Questi beni includono sia documenti, che archivi, ossia quelle istruzioni pubbliche destinate alla conservazione di atti e documenti pubblici e privati che sono di competenza statale.
- Musei. I musei sono delle importanti istituzioni, atti ad ospitare ed esporre una serie di beni mobili, che sono custoditi, catalogati ed esibiti al pubblico (i musei possono essere pubblici o privati).

Invece l'art.134 nel D.Lgs n. 42/2004 definisce come beni paesaggistici tutti quegli immobili ed aree di notevole interesse pubblico. Sono soggetti alle disposizioni di questo Titolo per il loro notevole interesse pubblico:

- le cose immobili che hanno cospicui caratteri di bellezza naturale o di singolarità geologica;
- le ville, i giardini e i parchi, non tutelati dalle disposizioni della Parte seconda del presente codice, che si distinguono per la loro non comune bellezza;
- i complessi di cose immobili che compongono un caratteristico aspetto avente valore estetico e tradizionale;
- le bellezze panoramiche considerate come quadri e così pure quei punti di vista o di belvedere, accessibili al pubblico, dai quali si goda lo spettacolo di quelle bellezze.

Se si pensa che nella sola Lombardia sono presenti più di 8000 monumenti vincolati, e circa più di 100.000 edifici di interesse storico-architettonico; se estendiamo i dati a tutte le regioni e comprendiamo tutte le tipologie di beni culturali e paesaggistici, si può immediatamente percepire la portata e la complessità del problema della gestione di una mole così elevata di dati. La soluzione più efficace per poter riunire e gestire contemporaneamente tutti i dati sul patrimonio culturale, è quella di passare da supporti cartacei e fotografici a supporti informatici: in particolare un moderno Sistema Informativo Territoriale (SIT), utilizzando le tecnologie GIS, consente di visualizzare i contenuti informativi non soltanto con riferimento agli aspetti descrittivi del patrimonio culturale

ma anche con riferimento alla collocazione sul territorio nazionale e ad una molteplicità di informazioni correlate ai beni.

## **2.3 LA CATALOGAZIONE**

Le campagne di inventario e catalogazione del patrimonio culturale nel nostro paese sono gestite dall'Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione (ICCD), con la finalità di “definire le procedure, gli standard e gli strumenti per la catalogazione e documentazione del patrimonio archeologico, architettonico, storico artistico e demo-etno-antropologico nazionale in accordo con le Regioni, gestisce il Sistema Informativo Generale del Catalogo e svolge funzioni di alta formazione e ricerca nel settore della catalogazione” ([www.iccd.beniculturali.it](http://www.iccd.beniculturali.it)). Per catalogazione si intende l'attività di registrazione, descrizione e classificazione di tutte le tipologie di beni culturali. Si tratta di individuare e conoscere i beni, documentarli in modo opportuno e archiviare le informazioni raccolte secondo precisi criteri ([www.iccd.beniculturali.it](http://www.iccd.beniculturali.it)). A livello regionale le campagne di catalogazione vengono condotte attraverso l'uso di software applicativi realizzati sulla base di specifici standard nazionali e distribuiti gratuitamente dalla Regione; va osservato che in genere la fase di catalogazione risulta essere molto complessa e dispendiosa in termini di tempo e denaro. La documentazione integra l'attività di catalogazione fornendo una rappresentazione del bene attraverso immagini, grafici, carte tematiche.

## **2.4 La Carta del Rischio del Patrimonio Culturale Italiano**

La problematica della gestione del rischio per i Beni Culturali è oggetto di ricerche multidisciplinari nel contesto europeo ed internazionale, per le quali si pone come fondamento la definizione di un documento universale, completo e condivisibile nei contenuti come è una Carta del rischio. Un importante esempio di gestione del patrimonio culturale orientata alla sua salvaguardia è lo strumento della Carta del Rischio realizzata in Italia. Lo studio è stato condotto su tutto il territorio italiano ad opera dell'Istituto Superiore per la Conservazione e il Restauro (ISCR) e promosso dal MiBAC; esso rappresenta un caso emblematico per tutto lo scenario culturale europeo, proponendosi come un modello guida per i paesi occidentali, riconoscendo il territorio italiano come rappresentativo di una cultura antica e consolidata in questo settore. Uno dei prodotti finali più comuni rappresenta graficamente sul territorio quali siano le condizioni attuali di danno minanti lo stato di conservazione dei beni culturali immobili, in una visione di salvaguardia del patrimonio per preservarlo alle generazioni future. Possiamo dire che nella Carta del Rischio avviene un

“complesso di operazioni, misurazioni ed analisi atte a comprendere e documentare un bene culturale nella sua configurazione, nelle sue caratteristiche metriche, nella sua complessità storica, nelle sue caratteristiche strutturali e costruttive oltre che in quelle formali” (Bonora V., Tucci G., 1997). Prima della realizzazione della Carta del Rischio, l'idea di analizzare e valutare i fattori di degrado sul territorio ebbe inizio con Giovanni Urbani che nel 1975 ideò e realizzò “il piano pilota per la conservazione programmata dei beni culturali in Umbria”. Successivamente, tra gli anni 1992 e 1996, fu realizzato il SIT MARIS, ovvero una prima mappa del rischio che permetteva di visualizzare i fattori di degrado sul territorio mediante una rappresentazione cartografica per aree tematiche. L'evoluzione della Carta del Rischio del patrimonio culturale si è realizzata tra il 2002 e il 2005 ad opera dell'I.S.C.R. e le finalità furono le seguenti:

- Sviluppo della Carta della Distribuzione del patrimonio culturale e georeferenziazione dei beni;
- raccolta dei dati sui beni immobili sottoposti a vincolo;
- realizzazione di una nuova interfaccia utente;
- aggiornamento e integrazione della procedura “data entry”;
- messa a punto di un test per un tracciato schedografico e per un rilevamento speditivo dello stato di conservazione dei beni immobili;
- accesso in internet alle banche dati.

Questo modello di Carta del Rischio così interpretato è un interessante esempio di gestione dell'informazione legata al rischio del bene nel suo contesto territoriale e nelle situazioni di pericolosità a cui è esposto. Di fatto è un Sistema Informativo Territoriale (SIT), pensato e realizzato dall'Istituto superiore Centrale per il Restauro (ISCR), al fine di fornire agli Istituti e agli Enti statali e locali preposti alla tutela, salvaguardia e conservazione e valorizzazione del patrimonio culturale, uno strumento di supporto per l'attività scientifica ed amministrativa ([www.cartadelrischio.it](http://www.cartadelrischio.it)). La sua struttura informatizzata è implementata secondo un modello logico che prevede un polo centrale e dei poli periferici: il POLO CENTRALE, gestito dall'ISCR, con il compito di censire e valutare tutte le informazioni sullo stato di “salute” del patrimonio culturale nazionale; i POLI PERIFERICI, istituiti dalle singole regioni, ai quali arrivano tutte queste informazioni. I poli periferici lavorano a stretto contatto con il polo centrale e hanno il compito principale di reperire i dati sui fattori di rischio e controllare lo stato di conservazione dei beni. I beni presenti nel SIT sono sia immobili che mobili; i primi riguardano beni archeologici, architettonici e paesaggistici e costituiscono l'unità georeferenzabile in un contesto territoriale, mentre i secondi, reperti archeologici, libri, dipinti, fotografie, ecc., in quanto non georeferenzabili, sono associati al relativo bene immobile in cui sono contenuti. Per descrivere un bene immobile e

classificare il Rischio che è ad esso associato si determinano i parametri di Vulnerabilità e Pericolosità. La Vulnerabilità Individuale (V) è una funzione che indica il livello di esposizione di un dato bene all'aggressione dei fattori territoriali ambientali; la Pericolosità Territoriale (P) è una funzione che indica il livello di potenziale aggressività di una data area territoriale, indipendentemente dalla presenza o meno dei beni ([www.cartadelrischio.it](http://www.cartadelrischio.it)). Questi indici vengono rilevati mediante moduli schedografici ideati dall'ISCR per permettere una catalogazione omogenea raccogliendo tutte le informazioni anagrafiche dei beni. La scheda prende in esame dodici componenti tipologiche:

- fondazioni
- strutture di elevazione
- pavimenti esterni
- pavimenti interni
- strutture orizzontali
- coperture
- collegamenti verticali
- apparato decorativo interno
- rivestimenti e decorazioni esterne
- infissi interni
- infissi esterni

e per ognuna di queste viene associata una tipologia di danno:

- danno strutture
- disgregazione materiale
- umidità
- attacchi biologici
- alterazione degli strati superficiali
- parti mancanti

Una valutazione quantitativa dell'entità del danno della specifica tipologia componente è espressa secondo gli indicatori di:

- gravità del danno ( 1 2 3 )

- estensione ( 20% 40% 60% 80% 100% )
- grado di urgenza ( 1 2 3 4 5 6 )

In questo modo il bene  $i$ -esimo può essere descritto da un massimo di 216 variabili che permettono di calcolarne il fattore Vulnerabilità indagato nei tre settori Ambientale-Aria, Statico-Strutturale, Antropico dei quali si riportano i seguenti indici:

- $V1_i = (t,x,y,z,m_1,\dots,m_n)$  variabili utilizzate per valutare l'indice Ambientale-Aria
- $V2_i = (t,x,y,z,p_1,\dots,p_n)$  variabili utilizzate per valutare l'indice Statico-Strutturale
- $V3_i = (t,x,y,z,o_1,\dots,o_n)$  variabili utilizzate per valutare l'indice Antropico

Anche per la Pericolosità (P) è possibile individuare gli stessi indici utilizzati per la Vulnerabilità:

P1: Indice Ambientale-Aria, rientrano in questo indice fattori come:

- annerimento dei monumenti causato dall'inquinamento ambientale o stress fisico a cui sono sottoposti i beni durante i cicli di gelo e disgelo.
- erosione di immobili ad opera di piogge, ma anche fenomeni carsici per beni paesaggistici, e trasgressione marina causata dall'innalzamento del livello del mare.

P2: indice Statico-Strutturale

- pericolosità sismica
- pericolosità frane e dissesti
- pericolosità dinamica dei litorali
- pericolosità valanghe
- pericolosità vulcani
- pericolosità esondazioni

tali indici sono tutti rappresentati da carte tematiche.

P3: indice Antropico

- spopolamento
- sovrappopolamento
- pressione turistica
- suscettibilità al furto

Analogamente alla vulnerabilità si può calcolare il livello di pericolosità del j-esimo bene

- $P1j = P1 (t,x,y,z,a1...a_n)$  variabili utilizzate per valutare l'indice Ambientale-Aria
- $P2j = P1 (t,x,y,z,b1...b_n)$  variabili utilizzate per valutare l'indice Statico-Strutturale
- $P3j = P1 (t,x,y,z,c1...c_n)$  variabili utilizzate per valutare l'indice Antropico

I due fattori sono dunque articolati ciascuno in tre domini: Ambientale-Aria (V1, P1), Statico-Strutturale (V2, P2), Antropico (V3, P3), connessi tramite un modello rigorosamente statistico e probabilistico, che esprime l'indicatore di Rischio (R) come media ponderata dei due fattori (P) e (V) tale che  $R = R (V1,V2;V3;...;Vn,P1,P2;P3;...;Pn)$ . La pericolosità gravante sul territorio è inserita in una classe di valori di appartenenza dal più basso 1 al più elevato 5. La Vulnerabilità individuale è descritta nelle schede di vulnerabilità (vedi figg. 2.4-1, 2.4-2 e 2.4-3) dove sono indicate: la tipologia del Bene Culturale; la fruizione del Bene Culturale; la definizione del bene culturale; il tipo di rapporto con il contesto urbanistico; il tipo di rapporto con il contesto monumentale; la tipologia di localizzazione; la pagina dov'è citato sulla guida Touring club, etc.(Fig.2.4-1); evento; periodo; epoca di rifacimento del bene ricercato; etc. (Fig.2.4-2).

In questo modo “la geometria degli oggetti non è il solo parametro ad essere documentato. Tutte le specificità che fanno l'oggetto unico sono significative; tutti i valori potenziali come architettonici, artistici, storici, scientifici, e sociali sono parametri da considerare”

( D'Ayala e Smars, 2003).

Lista Beni								
CODICI		LOCALIZZAZIONE					OGGETTO	
CDR	ICCD	PROVINCIA	COMUNE	FRAZIONE	LOCALITA'	INDIRIZZO	TIPO	DENOMINAZIONE
21CR0007118AAAA		Bologna	BOLOGNA			VIA D'AZEGLIO	Palazzo	PALAZZO MARSIGLI

Codice Servizio: 21CR0007118AAAA							
Elenco Schede - Cliccare su un codice scheda per selezionarne una							
IDENTIFICATIVO SCHEDA	TIPO SCHEDA	DESCRIZIONE SCHEDA	TIPO DB	DATA	POLO	STATO	RIFERIMENTI OPERE MOBILI
BO0172	PC	Schedatura Polo Centrale	DB Rischio	17-apr-2000 22.03.50	Polo Centrale ICR Roma	Chiusa	
02273210227325	VI	Schedatura Vincolato	Vincolato	10-feb-2006 18.17.08	Polo Centrale ICR Roma	Chiusa	VINCOLATO

Fig.2.4-1– Tabella lista beni (www.carta del rischio.it).



Fig.2.4-2– Tabella tipologia bene (www.carta del rischio.it).

MIBAC		CRONOLOGIA DEL BENE					ISCR
Provincia	Comune	Descrizione	Evento	Periodo	Epoca	Frazione	
BOLOGNA	BOLOGNA	PALAZZO MARSIGLI	ORIGINE	D.C.	non rilevato	0	
BOLOGNA	BOLOGNA	PALAZZO MARSIGLI	PRIMO RIFACIMENTO	D.C.	dal XVII alla meta' del XVIII secolo D.C.	2	
BOLOGNA	BOLOGNA	PALAZZO MARSIGLI	SECONDO RIFACIMENTO	D.C.	dal XVII alla meta' del XVIII secolo D.C.	1	

At the bottom of the table, there are buttons for 'Stampa' and 'Chiudi'.

Fig.2.4-3– Tabella qualifica bene (www.carta del rischio.it).

I risultati ottenuti per sovrapposizione di layers tematici vengono evidenziati in tavole sinottiche le quali mostrano le Pericolosità gravanti sull'area interessata dal bene.

Dal SIT Carta del Rischio, l'utente è in grado di valutare le diverse pericolosità che gravano sul bene ed il tipo di rischio associato riferendolo e definendolo nei tre ambienti Aria, Statico-Strutturale, Antropico, così da determinare per esso un livello di Rischio basso, medio, alto o elevato.

Il patrimonio culturale presente all'interno della carta del rischio è inserito in un contesto cartografico definito dalle Carte Tecniche Regionali (CTR) in scala 1:10000 con coordinate Nord (N) ed Est (E) espresse nella rappresentazione cartografica Gauss-Boaga.

La CTR 10000 non è l'unica cartografia presente all'interno del SIT, ma è supportata da altre basi cartografiche quali:

- Modello Digitale del Terreno (DTM) in scala 1:25000 per la descrizione orografica;
- reticolo cartografico IGM in scala 1:25000;
- livelli vettoriali per strade urbane, aree verdi, idrografia, limiti amministrativi, aree edificate e aree di competenza territoriale delle soprintendenze;

- ortofoto digitali in scala 1:10000 (IT2000) del territorio nazionale

Dal sito Web è possibile:

- Visualizzare la Cartografia del territorio con il posizionamento dei beni mobili ed immobili e i dati sulla pericolosità territoriale;
- Consultare il repertorio dei beni mobili ed immobili;
- Consultare gli originali dei decreti di vicolo sui beni immobili emessi (ex leggi 364/1909, 1089/1939 e D.vo 42/2004);
- Consultare le schede di vulnerabilità dei Beni mobili ed immobili;
- Inserire nuove schede di Vulnerabilità dei Beni mobili ed immobili (non per l'utente).

Il database informatico contenuto nel SIT Carta del Rischio è costituito da dati alfanumerici e cartografici che, elaborati insieme ai dati sul patrimonio culturale, identificano il livello di rischio sul territorio e quello associato al bene sul quale potenzialmente intervenire per iniziative di tutela e conservazione.

All'interno del database, i Beni sono classificati e gestiti mediante tabelle, che permettono di individuare un bene univocamente identificandolo per mezzo di un metacodice in un "Sistema Informativo Generale del Catalogo" il SIGEC organicamente gestito dall' ICCD al livello generale e dal SIRBeC (si veda capitolo 2.6) al livello regionale il quale sarà descritto in seguito.

Per accedere al sistema carta del rischio e ricercare un bene è necessario registrarsi e identificarsi tramite una login dal sito [www.cartadelrischio.it](http://www.cartadelrischio.it). La ricerca dei beni può essere condotta per "ricerca semplice", inserendo il nome del bene o per "ricerca avanzata" inserendo un metacodice "CDR" (Codice Univoco di Servizio) che abilita l'apertura della scheda di Vulnerabilità relativa al bene, nella quale è mostrata la gerarchia di appartenenza del bene ricercato, ad esempio Individuo.

Nello schema concettuale del database il Bene viene riconosciuto come un bene individuo, componente o complesso, ed è associato ad un codice univoco ID\_Bene (ICR), definito dall'ICCD (Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione). Un bene è identificato mediante una tabella anagrafica "TB\_Ana\_Edit", una tabella "TD\_Tipologia" che definisce la tipologia alla quale esso appartiene ed una tabella "Tipo\_Entità" che lo caratterizza geometricamente (punto, linea, area). Un bene così univocamente determinato entra a far parte di una tabella lista beni "TB\_List\_Beni" distribuiti in un dato territorio.

Lista Beni								
CODICI		LOCALIZZAZIONE				OGGETTO		
CDR	ICCD	PROVINCIA	COMUNE	FRAZIONE	LOCALITA'	INDIRIZZO	TIPO	DENOMINAZIONE
21CR0007118AAAA		Bologna	BOLOGNA			VIA D'AZEGLIO	Palazzo	PALAZZO MARSIGLI

Anagrafica Bene			
CODICI		UBVK	INDICAZIONE CHILOMETRICA
NCTI	CODICE DI SERVIZIO CDR	21CR0007118AAAA	GDPX LONGITUDINE SIGNIFICATIVA
NCTN	CODICE ICCD		GDPY LATITUDINE SIGNIFICATIVA
DATI AMMINISTRATIVI		GDPZ	ALTITUDINE SIGNIFICATIVA
VINL	VINCOLATO LEGGE	OGGETTO	
CTSF	FOGLIO CATASTALE	OGTP	TIPO OGGETTO
CTSN	PARTICELLE	OGTD	DENOMINAZIONE
CTSD	DATA FOGLIO CATASTALE	AUTN	AUTORE
AGGD	DATA - AGGIORNAMENTO SCHEDA	RVEL	GERARCHIA
LOCALIZZAZIONE		DATAZIONE	
NCTR	REGIONE	RELI	ESTREMO REMOTO DATA
PVCP	PROVINCIA	RELS	ESTREMO REMOTO SECOLO
PVCC	COMUNE	RELF	ESTREMO REMOTO FRAZIONE DI SECOLO
PVCF	FRAZIONE	REVI	ESTREMO RECENTE DATA
PVCL	LOCALITA'	REVS	ESTREMO RECENTE SECOLO
UBVD	DETERMINAZIONE SPAZIO VARIABILE	RELV	ESTREMO RECENTE FRAZIONE DI SECOLO
UBVN	NUMERO CIVICO		

Fig.2.5-1- tabella lista beni (www.carta del rischio.it).

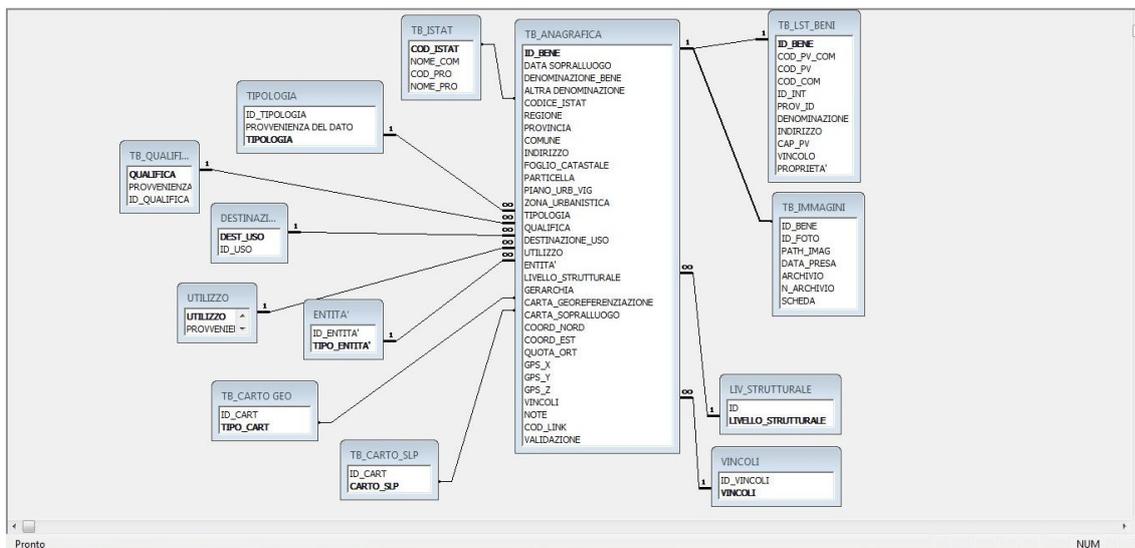


Fig.2.4-4- Relazioni esistente tra la tabella scheda anagrafica e le altre come suoi attributi.

Di seguito si riportano alcune definizioni di entità che sono di interesse nella C.d.R.

- Bene Individuo: è da intendersi un monumento, unità edilizia, con le stesse caratteristiche architettoniche dei Beni Componenti, ma svincolato da qualsiasi tipo di aggregazione e/o gerarchia, funzionale, tipologica, costruttiva.

Es. di Bene Individuo: teatro, palazzo, chiesa, fontana

- Beni Componenti: chiesa, convento, campanile, chiostro/ torri, mura di cinta, corpo centrale, ponte levatoio, cortile/corpo centrale, cappella, teatro, giardini, corti, fabbricati di servizio, fontane.
- Il Bene Complesso è costituito dall'insieme di più corpi di fabbrica, ovvero unità edilizie, distinguibili per caratteristiche architettoniche specifiche ( Beni Componenti), ma che presentino, ancor oggi, le caratteristiche originarie di aggregazione funzionale, tipologica, costruttiva. Es. di Bene Complesso: Complesso conventuale/Castello Medioevale/Palazzo Torre
- Codice Univoco"CDR": ID\_ Bene  
Codice univoco di un Bene costituito da un campo numerico a 8 cifre, le prime due indicano la provincia, quattro record sono assegnati ai Beni per provincia di appartenenza, le restanti codificano il bene univocamente.  
Il codice univoco serve da 'chiave'per identificare un Bene univocamente, operazione fondamentale nella georeferenziazione: è l'elemento di collegamento fra il dato geografico e i dati presenti all'interno del database, che consente di associare informazioni, fotografie, o altri attributi alla entità puntuale o poligonale digitalizzata/georeferenzziata.

## **2.5 La documentazione dei Beni culturali e il progetto europeo EU-CHIC**

La documentazione dei beni culturali non è fine a se stessa, ma deve tendere ad essere una fonte d'informazione accessibile anche per utenti meno esperti ma sensibili alle tematiche di salvaguardia del territorio e di gestione del rischio; l'informazione che è in essa contenuta e raccolta dovrebbe essere resa disponibile nei più comuni formati di interscambio dati per poter essere trasmessa in rete previa autorizzazione e identificazione del soggetto interessato alla consultazione degli stessi quando questa è ai fini della tutela e salvaguardia dei beni e del territorio. La raccolta di una documentazione attinente deve indirizzarsi verso l'individuazione di quelli che sono i contesti più significativi, capaci di testimoniare le condizioni effettive gravanti su di un bene specifico, per condurre verso un'informazione mirata e completa. Un'attenta documentazione che rifletta le attuali circostanze incombenti su un bene può favorire un'attenta valutazione delle problematiche e la conoscenza di quali siano i possibili fenomeni di danno che si potrebbero manifestare nel tempo. Un bene così identificato può essere facilmente analizzato e classificato per tutti gli ambiti che sono stati scelti come emblematici e rappresentativi dello stato delle sue condizioni attualmente presenti.

Al livello europeo, è stato pensato e recentemente completato il progetto di ricerca Europeo EU-CHIC, (European Cultural Heritage Identity Card) condotto all'interno del 7° programma quadro, è finalizzato all'elaborazione dei contenuti di una carta d'identità del Bene Culturale, con particolare riferimento ai beni culturali immobili. Il work plan del progetto EU-CHIC, ha raggiunto il suo completamento attraverso le attività di quattro nuclei di lavoro, i risultati dei quali sono stati sostenuti dal relativo coordinamento e dalla diffusione delle attività del gruppo di lavoro.

I principali compiti del progetto sono:

- di sviluppare e sperimentare una metodologia di catalogazione e delle linee guida pertinenti per ciascun monumento sotto controllo, necessarie ad un'efficiente compilazione e raccolta dei dati;
- di promuovere una manutenzione sostenibile, una conservazione preventiva e il recupero dei siti storici e dei monumenti;
- di fornire un'assistenza all'applicazione delle recenti strategie di sviluppo di sistemi informativi proponendo un sistema di tipo *user friendly*;
- di monitorare gli edifici analizzando i progressivi cambiamenti presenti quali cause degli interventi umani e degli impatti ambientali;
- di suggerire ai partner del progetto provenienti da 11 paesi (Slovenia; Austria; Belgio; Croazia; Repubblica Ceca; Germania; Grecia; Israele; Italia; Polonia; Spagna) di promuovere e incoraggiare il sistema EU-CHIC presso i governi e le autorità responsabili per la tutela e salvaguardia del patrimonio culturale.

In una maniera simile all'organizzazione del "Monumentwatch" dei Paesi Bassi, ed alla regione Fiandre nel Belgio, lo scopo principale del progetto EU-CHIC, è di promuovere e assistere nella creazione di nuove iniziative finalizzate ad un monitoraggio e ad un'ispezione regolare degli edifici e dei monumenti storici. Con la guida ed il supporto di un Comitato di rete ed un Comitato Consultivo, la cui iniziativa è stabilita nei paesi e nelle regioni beneficiate dal progetto. In figura 2.5-2 è indicato il work flow intrapreso dal progetto EU-CHIC, per la documentazione e la conoscenza di un bene culturale, finalizzato in particolare modo alla realizzazione di una carta d'identità del bene culturale. Lo schema mostrato in figura, costituisce l'anamnesi del bene, dove ogni attività riportata, contiene le informazioni corrette necessarie per la gestione di un bene immobile, considerato dalla sua origine ad i giorni nostri. Quindi ogni attività descrive in maniera completa: la storia; lo stato di conservazione; i lavori di restauro realizzati nel tempo; i materiali; la struttura; le tecniche di rilevamento adoperate; l'analisi del rischio. Tali attività vengono regolarizzate attraverso la definizione di linee guida o protocolli di analisi, ed un intelligente

gestione del livello delle informazioni (o conoscenze), acquisite in modo da intraprendere interventi appropriati e giuste strategie di conservazione. La gestione delle conoscenze, costituisce l'informazione primaria mediante la quale si può avere una piena consapevolezza delle condizioni attuali del bene, così da prevedere e/o stabilire sul bene gli interventi necessari.



Fig.2.5-2– Esempio dell'insieme delle informazioni alla base di una documentazione completa (EU-CHIC).

Tale progetto recependo il modello italiano Carta del Rischio, ha messo a punto una procedura generale per la conoscenza di un bene culturale, partendo dalla sua identificazione geografica, spingendosi fino ad una sua descrizione completa e dettagliata, sia dei materiali, che delle tecniche costruttive adoperate per la sua realizzazione. La procedura adoperata è orientata alla raccolta di una documentazione d'informazioni completa, tesa alla valutazione dello stato di conservazione del bene culturale, prestando particolare attenzione ai beni culturali immobili (si veda l'appendice 2). Per la realizzazione di una siffatta indagine conoscitiva, è stata definita una procedura di protocollo, composta da 19 domande. La procedura adottata, di facile compilazione, è stata testata conducendo uno studio dettagliato, per un totale di 24 protocolli campione, formulati sul territorio al livello europeo, ad enti o sistemi preposti alla tutela e conoscenza dei beni culturali. I risultati elaborati sono stati presentati in formato di tabulati, e di questi se ne riportano, nelle figure 2.5-3, 2.5-3, 2.5-

3, i più significativi, riguardanti il record descrittivo (del protocollo) dei dati generali. Da quanto è emerso dal sondaggio, la maggior parte dei sistemi informativi sui Beni Culturali, compreso quello italiano (da dati del SIGEC), non sono ancora accessibili sul web tramite internet, e la maggior parte dei cataloghi non sono ancora computerizzati.

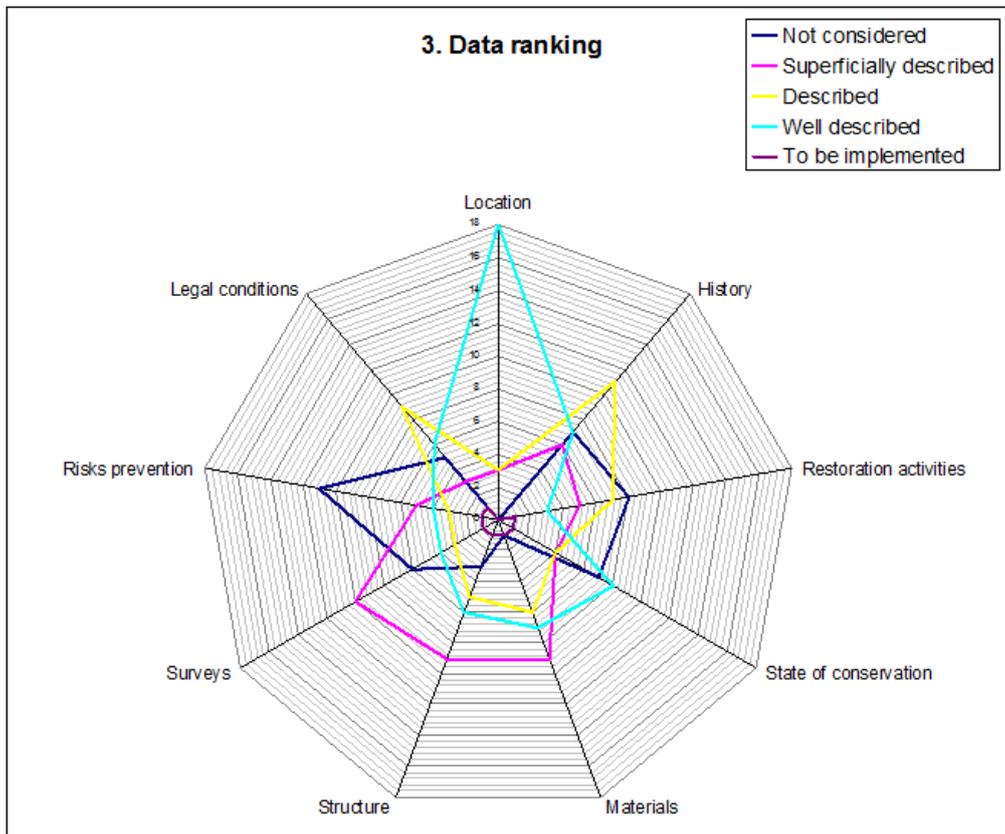


Fig.2.5-3–Da EU-CHIC: classificazione della documentazione raccolta articolata in 7 contesti rappresentativi: luogo; storia; attività di restauro; stato di conservazione; struttura; rilevamento; prevenzione del rischio; condizioni legali.

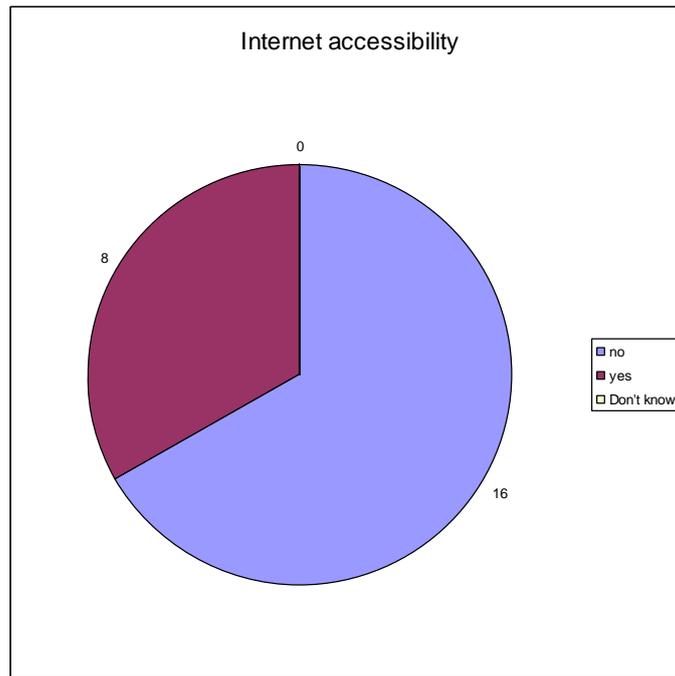


Fig.2.5-4 – La maggior parte dei sistemi informativi sui Beni Culturali non sono ancora accessibili sul web tramite internet (EU-CHIC).

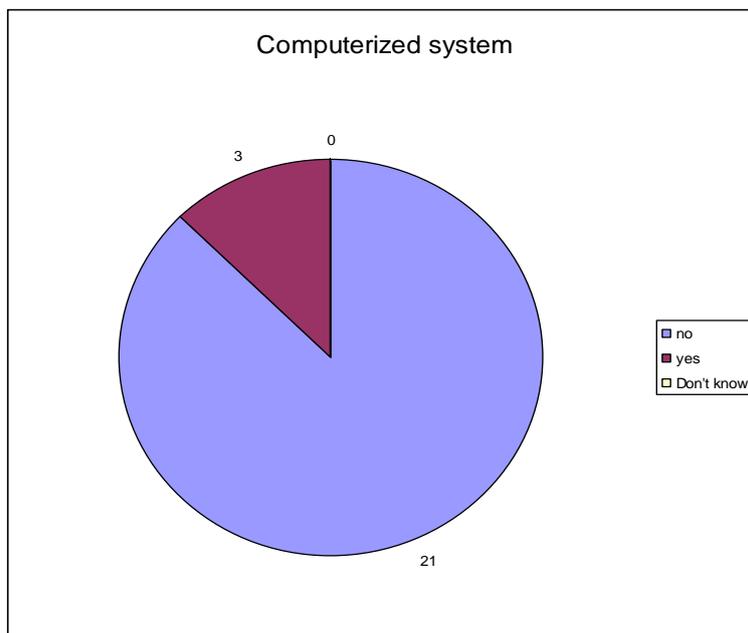


Fig.2.5-5– La maggior parte dei cataloghi non sono computerizzati (EU-CHIC).

Ognuno di questi protocolli segue procedure uniche. Tuttavia, questi metodi sono stati confrontati al fine di trarre conclusioni riguardanti il modo migliore per sviluppare una procedura ipoteticamente ottimale, in grado di poter definire una Carta d'identità del bene culturale.

In figura 2.5-6 viene riportato un modello di carta d'identità di un bene culturale (EU-CHIC Ottobre 2010 Ravenna), Il modello presentato è articolato in tre step successivi che portano alla conoscenza completa del bene. Questa definendo un'identificazione cartografica e univoca del bene, tramite un sistema codificato, giunge alla conoscenza dello stato d'uso del bene e delle sue caratteristiche descrittive di forma, colore e dei materiali.

Nr.	Element name	Score	Comments
1	Picture, drawing, basic graphic data... visual info	26	One piece. Links to more can be given. Format must be defined.
2	Name	26	This field might be broken down into 2 or more. Example: official name, local name.
3	Address	26	Includes number, postal code. Country code: see next.
4	Country / Nation	26	
5	Region	26	
6	Geo Location, coordinates	26	
7	General description of the object (prose).	26	Everyone agrees on this. But how this short description is to be made depends on different subject interests. A guideline should be developed. In a computer system a limit must be set to the number of words / positions allowed.
8	Original use	26	
9	Current use	26	
10	Date / year of construction (of the oldest parts)	26	Needs some possibility to inform about additions etc. over time. This could be done in the general description. Also possible to have a free text field added to write some very short info on developments over time.
11	Typology	26	Set of defined typologies must be developed.
12	Link ; URL for more information		Mentioned in the meeting but not as a specific information element.
13	Cadastre id.		This was not mentioned in the meeting, but will often be tied to the unique id or the identification of the property in the national property register.
14	Unique national and European identifier.		Not mentioned in the meeting. Can be system generated based on a unique national identifier.
15	Legal regulation (status)	26	Protected according to..... Type protection. Needs to be defined more precisely on a European level. The national legislation is always the basis.
16	Contact person/details, administration name, department etc.....	16	This will not be a mandatory field. But in some countries this is already standard information.
17	Ownership type	23	Private, Public (state, municipality), combined?.
18	State of conservation/Maintenance condition	26	A grade expressed by a number (0 – 3). Ref CEN standard on Condition survey of immovable heritage (protected and historic buildings, sites and constructions).
19	Risk (grading) / Hazard potential	17 / 18	Grading system must be developed. Can this be combined with hazard potential?
20	Vulnerability (importance, value, etc.?).	14	With this participants meant an indicator for how important the monument etc. is and the importance to intervene if damage develops? This is a very tricky indicator to have – at least at the top level, it needs some guidelines but seems problematic at this level.
21	Historic data, data on former interventions etc.	24	Pointer or information on where this can be found. Possible to have a very short prose description?
22	Structural type similar to another, info element.	26	It was unclear if this information element concurred with typology (see 11). If not it needs some further elaboration? If it is the same it needs to be incorporated into Typologies.
23	Basic construction material	26	The notes from the meeting read 'Basic materials'. I have assumed we are talking construction materials.

Fig.2.5-6–Proposta di una Carta d'identità per un bene culturale (EU-CHIC, meeting Ottobre 2010, Ravenna).

## 2.6 Il SIRBeC, un sistema regionale

Una esperienza regionale di notevole interesse che si appoggia alla Carta del Rischio è stata sviluppata nella Regione Lombardia con il nome di Sistema Informativo dei Beni Culturali (SIRBeC). Il Sistema Informativo Regionale Beni Culturali ([www.lombardiabeniculturali.it](http://www.lombardiabeniculturali.it)) è stato avviato dalla Regione Lombardia nel 1992 per realizzare uno strumento di conoscenza, di

documentazione e di supporto alle decisioni in materia di tutela, conservazione e valorizzazione del patrimonio culturale. Il sistema è diffuso sul territorio o conservato all'interno di musei, raccolte e altre istituzioni culturali.

Dal 1998 il sistema è stato allineato agli standard catalografici nazionali elaborati dall'Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione. L'Istituto, nell'ambito del MiBAC, ha il compito di promuovere e realizzare il catalogo unico dei beni culturali.

Complessivamente tra il 1992 ed il 2005 sono stati realizzati quasi 350 progetti riguardanti campagne di catalogazione. Il SIRBeC è cresciuto annualmente in maniera considerevole: sono attualmente catalogati quasi 500.000 beni mobili - di cui circa 400.000 già presenti nella banca dati centrale - e oltre 12.000 immobili, di cui 2002 con scheda conservativa Carta del Rischio.

Schede SIRBeC (dati aggiornati al 5 dicembre 2005):

Tipo di bene	N. Schede
Opere d'arte, beni mobili	213.134
Beni architettonici	12.914
Stampe, matrici, incisioni	8.946
Beni etnoantropologici	24.604
Reperti archeologici	19.687
Fotografie	108.398
Totale	387.683

Schede SIRBeC inserite nella Carta del Rischio (dati aggiornati al 5 dicembre 2005):

Tipo di bene	N. Schede
Opere d'arte, beni mobili	7.518
Beni architettonici	89
Totale	9.520

All'interno di SIRBeC risiedono le catalogazioni delle seguenti tipologie di beni:

- Architetture: complessi monumentali, edifici pubblici e di culto, edilizia rurale di interesse storico, dimore gentilizie, architetture fortificate, residenze private, fabbricati di archeologia industriale;
- Opere e oggetti d'arte: dipinti, disegni, sculture, arredi di culto e suppellettile liturgica, mobili, tessuti;
- Fotografie: fondi fotografici di interesse artistico, storico, documentario;

- Stampe e incisioni
- Reperti archeologici: ceramiche, monete, oreficeria, epigrafi, glittica, mosaici, vetri, monete, armi;
- Beni etnoantropologici: strumenti e attrezzi da lavoro, oggetti di uso domestico e personale, arte popolare, giocattoli;
- Patrimonio scientifico e tecnologico: strumenti, macchine e reperti rilevanti per la storia della scienza e della tecnologia.

Ogni bene viene descritto attraverso una serie di informazioni riguardanti: la tipologia, la materia e la tecnica di realizzazione, la denominazione, l'autore, l'ubicazione, il periodo di realizzazione. Le caratteristiche descrittive variano a seconda della tipologia dei beni e delle descrizioni a cui sono associate una o più immagini. La catalogazione è affidata a storici dell'arte e specialisti delle singole discipline adeguatamente formati sugli standard catalografici e addestrati all'uso dei software di catalogazione.

Per lo sviluppo del SIRBeC la Regione promuove e finanzia interamente:

- l'implementazione del sistema informativo a livello regionale;
- lo sviluppo e la manutenzione evolutiva degli applicativi software;
- la definizione e la sperimentazione di nuovi tracciati di catalogazione non ancora standardizzati a livello nazionale;
- il recupero e la normalizzazione di dati pregressi;
- la catalogazione del proprio patrimonio.

Il SIRBeC viene implementato attraverso campagne di catalogazione condotte sul territorio da parte di una pluralità di soggetti. Partecipano alla realizzazione del sistema, con diversi ruoli e competenze:

- Province, comuni e comunità montane
- Diocesi
- Musei, raccolte e altre istituzioni culturali
- Università e istituti di ricerca
- Associazioni no profit e fondazioni

Ciascuno dei soggetti realizza specifici progetti per le campagne di catalogazione che vengono cofinanziati dalla Regione Lombardia, con differenti modalità:

- i progetti delle Diocesi e delle Province sono regolati da apposite convenzioni bilaterali che definiscono gli obiettivi e i risultati, i tempi, la ripartizione degli oneri finanziari;
- i progetti degli altri soggetti vengono presentati sulla base di un apposito bando annuale.

Gli operatori incaricati effettuano la catalogazione attraverso l'uso degli applicativi software predisposti e distribuiti dalla Regione ovvero con altri applicativi e prodotti informatici che adottino gli stessi standard catalografici SIRBeC e producano i dati secondo formati compatibili. La catalogazione prodotta confluisce poi all'interno del sistema centrale dopo un esame di tipo tecnico-scientifico. A questo scopo è stato istituito, in collaborazione con l'Università degli Studi di Pavia e il Politecnico di Milano, un apposito nucleo di verifica che valuta i dati sotto il profilo dei contenuti, della rispondenza agli standard vigenti, oltre che della congruità rispetto a quanto previsto dai documenti di progetto ([www.lombardiabeniculturali.it](http://www.lombardiabeniculturali.it)).

## **2.7 Il monitoraggio del patrimonio culturale**

Il patrimonio culturale necessita di una costante operazione di monitoraggio mirato alla conservazione e controllo del bene. In ambito topografico, con la parola monitoraggio possiamo considerare l'insieme delle campagne di rilievo, effettuate su una serie di punti di controllo significativi, in un intervallo di tempo regolare; il monitoraggio risulta quindi una funzione dei punti di controllo, delle campagne di rilievo e dell'intervallo di tempo. Uno dei motivi del monitorare può essere quello di evidenziare spostamenti o deformazioni relativi o assoluti di punti significativi sotto controllo. Per agire in tal modo è di fondamentale importanza la scelta del sistema di riferimento, che sia stabile nel tempo per ogni campagna di rilievo che viene ripetuta, può essere anche di tipo locale.

I punti di controllo individuati sono punti che appartengono al bene e posizionati in modo idoneo al suo monitoraggio, per rendere possibile nel tempo sugli stessi punti, operazioni di confronto dei dati ottenuti nelle successive campagne di rilievo.

Sono interessate ad opere di monitoraggio generalmente le strutture di fondazione, perché su di esse si può verificare la rotazione delle strutture verticali e instabilità delle strutture orizzontali. I motivi principali per un'azione di monitoraggio condotta su beni culturali immobili possono riguardare:

- **CEDIMENTO DI FONDAZIONE:** problemi molto frequenti in edifici storici, è dovuto alla mancanza di opere di consolidamento strutturale, ma anche a causa di subsidenze localizzate del terreno dannose per le fondazione. Per verificare la presenza di questi problemi si può operare mediante una livellazione geometrica di precisione utilizzando dei particolari capisaldi fissati in modo permanente sull'edificio.
- **PERDITA DI VERTICALITA':** Sono causate da dissesti strutturali, spostamenti orizzontali di edifici o delle parti o da cedimenti del terreno. Le tecniche utilizzate per il controllo sono diverse

e non necessitano sempre di strumentazioni topografiche. Ad esempio con filo a piombo opportunamente protetto da una teca in vetro, per evitare perturbazioni esterne, può essere anche automatizzato per un monitoraggio continuo nel tempo.

- **INSTABILITA' DELLE STRUTTURE ORIZZONTALI:** Causati da carichi permanenti e accidentali su solai e coperture. Le tecniche topografiche sono affiancate da analisi strutturali per conoscere gli spostamenti ammissibili della struttura; viene rilevato se tali spostamenti sono minori o uguali agli spostamenti ammissibili.

Il monitoraggio del territorio è una delle azioni indispensabili da effettuare per la salvaguardia dei Beni Culturali e della popolazione.

Le più importanti cause di rischio gravanti sul territorio italiano sono:

- fenomeni sismici e vulcanici;
- fenomeni franosi;
- subsidenza del terreno;
- trasgressione dei mari;
- alluvioni.

La progettazione di una cartografica aggiornata che descriva il territorio è utile sia nella fase di controllo del territorio ma anche di pianificazione attraverso l'individuazione delle aree potenzialmente assoggettate a fenomeni di rischio per le quali intervenire; questa può essere redatta con metodi fotogrammetrici, con telerilevamento satellitare ad alta risoluzione o con l'integrazione di tecniche GPS e rilievi topografici classici. In diverse situazioni, soprattutto legate al rischio idrogeologico (es. edifici posti in aree di frana), è necessario disporre di un DTM (modello digitale del terreno) di elevata accuratezza, secondo il fenomeno che si intende mappare, che può ottenersi con diverse tecniche; rilievo laser scanning aereo o terrestre; rilievi GPS in modalità cinematica; immagini satellitari stereoscopiche; una cartografia esistente in formato digitale.

## **2.8 La documentazione dei beni culturali e la Geomatica**

Il patrimonio culturale è una testimonianza di quelle che sono state le attività compiute dall'uomo e, per il suo valore storico ed estetico, rappresenta un fattore di identità determinante nella vita dei popoli e dei singoli. Presenta grandi variazioni nella sua natura, dimensione e complessità: da piccoli manufatti e articoli museali a paesaggi culturali, da edifici storici e antichi monumenti a centri cittadini e siti archeologici (Patias, 2005), spesso caratterizzati da una propria straordinaria architettura, dalla progettazione e dai materiali. La sua conservazione e valorizzazione necessita di

un'approfondita documentazione sia in termini più propriamente storico-artistici che per quanto concerne le caratteristiche fisiche di posizione, forma, colore e geometria (Peloso, 2005). Come sottolineato in (Patias, 2005), per documentare il nostro patrimonio nazionale ed internazionale le organizzazioni internazionali si sono impegnate nel trasmettere delle linee guida descrivendo delle documentazioni standard. Statuti, risoluzioni e dichiarazioni da parte di organizzazioni internazionali sottolineano l'importanza della documentazione dei beni culturali ai fini di lavori di conservazione, gestione, stima, valutazione delle condizioni strutturali, archiviazione, pubblicazione e ricerca. Tra questi i più importanti sono quelli che includono il Consiglio Internazionale sui Monumenti e Siti, ICOMOS, e UNESCO, la Carta di Venezia, La Carta Internazionale per la Conservazione e Restauro dei Monumenti e Siti, 1964. Questo insieme di documenti prodotti da accordi internazionali impone importanti restrizioni tecniche e detta numerose specifiche da considerare quando sia necessario progettare le corrette strategie da seguire per un'azione di salvaguardia del patrimonio culturale. Le più comuni raccomandazioni richieste (Patias, 2005) sono: la registrazione di una vasta quantità di informazioni multi source, multi formato e multi contenuto, con determinati livelli di accuratezza e dettaglio; inventari digitali in 3D; gestione di informazioni 4D in un modo sicuro e razionale, garantendone la disponibilità per la condivisione e la distribuzione ad altri utenti; la visualizzazione e presentazione delle informazioni in modalità *user-friendly*, così che diversi tipi di utenti possono attualmente richiamare informazioni utili, adoperando Internet e tecniche di visualizzazione. Riconoscendo queste documentazioni come necessarie, ICOMOS e la Società Internazionale di Fotogrammetria e Remote Sensing (ISPRS) hanno unito gli sforzi nel 1969 e hanno creato il Comitato Internazionale per la Documentazione del Patrimonio, CIPA. (<http://cipa.icomos.org/>)

Il principale obiettivo di CIPA è di fornire un forum internazionale e un punto focale nel migliorare tutti i metodi che contribuiscano alla salvaguardia di siti e beni culturali.

I beni culturali oggi risentono nel mondo dell'azione di degrado causata dalle guerre, dai disastri naturali e dalle trascuratezze umane. La capacità di saper preservare il patrimonio culturale da tali azioni di disturbo per trasmetterle alle generazioni future è uno dei compiti principali degli esperti in conservazione e monitoraggio dei beni culturali.

Un fatto importante da considerare è che la documentazione è un processo complicato, ed include, a fianco del rilevamento geometrico, un largo spettro di attività che comprendono la sorveglianza, l'analisi e il monitoraggio e le raccolte testuali e altre informazioni.

Il processo relativo alla documentazione del rischio gravante su di un bene culturale può essere descritto da quattro momenti: la fase di mitigazione (conoscenza e documentazione); protezione (controllo e monitoraggio); rilievo a seguito di emergenza; restauro (recupero e ripristino). Tali

momenti sono individuati nella figura 2.8-1, ed in questa visione è interessante individuare le tecniche geomatiche più adeguate.

Le attività si possono applicare all'oggetto ed all'ambito territoriale in cui esso si trova e debbono condurre alla realizzazione di prodotti integrabili fra loro e all'interno di sistemi complessi di gestione dell'informazione. Le quattro fasi che sono state individuate, nella figura 2.8-1, sono qui poste in relazione con: le attività e ai prodotti necessari per la documentazione del rischio secondo un'azione d'indagine diversificata a scala dell'edificio o territoriale; il grado di precisione/accuratezza strumentale; la scala del rilievo; la produttività e ai tempi da adottare che sono diversificati in base alle diverse tecniche e tecnologie geomatiche adoperate nel fase di rilievo. Nella figura 2.8-1i diversi colori individuano le diverse relazioni e colori analoghi mettono in evidenza le relazioni che sono state riscontrate, verso una direzione integrata delle le tecnologie adoperate e delle conoscenze tecniche. Quindi ad esempio riferendoci all'interno del processo di gestione del rischio ad una singola fase:

il rosso individua le attività condotte a scala dell'edificio;

il verde individua le attività condotte a scala territoriale;

il magenta evidenzia un legame tra i tempi e il livello di precisione ricercata e le tecniche e tecnologie;

il ciano evidenzia un legame tra i tempi e il livello di precisione ricercata e la scala di rappresentazione;

il giallo evidenzia un legame tra la scala ed i tempi con le attività e prodotti;

il nero evidenzia una dipendenza dal metodo selezionato nelle operazioni di rilievo.

La problematica del rilievo dei beni culturali investe dunque tutta la *pipeline* che dall'acquisizione del dato conduce alla produzione degli elaborati.

Quindi in funzione del tipo di documentazione a disposizione, delle dimensioni del rilievo, dell'accuratezza ricercata, della scala di riproduzione e del prodotto finale ne segue la scelta del metodo di rilievo. Difatti la selezione di un metodo appropriato dipende dalla dimensione dell'oggetto e dalla sua complessità (Böhler, 2005), ed è necessaria ai fini di una controllata progettazione dei punti stazione o delle prese fotogrammetriche, secondo la scala del prodotto finale che si vuole ottenere e del tipo di indagine che si vuole perseguire. Ma anche è interessante comprendere quali possono essere le potenzialità dei prodotti che si possono ricavare nella fase finale di processing, per cui è fondamentale possedere una piena conoscenza delle tecnologie adoperate insieme alle tecniche della fotogrammetria e della topografia, così da completare tutte le fasi dalla documentazione alla valutazione del rischio con una dinamica di tipo integrato.

Fase del Rischio	Attività / Prodotti	Fonti	Tecniche / Tecnologie	Scala	Precisione / Accuratezza	Produttività / Tempi
Mitigazione e Documentazione	Mappatura di base a scala territoriale: cartografia di base, mappe tematiche	Rilievi di appoggio, immagini	Aerofotogrammetria, Lidar aereo, Telerilevamento ad alta risoluzione (landcover)	1:10000-1:200	funzione di scala	media, variabile in funz. del grado di automazione della tecnica
	Mappatura di base a scala di edificio: planimetrie, prospetti, sezioni, ...	Inquadramento topografico (non sempre necessario su sistema cartografico)	Topografia (total station e livelli), rilievi diretti, laser a scansione, fotogrammetria	funzione del prodotto (es. 1:100-1:200)	funzione di scala	in funzione della scala e delle fasi (es. per aseri a scansione: levata in acquisizione, ortorectifica, processing)
	Sistemi informativi per database georeferenziati (per gestione, manutenzione, programmazione)	Dati geometrici georeferenziati, cartografia numerica, database alfanumerici	GIS, Database Management Systems	multiscala	-	-
	Georeferenziazione di elementi notevoli (percorsi, itinerari museali a cielo aperto, ecc.)	Inquadramento cartografico	GNSS kin e GIS	media-grande	media	elevata
	Esplorazione e navigazione in realtà virtuale di siti	Immagini, modelli (non necess. georeferenziati)	Fotogrammetria, laser a scansione, sistemi di modellazione e realtà virtuale	grande	in unione delle tecniche adottate	in funzione delle tecniche adottate
	Rilievi di controllo a scala territoriale (beni in frana, subsidenza, dissesti)	Dati storici, database fotogrammetrici e topografici storici	Topografia, Aerofotogrammetria, UAV, Lidar	1:10000-1:200	in unione della scala	variabile in funz. del grado di automazione della tecnica
	Femataizzazione del degrado, controllo lesioni e dissesti a scala di edificio	database fotogrammetrici e topografici storici	Topografia, laser a scansione, fotogrammetria: change detection, analisi di serie temporali	1:10-1:50	elevata	in funzione del metodo (per punti/area)
	Mappatura del danneggiamento a scala territoriale e urbana: centro storico, mura di cinta, fortificazioni, complessi di interesse culturale	Inquadramento cartografico, GNSS, GIS, immagini	Aerofotogrammetria, UAV, Lidar, Telerilevamento ad alta risoluzione (change detection, classificazione del danno)	1:10000-1:200	in unione della scala	alta
	Rilievo del danno a scala di edificio	Inquadramento topografico (non sempre necessario)	Laser a scansione, fotogrammetria	in unione del prodotto	in unione della scala	Brevi tempi di acquisizione
	Sistema informativo di gestione dell'emergenza	Dati geometrici aggiornati georeferenziati, database alfanumerici	GIS, database cartografici, immagini aeree/satellitari aggiornate	multiscala	in unione della scala	-
Emergenza	Rilievo di percorsi e punti notevoli	Inquadramento cartografico, GIS	GNSS kin e GIS	Media-grande	Media	Elevata
	Percorsi d'esplorazione e navigazione	Immagini, modelli (non necess. georeferenziati)	Fotogrammetria, laser a scansione, sistemi di modellazione e realtà virtuale	grande	funzione delle tecniche adottate	in funzione delle tecniche adottate
	Parte tematiche di valutazione del danno a scala territoriale	Inquadramento cartografico	Telerilevamento, fotogrammetria, Lidar: classificazione di immagini (object-oriented)	Territoriale	Media	in funzione della scala e delle tecniche
Valutazione, recupero e ripristino	Mappatura delle fasi di ripristino a scala territoriale	Inquadramento cartografico, serie storica di immagini e dati integrati	Fotogrammetria, telerilevamento ad alta risoluzione: ortofoto, change detection	Territoriale	Media	in funzione della scala e delle tecniche
	Mappatura delle fasi di ripristino a scala di edificio	serie storica di immagini e dati topografici	Topografia, Fotogrammetria, Laser a scansione	in funzione del prodotto (es. 1:100-1:200)	in unione della scala	in funzione del metodo (es. per aseri a scansione: levata in acquisizione, ortorectifica, processing)

Fig. 2.8-1–Le quattro fasi nel processo di analisi del rischio su di un bene culturale.

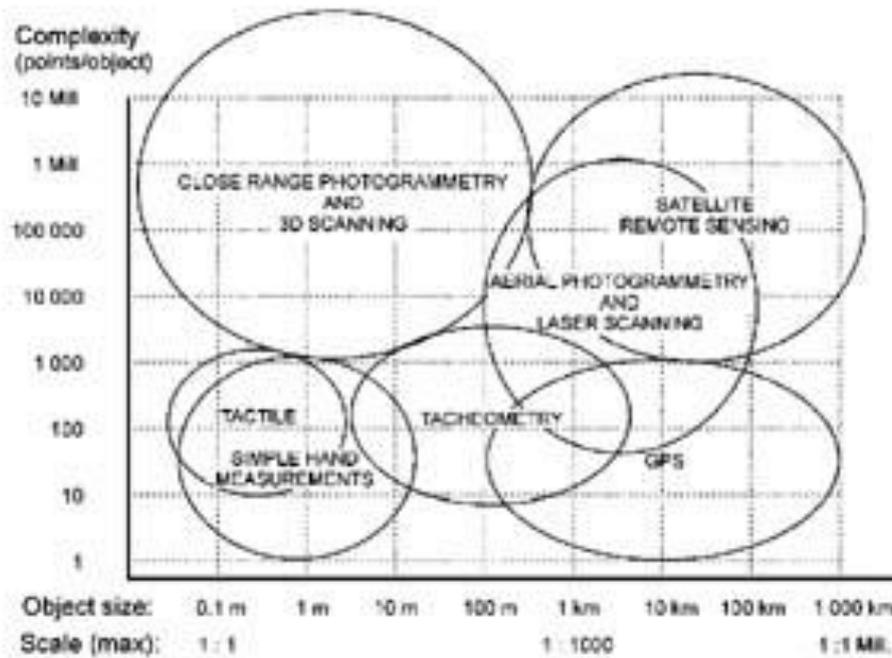


Fig.2.8-2– La selezione di metodi di ricerca appropriato dipende dalla dimensione dell’oggetto e dalla sua complessità. (After Böhler, 2005)

In questo ambito, l’impiego delle tecnologie e tecniche geomatiche nel campo dei Beni Culturali, si colloca su due principali linee di intervento (Bitelli e Mannina,2010):

- catalogazione e documentazione di beni mobili ed immobili a fini di studio, conoscenza, conservazione e restauro: le tecniche geomatiche, anche grazie al fatto che i loro prodotti sono oggi in forma digitale, consentono una descrizione metrica ed anche qualitativa che può avvalersi di strumenti di indagine e rilevamento diversi ma interfacciabili tra loro, grazie alla disponibilità di metodi ed algoritmi di trasformazione e fusione di dati. La descrizione metrica, oggi in gran parte tridimensionale, non si limita allo stato effettivo dell’oggetto ma è di supporto ed ausilio anche a nuove modalità di rappresentazione, tra le quali percorsi di esplorazione e navigazione virtuale in ambienti museali e di biblioteche;
- controllo e monitoraggio dello stato di beni mobili ed immobili; le operazioni di questo tipo si possono applicare all’oggetto ed all’ambito territoriale in cui esso si trova, anche in considerazione del fatto che molti dei fattori di rischio legati ad un bene immobile sono legati al suo contesto.

Il campo dei beni culturali è quindi, come già detto, uno dei più emblematici per le potenzialità offerte dalle moderne tecniche geomatiche, rappresentative dell’evoluzione dei moderni metodi di rilevamento..

Tali tecniche e tecnologie sono in continua evoluzione, ed offrono ad oggi molte applicazioni anche di tipo integrato, cioè utilizzando più metodologie contemporaneamente (es. laser scanner -

fotogrammetria), che consentono di descrivere al meglio il bene stesso sul territorio e il suo stato di conservazione.

Le moderne tecniche e tecnologie presentano infatti elementi di grande interesse tra i quali la possibilità di:

- effettuare in caso di emergenza operazioni di rilevamento in tempi molto ridotti, anche su aree vaste, con precisioni molto elevate sia in termini assoluti che relativi;
- integrare fra loro dati digitali acquisiti con tecniche diverse ed anche in tempi diversi, archiviando quando necessario i dati su database geografici che ne consentano una consultazione efficiente e flessibile;
- automatizzare operazioni di rilevamento ripetute, effettuate anche con scansione temporale molto elevata per fenomeni dinamici (monitoraggio in real-time), archiviando i dati su supporto digitale e con possibilità di trigger al presentarsi di situazioni critiche;
- mettere a disposizione nuovi strumenti non invasivi di indagine;
- offrire tecniche di visualizzazione e rappresentazione innovative, atte a gestire il dato “fedele al vero” ma anche contenuti di realtà virtuale.

I dati rilevati sul bene architettonico vengono forniti a organi competenti quali enti pubblici (Soprintendenze, Università, Amministrazioni pubbliche diverse, ecc.) e privati (studi d'ingegneria e architettura, studi associati diversi) che si occupano dell'esecuzione delle fasi di recupero, conservazione e restauro del Bene Culturale.

## 2.9 Casi di studio significativi

Nel paragrafo seguente sono illustrati quattro casi di studio tratti da letteratura come esempi emblematici di una metodologia di rilievo congiunto tra tecniche geomantiche, ai fini di produrre una rappresentazione corretta e rigorosa, qualora devono essere condotti studi particolareggiati di documentazione e controllo. In particolare le tecnologie qui presentate, sono state considerate nella parte sperimentale della tesi: fotogrammetria, laser a scansione terrestre, termocamera.

I casi si riferiscono a :

- ✓ L'EUIT a Vigo in Spagna;
- ✓ Un affresco romanico all'interno della chiesa di San Giacomo della Bessa in Sala Bielesse;
- ✓ Il Djin Block n.9 nell'area archeologica di Petra in Giordania;
- ✓ Villa Litta Modigliani a Milano.

L'edificio dell'EUIT a Vigo, sede della scuola d'ingegneria tecnica industriale della più antica università della Galizia, è oggi chiuso per le cattive condizioni d'uso ed è stato oggetto di studi ed analisi riguardo la dispersione energetica secondo la Direttiva del 2002/91/CE del Consiglio del Parlamento Europeo, sul rendimento energetico nell'edilizia. Nello studio viene riportata una procedura d'indagine multispettrale condotta sul prospetto principale dell'edificio per indagare le zone con più dispersione di calore. Per fare questo sono state integrate le informazioni radiometriche e geometriche del modello tridimensionale risultante dal processing di due scansioni laser del fronte e i dati nell'infrarosso termico acquisiti da una termo camera (Lagueta S. et al., 2010).

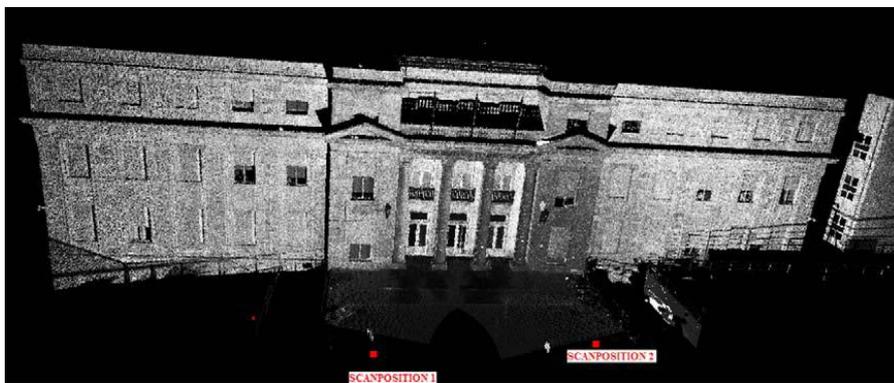


Fig. 2.9 -1 Posizione delle scansioni nell'EUIT Industrial.

Le immagini visibili e termiche sono state tra loro co-registrate utilizzando 8 control point comuni tra la nuvola di punti laser e i termogrammi raddrizzati con i parametri di distorsione radiale e tangenziale ricavati durante il processo di calibrazione iniziale del sensore termico della termocamera. In questo modo il modello tridimensionale è stato texturizzato con le immagini termiche ottenendo un modello termico tridimensionale, che proiettato su un piano orizzontale parallelo alla facciata ha permesso di generare un orto-termogramma della facciata. Sul modello tridimensionale è possibile quantificare la dispersione energetica presente sull'edificio attraverso la misurazione delle superfici a più alta o più bassa temperatura. Le immagini termiche acquisite, calibrate e raddrizzate, sono state in primo luogo processate agendo sulla matrice delle temperature, per normalizzare i valori radiometrici delle temperature definendo un intervallo unico tra 0°C e 40°C; assegnando un valore digitale di scala di 1/40 alla matrice termica in modo da gestirla come un immagine termografica; applicando una palette di valori per visualizzare le termografie in toni colore e non in grigio e adottando per ogni colore una corrispondenza d'intensità di valori con la scala delle temperature; un aumento dei valori radiometrici per accentuare il contrasto. Tali correzioni hanno permesso di non tralasciare il contenuto d'informazioni di temperatura di radianza

spettrale presente sulle termografie acquisite e di fonderlo correttamente con quello radiometrico. L'orto-termogramma ottenuto permette d'identificare le aree dove sono presenti ponti termici, umidità e dispersioni di calore, e di pianificare operazioni di risanamento conservativo in modo mirato, grazie all'individuazione e misurazione diretta delle zone peculiari sul modello termografico 3D.

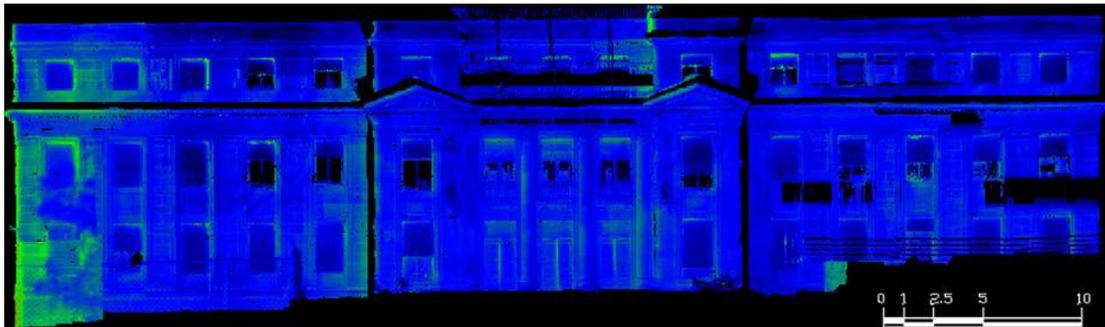


Fig. 2.9-2 Ortotermodigramma della facciata dell'EUIT

La chiesa di San Giacomo della Bessa nel comune piemontese di Sala Biellese, presenta al suo interno un ambiente ad unica navata con copertura a capriata, è di proprietà privata insieme all'attiguo convento, si presenta in uno stato di totale degrado, avendo perduto nei suoi ambienti il carattere di domus ecclesiae. Al suo interno si trova un affresco romanico, del quale sono state rilevate le condizioni all'infrarosso termico operando con tecniche di termografia attiva, analizzando i transitori di temperatura, in modo da poter osservare dinamiche non visibili in modalità stazionaria. La strumentazione adoperata è composta da una total station, uno scanner laser terrestre, una fotocamera non metrica digitale ed una termocamera. Trattandosi di una superficie piana non è stato necessario ricavare i parametri d'orientamento interno del sensore termico e le immagini termiche ottenute dalla camera termica sono state raddrizzate utilizzando punti omologhi derivati dall'ortofoto. La georeferenziazione ai fini del restauro e manutenzione è considerata accettabile se l'errore non è superiore a 2-3 volte il pixel. Un tal modo d'operare ha condotto verso studi di diagnostica non distruttivi, fornendo informazioni e caratteristiche utili non rilevabili nel visibile, consentendo operazioni di restauro appropriate delle aree oggetto di anomalie termiche. (Borgogno Mondino E. et al., 2005).

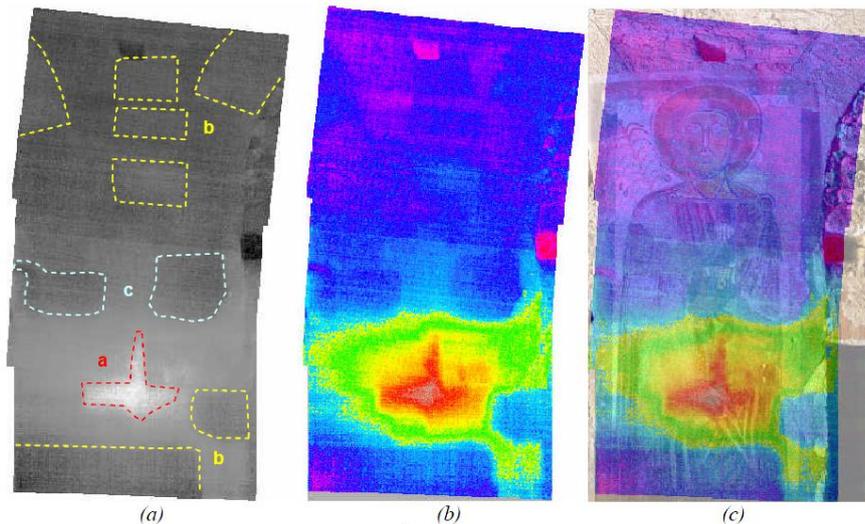


Fig.2.9-3– (a) Mosaicatura delle immagini termiche in toni di grigio; (b) density slicing; (c) sovrapposizione con l'ortofoto. (Borgogno Mondino E. et al., 2005).

I Djin Block sono strutture funerarie in pietra presenti sul sito archeologico di Petra, in Giordania, sito del Patrimonio mondiale dall'UNESCO dal 1985; il loro nome deriva da un termine usato dalle popolazioni locali per designare la residenza di crudeli spiriti (gli djinn, per l'appunto) capaci di spaventare a morte chiunque vi si imbatta. Il monumento codificato con il numero 9 si trova all'ingresso delle mura della città ed ha una forma a parallelepipedo un'altezza intorno ai 9 metri e lati di base intorno ai 4 metri. Il blocco è uno di tre che furono ottenuti dal pieno della massa rocciosa sbancando un candido affioramento di arenaria. Questo terzo caso presentato è un esempio completo di studio integrato per il rilevamento e la conservazione di un bene culturale; Il blocco il più grande di tre e rappresenta una singolarità rispetto alle altre costruzioni del parco archeologico per i suoi colori di un arenaria biancastra del periodo Ordoviciano, unico ad avere quattro fronti corrispondenti ai quattro punti cardinali. Il degrado che esso presenta è causato dagli agenti atmosferici, vento, pioggia e salsedine, che minacciano di distruggere questo monumento prima che gli specialisti abbiano cominciato a apprezzarlo e conoscerlo. Il rilevamento è stato effettuato con una total station, un laser scanner terrestre, una fotocamera non metrica e una termocamera. La TS ha misurato le coordinate di 8 punti di controllo, le scansioni eseguite sono state 7 in 5 posizioni differenti, le immagini acquisite nel visibile sono state 15 e le immagini termiche sono state prese in differenti ore del giorno per ottenere un maggiore contrasto termico sul monumento. Le sette scansioni sono state unite, pulite (filtrate) e registrate; il modello triangolare ottenuto è stato texturizzato con le immagini nel visibile e termiche. Per far ciò sono state utilizzate due soluzioni una per bundle adjustment per correggere l'alta risoluzione delle immagini visibili ed una resezione per singole immagini per fornire le informazioni termiche al modello 3D. Trattandosi d'immagini

prodotte da camere non metriche, per la conoscenza dell'orientamento esterno, le 12 immagini acquisite nel visibile sono state orientate per bundle adjustment e le 12 nell'infrarosso termico per space resection. Mediante le immagini orientate sono stati costruiti i due modelli fotorealistico e termorealistico sui quali si sono potute fare osservazioni interessanti. Nel modello termo realistico compaiono infatti maggiori informazioni rispetto a quello nel visibile, che prima d'ora non erano state indagate; le diverse temperature spiegano il comportamento e lo stato di degrado del blocco e permettono di individuare oltre le zone più umide la posizione di motivi decorativi dispersi lungo la parete della facciata orientale. Questo tipo d'informazioni sono difficilmente rilevabili nel visibile come anche sul modello foto realistico (Cabrelles M. et al., 2009).



Fig.2.9-4–Djin Block n°9



Fig. 2.9.5–Immagine del Djin Block n. 9 nel visibile e nell'infrarosso termico.

Altro esempio d'applicazione delle tecniche termografiche è la Villa Litta Modigliani a Milano: dall'analisi del contenuto d'informazioni presente sulle immagini di figura 2.9-6, si nota come un'indagine termografica consente di individuare il corretto posizionamento dei tiranti all'interno di una copertura voltata, senza operare alcun intervento di smantellamento o asportazione di parti della copertura, ma operando in modo non invasivo e al contempo mirato e speditivo. Un'indagine termografica, permette di scoprire la posizione dei tiranti sotto la volta del portico, indicati in figura da una freccia; l'analisi al termico è confermata da un rilievo radar che conferma quanto già evidenziato dalle immagini termografiche (Gianinetto et al., 2005).

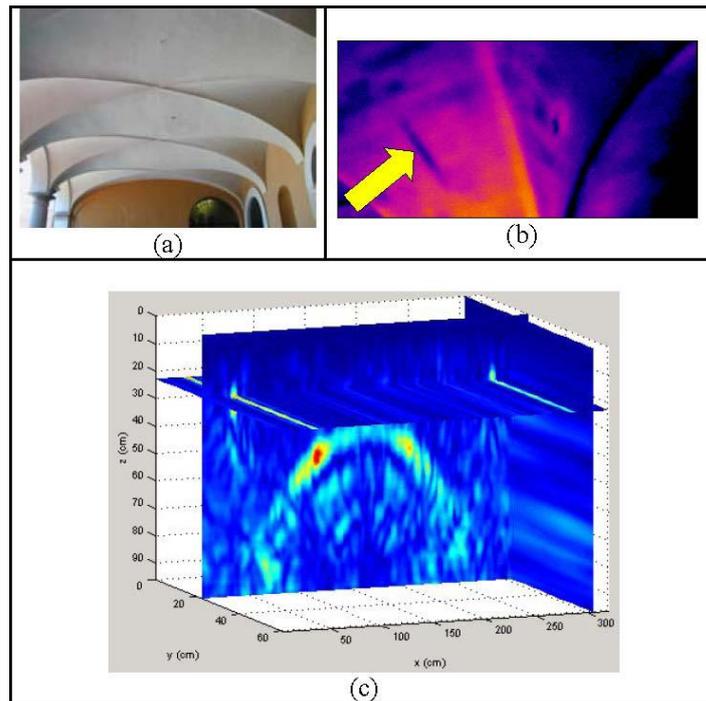


Figura 2.9-6 – Villa Litta Modigliani a Milano, particolare in foto del profilo depresso delle volte del portico (a, b). Rilevamento di un tirante inclinato nascosto dall'intonaco della volta rilevato dalla termografia (freccia gialla – (c) 3D di un volume misurato con una antenna radar di 1GHz sopra la volta del portico. (Gianinetto et al., 2005)

## Capitolo 3

# I SISTEMI PER IL RILIEVO TRIDIMENSIONALE

### 3.1 I SISTEMI IMAGE E RANGE BASED

Sono sempre più diffuse oggi le esperienze di documentazione digitale mediante rilievi e modellazione tridimensionale di siti e di oggetti significativi nel campo dei Beni Culturali; le nuove tecnologie hanno suscitato notevole interesse da parte di esperti nel campo della conservazione e della diagnostica, come restauratori e archeologi, essendo in grado di fornire validi risultati e di supportare accurate ispezioni. Ma la corretta selezione ed integrazione delle tecniche oggi disponibili richiede una grande esperienza e la necessità di combinarle insieme, dettata dalla complessità delle opere, ma anche dalla mancanza di un singolo metodo in grado di fornire risultati soddisfacenti per tutte le condizioni di rilievo. Oggi sono disponibili diverse metodologie per la documentazione, che vanno dal disegno a mano alla scansione, dal rilevamento topografico e fotogrammetrico al radar, dal satellite fino a tecniche speciali quali quelle legate alle acquisizioni subacquee. La metodologia da seguire dipende dalla complessità e dai requisiti richiesti dal progetto, dalla disponibilità del budget e dall'esperienza degli specialisti. La necessità di una documentazione digitale per la salvaguardia e la conservazione dei nostri beni culturali, nasce dalla costante minaccia e dai rischi cui sono soggetti, si veda a riguardo il paragrafo 2.7. Per la documentazione, la registrazione e la visualizzazione di siti, reperti e monumenti culturali, si possono distinguere tre principali approcci:

1. I metodi *image-based* fotogrammetrici: questi metodi sono usati ampiamente per le ricostruzioni 3D di oggetti architettonici, per la modellazione rigorosa di terreni e città o di monumenti e statue, ed anche per la realizzazione di modelli complessi. Gli strumenti sono altamente trasportabili e i sensori sono spesso a basso costo.

2. I metodi *range-based* propri dei laser a scansione: queste tecniche sono basate sui sensori attivi, che catturano direttamente l'informazione geometrica 3D di un oggetto, usando una luce laser artificiale o proiettando un pattern. Applicando differenti principi di misurazione, catturano milioni di punti in un tempo relativamente breve, ma richiedono grandi sforzi di editing nella correzione dei dati del modello 3D rilevato. Sono piuttosto semplici da usare, anche se sono ancora abbastanza costosi e spesso non pratici in alcuni settori.

3. Combinazione di image-based e range-based sono riportate negli esempi tratti da letteratura e discussi nel paragrafo 2.9. Possiamo tranquillamente dire che attualmente, per tutti i tipi di oggetti e di siti da rilevare, non ci sono singole tecniche di modellazione capaci di soddisfare contemporaneamente i costi, come anche la flessibilità, l'accuratezza e l'efficienza (Rizzi et al., 2007).

### **3.2 IL SISTEMA PER IL RILIEVO TRIDIMENSIONALE *IMAGE-BASED***

Il sistema image-based utilizza almeno due immagini di un oggetto per fornirci attraverso un modello matematico (in primo luogo le equazioni di collinearità), le informazioni 3D (sulla forma, sul contorno, sui vuoti, etc..) dell'oggetto stesso. L'acquisizione dei dati è veloce, e l'analisi delle immagini può essere intrapresa parallelamente alle attività di rilevamento, di scavo o di restauro; la fotogrammetria, che in fase di ripresa è sicuramente veloce, obbliga in fase di restituzione ad una lunga e delicata elaborazione dati. I sistemi adoperati per l'acquisizione delle immagini sono economici e permettono di documentare l'oggetto da tutelare tanto più quando vengono adoperate immagini prese a diverse altezze e da differenti posizioni, per meglio poterne descrivere la loro complessità, specialmente nel caso di vaste architetture come indicato nel paragrafo 3.2.1. Tra le metodologie image-based, la fotogrammetria è un approccio altamente accurato e flessibile, che si adatta alle differenti scale di restituzione. L'analisi condotta sulle immagini fotogrammetriche non è un compito difficile; con l'avvento di procedure pienamente automatiche e prodotti interamente digitali, negli anni '90, ciò è divenuto di più facile utilizzo (con un ampio range di software commerciali disponibili), e più economico. Gli applicativi fotogrammetrici disponibili, dopo la misurazione dei punti di legame e la fase di bundle adjustment, permettono di ottenere la calibrazione del sensore e l'orientamento dei dati, le coordinate 3D dei punti nello spazio oggetto da una rete di multi immagini, come anche modelli wireframe o 3D testurizzati (Rizzi A. et al., 2007). Sebbene gli applicativi fotogrammetrici terrestri siano generalmente di tipo user friendly e di facile utilizzo, è necessario avere una buona conoscenza fotogrammetrica per usarli nel modo corretto.

#### **3.2.1 LE PRESE**

Per la progettazione ed esecuzione di una ripresa fotogrammetrica terrestre, finalizzata al rilievo architettonico, possiamo distinguere le seguenti situazioni: prese singole; prese convergenti; prese stereoscopiche. Le prese singole sono eseguite quando l'oggetto da rilevare è considerato piano, ed

è sufficiente in fase di orientamento definire i parametri di una trasformazione piana tra coordinate immagine e coordinate oggetto. Il prodotto finale sarà un'ortofoto e/o una restituzione grafica bidimensionale.

Le prese singole possono essere secondo gli schemi:

-di presa "normale"

-con asse della camera inclinato

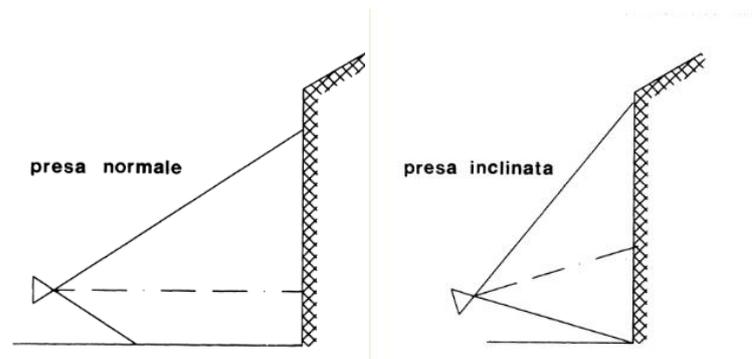


fig.3.2.1-1– Prese singole.

Lo schema di prese convergenti viene invece usato di norma:

-per la calibrazione di camere non metriche;

-per l'acquisizione di oggetti a forte tridimensionalità o a tutto tondo.

La geometria delle prese è facilmente adattabili a differenti situazioni.

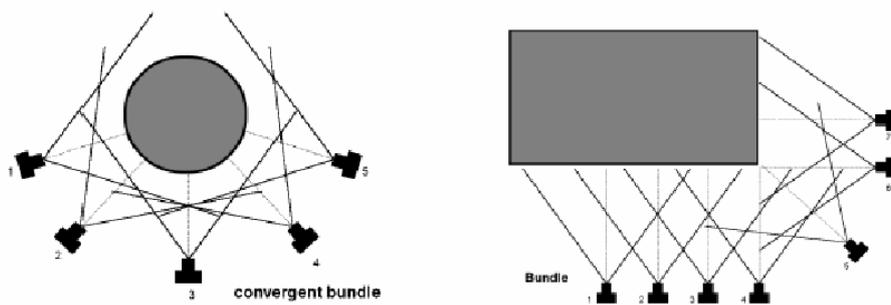


fig.3.2.1-2–Prese convergenti.

Uno schema classico di presa stereoscopica in assetto "normale" è la seguente:

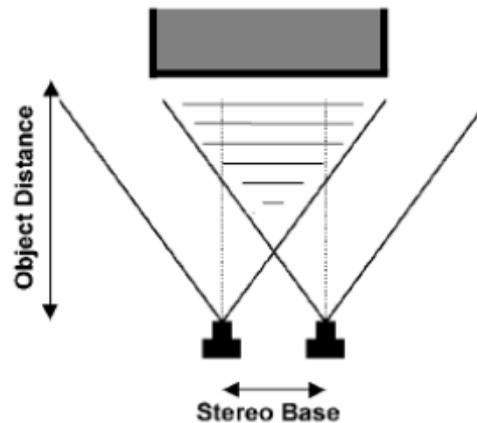


fig.3.2.1-3– Prese stereoscopiche.

Queste prese sono eseguite in tutte le situazioni in cui si vuole ottenere una restituzione tridimensionale dell'oggetto fotografato.

La fotogrammetria è una tecnica di rilevamento che si propone di determinare la posizione tridimensionale di punti-oggetto a partire da misure effettuate nello spazio oggetto. Tuttavia, per produrre un modello accurato e dettagliato di un edificio o di un monumento complesso sono necessari tempi lunghi di data processing delle immagini. La fotogrammetria ricopre un ruolo abbastanza importante nei campi della documentazione e conservazione dei beni culturali, dove sono necessari risultati dettagliati, precisi e credibili. Rispetto ai sensori attivi, la fotogrammetria ha il privilegio di ben adattarsi alla restituzione di bordi e di strutture, mentre contribuisce meno per la registrazione delle superfici (Rizzi et al., 2007). L'impiego di procedure automatiche per la correlazione tra le immagini, è da preferire quando nel campo dei beni culturali, si devono restituire superfici irregolari, come modelli digitali del terreno (DEM o DSM), bassorilievi, statue o superfici decorate. La correlazione automatica delle immagini avviene tramite algoritmi di *image matching*, del tipo *area-based* o *feature-based*, mediante il riconoscimento di primitive quali regioni o contorni, aree di immagini a diversi valori di grigio, che vengono selezionate attorno a finestre d'interesse. Le corrispondenze tra le immagini sono trasformate in coordinate 3D, utilizzando le equazioni di collinearità ed i parametri d'orientamento interno ed esterno, ottenuti precedentemente nella fase di orientamento delle immagini. La restituzione dell'oggetto avviene mediante misure manuali, semiautomatiche o automatiche di punti omologhi tra le immagini. Per immagini provenienti da superfici altamente riflettenti, che presentano alla luce un comportamento differente in funzione del punto di vista, può essere necessaria una fase di pre-elaborazione; vengono effettuate alcune operazioni come l'attenuazione del rumore, l'equalizzazione radiometrica, come nel caso di prodotti provenienti da data set differenti.

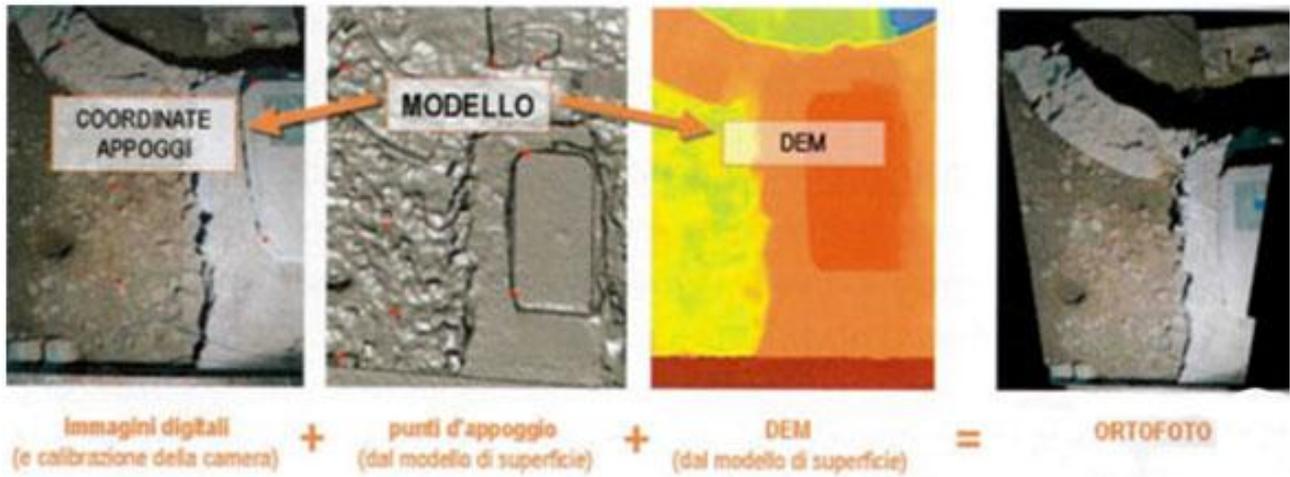


Fig. 3.2.1-4–Dall’immagine digitale al modello di superficie texturizzato.

### 3.2.2 EQUAZIONI DI COLLINEARIETA’

Dati due punti che osservano in modo univoco un punto A su una scena, le equazioni di collinearità descrivono, nella condizione ideale di camera stenopeica, le relazione esistenti tra le coordinate immagine di A', proiezione di A sulla scena, e le coordinate oggetto di A nello spazio, noti la focale e l'assetto della camera. Indicati con  $\Delta x$  e  $\Delta y$ , gli scostamenti dalla condizione proiettiva ideale di collinearità, dovuti alle distorsioni radiali simmetriche, alle rifrazione reali delle lenti ed alle aberrazioni cromatiche, espressi dalla 3.1:

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_u + \Delta x_f \\ \Delta y = \Delta y_r + \Delta y_d \end{cases} \quad 3.1$$

dove:

- $\Delta x_r = \frac{\bar{x}}{r} \Delta_r$ ;  $\Delta y_r = \frac{\bar{y}}{r} \Delta_r$  distorsioni radiali simmetriche;
- $\Delta x_d = [(2\bar{x}^2 + r^2)P_1 + 2P_2\bar{x}\bar{y}]$ ;  $\Delta y_d = [2P_1\bar{x}\bar{y} + (2\bar{y}^2 + r^2)P_2]$  distorsioni tangenziali;
- $\Delta x_u$  (polinomio di 3° / 4° grado) non planarità del piano immagine
- $(\Delta x_f = b_1\bar{x} + b_2\bar{y})$  deformazioni nel piano immagine;

le equazioni di collinearità corrette coi termini di distorsione 3.1 divengono le 3.2:

$$\begin{cases} \Delta x = -x_0 + \frac{\bar{x}}{c} \Delta c + \bar{x}r^2 k_1 + \bar{x}r^4 k_2 + \bar{x}r^6 k_3 + (2\bar{x}^2 + r^2)P_1 + 2P_2\bar{x}\bar{y} + b_1\bar{x} + b_2\bar{y} \\ \Delta y = -y_0 + \frac{\bar{y}}{c} \Delta c + \bar{y}r^2 k_1 + \bar{y}r^4 k_2 + \bar{y}r^6 k_3 + 2P_1\bar{x}\bar{y} + (2\bar{y}^2 + r^2)P_2 \end{cases} \quad 3.2$$

con:

$(x_0, y_0)$  :offset del punto principale;

$\Delta x$  e  $\Delta y$  :correzione dei termini delle coordinate immagine  $(x,y)$ ;

$\Delta c$  :correzione sulla focale della camera;

$K_1, K_2, K_3$  :coefficienti della distorsione radiale simmetrica;

$P_1, P_2$  : coefficienti della distorsione tangenziale;

$b_1, b_2$  : coefficienti della distorsione affine;

$\bar{x} = x - x_0$  : componente in direzione x, della distanza radiale r dal punto principale (con x coordinata immagine misurata);

$\bar{y} = y - y_0$  : componente in direzione y, della distanza radiale r dal punto principale (con y coordinata immagine misurata) ;

$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$  : distanza radiale dal punto principale.

### 3.2.3 CALCOLO DELL'ORIENTAMENTO ESTERNO:

#### BUNDLE ADJUSTMENT O TRIANGOLAZIONE A STELLE PROIETTIVE

Le unità elementari della triangolazione a stelle proiettive sono i “singoli fotogrammi” ; i punti immagine ed il centro di presa di ciascun fotogramma definiscono una stella di raggi nello spazio. La triangolazione a stelle proiettive considera le relazioni tra le coordinate immagine e le coordinate oggetto senza introdurre le coordinate modello. I parametri noti sono: le coordinate immagine dei punti di appoggio e dei punti di legame; le coordinate oggetto dei punti di appoggio. Le incognite sono:l'orientamento interno e l'orientamento esterno. I parametri d'orientamento interno vengono calcolati in un processo di stima unico, così come i parametri di orientamento esterno di tutte le stelle del blocco (ossia di tutti i fotogrammi), che vengono calcolati simultaneamente.

Le stelle proiettive (i fotogrammi) vengono:

-traslate (tre traslazioni in  $X, Y, Z$ );

-ruotate (tre rotazioni  $\omega, \phi, \kappa$ );

affinché:

-i raggi omologhi si intersechino al meglio in corrispondenza dei punti di legame;

-passino il più possibile per i punti di appoggio.

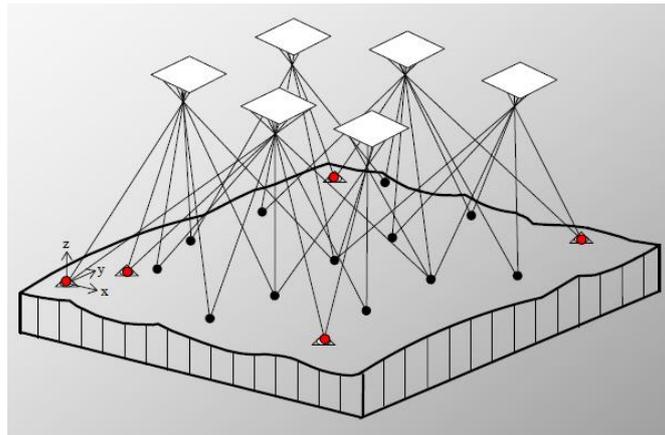


fig.3.2.3-1– Triangolazione a stelle proiettive

Per ogni punto immagine si scrivono due equazioni di collinearità. Combinando tutte le equazioni di tutti i punti immagine, si perviene ad un sistema di equazioni non lineari da risolvere. Le equazioni vengono linearizzate con uno sviluppo in serie di Taylor, ed il sistema viene risolto tramite una soluzione ad i minimi quadrati. Le osservazioni linearizzate sono di questo tipo:

$$A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 + w = 0$$

$x_1$  sono i parametri di orientamento esterno delle stazioni di presa;  $x_2$  sono i punti oggetto;  $x_3$  sono i parametri di calibrazione della camera. Le matrici  $A_i$  sono composte dalle derivate parziali delle funzioni, fatte rispetto alle incognite, ed infine  $w$  è il vettore delle discrepanze delle coordinate immagine ( $w = l - e$ ). La stima dei parametri addizionali e contemporaneamente la stima dei parametri d'orientamento esterno di ogni immagine e delle coordinate dei punti oggetto, avviene per mezzo della collimazione di un certo numero di punti omologhi in tutte le immagini.

### 3.2.4 SPACE RESECTION O MODELLO A VERTICE DI PIRAMIDE

Il singolo fotogramma viene orientato utilizzando un sufficiente numero di punti di appoggio (tale numero deve garantire la ridondanza di stima nel processo di soluzione del problema).

Tale procedura viene utilizzata per ortoproiettare un'immagine, ma il concetto non è applicabile ai punti di legame. Occorrono tre punti d'appoggio tridimensionali, per ogni fotogramma di cui si misurano le coordinate immagine. Si scrivono sei equazioni di collinearità in sei incognite. Le sei equazioni devono essere linearizzate attorno ai valori approssimati delle incognite.

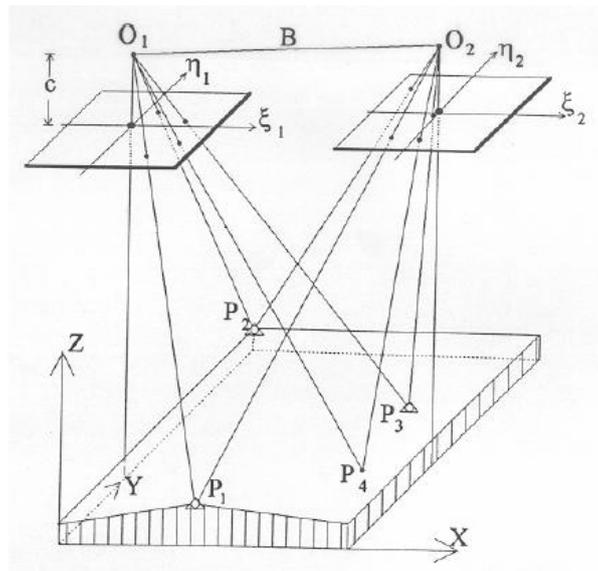


fig.3.2.4-1– Calcolo dell'orientamento esterno per due fotogrammi mediante vertice di piramide

La procedura è nota come “vertice di piramide” e si può utilizzare solo con strumenti analitici.

Operativamente si tratta di collimare sull'immagine i punti di appoggio e fissarne le coordinate oggetto. Tale procedura presenta alcuni inconvenienti così riassumibili:

- non si sfrutta la condizione di intersezione dei raggi omologhi in corrispondenza di altri punti oggetto;
- sono necessari tre punti plano-altimetrici.

### 3.2.5 Self-calibration e considerazioni sulla geometria di progetto, alcuni risultati da bibliografia

Il termine di self-calibration in Computer Vision viene utilizzato quando non viene impiegato nessun oggetto calibrato; le proprietà metriche della camera e dell'immagine sono ricavate da un insieme di immagini non calibrate, utilizzando vincoli presenti sulla scena e sui parametri della camera (Remondino & Fraser 2006). In generale per eseguire una self-calibration, vengono applicati tre tipi di vincoli (separatamente o in associazione): vincoli di scena, vincoli di movimentazione della camera e vincoli sui parametri intrinseci della camera. Nel caso di movimentazione della camera o della scena sconosciuti, possono essere utilizzati solo i vincoli sull'orientamento interno.

Vari studi sperimentali nel campo della fotogrammetria terrestre [Fraser, 1996; Fryer, 1996; Clarke et al., 1998; Gruen & Beyer, 2001; El-Hakim et al., 2003; Remondino & Fraser, 2006], hanno dimostrato che uno dei punti critici per il successo di una self-calibration è la geometria del progetto; infatti è meglio generalmente calibrare i parametri interni della camera usando la rete

d'immagini più appropriata, per poter recuperare la geometria degli oggetti al momento della presa. Tali studi hanno confermato che una self-calibration, è attendibile solo quando la geometria della rete ( progetto) è favorevole, ossia la configurazione della base della camera comprende:

- immagini altamente convergenti; perché l'accuratezza di una rete aumenta con l'aumentare degli angoli di convergenza tra le immagini (vedi fig.3.2.1-2). L'aumento degli angoli di convergenza, implica anche un aumento del rapporto base fra le immagini-distanza dall'oggetto.
- un grande numero di punti oggetto ben distribuiti su tutta l'immagine, e se l'oggetto è tridimensionale, devono essere rappresentativi di tutte le profondità presenti; perché l'accuratezza aumenta con il numero dei punti misurati per immagine; l'importante è che i punti aggiunti all'interno di un'immagine, offrano migliori prospettive per correggere la deviazione dal modello di collinearità per tutto il formato dell'immagine;
- immagini ruotate di  $\pm 90^\circ$ , sono indispensabili soprattutto se i punti collimati sono disposti su un piano, per rompere la correlazione esistente tra i parametri d'orientamento interno, i parametri d'orientamento esterno e gli APs; infatti una geometria con immagini ruotate, convergenti e acquisite a differenti distanze dal reticolo di calibrazione, può favorire l'eliminazione o la riduzione di tale problematica.

L'accuratezza di una rete migliora aumentando il numero di raggi ottici che vedono su un'immagine un dato punto oggetto, ma studi sperimentali hanno dimostrato che il numero ottimale di immagini è 8, aumentando tale numero la precisione in realtà non cresce in modo significativo.

Pertanto, da quanto è stato sottolineato segue che, per ottenere risultati accurati e corretti sulle immagini, le camere impiegate devono essere calibrate (Remondino & Fraser; 2006), ma al momento non c'è una soluzione commerciale capace di eseguire un orientamento automatico delle immagini senza marche, mentre la calibrazione basata su target codificati è una questione già risolta da alcuni anni (Ganci e Hanley, 1998; Cronk et al., 2006). Difatti, sistemi di calibrazione possono essere realizzati mediante pannelli piani, su cui vengono stampate matrici di punti; per esempio, nel sistema I-Witness si usano piccoli pannelli svincolati tra loro contenenti set di target la cui posizione relativa è nota a priori. Tali sistemi sono trasportabili e più flessibili, adattandosi diversamente alle diverse condizioni di presa, permettendo rilievi direttamente sul campo.

La calibrazione con questi sistemi nel caso di una field-calibration, può prevedere l'importazione tramite un file di testo delle coordinate dei punti di controllo, note per esempio da un rilievo topografico; scattate una serie di foto alla griglia di test, l'operatore successivamente individua sul progetto i target di riferimento, definendo per ognuno un identificativo corrispondente a quello assegnato ai punti di controllo. Il software consente un riconoscimento automatico dei target codificati, e ciò consente di sveltire enormemente il processo di selezione dei vari punti, senza che

alcun operatore debba intervenire nella fase di riconoscimento. L'insieme dei punti d'appoggio e dei punti di controllo selezionati sui fotogrammi, vengono inseriti nella procedura di risoluzione per bundle adjustment, e vengono così stimati i parametri di calibrazione e d'orientamento esterno della camera.

### 3.2.6 L'ortofoto

L'ortofoto è un'immagine metricamente corretta, nella quale le distorsioni di sistema e di rilievo sono state rimosse. La prospettiva centrale è stata ricondotta ad una prospettiva ortografica (raggi proiettivi paralleli). L'ortofoto è ottenuta orientando la scena singolarmente (determinazione dei parametri di orientamento esterno), e correggendone la geometria secondo le equazioni di collinearità. Il processo di ortoproiezione è condotto agendo su un'immagine singola, recuperando il dato di quota da una fonte esterna, il DEM (Digital Elevation Model). Nel processo di ortoproiezione serve aver orientato l'immagine (quindi sono noti i sei parametri d'orientamento interno ed i tre dell'orientamento esterno), ed il DEM dell'area da correggere.

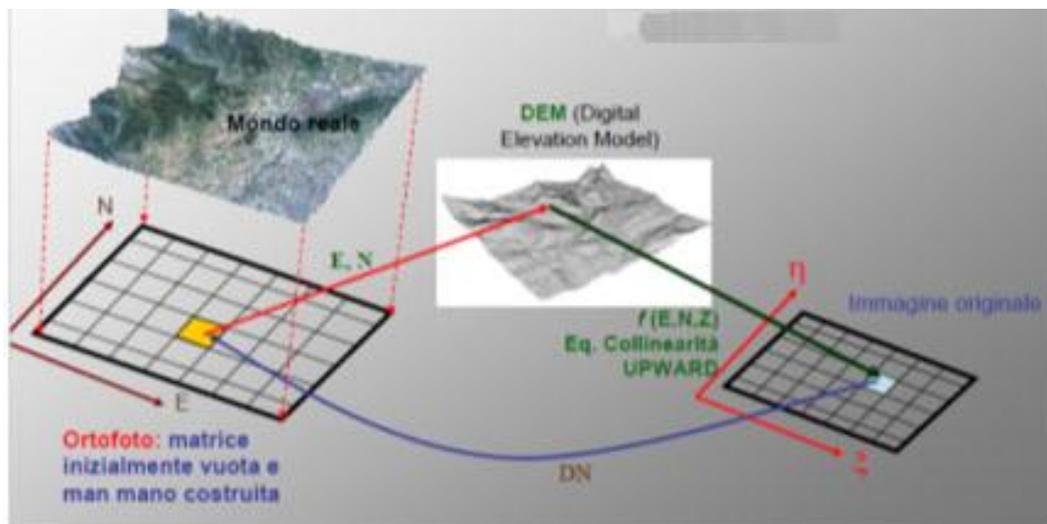


Fig.3.2.6– Ortoproiezione

### 3.3 Il sistema per il rilievo tridimensionale range-based

Il laser a scansione è una metodologia di ultima generazione per l'acquisizione dei dati topografici, ed è certamente una delle tecnologie che sta trovando una più grande espansione nel campo del rilevamento dei Beni Culturali. Laddove per esempio la fotogrammetria non è in grado di riconoscere superfici sulle quali non vi è sufficiente contrasto (come quelle a tinta unita), se non ricorrendo all'uso di target adesivi o alla proiezione di immagini strutturate, il rilievo con sensori attivi basati sulla luce laser, rendono pressoché indipendente il risultato della misura dalla texture del soggetto da riprendere, modificandone l'aspetto esteriormente con luce opportunamente codificata, il cui contenuto informativo è riconoscibile da un sensore elettronico.

Queste nuove tecnologie hanno rivoluzionato il settore del rilievo, sia nel campo dei beni culturali che in quello industriale, rendendo possibile in un tempo estremamente breve: il rilevamento tridimensionale di oggetti di piccole come di grandi dimensioni; l'acquisizione di enormi quantità di dati. Le caratteristiche comuni a queste strumentazioni sono: le dimensioni ridotte e quindi relativa comodità nel trasporto; l'alta velocità nella disponibilità di decine di migliaia di punti al secondo; la restituzione dei risultati rivelati in tempo reale e l'uso di finestre di scansione in verticale e panoramiche, o anche personalizzate in orizzontale come per gli scanner a tempo di volo. Il laser è un'apparecchiatura che trasforma energia da una forma primaria (elettrica, ottica, chimica, termica o nucleare) in un fascio monocromatico e coerente di radiazioni elettromagnetiche di intensità elevata: la luce laser; infatti il termine L.A.S.E.R. è l'acronimo di "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (amplificazione della luce da emissione stimolata di radiazioni). La sua caratteristica è di essere una luce monocromatica, unidirezionale che si propaga per lunghe distanze e con coerenza temporale, usufruendo di una stessa frequenza e fase per raggiungere una elevata intensità e potenza. La precisione dello strumento varia al variare della distanza e dell'angolo di incidenza del raggio, ed è data dalla combinazione di tutti gli errori insiti nel sistema. La portata di un laser è funzione del tipo di materiale colpito dal raggio ed, in particolar modo, della riflettività del materiale alla lunghezza d'onda del laser; infatti maggiore è la riflettività maggiore sarà la portata ottenibile, mentre minore è la riflettività (e quindi maggiore la parte di energia assorbita) minore sarà la portata. Questo avviene semplicemente perché il raggio riflesso dalla superficie si propaga nell'atmosfera che non è altro che un corpo trasparente. Come tale ha la proprietà di assorbire, trasmettere e riflettere una qualsiasi radiazione elettromagnetica.

### 3.3.1 Ricezione ed elaborazione del segnale

I laser scanner attualmente presenti in commercio, adottano tre diversi principi operativi, e si distinguono in scanner che adottano: il principio della triangolazione del segnale; la misura del “tempo di volo” (TOF, Time Of Flight); il metodo di comparazione della fase. A loro volta gli scanner a triangolazione si distinguono per la diversa tecnologia adottata dal sensore in: single spot; a lama di luce laser; a luce strutturata e a luce codificata.

#### 3.3.1.1 I sistemi a triangolazione laser: laser con sensore a single spot e coassiale col raggio laser

Il sistema è costituito da una sorgente luminosa (emettitore) e da un sensore piano, posti entrambi ad una distanza vincolata  $b$  da un punto  $A$  di coordinate  $(x_A, z_A)$  come in figura 3.3.1-1. La sorgente emette un sottile fascio di luce puntiforme, che raggiunge un punto  $A$  e viene riflesso e ripreso da un sensore. La sorgente puntiforme, il punto luminoso riflesso ed il centro del sensore costituiscono un triangolo. Il principio di misura delle coordinate di un punto è dunque del tutto analogo alla triangolazione in topografia, le coordinate del punto  $A$  da rilevare sono note per intersezione in avanti.

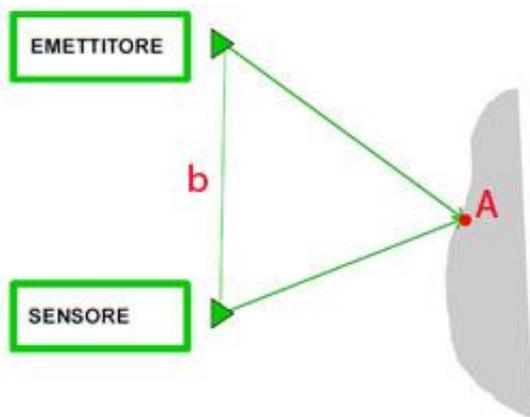


Fig.3.3.1-1– Sensori a triangolazione.

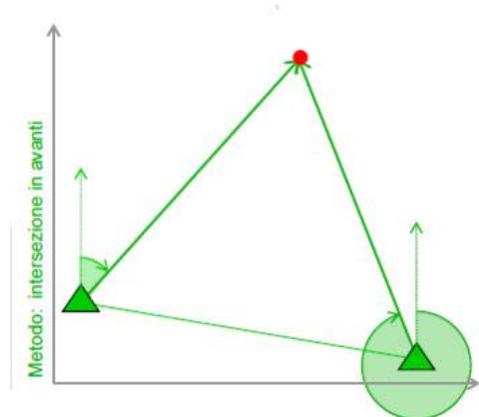


Fig.3.3.1-2 – Intersezione inversa.

Siano noti l'angolo di emissione  $\alpha$ , la distanza  $b$  tra sorgente e sensore, la distanza focale  $f$  tra sensore e lente, e la traccia del punto riflesso  $p$  sul sensore piano, da semplici relazioni trigonometriche sui triangoli, l'angolo  $\beta$  del sensore è data da:

$$\arctg \beta = \frac{f}{p}$$

$$z_A = \frac{b}{\text{tg}\alpha + \text{tg}\beta} ; \quad x_A = z_A \times \text{tg}\alpha = \frac{b}{1 + \frac{\text{tg}\beta}{\text{tg}\alpha}}$$

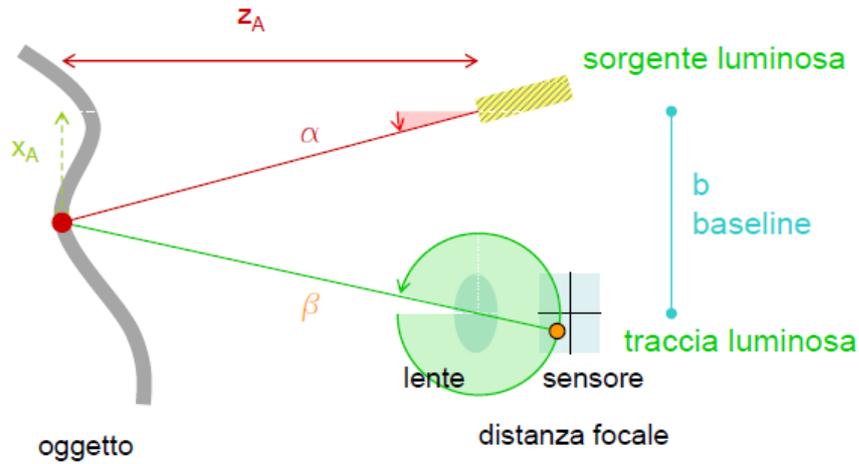


Fig.3.3.1-3– Sensori a luce puntiforme.

Si può notare come  $\beta$  dipenda dal rapporto tra lo scostamento del raggio dal centro del sensore (p), misurato da una camera CCD o CMOS, e dalla focale f, mentre  $\alpha$  viene misurato direttamente.

Si osserva che a parità di un angolo di proiezione  $\alpha$ , la differenza di profondità  $z_A$ , letta su un sensore di posizione, comporta una variazione di  $\Delta\beta$  sul valore di  $\beta$ .

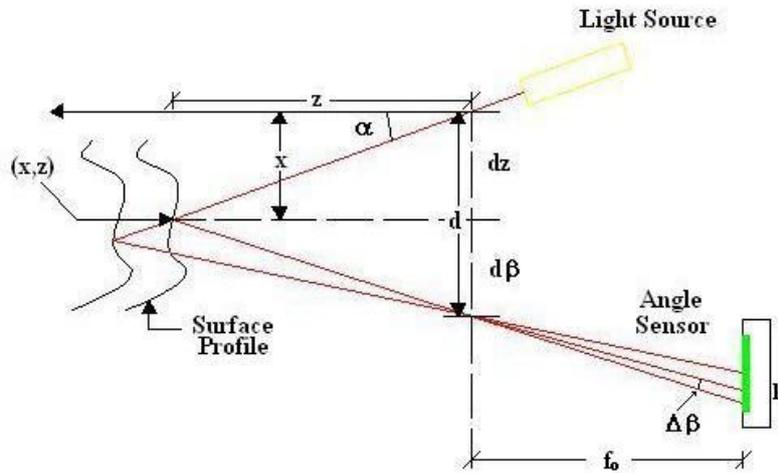


Fig.3.3.1-4 – Nei laser a triangolazione, una variazione di profondità z viene letta come una variazione d’angolo.

Questo sistema di tecnologia, è uno dei sistemi più semplici, oggi evoluti largamente adottato nelle versioni più aggiornate, è dotato di sensori inclinabili rispetto al piano dell’ottica, in accordo col principio di Scheimpflug, che permettono di ottenere un’immagine sempre messa a fuoco a qualsiasi distanza dal punto. Si tratta di strumenti dotati di un sensore radiometrico coassiale al raggio laser che, per ogni punto acquisito se dotati di fotocamera integrata, possono misurare anche il relativo tono radiometrico.

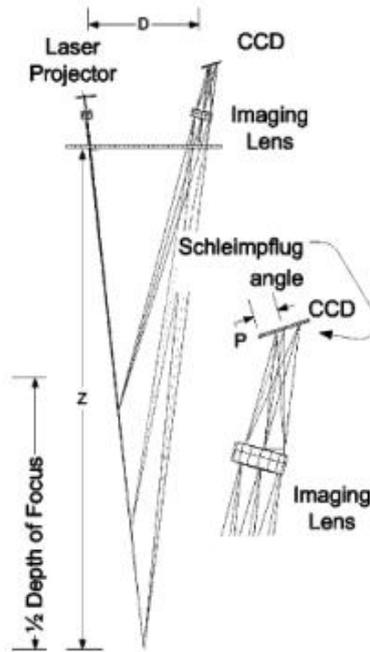


Fig.3.3.1-5– Particolare dell’angolo di Scheimpflug.

### 3.3.1.2 Sensori a lama di luce

I sensori a lama di luce utilizzano lo stesso principio di funzionamento degli scanner a single spot, ma si riferiscono ad un insieme di punti allineati che vanno a formare un segmento; una superficie da misurare viene investita da una lama di luce laser, che viene osservata e descritta in ogni punto da una camera CCD o da un sensore piano. La lama di luce laser proiettata su una superficie piana, produce un segmento luminoso, mentre si deforma diversamente su superfici curve individuandone il profilo, come mostrato in figura 3.3.1.2-1.

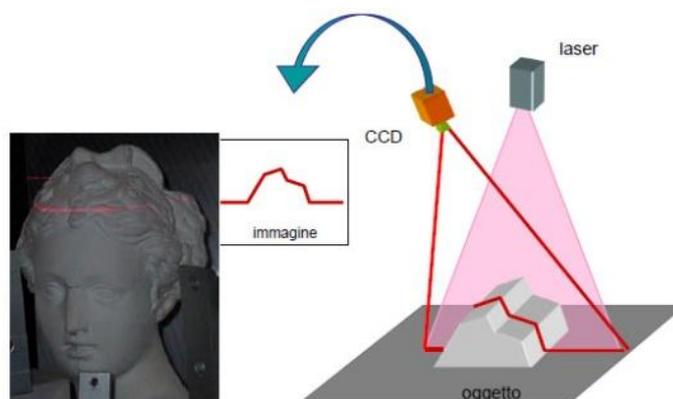


Fig.3.3.1.2-1 – Sensori a lama di luce

Per ogni punto, in accordo col sistema a triangolazione single spot, vengono calcolate le coordinate corrispondenti al segmento illuminato. Un sistema di acquisizione per singolo punto o per insieme di punti, può avvenire con un movimento rotatorio o traslatorio della testa di scansione e allora si parla di sistemi a lama di luce laser in movimento. Movimenti meccanici sono imposti su un oggetto, pertanto la scansione laser (range map) risultante, relativa ad un'area rettangolare, dipende dall'estensione del movimento di scansione, reso possibile dallo strumento. E' chiaro che sistemi più movimentabili presentano un prezzo più elevato. Un esempio di laser a triangolazione a quattro lame di luce, dotato di sensore RGB coassiale integrato, è mostrato in figura 3.3.1.2-2. Si tratta in genere di sensori con una risoluzione di scansione stabilita dalla casa costruttrice, e con un obiettivo a focale fissa. Il numero di scansioni acquisite, è funzione della dimensione della scena rilevata. La scelta del numero di immagini necessarie può essere demandata al software di gestione dello strumento o imposta dall'operatore in funzione dell'entità di sovrapposizione tra nuvole adiacenti.



Fig.3.3.1.2-2– Scanner a triangolazione NextEngine HD-sensore a quattro lame di luce.

### 3.3.1.3 Sensori a luce strutturata e codificata

La riproduzione della geometria di un oggetto può avvenire anche per proiezione di pattern codificati come nei sistemi a luce strutturata. La risoluzione su questi sistemi risulta più elevata, ed è crescente in funzione della quantità delle transizioni di gray code impiegate e proiettate sull'oggetto, e del grado di raffittimento di pattern impiegato. Un sistema di questo tipo è in grado di riconoscere le diverse profondità presenti sull'oggetto, grazie anche all'effetto Moire, che consiste nella generazione di figure d'interferenza a partire dalla sovrapposizione tra due pattern all'apparenza simili ma non identici. L'oggetto osservato da coppie di immagini a diversa frequenza rende un'informazione utile data dai battimenti delle due onde. Calibrando opportunamente il segnale, questo metodo permette di misurare con grande accuratezza l'andamento spaziale di una superficie. Un sistema alternativo alla proiezione di pattern verticali, per il calcolo delle profondità,

è dato dalla misurazione della deformazione di geometrie note di pattern pseudo-casuali. Sebbene si tratti di sistemi di rilevamento per piccoli volumi, affinché un apparato a triangolazione funzioni bene è necessario che la baseline camera-sorgente sia dello stesso ordine di grandezza della distanza tra strumento e superficie da misurare. Tali distanze devono essere tali da permettere al sensore di inquadrare un oggetto con un rapporto ottimale distanza/base di presa che va da 1 (buona precisione) a 5 (scarsa precisione).

Osservando che il range massimo raggiunto da questi sistemi è intorno ai 10 m, si può dire che questi siano perlopiù idonei in campo industriale per il rilevamento di piccoli oggetti, o tutte le volte che si voglia prototipare una forma con estrema precisione. Nel campo dei beni culturali sono adoperati per la riproduzione di statue o elementi decorativi, sia per scopi di documentazione che per le esigenze legate alla conservazione ed al restauro.

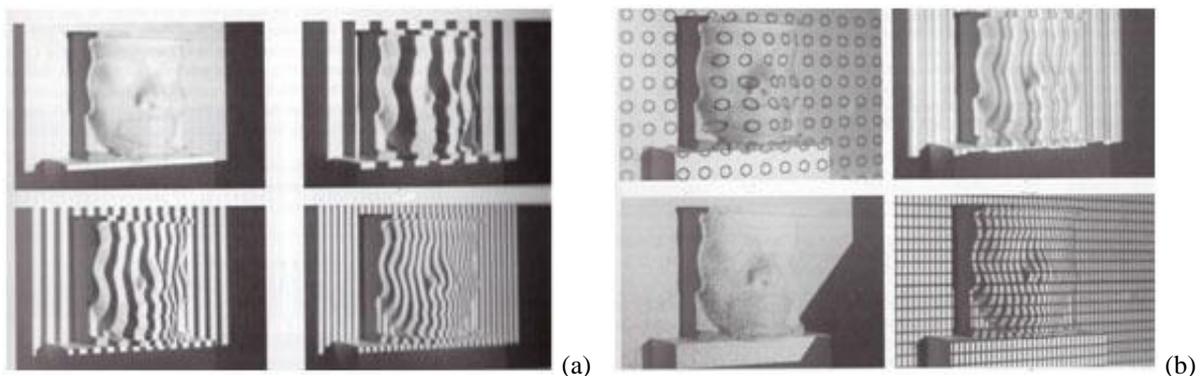


Fig.3.3.1.3.1 – Acquisizione di sensori a luce strutturata tramite: (a) gray code; (b) pattern di diversa misura 3D.

### 3.3.2 Sensori basati sulla misura di distanza

I laser scanner a tempo di volo (time of flight), sono dispositivi capaci di inviare un impulso elettromagnetico e di ricevere il segnale riflesso, misurando l'intervallo di tempo trascorso e quindi la distanza tra lo strumento ed il punto rilevato. Il funzionamento avviene per deflessione del raggio laser, mediante un meccanismo di specchi rotanti ed oscillanti che, con il variare dell'angolo azimutale e zenitale, illumina il terreno in punti contigui. Questo sistema opera misurando anche decine di migliaia di punti al secondo formando delle "nuvole di punti". Per ogni misurazione, oltre alla tripletta di coordinate  $(x,y,z)$ , il sistema fornisce anche l'intensità del segnale di ritorno descrivendo la superficie dell'oggetto scansionato. Il sistema scanner TOF (Time Of Flight) è quindi costituito dai seguenti componenti: un laser che emette impulsi di luce infrarossa, indirizzati e

convogliati da una lente di emissione; un sistema di specchi rotanti, necessari per deflettere il raggio; una lente di ricezione, che capta la parte del segnale di eco del raggio laser riflesso dalla superficie di impatto dell'oggetto; un diodo ricevitore che produce un segnale di ricezione elettrico; un orologio stabilizzato al quarzo, che quantifica l'intervallo di tempo tra segnale emesso e l'eco del segnale ricevuto. La distanza del punto dal centro strumentale è calcolata tramite la misura del tempo di volo mediante un'operazione molto semplice:

$$D = \frac{TOF \times c}{2}$$

$$2D = TOF \times c$$

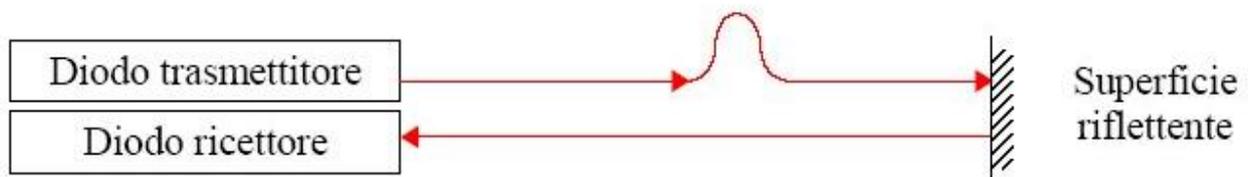


Fig. 3.3.2-1–Sistema a tempo di volo.

La precisione nella stima della distanza, che dipende dalla stima della precisione del tempo di volo, non risulta molto elevata, a causa della presenza del rumore sul segnale di ritorno causato dai meccanismi ottico- elettronici. Sebbene questi sistemi siano meno accurati di quelli che operano per differenza di fase (precisione da alcuni mm ad un paio di cm ed oltre), offrono il vantaggio di operare in un range più ampio, da 0,5 sino ai 6000 metri ed hanno una velocità di acquisizione dei punti elevata (per esempio 12.000 punti al secondo).

I sistemi basati sulla misura del tempo di volo hanno un'incertezza 20 volte maggiore rispetto ai sistemi a triangolazione, e difficilmente tale valore risulta inferiore ai 2mm. Tale precisione rende i sistemi a tempo di volo adeguati per il rilievo di strutture e architetture di grandi dimensioni, dove un errore di qualche millimetro può essere trascurabile a fini di rappresentazione.

Gli scanner a differenza di fase sono caratterizzati invece da elevate velocità di acquisizione e notevoli densità di punti acquisiti (625.000 punti al secondo), in un range massimo di circa 100 m e

con un'accuratezza che va dai 25 μm al centimetro. L'accuratezza di questi laser varia in modo lineare rispetto alla distanza e con valori che dipendono dalla tipologia di laser (Sgrenzaroli M. et al., 2007); infatti tali valori di accuratezza sono forniti dalle case costruttrici in base al range di acquisizione di ciascun laser (da notare che tali scanner lavorano su corte distanza e con una velocità d'acquisizione minore rispetto agli scanner a tempo di volo).

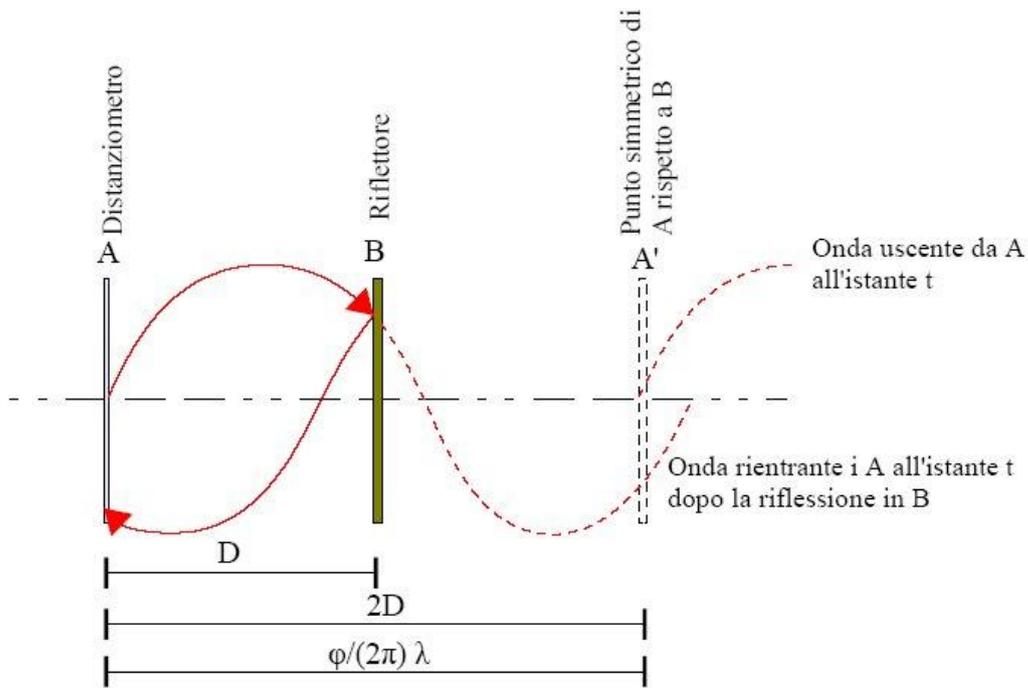


Fig. 3.3.2-2–Sistema a differenza di fase per il calcolo della distanza di un punto da uno stazione, data come la differenza di fase tra l’impulso emesso e quello trasmesso.

Questi scanner utilizzano un raggio laser modulato con un’onda armonica, per scansionare lo spazio punto per punto, calcolando la distanza del punto dal centro dello strumento, mediante un circuito che determina la differenza di fase tra l’impulso emesso e quello riflesso, ed il tempo necessario all’onda per percorrere la distanza di andata e ritorno del segnale. Indicata con  $\Delta\phi$  la differenza di fase,  $f_{AM}$  la modulazione di frequenza e  $c$  la velocità della luce nel vuoto, segue che la distanza  $D$  è determinata dalla relazione:

$$D = \frac{c}{4\pi} \times \frac{\Delta\phi}{f_{AM}}$$

L’elaborazione di questo dato è piuttosto complessa, con tempi di calcolo maggiori rispetto ad altri sistemi, ma questi sistemi raggiungono precisioni più elevate. Un limite di questo principio, è la

necessità di avere un segnale di ritorno che sia dotato di adeguata potenza, con conseguente riduzione della portata dello strumento, e la possibilità di avere all'interno della griglia di acquisizione, un numero consistente di punti non definiti.

### **3.3.3 La progettazione ed il rilievo laser scanner**

La risoluzione di uno scanner, può essere definita come la sua capacità di rilevare e rappresentare oggetti di dimensioni minime, ovvero la densità massima della nuvola di punti.

Un ridotto passo angolare e le dimensioni contenute dello spot laser, permettono di determinare con minore ambiguità la posizione del punto scansionato. La risoluzione ottenibile è uno dei fattori principali che in un rilievo dirigono la scelta verso uno strumento piuttosto che un altro. Secondo le finalità del rilievo (una statua o una cava), o le distanze dall'oggetto (brevi o elevate), il fattore predominante è la risoluzione, in un giusto compromesso con la portata massima dello strumento.

Un elenco dei modelli di laser scanner TOF più diffusi e degli scanner a triangolazione, con indicazione della distanza massima di acquisizione, del sistema di ricezione del segnale è riportato in figura 3.3.3-1, 3.3.3-2. Mentre un elenco dei principali strumenti software disponibili sul mercato è riportato in figura 3.3.3-3.

Brand	RIEGL Laser Measurement Systems GmbH	RIEGL Laser Measurement Systems GmbH	RIEGL Laser Measurement Systems GmbH	Trimble	Trimble	Z+F (Zoller + Fröhlich GmbH)	Z+F (Zoller + Fröhlich GmbH)
System	RIEGL VZ-400	RIEGL VZ-1000	RIEGL LMS-Z620	CX	FX	Z+F IMAGER® 5006h	IMAGER 5006EX
Date of introduction	Autumn 2008	Summer 2010	Spring 2008	2010	2008	April 2010	March 2009
<b>Dimensions</b>							
Weight [kg] (sensor only)	9.8	9.8	16	11.8	11	13.2	
Weight [kg] (sensor + peripherals)	12	12	18	variable	variable	14	30.6
Size [cm] (sensor only)	30.8 x 18	30.8 x 20	46.3 x 21	12 x 52 x 35.5	42.5 x 16.4 x 23.7	37.2x19	41.4x39.5
Battery internal/external	both	both	external	external	external	24V DC / 90-260V AC	18V DC scanner
<b>Laser Ranger</b>	-	-		-	-	internal	internal
Range measurement principle [1]	pulse	pulse	pulse	combined pulse & phase	phase		
Wavelength [nm]	near infrared	near infrared	near infrared	660	685	phase	phase
Laser safety classification	1	1	1	3R	3R	visible	visible
Min. / max. range [m]	1.5 / 600	1.5 / 1200	2 / 2000	1 / 80	1 / 80	3R (ISO EN 60825-1)	3R (ISO EN 60825-1)
Range resolution [mm]	1	1	1	variable	variable	0.4 m / 79 m	0.4 m / 79 m
Range accuracy [mm] (1 sigma)	5	8	10	2	1-pass HQ: 2.4 2-pass: 1.5	0.1 mm	0.1 mm
Beam diameter at exit [mm]	7	7	14	N/A	N/A	? 1 mm	? 1 mm
Beam divergence/spot at 50 m distance [mm]	18 (0.3mrad )	18 (0.3mrad )	16 (0.15mrad)	13	16	3 mm at 1 m distance	3 mm at 1 m distance
Intensity recording (Y[#bits]/N)	Y [16]	Y [16]	Y [12]	Y	Y	0.22 mrad	0.22 mrad
Hits per point before averaging	single shot	single shot	single shot	variable	variable	Y (24 bits) / 24 bits	Y (24 bits) / 24 bits
<b>Scanning Characteristics</b>							
Max. FoV VxH [D]	100 x 360	100 x360	80 x360	360 x 300	360 x 270	310° x 360°	310° x 360°
Scan angle step size H/V [D]	0.0024 to 0.5 / 0.0024 to 0.288	0.0024 to 0.5 / 0.0024 to 0.288	0.004 to 0.75 / 0.004 to 0.2	0.002	0.0171 x 0.0342	0.0018°/0.0018°	
Scan angle accuracy H/V [D] (1 sigma)	0.0005	0.0005	0.0025 / 0.002	0.004 / 0.007	0.008	0.007° rms / 0.007° rms	
Beam deflection mechanism	rotating polygon, rotating head	rotating polygon, rotating head	rotating polygon, rotating head	rotating mirror	rotating mirror	rotating mirror	rotating mirror
Measurement rate [Z] [kHz]	300 (eff. 122)	300 (eff. 122)	24 (eff. 11)	54	216	1,016kHz	508kHz
Scan duration typical/highest resolution [min]	0.75 for 100°x360° /	0.75 for 100°x360° /	1 for 80°x 80° /	variable	variable	3min22 / 26min40	3min22 / 26min40
<b>Operation Characteristics</b>							
Temperature range/humidity range [°C/ %]	0 to 40 (operation); -10 to 50 (storage), humidity range: +31°C / 80%	0 to 40 (operation); -10°C to +50°C (storage) / humidity range: +31°C / 80%	0 to 40 (operation); -10°C to +50°C (storage) / humidity range: +31°C / 80%	0 to 40	5 to 45	-10°C - +45°C non-condensing	0°C - 40°C non-condensing
Internal Camera [Y/N]	N	N	N	Y (video)	N	N	N
Inbuild Control Panel [Y/N]	Y	Y	N	N	N	Y	Y
Scan time per battery [h]	8 / 3.5 / 1.6 (depending on battery)	8 / 3.5 / 1.6 (depending on battery)	9 / 4 (depending on battery)	variable	variable	2.5 h int.batt. / 4 h ext. batt.	1 h int. batt.
<b>Peripherals</b>							

Fig. Fig. 3.3.3-1–Elenco delle strumentazioni scanner TOF disponibili sul mercato GIM International, Product Survey: Terrestrial Laser Scanners, Agosto 2010.

Brand	3rdTech	Basis Software, Inc.	FARO	FARO	Leica Geosystems	Leica Geosystems	Optech Incorporated
System	DeltaSphere-3000IR	Surphaser 25HSX	Photon 120	Photon 20	Leica ScanStation C10	Leica HDS6200	ILRIS-HD
Date of introduction	May 2005	November 2009	March 2009	March 2009	September 2009	June 2010	2008
<b>Dimensions</b>							
Weight [kg] (sensor only)	10	11	14.5	14.5	13	14	14
Weight [kg] (sensor + peripherals)	12	11			13.8	14	21
Size [cm] (sensor only)	35 x 35 x 10	42.5 x 16.4 x 23.6	41 x 16 x 28	41 x 16 x 28	24 x 36 x 39.5	20 x 29.5 x 36	32 x 32 x 22
Battery internal/external	external	external	external	external	both	both	External
<b>Laser Ranger</b>	-	-	-	-	-		-
Range measurement principle [1]	phase	phase	phase	phase	pulse	phase	pulse
Wavelength [nm]	780	685	785	785	532	650 - 690	1535
Laser safety classification	3R	3R	3R	3R	3R	3R	1 or 1M
Min. / max. range [m]	0.5 / 10	0.2m / 70m	0.6 / 120	0.6 / 120	0.1 / 300	0.4 / 79	3.0 / 2000
Range resolution [mm]	0.25	0.001			freely selectable, <1mm at any range	0.1	0.1
Range accuracy [mm] (1 sigma)	7mm at 10m	0.5mm at 20m; 5mm at 50m	2mm at 10m and 25m, each at 90% and 10% reflectivity	2mm at 10m and 25m, each at 90% and 10% reflectivity	4mm at 50m, single measurement, not averaged	2mm at 90% alb up to 25m, 3mm at 18% alb up to 25m, 3mm at 90% alb up to 50m, 5mm at 18% alb up to 50m,	7
Beam diameter at exit [mm]	2.5	2.8	3.3	3.3	6	3	9.2
Beam divergence/spot at 50 m distance [mm]	11.8 at 15m	16	0.16mrad (0.009°)	0.16mrad (0.009°)	6 (0.01°)	14 (0.22mrad)	12
Intensity recording (Y[#bits]/N)	Y[8]	Y[16]			Y [12]	Y [12]	Y [8/16/24]
Hits per point before averaging	64 ( varies)	200,000-1,200,000	N/A	N/A	no averaging	N/A	1
<b>Scanning Characteristics</b>	-	-	-	-	-		-
Max. FoV VxH [D]	288 x 360	270x360	320 x 360	320 x 360	270 x 360	310 x 360	40 x 40, 360 x 360
Scan angle step size H/V [D]	0.067 / 0.067	0.3/0.03; 0.005/0.01	0.009 / 0.009	0.009 / 0.009	0.0002	0.0018	0.000745
Scan angle accuracy H/V [D] (1 sigma)	0.015 / 0.015	0.003 / 0.003			0.0034°	0.0071	0.00298
Beam deflection mechanism	rotating mirror	hemispherical	rotating mirror	rotating mirror	Smart X-Mirror	mirror	dual mirror
Measurement rate [2] [kHz]	17	200-1200	122 - 976	122 - 976	50	1016	10
Scan duration typical/highest resolution [min]	11 / 13 for 288 x 360 degrees	4-100	variable	variable	variable	3 / 7	variable
<b>Operation Characteristics</b>	-	-	-	-	-		-
Temperature range/humidity range [°C/ %]	0 to 45 / non-condensing	5 to 45 / non-condensing	5 to 40 / non-condensing	5 to 40 / non-condensing	0 to 40 / non-condensing	-10 to 45	0 to 40 (-20 to 50 storage) 95%
Internal Camera [Y/N]	N	N	N	N	Y (5MPixel still image and streaming video)	N	Y
Inbuild Control Panel [Y/N]	N	N	Power and Start/Stop button on the scanner	Power and Start/Stop button on the scanner	Y (full color touchscreen display, 320 x 240 pixels)	Y	Y, 6.5" XVGA
Scan time per battery [h]	7	3	6	6	3.5 (two internal batteries); 6h (one external battery)	2.5 (internal battery); 4 (external battery)	5 hours
<b>Peripherals</b>	-	-	-	-	-		-

Fig. 3.3.3-2– Elenco delle strumentazioni scanner TOF disponibili sul mercato GIM International, Product Survey: Terrestrial Laser Scanners, Agosto 2010.

SOFTWARE PRODUCTS		
Producer	Type	Link to Producer
Inn.Tec s.r.l.	Reconstructor	<a href="http://www.reconstructor.it">www.reconstructor.it</a>
InnovMetric Software	Polyworks	<a href="http://www.innovmetric.com">www.innovmetric.com</a>
INUS Technology	RapidForm	<a href="http://www.rapidform.com">www.rapidform.com</a>
Metris	Focus Inspection, Focus Reverse Engineering	<a href="http://www.metris.com">www.metris.com</a>
kubit GmbH	PointCloud	<a href="http://www.kubit.de">www.kubit.de</a>
metrologic group	Metrolog	<a href="http://www.metrologic.fr">www.metrologic.fr</a>
Phocad GmbH	Phidias	<a href="http://www.phocad.de">www.phocad.de</a>
UGS	Imageware	<a href="http://www.ugsplm.de">www.ugsplm.de</a>
Raindrop Geomagic	Geomagic Studio	<a href="http://www.geomagic.com">www.geomagic.com</a>
Pointtools	Pointtools View	<a href="http://www.pointtools.com">www.pointtools.com</a>
Free Open Source	MeshLab	<a href="http://meshlab.sourceforge.net">meshlab.sourceforge.net</a>

Fig. 3.3.3-3–Elenco software disponibili sul mercato.

Le fasi di scansione dell'oggetto sono le seguenti:

1. Progettazione delle prese di scansione;
2. Acquisizione dei dati: viene prodotta la nuvola di punti, la quale però è limitata dalla finestra di scansione dello strumento, il quale lascia in ombra una parte dell'oggetto. Nel caso in cui l'oggetto non sia stato scansionato completamente da una stazione, bisognerà effettuare altre scansioni, le quali devono comprendere dei punti in comune con una sovrapposizione che può essere dell'ordine del 30% (si possono utilizzare mire o target). Ogni scansione possiede un proprio sistema di riferimento, che generalmente coincide con il centro dello strumento;
3. Filtraggio del rumore presente nella nuvola di punti acquisita, dovuto essenzialmente alla divergenza del raggio laser ed alla deviazione standard dello strumento;
4. Pre-allineamento manuale;
5. Registrazione delle singole scansioni con algoritmi della tipologia ICP (si veda il paragrafo 3.3.4). È la procedura che consente di allineare ed unire le singole acquisizioni in una unica nuvola di punti secondo un determinato sistema di riferimento;
6. Eventuale decimazione del numero dei punti della nuvola;
7. Triangolazione (meshing). Fase in cui avviene il passaggio da un sistema discreto di punti ad un continuo di superficie, tramite la costruzione di un modello poligonale o a maglie triangolari definito mesh.
8. Realizzazione del modello di superficie, tramite l'applicazione di texture, ed esportazione del modello per la realizzazione di prodotti finali quali:

- modello tridimensionale di superfici, curve di livello, sezioni, modelli di esposizione, etc., tutti prodotti che è possibile ottenere utilizzando la sola tecnologia laser;
- ortofoto di precisione, modelli solidi, modello 3D a colori, navigazioni virtuale, etc., prodotti ottenibili dall'integrazione della tecnologia laser scanner con le classiche tecniche di fotogrammetria digitale.

I modelli tridimensionali finali possono essere stampati ottenendo modelli fisici 3D, che sono dei prototipi in scala o in vera forma e grandezza.

Talvolta sono necessarie numerose scansioni da punti di presa differenti, qualora siano presenti degli ostacoli tra il campo visivo dello strumento e la superficie da rilevare, come oggetti interposti, spigoli, superfici adiacenti ma a differente quota, zone d'ombra (la cui ampiezza dipende dalla differenza di quota e dall'angolo di incidenza del raggio laser). Durante la fase di progettazione delle prese, è dunque bene prestare notevole attenzione: alla scelta della tipologia di scanner da adoperare, in base all'esigenze del rilievo, alla risoluzione finale ricercata, secondo gli scopi del rilievo ed in funzione delle dimensioni dell'oggetto da analizzare. Le acquisizioni devono essere comprensive di tutte le dimensioni dell'oggetto e poste a diverse altezze; qualora sia necessaria una documentazione integrata e più approfondita, condotta a diversa scala e con differente contenuto radiometrico, si può prevedere, anche in fase di progettazione, l'adozione integrata con altre tecnologie. E' evidente che nel progettare le prese, si deve tenere conto delle caratteristiche dello scanner e delle possibilità di movimentazione di esso nello spazio circostante l'oggetto rilevato.

### **3.3.4 Tecniche di allineamento delle nuvole di punti laser**

La fase di registrazione delle scansioni, indicata al punto 3.delle fasi del rilievo, può avvenire nelle maniere seguenti:

- mediante l'utilizzo di bersagli o target;
- mediante il riconoscimento di caratteristiche geometriche, come di punti naturali posti sulla superficie;
- mediante gli algoritmi ICP, acronimo di Iterative Closest Point, i quali permettono la registrazione delle scansioni basandosi sul confronto delle posizioni relative di punti corrispondenti).

Gli algoritmi ICP hanno raggiunto notevoli risultati specie negli ultimi due decenni, anche grazie allo sviluppo di piattaforme hardware e software, mostrandosi in grado di restituire in breve tempo risultati metricamente accettabili. Sono detti semi-automatici, perché richiedono una fase iniziale di

pre-allineamento manuale ed una di raffittimento con un algoritmo di ottimizzazione. Premesso che L'ICP lavora per coppie di range map per volta, due sono le caratteristiche comuni individuate nella procedura di gestione dei dati:

- ✓ l'individuazione manuale di una sequenza di punti omologhi, presenti sulle aree di sovrapposizione delle due scansioni;
- ✓ l'allineamento automatico tra due set di punti, ripetuto fino alla minimizzazione di una funzione obiettivo, proporzionale alla distanza media tra le prese.

Il livello di precisione è finalizzato all'aspetto quantitativo, quando si ci riferisce al valore di convergenza dell'algoritmo ed alla deviazione standard, ed all'aspetto qualitativo, se si ci riferisce alla visualizzazione della sovrapposizione tra due scansioni fino alla mutua fusione. I metodi di allineamento sono di due categorie, punto-punto e punto-piano; in entrambi la registrazione delle range map prevede come soluzione finale la ricerca del minimo di una funzione obiettivo.

1. Punto-punto: la soluzione è data da una funzione obiettivo che è data dalla somma dei quadrati delle distanze dei punti corrispondenti su due nuvole di punti distinte;

2. punto-piano: la soluzione è data da una funzione obiettivo con la quale vengono minimizzate le distanze tra i punti di una nuvola ed i piani tangenti e passanti per l'altra.

Per entrambi una nuvola è considerata fissa ed una seconda rototrasla per la registrazione sulla prima.

### 3.3.4.1 Metodo punto-punto

Per ogni punto della nuvola mobile vengono ricercati, all'interno della nuvola fissa, i punti contenuti all'interno di una sfera di un certo raggio e di questi viene tenuto il più vicino, che sarà considerato il punto corrispondente. Vengono quindi esclusi quei punti al di sopra del raggio, posto pari al doppio della distanza media dei punti sulla nuvola. Date due nuvole di punti, A fissa e B mobile, contenenti rispettivamente l'insieme dei punti  $a_i$  e  $b_i$ , l'assegnazione delle coppie di elementi corrispondenti  $(a_i, b_i)$ , avviene verificando che per ogni  $a_i$  sulla prima nuvola esista un solo  $b_i$ , sulla seconda nuvola, tale che:  $\min(\text{dist}(a_i, b_i)) \leq \sigma$  con  $a_i \in A$  e  $b_i \in B$ ,  $\forall i=1, \dots, n$ .

Le coppie di punti corrispondenti si formano all'interno della zona di sovrapposizione tra le due scansioni e la funzione obiettivo da minimizzare, che rappresenta la distanza tra le coppie di punti corrispondenti appartenenti alle due nuvole, è: 
$$e = \sum_{i=1}^n \|a_i - (Rb_i + T)\|^2$$

dove  $R$  è la matrice di rotazione e  $T$  la matrice di traslazione. La convergenza dell'intero processo si avrà quando la variazione della matrice di roto-traslazione tra due iterazioni successive è minore dell'1%. Naturalmente dopo un primo tentativo di minimizzazione delle distanze dei punti corrispondenti, sarà improbabile che la registrazione sia andata a buon fine, perché molto spesso gli allineamenti tra le coppie formate sono solo fittizi e portano verso falsi allineamenti. Dunque saranno necessarie più iterazioni, durante le quali viene ridotto di una certa percentuale il raggio  $r$  della sfera.

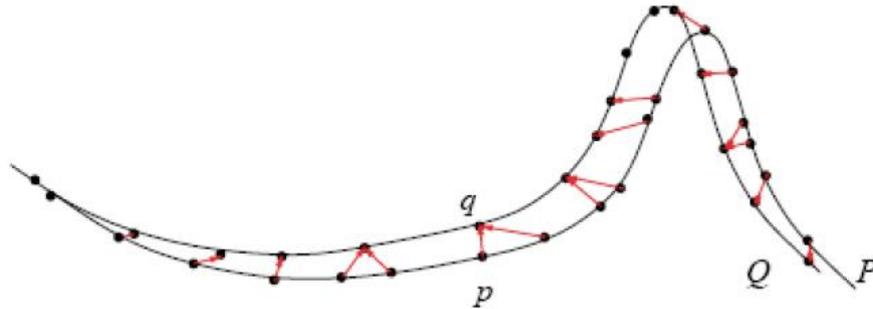


Figura 3.3.4.1-1 Metodo punto-punto.

### 3.3.4.2 Metodo punto– piano

La funzione obiettivo che viene scelta in questo caso rappresenta la distanza tra un punto sulla nuvola fissa ed un piano tangente nel punto corrispondente sulla nuvola mobile.

L'obiettivo è quello di minimizzare una funzione che rappresenta la somma dei quadrati delle distanze punto-piano, di tutti i punti sulla nuvola mobile ossia trovare il minimo di:

$$e = \sum_{i=1}^n \text{dist}(Rb_i + \pi_i)^2$$

indicando con  $n$  il numero di coppie corrispondenti che si sono formate, ed  $R$  la matrice di rotazione. Dopo una prima fase di riconoscimento automatico delle coppie punto– piano tangente, la seconda fase di allineamento delle due nuvole avviene senza falsi accoppiamenti, dato che il suo corrispondente viene ricercato muovendosi su un piano tangente. Il minimo della funzione, viene raggiunto con un numero d'iterazioni di un ordine inferiore rispetto al metodo punto-punto, perché la ricerca avviene muovendosi in uno spazio bidimensionale. Sebbene il processo di best-fit dei piani risulti piuttosto oneroso dal punto di vista computazionale, il metodo punto-piano resta più veloce e più preciso di quello punto-punto.

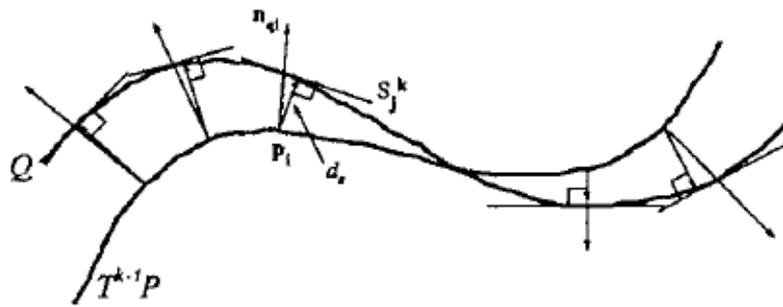


Figura 3.3.4.2-1 Metodo punto-piano

Come già sottolineato è un algoritmo della tipologia pairwise based, raggiunge l'allineamento registrando due nuvole per volta; generalmente dopo una prima fase di allineamento, procedendo per coppie, in cui ogni nuvola viene allineata con l'ultima ottenuta, viene richiesto un secondo allineamento globale di tutte le nuvole insieme, allo scopo di ridistribuire e minimizzare l'errore residuo di registrazione fra tutte le scansioni. L'algoritmo non è in grado di gestire dati multi-scala, per questi motivi numerose variazioni dell'algoritmo sono state proposte da altri autori, al fine di ridurre questi problemi. Software commerciali nel quale è implementato e permettono di eseguire tali operazioni sono ad esempio PolyWorks; Innovmetric; Geomagic Studio; RapidForm.

### 3.3.5 Settori d'applicazione della tecnologia laser scanner

Le dimensioni degli oggetti rilevabili, variano dai piccoli manufatti, alle sculture, fino ad edifici di grandi dimensioni, con alcuni limiti legati al campo visivo dello strumento, o dovuti in generale alla geometria delle superfici da rilevare. Un modello a punti non è però facilmente comprensibile e spesso non è facile estrarvi informazioni utili. Quando si ha a disposizione un modello di superficie dell'oggetto (mesh), è possibile, attraverso l'utilizzo di appositi software estrarre informazioni di volume, sezioni, etc. Rispetto all'oggetto reale però il modello descrittivo così ottenuto è ancora privo di tutta l'informazione radiometrica che è propria dello spazio oggetto. A questo scopo sono resi oggi disponibili sul mercato laser scanner in grado d'integrare le informazioni rilevate con quelle radiometriche dell'oggetto, operando in diverse maniere:

- utilizzando una fotocamera esterna, rigidamente connessa al laser scanner attraverso un sostegno calibrato;
- utilizzando un sensore radiometrico interno al laser coassiale al raggio laser stesso, come lo scanner triangolatore Next Engine, descritto al paragrafo 3.3.4.

Utilizzare una fotocamera esterna connessa allo scanner, si ha il vantaggio di permettere all'utente di scegliere la risoluzione dell'immagine e l'obiettivo più adatto alle proprie esigenze, permettendo di ottenere una serie di prodotti di integrazione che si basano sull'utilizzo delle immagini digitali. Oltre al settore dei Beni Culturali, i campi in cui si può applicare questa tecnologia innovativa sono molteplici, tra essi possiamo citare:

- applicazioni d'ingegneria forense;
- ingegneria civile;
- medicina;
- reverse engineering in campo industriale;
- industria navale.

### **3.3.6 Integrazione tra i due sistemi di rilievo tridimensionale: Image-based e range based**

L'integrazione di dati di questo tipo comporta in primo luogo la georeferenziazione dei dati nello stesso sistema di riferimento del laser. Sono state individuate in letteratura (Gianinetto et al., 2005), tre principali strategie per eseguire la georeferenziazione del dato fotogrammetrico e laser:

1. la fotocamera viene montata in modo rigido al corpo del laser scanner, e la sua posizione relativa rispetto allo scanner laser terrestre (TLS), è nota a priori dal test-field di calibrazione adottato. In questo caso ogni immagine catturata è già orientata sulla nuvola di punti, in modo che può essere direttamente riproiettata per creare un'immagine texturizzata;
2. la fotocamera è indipendente dal laser TLS, il che significa che ciascuna immagine deve essere registrata nel sistema del laser. Solitamente le immagini, per essere integrate con i dati della nuvola di punti, non sono state catturate in una configurazione a blocco, ma l'orientamento è basato sull'algoritmo di space resection;
3. le immagini sono state acquisite in una configurazione a blocco, cosicché è calcolato un bundle adjustment globale, per registrarle in un dato sistema di riferimento terreno.



Fig.3.3.6-1–Esempio di test- field usato per la calibrazione di una fotocamera. (Fiani M. et al., 2008)

**Capitolo 4****SISTEMI D'INDAGINE SPETTRALE: LE CAMERE TERMICHE****4.1 Le camere termiche**

Le informazioni puramente geometriche possono a volte essere integrate o accoppiate con dati di altra natura che ne aumentano il grado di utilizzazione; oltre all'immagine nel visibile si può citare l'acquisizione in altre bande dello spettro elettromagnetico, per esempio l'infrarosso vicino o termico. L'adozione di sensori operanti nel campo dell'infrarosso termico, capaci di restituire informazioni diverse da quelle nel visibile, ha prestato l'interesse di più contesti tecnici e scientifici, che operano sia nel campo della diagnostica e della conservazione che nel controllo e monitoraggio, per la sicurezza, in medicina, in archeologia e in edilizia.

Così la termografia, inizialmente utilizzata unicamente per applicazioni militari (durante gli anni della seconda guerra mondiale, nella sua versione all'infrarosso falso colore (IRFC), con lo scopo principale di individuare i bersagli mimetizzati), ha trovato dall'inizio degli anni sessanta molteplici applicazioni anche nei campi industriali e civili per rilievi di oggetti in situazioni diverse:

- linee di alimentazione e controllo delle condutture;
- diagnostica dell'isolamento termico dell'edificio;
- medicina;
- edilizia per collaudi non invasivi e non distruttivi su edifici e strutture storiche;
- monitoraggio del bestiame;
- studi in campo biologico;
- scienze motorie;
- individuazione di resti archeologici;
- sicurezza;

Nella documentazione dei beni culturali, in particolare per le opere d'arte e gli affreschi, come mostrato nella sperimentazione del sesto capitolo, la termografia può essere utile, per studiare in modo più completo un'opera, e per affiancare ed integrare il rilievo nel campo del visibile con altre informazioni aggiuntive fornite da altri sensori che lavorano in differenti bande spettrali (esempio IR infrarosso e UV ultravioletto). Per esempio, nel caso delle pitture, i sensori IR e UV sono capaci di rilevare informazioni impreviste (Pelagotti et al., 2007), come descritto nel caso di studio del quinto capitolo.

La termografia è in grado di rilevare la radiazione emessa da un corpo nel campo dell'infrarosso termico e di ottenere una mappa termica dell'oggetto da misurare, ponendo così in risalto le disomogeneità dei materiali costruttivi impiegati. Per le facciate degli edifici, la termografia IR può fornire uno stato di conoscenza sul grado di conservazione del muro o rilevare la presenza di tamponamenti, di elementi strutturali nascosti, lesioni, distacchi dell'intonaco, presenza di cavi metallici e di ristagno d'umidità.

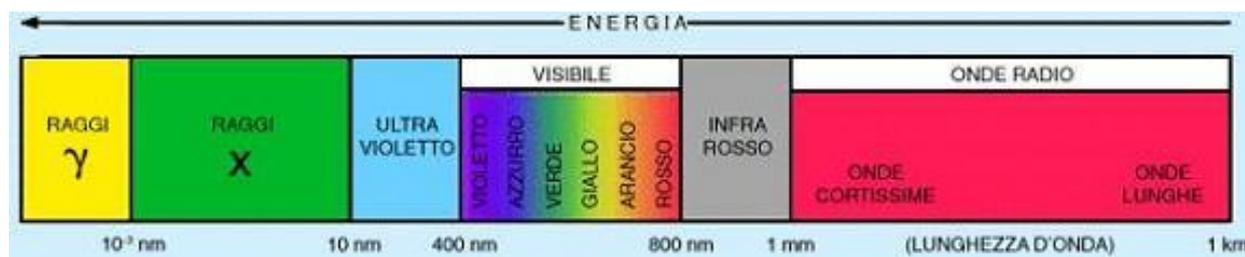


Fig.4.1-1– Classificazione dello spettro elettromagnetico in funzione dell'energia di radianza emessa dai corpi. Suddivisione dello spettro elettromagnetico per bande o regioni in base alla loro lunghezza d'onda.

Con una termocamera è possibile documentare quei dettagli che non sono generalmente visibili ad una camera a sensori CCD (Charge Couple Device) o CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), permettendo studi più approfonditi degli edifici, della loro cronologia storica e dello stato di conservazione. L'efficienza di IRT (Infrared Thermography), come tecnica non distruttiva è ben documentata in molti campi dell'ingegneria e delle indagini storico-strutturali (si veda il paragrafo 2.9 del capitolo 2), dove al contrario un trattamento di restauro o di conservazione potrebbe anche causare danni irreversibili alla struttura (Avdelidis N.P. et al., 2004). Nel campo dell'ingegneria civile e in architettura l'IRT può essere utilizzata con successo, in alternativa a tecnologie convenzionali di controllo, per rilevare i difetti delle strutture. La tecnologia IRT, può essere integrata con altre tecnologie non distruttive come il radar o misure ultrasoniche. I vantaggi di usare IRT per l'analisi strutturale di edifici antichi sono prevalentemente il basso costo e l'alta produttività delle indagini rese possibili. Oggi le termocamere, sono uno strumento interessante per affiancare molte applicazioni di fotogrammetria, in quanto permettono di visualizzare le differenze termiche presenti sulla superficie di un oggetto. La termografia a infrarossi può essere divisa in due diversi approcci: IRT passiva e IRT attiva. Nell'approccio passivo, i materiali e le strutture vengono rilevati a temperature stazionarie; le aree che presentano maggiori problematiche, sulle quali verranno condotte azioni di manutenzione, vengono individuate da profili anomali di temperatura o dai punti caldi. Nell'approccio attivo, viene usato uno stimolo esterno per indurre un rilevante contrasto termico, non presente in condizioni stazionarie. In questo secondo caso, le metodologie che sono state sviluppate e comunemente adoperate sono: la termografia ad impulso, la termografia

a blocco, la vibro termografia ed il riscaldamento a step (Maldague X.,2002). Seguendo tali metodologie, si effettua l'acquisizione di immagini termiche durante transitori termici di riscaldamento e/o raffreddamento della superficie, sfruttando le diverse capacità termiche dei materiali che compongono l'oggetto. Sulle parti esterne dell'edificio, come sugli aggetti e sulle decorazioni, possono essere sfruttati i transitori termici dovuti all'irraggiamento solare, specie nelle ore del giorno in cui i raggi sono più incidenti, cioè all'alba e al tramonto. Per le parti interne decorate, come su affreschi, mosaici, pavimenti e coperture voltate, si possono adoperare sistemi di riscaldamento direzionati, in grado di forzare la risposta termica dei materiali impiegati. La misura dei transitori di temperatura " $\Delta T$ " (pixel scaldati ad esempio con la lampada ad infrarossi e rilevati nuovamente dopo il rilascio termico della T accumulata), permette d'individuare le aree con i  $\Delta T$  critici maggiori, che permettono di localizzare per valori di radianza superficiale le aree degradate come le superfici più fredde (causate da flussi evaporativi e corrispondenti ad aree di condensa o di rifacimenti di un restauro recente), o quelle più calde, dove sono presenti sull'intonaco distacchi o disomogeneità dei materiali. Per esempio, il differente grado di riscaldamento di una parete affrescata, e specialmente il differente rilascio termico successivo, sono gli indicatori delle parti dell'affresco probabilmente distaccate: l'aria che si trova nell'eventuale intercapedine tra l'intonaco e la parete determina un differenziale  $\Delta T$  di riscaldamento–raffreddamento, sia in termini di rapidità che in valore assoluto. La sovrapposizione delle immagini visibili sulle immagini termiche permette di localizzare ed evidenziare più facilmente le parti dove bisogna intervenire e i punti sui quali bisogna eseguire ulteriori verifiche d'ispezione, ma è necessaria un'equalizzazione termica delle immagini ed una calibrazione geometrica come è stato descritto nel paragrafo 6.5 del capitolo 6. Ogni materiale ha un diverso comportamento termico, e la sua temperatura varia da punto a punto in funzione dell'energia che viene localmente assorbita. Il comportamento varia non solo a causa delle diverse caratteristiche chimico-fisiche del materiale costituente, ma ad esempio nel caso degli affreschi dove c'è per lo più un'omogeneità dei materiali, varia con il colore. La temperatura superficiale rilevata varia col materiale e per materiali per lo più omogenei varia col colore, perché ogni colore ha un diverso potere d'assorbimento. Così ad esempio un corpo più scuro risulterà più caldo, mentre per un mattone di diversa cromia (Fig.4.1-1), nel quale è presente una fessurazione, risulta difficilmente distinguibile il comportamento del materiale sul termogramma (immagine termica), perché sui colori chiari come il giallo la fessurazione risulta invisibile (il giallo assorbe poco calore, e risulta più freddo e meno predominante rispetto ad una superficie sottostante più scura (blu) e quindi più calda). Mediante un'indagine di sollecitazione esterna indotta, si possono diagnosticare le superfici affrescate, ma è necessaria la misura delle proprietà d'assorbimento o una stima della temperatura di radianza superficiale.



Fig.4.1-1– fessurazione nel visibile che sul termogramma risulta invisibile nei toni del giallo

La termocamera è in grado di misurare e visualizzare la temperatura superficiale di un oggetto, come funzione della radiazione infrarossa emessa da esso. Secondo la legge di Stephen Boltzman,  $E = \sigma \epsilon T^4$ , quanto più elevata è la temperatura di un oggetto, tanto più elevata sarà anche la sua l'energia irradiata o emessa, secondo una relazione lineare di proporzionalità dipendente dal parametro di emissività  $\epsilon$ , numero puro compreso tra 0 e 1, che indica l'efficienza di radiazione termica (oggetti caratterizzati da emissività prossima a 1 emettono molto bene, materiali caratterizzati da emissività prossima allo 0 emettono poco).

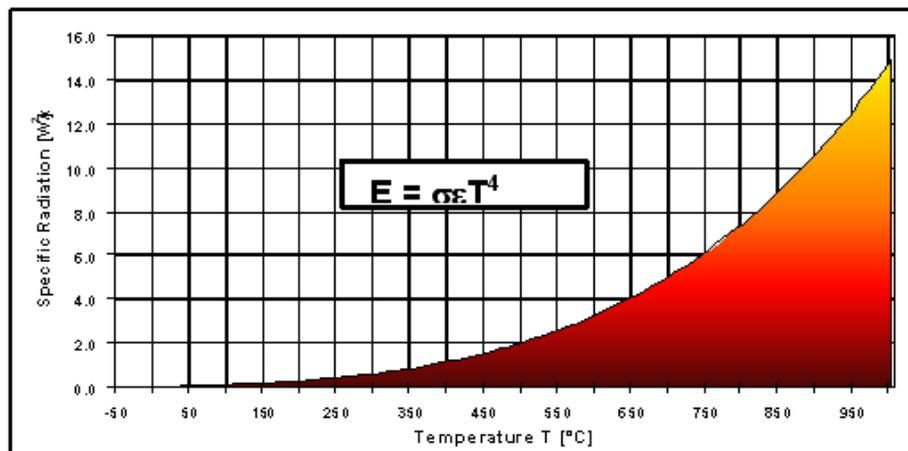


Fig.4.1-2– Per la legge di Stephen Boltzman esiste una proporzionalità tra l'energia di radianza emessa da un corpo e la sua temperatura mediante un fattore di proporzionalità  $\epsilon$ .

## 4.2 Aspetti geometrici delle immagini termiche

In accordo con la legge di Planck, ogni corpo emette energia in modo proporzionale alla sua temperatura, ed i dispositivi in grado di rilevare queste emissioni sono le termocamere, dotate di

sensori a raggi infrarossi (IR); pertanto le immagini prodotte contengono dei valori di digital number proporzionali alla quantità d'energia ricevuta (Lagueta M. et al., 2011).

Secondo la legge di Wien:

$$\lambda_{max} = \frac{2897,8}{T}$$

la massima emissione di lunghezza d'onda di un corpo è inversamente proporzionale alla sua temperatura; come si può notare dalla figura 4.2-1 [1], a temperature non elevate corrispondono alte lunghezze d'onda; di conseguenza i sensori delle camere termiche, in funzione del tipo di tecnologia del rilevatore di cui sono dotate, lavorano a lunghezze d'onda che vanno dai 7 ai 15  $\mu\text{m}$ . Per gestire tali lunghezze d'onda, le lenti delle termocamere sono fatte di germanio che li rende estremamente costose, ma al contempo queste lenti sono dotate di una buona risoluzione radiometrica, che garantisce una buona precisione geometrica e minime distorsioni (Luhmann et al., 2010).

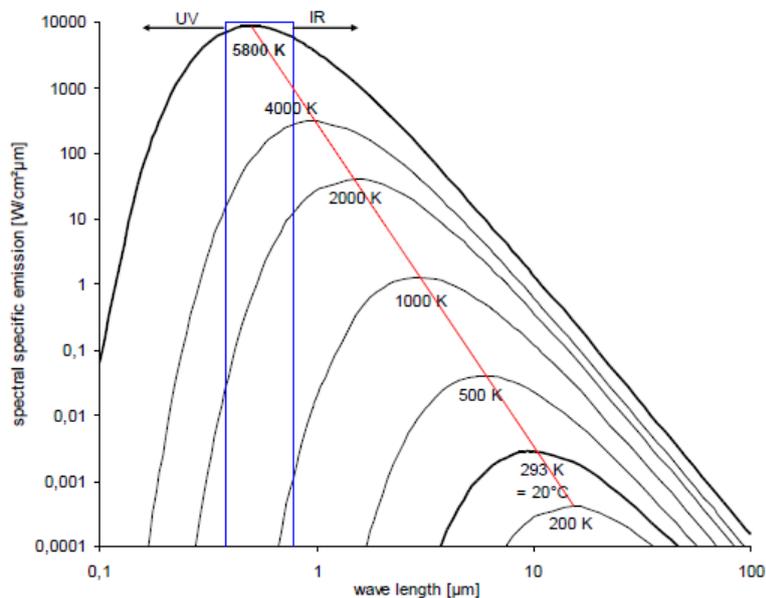


Fig.4.2-1 Specifiche emissioni spettrali.

[1] Solo gli oggetti con una temperatura maggiore di circa 1000 K emettono radiazioni elettromagnetiche visibili all'occhio umano o a camere convenzionali operanti nel visibile.

I sensori delle termocamere sono dotati di rivelatori quantici [2] o rivelatori termici.

I rivelatori quantici sono ad effetto foto-elettrico, ossia quelli in cui l'energia dei fotoni è tale da estrarre degli elettroni da un conduttore. Questi rivelatori sono molto sensibili ( $\pm 0,01$  K) e veloci, ma è necessario un sistema di raffreddamento esterno; utilizzano il risultato che una variazione di temperatura sull'elemento del rivelatore porta ad un cambiamento delle proprietà elettriche del rivelatore, per esempio sulla resistenza o sulla carica (Luhmann T. et al., 2010). Queste modifiche possono essere misurate e trasformate in valori di intensità. I rivelatori termici sono meno sensibili ( $\pm 0,1$  K) e più lenti rispetto ai quantici, ma non è necessario alcun elemento di raffreddamento sicché risultano meno costosi. Possono essere piroelettrici o bolometri [3]; vengono adoperati in diverse applicazioni che interessano il monitoraggio delle costruzioni.

La termografia a infrarossi è basata sulla misurazione dell'energia termica e sulla sua conversione in un segnale elettrico, che viene trasformato da un microprocessore in una immagine termica digitale (Capizzi et al., 2004). L'immagine termica, può essere vista come una matrice di digital number, in cui l'informazione radiometrica rappresenta la distribuzione delle temperature sulla superficie investigata in funzione dei valori noti di: emissività, temperatura apparente riflessa, distanza oggetto-termocamera, umidità relativa e temperatura dell'atmosfera. Il minimo valore di temperatura  $\Delta T$ , misurabile dalla termocamera, indica la risoluzione termica di una immagine.

---

[2] I rivelatori della radiazione ottica possono essere suddivisi in due gruppi: rivelatori a generazione di cariche e rivelatori a generazione di fononi. I primi si distinguono a loro volta in rivelatori ad effetto fotoelettrico, ossia quelli in cui l'energia dei fotoni è tale da estrarre degli elettroni da un conduttore, e rivelatori a generazione di cariche mobili, ossia quelli in cui l'energia dei fotoni è tale da generare coppie elettrone-lacuna in un semiconduttore. Questi rivelatori, detti anche rivelatori quantici, sono i più diffusi, in particolare nel campo del visibile e del vicino infrarosso, per le caratteristiche di elevata sensibilità e prontezza di risposta.

[http://www.dieet.unipa.it/cali/didattica/mat\\_didatt/Rivelatori.pdf](http://www.dieet.unipa.it/cali/didattica/mat_didatt/Rivelatori.pdf) – consultazione marzo 2012.

[3] Il sensore microbolometrico, ha la funzione di trasformare l'energia infrarossa, che colpisce ogni singolo elemento del sensore, in un grandezza fisica misurabile. In particolare il sensore varia il proprio valore di resistenza elettrica, in funzione dell'energia IR, quindi della temperatura dell'oggetto inquadrato; detta variazione viene letta dal circuito di misura integrato "ROIC" (Readout Integrated Circuit) e mediante una tabella di calibrazione è calcolata la temperatura.

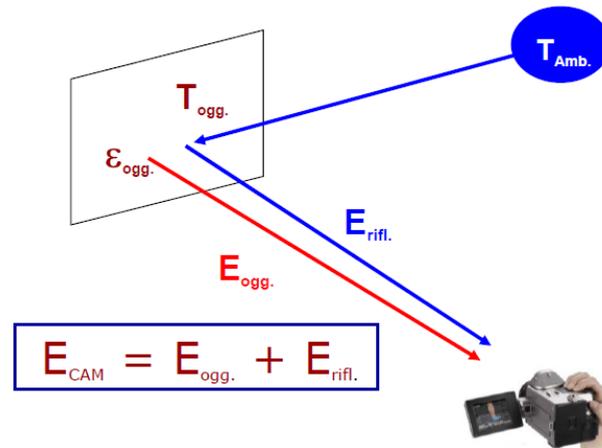


Fig.4.2-2 Componenti dell'energia irradiata e rivelata da una termo camera

La risoluzione geometrica di un'immagine termica, che definisce le dimensioni dell'oggetto più piccolo di cui si può misurare la temperatura alle varie distanze, si esprime in mrad, e permette di ottenere la dimensione corrispondente ad un pixel alle varie distanze. L'obiettivo di una termocamera in genere è un array di piccolo formato, caratterizzato da basse risoluzioni rispetto a quelle di altri sensori terrestri, comunemente adoperati nel campo dei beni culturali, come le camere digitali fotogrammetriche. Ad esempio adoperando un sensore di 640x480 pixel, come quello usato nella sperimentazione condotta nel sesto capitolo, con un IFOV di 0,65 mrad ad una distanza di 8 m dalla superficie da indagare, la dimensione del pixel sul termogramma è di circa 2,7 cm<sup>2</sup>.

### 4.3 Problematiche sulla calibrazione del sensore di una camera termica

Le camere termiche a infrarossi sono usate ampiamente come strumenti qualitativi e quantitativi d'ispezione radiometrica. Tipicamente, i dati termografici e la loro trasformazione numerica sono rappresentati nel sistema di riferimento dell'immagine che può essere anche influenzato da alte deformazioni geometriche. In questo caso, le immagini termiche devono essere raddrizzate, e quindi è necessaria la conoscenza dei parametri di calibrazione della termocamera (distanza principale, posizione del punto principale e distorsione della lente). L'approccio comunemente adoperato nella calibrazione delle immagini termiche è analogo a quello adoperato con le camere digitali, il calcolo preliminare dell'orientamento delle immagini partendo da valori approssimati dei parametri d'orientamento interno. Da lavori in letteratura (Gianinetto M. et al., 2005), le problematiche maggiormente riscontrate sull'adozione dei sensori termici, sono originate principalmente: (i) dalla

grande distorsione della lente, (ii) dalle grandi dimensioni dei pixel, (iii) dal piccolo formato dell'immagine, (iv) dall'elevata sensibilità alle variazioni di temperatura superficiale, e dalla bassa sensibilità alle variazioni di riflettività della superficie radiometrica, (v) dalla presenza di autofocus, dispositivo che non può essere disattivato, (vi) e a volte anche dalla ridotta informazioni sulla geometria del sensore interno. Normalmente nelle specifiche tecnica di una termocamera non è fornita alcuna informazione sulla dimensione del sensore, e così per superare questo inconveniente al sensore si possono dare delle dimensioni arbitrarie in millimetri, scalando gli altri parametri rispetto a queste. Per i valori approssimati dei parametri di calibrazione della camera si possono fare le seguenti valutazioni: la distanza principale può essere calcolata per resezione o space resection, misurando alcune distanze tra i punti di controllo nell'immagine nadirale; il punto principale viene scelto al centro del sensore, mentre vengono posti nulli i valori dei coefficienti della distorsione indicati nell'equazione 3.1 al paragrafo 3.2.3, del capitolo 3, riconducendo il problema al caso ideale di camera stenopeica (Gianinetto et al., 2005).

### **4.3.1 Approssimazione dei parametri con un software di fotogrammetria digitale**

Il programma PhotoModeler richiede l'introduzione di valori approssimati solo per il calcolo dei parametri d'orientamento interno, senza dovere definire i parametri d'orientamento esterno.

Il modello geometrico implementato si basa sulla seguente serie di parametri:

- la distanza principale ( $c$ ) ;
- le coordinate ( $y_0, y_0$ ) del punto principale;
- I coefficienti ( $K_1, K_2$ ) per compensare la distorsione ottica radiale;
- I coefficienti ( $P_1, P_2$ ) per compensare la distorsione tangenziale della lente.

La stima di questi parametri aggiunge quindi sette incognite al calcolo del bundle adjustment .

L'algoritmo implementato in PhotoModeler, per questo calcolo, ha bisogno di almeno 8 punti di controllo (come indicato al paragrafo 3.2.6), che possono essere misurati su tutte le immagini del blocco.

### **4.3.2 Esempio di procedura di calibrazione del sensore termico con reticolo di calibrazione spaziale, eseguendo una self-calibration.**

Costruito un reticolo di calibrazione, ad esempio costituito da una tavoletta di legno con sopra posti dei chiodi come target, ed utilizzato un set di punti di controllo ben distinguibili sulla scena di

coordinate note, dopo una fase di co-registrazione delle immagini, viene eseguito con PhotoModeler il calcolo dell'orientamento esterno per space resection, ed infine per bundle adjustment vengono stimati i parametri di calibrazione del blocco fotogrammetrico. Da studi di calibrazione di immagini, in particolare termiche, tratti da letteratura (Gianinetto et al., 2005), e condotti lavorando col software di calibrazione di immagini PhotoModeler, le operazioni da compiere per l'orientamento dei fotogrammi, in ordine sono:

1. avvio del software e creazione di un nuovo progetto :

-importazione delle coordinate dei punti di controllo;

-assegnazione di valori iniziali per i parametri di calibrazione della camera;

-selezione delle immagini da utilizzare nel progetto.

2. misurazione manuale delle coordinate immagine dei punti di controllo: il centro di ogni target utilizzato come punto di controllo deve essere ricercato mediante una collimazione manuale dall'utilizzatore del software (purtroppo la misurazione dei punti di controllo, non può avvenire mediante l'applicazione di procedure automatiche, perché introdurrebbero delle distorsioni nella misurazione). In questa fase, le coordinate immagine dei punti di controllo vengono misurate, ma senza alcuna etichettatura degli stessi;

3. Etichettatura manuale dei punti di controllo sulle immagine selezionate: al fine di calcolare un primo orientamento stabile di tutto il blocco di immagini importate in fase 1, vengono individuati su tutte le immagini di riferimento un insieme di punti di controllo, di geometria nota e ben distribuiti sul reticolo spaziale.

4. Calcolo di un iniziale orientamento esterno : ogni immagine viene orientata per space resection, basandosi sul set di punti di controllo etichettati al punto 3, in una seconda fase un primo bundle adjustment viene calcolato senza includere la stima dei parametri di calibrazione.

5. Etichettatura automatica dei punti di controllo rimanenti: grazie all'orientamento calcolato al punto 3, tutti gli altri punti di controllo, vengono ora etichettati sfruttando i vincoli epipolari; la ricerca dei punti corrispondenti, richiede in fase di progettazione iniziale la definizione di una soglia, che dipende dall'accuratezza dell'orientamento stimato; nel poligono di calibrazione spaziale i punti di controllo vengono posizionati abbastanza lontani tra loro per evitare errate corrispondenze; infine per perfezionare l'orientamento alcuni punti mancanti vengono inseriti manualmente.

6. Bundle adjustment del blocco con la stima dei parametri di calibrazione: l'orientamento finale viene calcolato in due passi, il primo senza comprendere i parametri di calibrazione, per rilevare eventuali errori grossolani nelle misure del punto immagine, il secondo viene calcolato anche per ottenere la stima dei parametri di calibrazione.

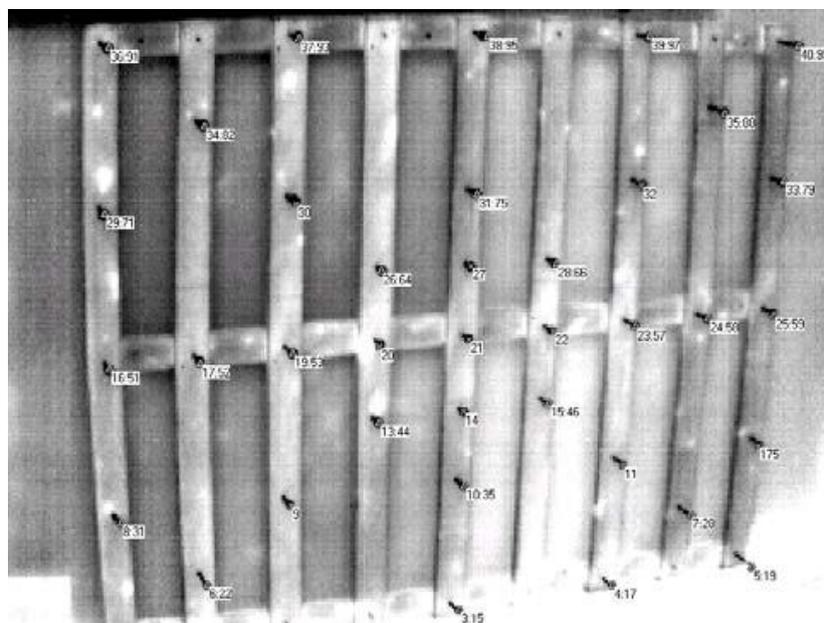


Fig.4.3.2-1– Reticolo di calibrazione con sopra riportate le posizioni dei punti di controllo

#### 4.4 Integrazione tra termografia e scansione laser

Un sistema integrato del tipo, laser scanner e termocamera, può essere per esempio di valido supporto nelle operazioni di misurazione e controllo delle dispersioni di calore presenti sulle superfici degli edifici, come presentato nell'esempio del paragrafo 2.9. L'integrazione delle due tecnologie, laser scanner e termocamera, è in grado di fornire, sulla base delle variazioni di profondità fornite dal DEM del laser, un ortotermomosaico di immagini termiche, che può facilitare una rapida individuazione di quelle parti di superficie che si presentano più fredde o più calde. L'integrazione di dati di questo tipo comporta in primo luogo la georeferenziazione dei dati nello stesso sistema di riferimento del laser. Per adoperare una procedura di tipo integrato la termocamera non può essere montata in una posizione fissa sul laser TLS, a causa dei diversi angoli di vista tra i due strumenti, e quindi delle diverse distanze di presa dalle stesse superfici da acquisire; cosicché la registrazione di ogni immagine termica nel sistema di riferimento della nuvola di punti, e la stima dei parametri di calibrazione interna della termocamera, avviene per space resection. Tale metodo richiede il posizionamento di diversi punti di controllo, che rendono la

procedura di georeferenziazione più complessa, e l'approccio comunemente adoperato nella calibrazione delle termocamera è analogo a quello delle fotocamera digitali non metriche, ossia il calcolo preliminare dei parametri d'orientamento interno da utilizzare come valori approssimati nella stima dei parametri dell'orientamento esterno.

#### **4.5 Calibrazione e orientamento delle immagini IR: alcune considerazioni tratte da bibliografia**

In un approccio più completo la mappatura delle immagini sui modelli 3D si basa sull'uso delle relazioni analitiche tridimensionali, che approssimano il processo di formazione dell'immagine.

Le equazioni di collinearità sono usate in fotogrammetria per descrivere la connessione di un punto tridimensionale  $(X, Y, Z)$  dello spazio oggetto al punto immagine bidimensionale  $(x, y)$  corrispondente in una fotografia. In queste equazioni, come già visto in precedenza, possono essere inclusi una serie di parametri addizionali che descrivono la distorsione della lente secondo un modello matematico. Di solito l'orientamento interno e i parametri addizionali sono calcolati in una fase preliminare di calibrazione della camera. Il loro valore rimarrà costante per tutte le immagini catturate dalla camera stessa, almeno per il periodo della campagna di misura e in assenza di shock meccanici o termici. In alternativa, il modello prospettico delle equazioni di collinearità, può essere sostituito dal modello proiettivo fornito dalla trasformazione lineare diretta (DLT), in questo caso la relazione tra le coordinate 2D e 3D è descritta da 11 coefficienti algebrici, senza un significato fisico immediato. In entrambi i casi, i parametri del modello vengono valutati in una procedura riferita all'orientamento delle immagini. Solitamente, la procedura più comune per eseguire questa operazione, in caso di immagini termiche, si basa sull'orientamento di ogni singola immagine in maniera indipendentemente dalle altre. Questa procedura, generalmente definita di resezione spaziale, si basa sulla misurazione di alcuni punti di controllo come nel caso delle trasformazioni omografiche. Il numero di punti di misura dipende dal modello adottato (6 per DLT, 3 per la collinearità), dal metodo adottato per la linearizzazione dell'equazioni, e dalla ridondanza delle osservazioni che si desidera. In pratica, questo numero varia normalmente da 5 a 10 punti per immagine. Una texturizzazione preliminare, con immagini RGB, potrebbe essere utile per semplificare e accelerare l'orientamento delle immagini IR. Quando un'immagine è stata orientata, nello stesso sistema di riferimento del modello di superficie, ogni punto 3D di una nuvola di punti o di ciascuna porzione di un modello poligonale, può essere texturizzato. Questo metodo è oggi praticabile in molti pacchetti di software fotogrammetrici e per l'elaborazione di nuvole di punti, ma purtroppo soffre di tre inconvenienti principali:

- (i).tempi eccessivi, perché ogni immagine deve essere elaborata singolarmente;
- (ii).alcune immagini a infrarossi, potrebbero avere texture povere e i punti di controllo possono non essere trovati;
- (iii) la mosaicatura delle immagini IR sul modello 3D tende a mostrare delle discontinuità nelle zone in cui le due immagini sovrapposte sono texturizzate.

La soluzione proposta da Scaioni M. et al, 2011, per superare, quasi tutti gli inconvenienti elencati per i metodi di registrazione tradizionali a singola immagine, prevede un sistema di acquisizione dati costituito da una bi-camera, con le immagini IR catturate da una camera termica, montata su un estremo di una corta barra d'acciaio e le immagini RGB ad alta risoluzione sono ottenute da una camera montata in posizione diametralmente opposta. Dopo la taratura e l'orientamento relativo di entrambi i sensori, il risultante sistema "bi-camera" è in grado di fornire due risultati:

- (1) la copertura IR di un oggetto;
- (2) l'orientamento esterno di tutte le immagini catturate dalla fotocamera RGB, che è ottenuta mediante un bundle adjustment (alcune immagini supplementari possono essere inserite per rafforzare la geometria del blocco fotogrammetrico).

La conoscenza dell'orientamento relativo tra le camere IR e RGB permette di calcolare l'orientamento esterno di entrambi i sensori ed infine del sistema "bi-camera IR-RGB", che è calcolato rispetto al sistema di riferimento dell'oggetto. In fase di orientamento delle immagini, è richiesto l'orientamento manuale delle immagini RGB, che può essere svolto da una procedura automatica quando sono le immagini sono costituite da una texture ricca, senza schemi ripetitivi. Tuttavia, non sono necessarie misure tra le immagini RGB e IR, tranne durante la taratura del sistema "bi-camera".

## Capitolo5

## CASO DI STUDIO: APPLICAZIONE DI ALGORITMI DI CLASSIFICAZIONE SU UN AFFRESCO RESTAURATO

### 5.1 LA CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI

La classificazione, usata largamente nel telerilevamento da satellite mediante immagini multispettrali, è il prodotto finale di un processo d'interpretazione della realtà, condotto in maniera automatizzata e non soggettiva, che consente di ottenere come risultato finale una o più mappe tematiche della realtà osservata in funzione della scelta di un predefinito spazio delle caratteristiche. Una classificazione di questo tipo, si prefigge l'obiettivo di sostituire l'interpretazione visuale di carattere soggettivo dell'analista in un'assegnazione automatica dei pixel, o di gruppi di pixel, a determinate classi con le quali si intende rappresentare un certo tipo di informazione tematica. Per ogni singola classe  $\omega_i$  viene costruita una specifica funzione di decisione  $d_i(x)$ , ed un oggetto, caratterizzato dal vettore di misure  $x$ , viene assegnato alla classe per cui la funzione di decisione è massima, ossia:

$$x \in \omega_i \text{ se } d_i(x) < d_j(x) \text{ per } \forall j \neq i.$$

Nello spazio  $k$ -dimensionale  $x$  delle caratteristiche, le  $d_i(x)$  sono delle linee o superfici che suddividono lo spazio stesso in  $n$  regioni tra loro separate, ognuna corrispondente alle  $n$  classi informative, definite dall'utente nel processo di classificazione e riportate sulla mappa tematica risultante.



Fig. 5.1-1–Schema delle interazioni fra elementi del territorio, osservato e misurato dai sensori di telerilevamento, e mondo dei modelli a cui si arriva attraverso il processo di classificazione.

Le classi informative sono definite sulla base di criteri di associazione definiti in base alle proprietà fisiche, alle risposte spettrali delle superfici e sul concetto di similarità tra pixel, ed i vettori-misura

che le contraddistinguono, associati ai pixel rappresentanti la stessa tipologia di oggetti sul terreno, definiscono nello spazio delle caratteristiche raggruppamenti di pixel detti cluster o classi spettrali. I pixel sono classificati correttamente quando si verifica sul pixel campione di diverse classi spettrali che essi vengono identificati dalla giusta classe d'appartenenza, rappresentando il corrispondente dato di verità a terra nello spazio oggetto (reale). Nelle situazioni in cui uno stesso pixel presenta più attributi spettrali dovuti ad una diversa illuminazione, alla presenza di ombre, alla presenza di coperture miste su una stessa area, una classe di informazioni accidentalmente rappresenta più classi spettrali. In questi casi le sole immagini multi-spettrali possono essere insufficienti a superare il problema ed è necessario adoperare nel processo di classificazione dati ancillari. In generale si può affermare che la possibilità di ottenere una classificazione accurata di una data immagine multi-spettrale dipende in larga misura dal grado di sovrapposizione delle classi spettrali nello spazio delle caratteristiche. In tal modo si possono distinguere classificatori hard, modellati sulla logica booleana vero o falso, da classificatori soft, operanti su un insieme sfumato (fuzzy set) dove ogni elemento dell'insieme è associato ad una funzione caratteristica, che esprime in valore percentuale il grado di appartenenza dell'elemento all'insieme, in una scala da 0 a 1. Pertanto un pixel può appartenere per il 35% alla classe a e per il 65% alla classe b e per il 30% alla classe c; i classificatori soft esprimono in output il grado d'indeterminazione con cui viene assoggettato un pixel alle varie classi gestendo anche le situazioni di coesistenza di due o più classi per un pixel nel caso di pixel misti (es. per 29% mattone rosso, 17% mattone chiaro, per 54% classe non definita cioè incognita). Tali classificatori sono molto usati in ambito sperimentale.

E' ampiamente diffuso un approccio alla classificazione di tipo supervisionato, in cui l'utente guida il processo definendo delle aree di addestramento (training sites) per i cui pixel viene garantita l'appartenenza a una certa classe o categoria (nel caso più frequente si tratta di classi di copertura, *landcover*). La fase di addestramento è quella che comporta il maggiore investimento di tempo da parte dell'esperto, il quale deve far ricorso alle proprie capacità di scelta e di conoscenza del territorio da analizzare, per individuare sull'immagine da classificare i training sites più idonei per le circostanze e più rappresentativi secondo gli obiettivi del suo studio. I training sites vengono ricercati mediante sopralluoghi sul campo, o su immagini ad alta risoluzione per mezzo di tecniche d'interpretazione visuale. Nello spazio delle caratteristiche, il campione dei training sites, deve essere rappresentativo di tutte le condizioni fisiche e spettrali di una data classe, deve essere completo, cioè non deve presentare alcuna autocorrelazione spaziale, cosicché i campioni acquisiti devono essere sparsi, non vicini tra loro, perché pochi campioni sparsi acquisiscono più contenuto informativo di molti campioni vicini. I campioni di pixel scelti è preferibile siano disposti su aree omogenee, evitando aree di passaggio tra classi che presentano pixel misti, selezionandoli in zone

diverse della stessa immagine, per considerare la variabilità propria di una stessa classe, ordinati in numero adeguato (in caso di tecniche di classificazione che fanno uso di parametri statistici, sono necessari almeno  $k+1$  elementi in uno spazio delle caratteristiche  $k$ -dimensionale, affinché la matrice di covarianza non sia singolare). Definiti i pixel ricadenti in una data classe spettrale d'appartenenza, nella fase d'istradamento dei training sites, dopo aver definito idonee procedure di calcolo tramite l'adozione di opportuni algoritmi l'immagine viene classificata.

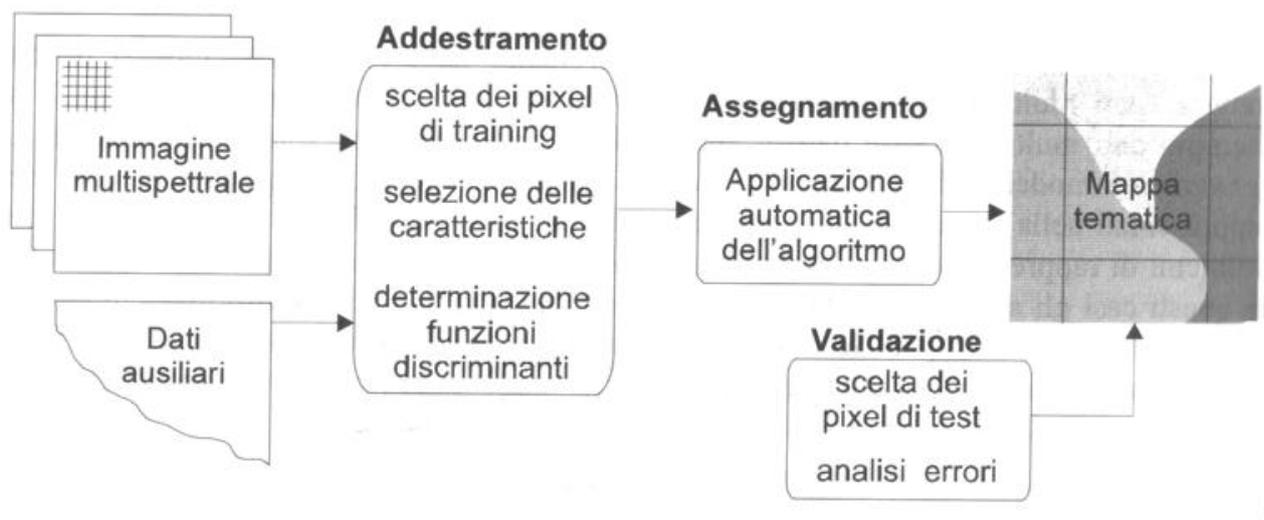


Fig.5.1-2– Schema delle principali fasi del processo di classificazione: dall'immagine multi-spettrale alla mappa tematica finale.

I passi della classificazione guidata possono essere schematizzati come segue:

1. definizione della legenda: decisione delle classi di copertura da inserire in legenda;
2. scelta dei pixel di training: per ogni classe della legenda vengono scelti i pixel rappresentativi;
3. selezione delle caratteristiche: vengono utilizzati l'insieme dei dati di training (bande spettrali; dati ancillari) per definire le proprietà dello spazio delle caratteristiche;
4. funzione di decisione: viene costruita la regola di decisione che individua nello spazio delle caratteristiche le funzioni di divisioni tra le classi;
5. applicazione dell'algoritmo;
6. validazione dei risultati: attraverso la valutazione dell'accuratezza della mappa tematica, dal confronto dei dati di training con dati di verità a terra, definendo il grado di confidenza dei risultati mediante la matrice di confusione.

Quando la classificazione avviene considerando una singola banda, piuttosto che un insieme congiunto di  $k$  bande, si parla più semplicemente di density slicing o tecniche di isolivelli: la

suddivisione dei valori di digital number (DN) in classi avviene tramite appropriate LUT (Look up table) o tabelle di trasformazione. Valori di digital number vengono separati da altri tramite la conoscenza di valori di soglia, determinati da analisi esterne condotte sul campo o dall'analisi di un istogramma, ed attribuiti al livello di appartenenza. La tecnica di suddivisione in isolivelli permette di raggruppare in un solo livello dei valori di DN corrispondenti a determinati range mediante un numero indice; ogni livello può essere visualizzato mediante un codice colore o valore d'intensità di radianza assegnato dall'utente, realizzando un'immagine in pseudo-colore, sulla base di una immagine mono-spettrale (con  $K=1$  bande) che normalmente viene visualizzata in bianco-nero. La tecnica degli isolivelli (density slicing), è adatta nella visualizzazione d'informazioni di tipo semantico, come le altezze nei modelli tridimensionali di superficie DEM, le temperature, ecc. E' anche un particolare metodo per la modifica del contrasto.

## 5.2 LA CLASSIFICAZIONE PIXEL-BASED

Nella classificazione pixel-based vengono utilizzate le solo informazioni di riflettanza contenute nei pixel dell'immagine. L'assegnazione delle classi avviene a livello del singolo pixel e dipende esclusivamente dal suo contenuto informativo: le uniche informazioni disponibili sono quelle relative al contenuto spettrale dell'immagine. Gli algoritmi per la classificazione di immagini digitali, come ad esempio quello di Massima Verosimiglianza, Spectral Angle Mapper ed altri, sono descritti nel capitolo seguente 5.4. In questa metodologia di classificazione, l'immagine viene scissa in pixel, che vengono classificati uno ad uno in funzione dell'informazione radiometrica dei digital number con l'algoritmo adottato. Questa metodologia di classificazione opera nelle condizioni ottimali se le classi da estrarre sono ben distinte nello spazio delle caratteristiche.

## 5.3 LA CLASSIFICAZIONE OBJECT-BASED

Lo sviluppo di questa metodologia è motivato dal crescente interesse di poter disporre di strumenti capaci di fornire una migliore descrizione semantica del contenuto delle immagini. In molti casi le informazioni semantiche significative per il caso di studio, qualunque questo sia, non sono isolate nel singolo pixel, ma in genere si riscontrano in un *image-object*. Gli *image-objects* sono raggruppamenti di pixels che presentano caratteristiche simili (luminosità, colore, tessitura) e vengono creati in un processo chiamato segmentazione. Sono di particolare interesse nel caso di immagine ad alta risoluzione, dove uno stesso oggetto è rappresentato da una grande quantità di pixel, con questo assemblaggio viene ridotto il numero di elementi da processare nella fase di classificazione. Le informazioni spettrali contenute in un object derivano dai valori medi

radiometrici dei pixel che ne fanno parte. Questo nuovo modo di operare utilizza anche un altro genere di informazioni aggiuntive, le caratteristiche (features) di forma, tessitura, relazioni geo-spaziali, contesto, rapporti dimensionali. La disponibilità di un maggior numero di informazioni consente una migliore identificazione degli oggetti reali, che possono essere individuati secondo criteri geometrici, relazioni tra image objects, tessitura, oltre alle caratteristiche spettrali, con una analogia al ragionamento d'interpretazione visiva da parte di un user (operatore umano). Con questa tecnica di classificazione le unità di base dell'analisi sono gli image-objects; partendo dal presupposto che è di interesse estrarre dall'immagine informazioni sul mondo reale, è auspicabile una coincidenza degli oggetti reali con gli image-objects, cosa improbabile nella metodologia pixel-based. Il processo di classificazione object-oriented è caratterizzato da due azioni: la *segmentazione* e la *classificazione*. Come mostrato in figura è obbligatorio iniziare con la segmentazione per creare gli image-objects, solo dopo sono possibili la classificazione e successive ripetizioni di queste azioni per identificare al meglio gli oggetti d'interesse.

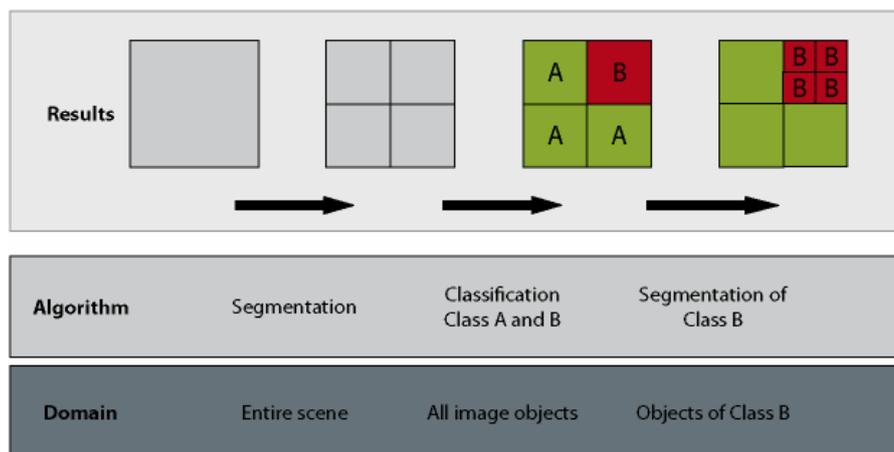


Fig.5.3-1– Processo di classificazione object-oriented

## 5.4 ALGORITMI DI CLASSIFICAZIONE NON SUPERVISIONATA E SUPERVISIONATA

Considerando la classificazione non supervisionata di tipo pixel-based, l'algoritmo adoperato è il classificatore Isodata. L'algoritmo Isodata, riconosce su un'immagine k classi di training sites e classifica l'immagine secondo queste, pertanto i pixel vengono raccolti in un insieme di dati statistici senza che alcun utente intervenga ad addestrarli. L'algoritmo comincia col calcolare una classe di punti medi uniformemente distribuita nello spazio dei dati, quindi per iterazione successiva

vengono raggruppati i pixel che restano con la minima distanza. Ciascuna iterazione ricalcola i punti medi e riclassifica i pixel in base alle loro nuove posizioni. Questo procedimento continua fino a che la percentuale dei pixel che cambia classe durante un'iterazione risulta minore di una soglia minima o fino a quando è raggiunto il massimo numero d'iterazioni settato dall'utente.

Invece, considerando una classificazione supervisionata di tipo pixel-based, l'algoritmo di massima verosomiglianza o *maximum likelihood*, assume una distribuzione normale per ogni classe ed ogni banda. Viene vincolata la problematica che ogni pixel appartenga ad una determinata classe. Ogni pixel viene assegnato alla classe con la massima probabilità. Anche qui si può specificare una soglia al di sotto della quale lasciare il pixel non classificato.

Altro algoritmo di classificazione pixel-based, è l'algoritmo SAM, che attribuisce ciascun pixel dell'immagine ad una categoria, sulla base di un valore di angolo spettrale limite predefinito. Questo angolo, è l'angolo tra il vettore medio rappresentativo della classe di training e il vettore posizione spettrale risultante relativo al pixel considerato; il pixel è appartenente ad uno spazio a  $n$  dimensioni, dove  $n$  è il numero di bande spettrali. Il pixel è assegnato alla classe con cui forma l'angolo minimo. Anche qui la classificazione avviene secondo un valore di soglia scelto dall'utente. L'algoritmo di classificazione SVM (*Support Vector Machine*), invece, è un sistema di classificazione ottenuto da teorie statistiche e richiede la conoscenza di diversi parametri statistici, i quali a loro volta dipendono dalla tipologia di *kernel* scelto (vettore di pixel utilizzato per racchiudere un'operazione tra un subset di pixel). L'algoritmo SVM considera un insieme di dati di input (pixel rappresentati come un insieme di punti nello spazio cluster) e calcola, per ogni dato di input, a quale delle due possibili classi l'input appartiene. Per tale scelta considera il piano margine che si trova, per ciascun lato, alla distanza massima (massimizzata) dalla classe dei *training data* considerata. Una classificazione differente, perché opera su oggetti campione all'interno di un certo spazio delle caratteristiche, può essere condotta adoperando l'algoritmo *Nearest Neighbour*, in modo più semplice e rapido. Questo classificatore viene utilizzato in prevalenza quando si desidera eseguire una classificazione veloce, poiché permette una più semplice gestione delle classi, oppure quando le classi sono descritte da numerose *features* con il conseguente rischio di sovrapposizione all'interno del *feature space*. L'algoritmo K-Nearest Neighbor (il vicino più vicino col maggior voto), viene adoperato per determinare a quale classe il pixel appartiene.

Nella classificazione K-NN un pixel viene assegnato ad una classe A se questa è la più frequente (presenta il maggior voto) tra i k esempi ed è la più vicina al pixel da classificare.

Se per esempio, si hanno due classi A e B, e  $K=3$ , le distanze vengono ripartite dal pixel da classificare, ai tre vicini più vicini tra le classi di training sites, ed il pixel viene assegnato alla classe col maggiore voto.

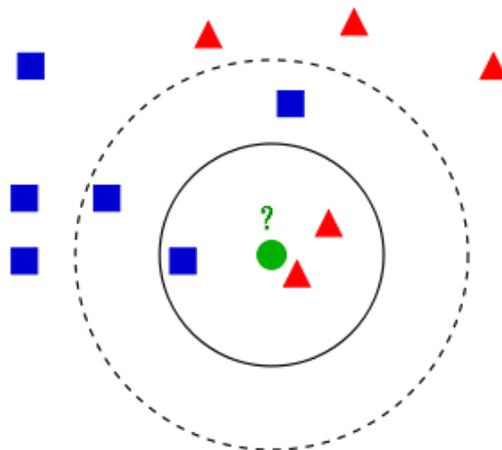


Fig.5.4-1– Esempio di classificazione pixel-based mediante k-NN con due classi di training sites.

In figura 5.4-1, è rappresentato un esempio di classificazione mediante k-NN, dove si vede che il punto da classificare è il pallino verde, e le classi di training sites sono due: quella dei triangoli rossi e quella dei quadrati blu.

Se  $k = 3$  (cioè vengono considerati i 3 oggetti più vicini), allora il pallino verde viene inserito nella stessa classe dei triangoli rossi perché sono presenti 2 triangoli e 1 quadrato. Se  $k = 5$  allora viene inserito nella stessa classe dei quadrati blu perché sono presenti 3 quadrati e 2 triangoli.

Valori elevati di K diminuiscono gli effetti del rumore e valori errati possono causare inaccurate classificazioni.

Gli algoritmi considerati in questo paragrafo, sono implementati sui più importanti software di classificazione di immagini telerilevate (nella tesi si sono usati in prevalenza Envi e Definiens Developer).

## 5.5 LA VALUTAZIONE DELL'ACCURATEZZA DELLA CLASSIFICAZIONE

Le immagini classificate devono essere sottoposte ad una rigorosa valutazione statistica di accuratezza prima di essere consegnate all'utente utilizzatore. L'accuratezza di una mappa tematica è definita come la misura della fedeltà tra la mappa tematica ottenuta dalla classificazione e un

riferimento che viene assunto come verità a terra. Il concetto di accuratezza non è legato alla precisione della classificazione, con questo termine viene indicato il livello di dettaglio della classificazione. La conoscenza dell'accuratezza di una mappa deve essere sempre fornita per dare informazioni sull'affidabilità dell'elaborato e per indicare gli eventuali errori che sono presenti.

L'errore di classificazione viene commesso quando un pixel o un object, durante il processo di classificazione, viene assegnato ad una classe differente da quella di appartenenza. L'errore viene caratterizzato per frequenza, natura, grandezza e sorgente. La frequenza indica quante volte si ha l'errore di misclassificazione, la natura specifica le classi interessate, la grandezza esprime la gravità dell'errore, la sorgente indica la provenienza dell'errore.

La valutazione dell'accuratezza è eseguita mediante il confronto tra l'immagine classificata e una seconda immagine che viene assunta come verità a terra, prodotta generalmente da informazioni più dettagliate e accurate. Queste immagini per essere confrontate devono essere compatibili rispetto alla scala, al livello di dettaglio, numero e tipologia di classi.

Esistono due metodologie per valutare l'accuratezza: non-site-specific e site-specific. Nel primo metodo, la valutazione dell'accuratezza è più elementare, è consiste nel confrontare i valori delle aree complessivamente assegnate alle classi A, B o C nelle due mappe (vedi figura 5.6-1), senza considerare la localizzazione degli errori, per cui viene chiamato non-site-specific; è un metodo elementare che non considera la localizzazione spaziale delle classi e questo limite può causare gravi errori di valutazione.

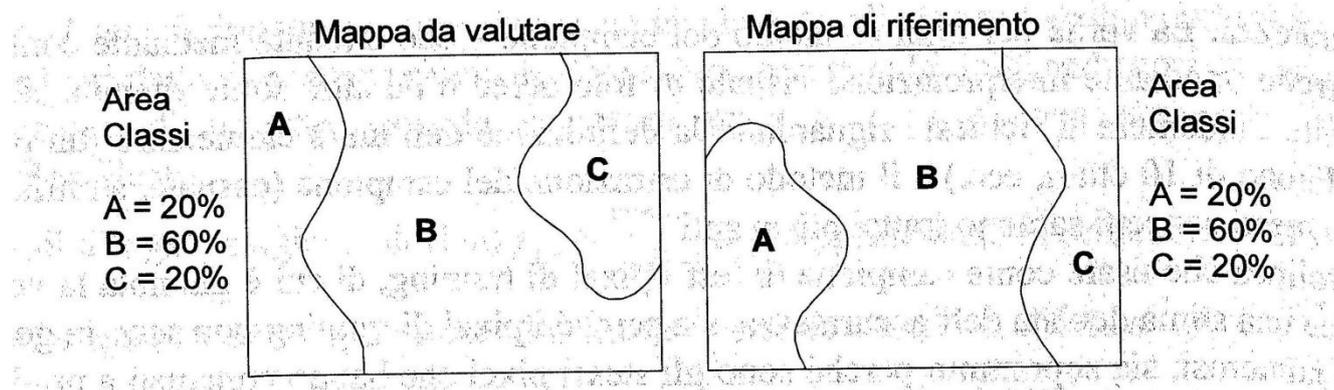


Fig.5.6-1– Accuratezza non-site-specific, basata solo sul confronto tra aree. L'estensione delle aree occupate dalle due classi nelle due mappe sono uguali, anche se di differente localizzazione.

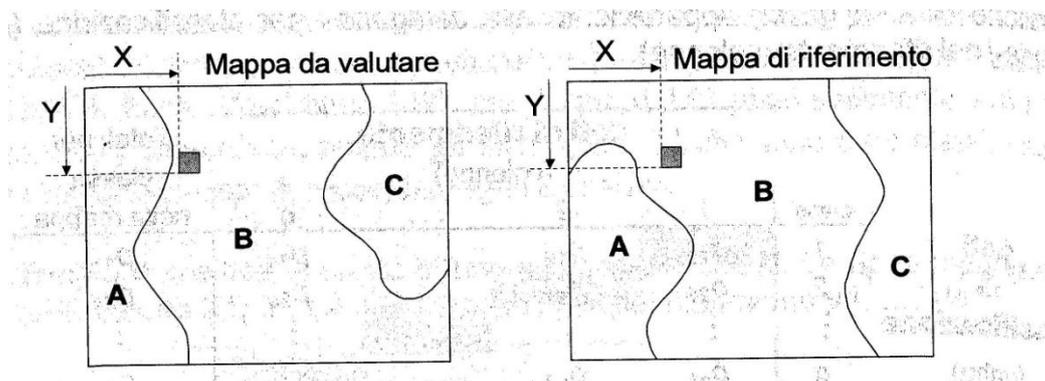


Fig.5.6-2– Accuratezza Site-specific. Le due mappe vengono confrontate pixel per pixel e le informazioni presenti relative ad ogni singolo pixel vengono cumulate

Il secondo valuta l'accuratezza, operando individualmente mediante un confronto pixel per pixel delle due mappe (vedi figura 5.6-2), è un procedimento più oneroso, ma garantisce una stima dell'accuratezza più affidabile, in quanto è considerata la localizzazione degli errori. Questo procedimento viene applicato su alcune aree campione dette test samples, che non devono assolutamente essere coincidenti ai training sites, perché significherebbe valutare la classificazione sulle informazioni utilizzate a produrla.

## 5.6 LA MATRICE D'ERRORE

La matrice d'errore contiene tutte le informazioni ricavate dal confronto dei pixels dell'immagine classificata rispetto a quella di riferimento; è una matrice quadrata di dimensione pari al numero delle classi. Lungo le colonne sono i dati di riferimento a terra, nelle righe sono riportati i risultati della classificazione; gli elementi sulla diagonale principale riportano gli elementi correttamente classificati, gli elementi che sono al di fuori sono invece errori di classificazione.

La classificazione ideale è rappresentata da una matrice d'errore che presenta elementi nulli fuori dalla diagonale. La matrice d'errore oltre a fornire indicazioni riguardo la corretta classificazione, restituisce informazione dettagliate sugli errori e sulla loro distribuzione.

In figura 5.3.2-1 è riportata la matrice d'errore per un'immagine che presenta  $q$  classi, dove il termine  $p_{ij}$  rappresenta sulle righe  $i$  pixel assegnati alla categoria  $i$  per la classificazione e sulle colonne  $j$  pixel assegnati alla categoria  $j$  per i dati di riferimento a terra.

		dati di riferimento (colonne)				Totali per classe nella mappa
		1	2	...	q	
dati di classificazione (righe)	1	$p_{11}$	$p_{12}$	...	$p_{1q}$	$p_{1+}$
	2	$p_{21}$	$p_{22}$	...	$p_{2q}$	$p_{2+}$
	...	...	...	...	...	...
	q	$p_{q1}$	$p_{q2}$	...	$p_{qq}$	$p_{q+}$
Totali per classe nel riferimento		$p_{+1}$	$p_{+2}$	...	$p_{+q}$	

Fig.5.6-1– Matrice di confusione in uno schema a q classi

### 5.7 MISURE D'ACCURATEZZA

Dalla lettura della matrice d'errore è possibile ricavare i parametri, espressi in termini di probabilità, che esprimono la qualità della classificazione.

- Global Accuracy :  $GA = \frac{\sum_{k=1}^q p_{kk}}{n}$

dove con  $p_{kk}$  è indicata la somma degli elementi sulla diagonale e n in numero totale di test samples. GA rappresenta la probabilità che ha un punto estratto a sorte di essere classificato correttamente.

- User Accuracy :  $UA = \frac{p_{ii}}{p_{i+}}$  relativo alla classe i

dove con  $p_{ii}$  è indicata la somma dei pixel assegnati correttamente alla classe i,  $p_{i+}$  indica il numero totale dei pixel assegnati alla classe i dal processo di classificazione.

UA rappresenta la probabilità condizionale che ha un punto estratto a sorte, appartenente alla classe i, di essere stato correttamente classificato. È un indicatore utile all'utente.

- Producer Accuracy:  $PA = \frac{p_{jj}}{p_{+j}}$  relativo alla classe j

dove con  $p_{jj}$  è indicata la somma dei pixel assegnati correttamente alla classe j,  $p_{+j}$  indica il numero totale dei pixel della classe j nell'immagine di riferimento.

PA rappresenta la probabilità condizionale che ha un punto estratto a sorte, appartenente alla classe j nell'immagine di riferimento, di essere stato correttamente classificato nella mappa tematica. È un indicatore utile al classificatore.

-Errore di Commissione:  $CE = 1 - UA = \frac{\sum_{k=1}^q p_{ik}}{p_{i+}}$  relativo alla classe i e ( $k \neq i$ ).

CE è associato a UA, e rappresenta la probabilità condizionale che ha un pixel estratto a sorte, appartenente alla classe  $i$  nella mappa classificata, di non essere stato correttamente classificato.

-Errore di Omissione:  $OE = 1 - PA = \frac{\sum_{k=1}^q p_{kj}}{p_{+j}}$  relativo alla classe  $j$  e ( $k \neq j$ )

OE è associato a PA, e rappresenta la probabilità condizionale che ha un pixel estratto a sorte, appartenente alla classe  $j$  nella mappa di riferimento, di non essere stato correttamente classificato nella mappa tematica.

-Coefficiente di accordo kappa:  $\hat{K} = \frac{n \sum_{k=1}^q p_{kk} - \sum_{k=1}^q (p_{k+} \cdot p_{+k})}{n^2 - \sum_{k=1}^q (p_{k+} \cdot p_{+k})}$

Fornisce una stima dell'accuratezza di una mappa tematica depurata dall'effetto legato alle possibili coincidenze casuali tra le due mappe. Considera gli elementi della diagonale principale della matrice d'errore e indirettamente anche quelli che ricadono al di fuori. Il coefficiente K assume valori compresi tra 0 e 1, valore quest'ultimo che rappresenta il massimo accordo tra i dati di riferimento e i dati generati dalla classificazione. Valori di K prossimi allo 0.4 indicano una classificazione scadente, valori intorno a 0.75 sono indice di una buona classificazione.

Nella figura seguente si presenta un esempio di matrice di confusione di una classificazione condotta su un'immagine non di tipo satellitare ma riferita invece ad un edificio che presenta segni di degrado. Sono state utilizzate 6 classi: mattone rosso, mattone chiaro, efflorescenze, croste nere, malta, lacune.

Confusion Matrix:

Dati di riferimento o "Ground Truth"

Classificazione	Dati di riferimento o "Ground Truth"						Totale riga	
	mattone rosso	mattone chiaro	efflorescenze	croste nere	malta	lacuna		
mattone rosso	7	29	0	0	0	0	36	
mattone chiaro	12	50	0	0	0	0	62	
efflorescenze	0	0	86	0	0	0	86	
croste nere	0	0	0	13	0	0	13	
malta	0	0	0	0	135	0	135	
lacune	0	0	0	0	0	8	8	
Totale colonna	19	79	86	13	135	68	400	
K=0.67   GA = 74,75%								

Fig.5.7-1 – Matrice di confusione riferita a 6 classi

Dalla matrice di confusione riportata in figura 5.7-1, si può valutare la qualità della classificazione. Sulla matrice, come si nota nella figura 5.7-1, gli errori di omissione e commissione più marcati riguardano le classi mattoni rossi e mattoni chiari. Le aree di training sample selezionate, per queste

due classi, non hanno consentito un'adeguata classificazione pixel-based e questo potrebbe essere stato causato ad esempio da una coesistenza di pixel sparsi sull'oggetto da classificare. I risultati di classificazione si potrebbero migliorare avvalendosi del contenuto di dati multi spettrali operanti ad esempio sulle bande dell'infrarosso vicino (NIR).

## 5.8 L'APPROCCIO OBJECT-ORIENTED

All'interno della presente tesi, sono discussi nei successivi paragrafi, degli esempi di classificazione tratti da letteratura, condotti con approccio object-based, posti come introduzione ad una piccola sperimentazione, presentata a seguire. Quanto viene presentato, è stato sviluppato adoperando la nuova tecnologia fornita dal software di classificazione Definiens Developer, un software che è stato pensato per l'analisi e la classificazione delle immagini con un approccio object-oriented, e che è stato ideato in primo luogo per lavorare con immagini VHR, Radar ed aeree.

Questo particolare software cerca di interpretare le immagini in maniera simile alla mente umana, le analizza tenendo conto degli oggetti e del contesto in cui essi si trovano, pertanto la tecnologia di Definiens è basata sugli "oggetti" e sul loro contesto spaziale.

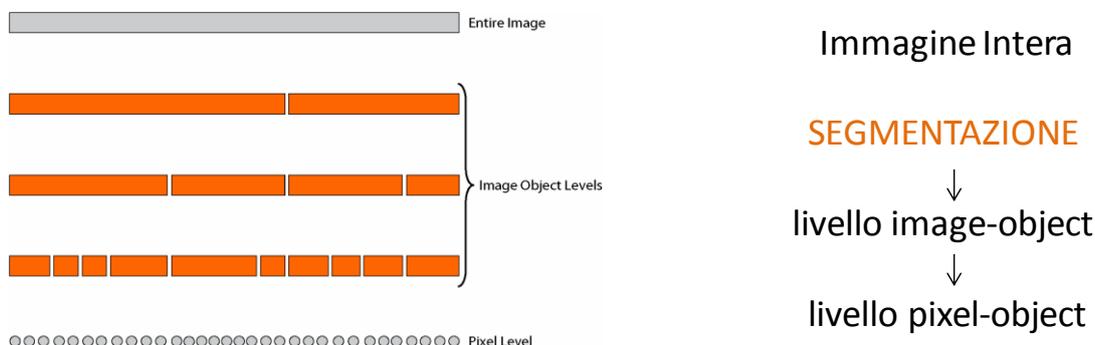


Fig.5.8-1–Dall'immagine intera alla segmentazione.

Essendo stato concepito per lavorare in un approccio object-oriented, il programma in una prima fase, detta di segmentazione, definisce gli oggetti con i quali suddivide l'immagine. La segmentazione avviene al livello object level, come è indicato in figura 5.8-1, ed è eseguita utilizzando diverse metodologie, tra le quali la più comunemente utilizzata è la *multiresolution segmentation*, adoperata anche nelle sperimentazioni presentate in seguito.

La *multiresolution segmentation* è una classificazione che opera attraverso una procedura di ottimizzazione, la quale minimizza, ad una certa risoluzione, l'eterogeneità o la scala degli oggetti immagine. L'eterogeneità presa in considerazione è sia spettrale (numero digitale del pixel), che

geometrica (forma dei poligoni creati). La segmentazione multi-risoluzione separa regioni adiacenti ad una immagine, che presentino un significativo contrasto. In questo modo, possono essere classificate anche immagini con elevati livelli di tessitura. Essa permette di inserire nuovi livelli di oggetti, sia sopra che sotto a quello esistente. Ogni oggetto può essere relazionato agli oggetti che gli stanno vicini (*neighbours*), a quelli del livello superiore (*super-objects*), ed agli oggetti del livello inferiore (*sub-objects*).

Altre segmentazioni sono:

- la chessboard segmentation, che raggruppa i pixel in oggetti quadrati della stessa dimensione, costruendo una griglia allineata ai bordi dell'immagine;
- la quadtree based segmentation, che raggruppa i pixel in una griglia di quadrati di diversa dimensione costruiti ad albero;
- la spectral difference segmentation, che è usata per fondere oggetti dal punto di vista dell'intensità radiometrica, in modo che due oggetti vicini sono fusi se hanno una differenza nel valore di intensità media inferiore a quello predefinito dall'utente.

L'utente, in fase di segmentazione, può specificare diversi parametri, in modo da ottenere la segmentazione ottimale per gli scopi prefissi:

- Scale parameter: misura del massimo cambiamento in eterogeneità ammesso durante la fusione degli oggetti, in pratica si relazione alla dimensione dei segmenti (objects);
- Peso del layer: valore intero compreso tra 0 ed 1, assegnato ad un layer immagine prima della fase di segmentazione, in modo che sia il valore del peso attribuito ai layer immagine a determinare il risultato della segmentazione.
- Composizione del criterio di omogeneità: (sinonimo di minima eterogeneità) è diviso in due parti, un criterio per la forma (shape) e uno per il colore (color). Con questi due parametri si può decidere se l'omogeneità dell'immagine si basi di più sulla forma o sui valori spettrali. Nella maggior parte dei casi il criterio del colore è il più importante per creare oggetti significativi, ma spesso un certo grado di eterogeneità nella forma migliora la qualità degli oggetti estratti.

Il criterio della forma è poi suddiviso in altri due parametri: *compactness* e *smoothness*.

Il parametro *smoothness* (regolarità), consente di ottimizzare gli oggetti in relazione alla regolarità dei bordi. Viene utilizzato nel caso di dati molto eterogenei, per evitare di creare poligoni con i bordi frastagliati. La *compactness* (compattezza), invece, è utilizzata per ottimizzare la compattezza degli oggetti. Ne viene aumentato il valore, ad esempio, quando oggetti compatti dell'immagine sono separati da altri non compatti, con un contrasto spettrale debole.

I parametri vengono modificati finché non si ottiene il risultato desiderato, e fintanto che gli oggetti siano stati scalati fino alla loro massima grandezza, ma in modo da essere caratterizzati da un livello

minimo di eterogeneità. In questo modo si possono separare regioni dell'immagine a diversa copertura anche quando hanno valori spettrali simili (ad es. alberi e prato).

Riassumendo, i parametri della struttura di segmentazione sono analiticamente così definiti:

–fattore di scala:  $Scale = w_{color} \cdot h_{spectral} + (1 - w_{color}) \cdot h_{shape}$ ;

–fattore di colore:  $h_{spectral} = \sum w_{color} \cdot \sigma_{color}$ ;

–fattore di forma:  $h_{shape} = w_{compactness} \cdot h_{compactness} + (1 - w_{compactness}) \cdot h_{smoothness}$ ;

–fattore di compattezza:  $h_{compactness} = \frac{1}{\sqrt{n}}$ ;

–fattore di lisciatura:  $h_{smoothness} = \frac{1}{b}$ .

In Definiens, gli oggetti, object, sono definiti esprimendo delle caratteristiche di tipo contestuale e relazionale, che li contraddistinguono, le features. La feature è un attributo che rappresenta un'informazione riguardante l'oggetto d'interesse, come misure, dati o valori allegati.

Le feature sono relative agli oggetti immagine e descrivono le proprietà spettrali, di forma, di appartenenza gerarchica o altro di un oggetto immagine, per esempio l'area. Sono ottenute nel valutare gli oggetti immagine, nell'analizzarli nel comportamento e nella loro gerarchia d'appartenenza. Esse sono raggruppate in: Customized; Layer Value; Shape; Texture; Variables; Hierarchy; Thematic attribute. Le feature globali non sono relative ad un oggetto immagine individuale, per esempio il numero degli oggetti immagine di una certa classe, ma descrivono la situazione della rete corrente o livello in generale, come il valore di Mean di un dato layer immagine o il numero di livelli nella gerarchia oggetto immagine. Mean sta per indicare il valore medio statistico di primo livello, per la caratteristica selezionata, di tutti i pixels che formano un oggetto immagine. Rappresenta ad esempio la Brightness media di un oggetto immagine, che riguarda solo un singolo livello. Con l'esecuzione del processo di segmentazione viene realizzato un nuovo livello immagine posto sopra il livello pixel primario, sicché l'insieme delle immagini degli oggetti è organizzata in una rete gerarchica di oggetti immagine.

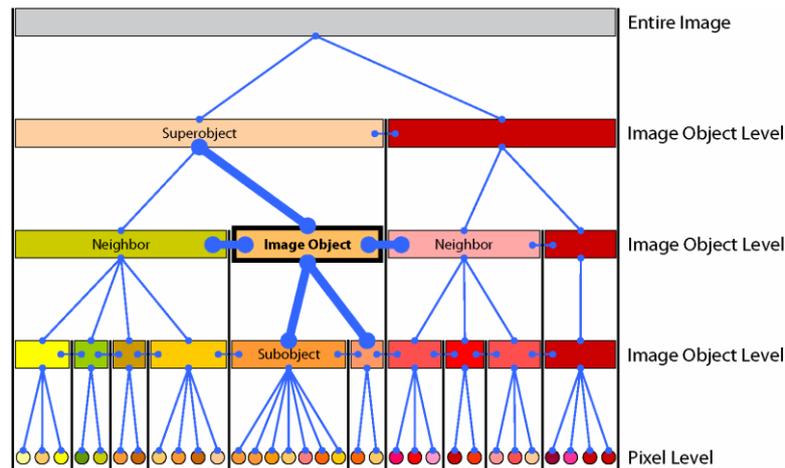


Fig.5.8-2–Relazioni esistenti tra gli object dopo la fase di segmentazione.

Tale rete è chiamata gerarchia oggetti immagine, e si compone di uno o più livelli di oggetti immagine, dall'alta risoluzione sull'oggetto immagine del livello più basso alla risoluzione più grossolana sull'oggetto immagine del livello più alto. Gli oggetti immagine all'interno di un singolo livello oggetto immagine sono collegati orizzontalmente, ed allo stesso modo, ogni singolo oggetto immagine è collegato verticalmente alla gerarchia degli oggetti immagine, come mostrato in figura 4.8-2. Gli oggetti immagine sono in rete in modo che: ogni oggetto immagine conosce il suo contesto; quali sono i suoi vicini; quali sono i suoi super-object su un livello immagine oggetto più alto ed i suoi sub-object su un livello oggetto più basso. Per garantire determinati rapporti tra i livelli di oggetto immagine, nessun oggetto immagine può avere più di un super-object, ma può avere sotto di sé più sub-object (oggetti multipli), in modo che il confine di un super-object è coerente con il confine del suo sub-object. Dopo la segmentazione dell'immagine in object, avviene la classificazione dell'immagine tramite le object feature, divise in customized feature e class-Related feature. Le prime descrivono le caratteristiche spettrali, di forma, di colore, ecc., degli oggetti dell'immagine, definendo delle feature personalizzate (aritmetiche o relazionali), mentre le seconde permettono di individuare le relazioni tra gli oggetti. Operazioni preliminari alla classificazione dell'immagine, sono ordinate e compilate in un albero dei processi, dove un singolo processo, che è l'unità elementare di un cosiddetto Rule Set, permette di gestire tutti i passi di analisi di una immagine, impiegando idonei algoritmi ad una specifica regione dell'immagine. Ogni processo può avere dei processi "figli", creando così una gerarchia (process tree), la quale consente di costruire complessi flussi di lavoro, che possono essere salvati e caricati in un altro progetto (Rule Set).

## **5.9 ESPERIENZE DI CLASSIFICAZIONE TRATTE DA LETTERATURA IN AMBITI DI BENI CULTURALI**

Come già evidenziato nel paragrafo precedente, la segmentazione col software di classificazione Definiens è la suddivisione dell'immagine in sezioni separate di oggetti (object), che è possibile unire e classificare all'interno di un progetto (rule set), quando è raggiunto un criterio di eterogeneità o di scala. Nella segmentazione di tipo multiresolution, all'interno della struttura dati di segmentazione, vengono coinvolti insieme oggetti di dimensioni diverse secondo limiti direzionali o di gerarchia d'appartenenza, definiti tra oggetto e oggetto. Gli oggetti di un'immagine segmentata vengono descritti per livelli da una struttura di tipo object fino a quella per pixel.

I valori da attribuire ai fattori color e shape o ai fattori compactness e smoothness, vengono definiti in funzione dello spazio delle caratteristiche dell'immagine di partenza da voler segmentare. Nell'ortofoto di figura 5.5-1, relativa ad una sperimentazione di classificazione, condotta con il software eCognition, dal Dipartimento Distart di Bologna nel settore del rilevamento dei Beni culturali, (Bitelli et al., 2005), viene descritto un particolare del mosaico del Ninfeo della "Domus dei gemelli" a Pompei; l'ortofoto delinea dettagliatamente attraverso i colori i particolari del disegno delle tessere del mosaico. L'immagine, prima d'essere segmentata e poi classificata ad oggetti, è stata analizzata, in modo che dopo la segmentazione un oggetto comprenda al suo interno una sola tessera e non si intersechino più object in una tessera. La segmentazione è stata eseguita adoperando scale diverse e variando i valori dei fattori color/shape, fino ad individuare, come è mostrato in figura 5.5-2, la scala per la quale le tessere sono individuate univocamente, e cioè di 50.



Fig. 5.5-1 – Ortofoto del mosaico pompeiano presente nella Domus Gemelli

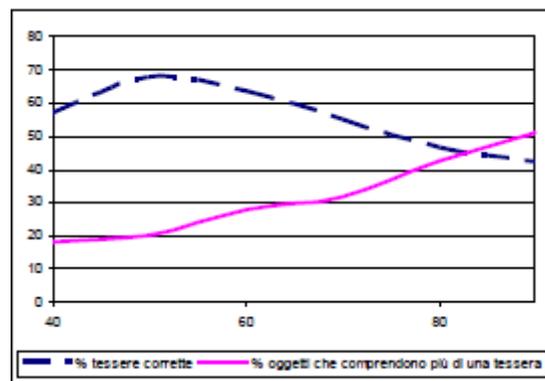


Fig. 5.5-2 – Ottimizzazione dei parametri di segmentazione delle tessere.

Terminata la segmentazione, eseguita con il fattore di scala 50, nella fase di classificazione supervisionata, gli object sono stati classificati definendo una classe per ciascun colore delle tessere mosaico, ed individuando delle caratteristiche geometriche comuni, come la superficie o la forma, che secondo dei valori di soglia massimi e minimi, hanno migliorato i risultati della classificazione finale. Nell'immagine classificata mostrata in figura 5.5-3, è possibile conteggiare le tessere correttamente classificate e conoscerne il valore complessivo per ciascuna delle otto classi colore riconosciute dall'utente e assegnate nel progetto di classificazione.



Figura 5.5-3 – Immagine classificata attraverso 8 classi colore assegnate.

Da studi di classificazione svolti sulle immagini digitali, si può affermare che partire da una buona segmentazione, che operi per un corretto riconoscimento degli object rappresentativi di tutte le classi assegnate, consente di poter giungere ad una buona classificazione. Il risultato è stato verificato sia con il conteggio manuale delle tessere, che con quello automatico possibile con il software eCognition. Nelle mura del bastione di Floriana a Malta, segmentazioni condotte adoperando scale diverse e variando i fattori shape e color, hanno permesso d'identificare forme ed colori dei differenti conci.

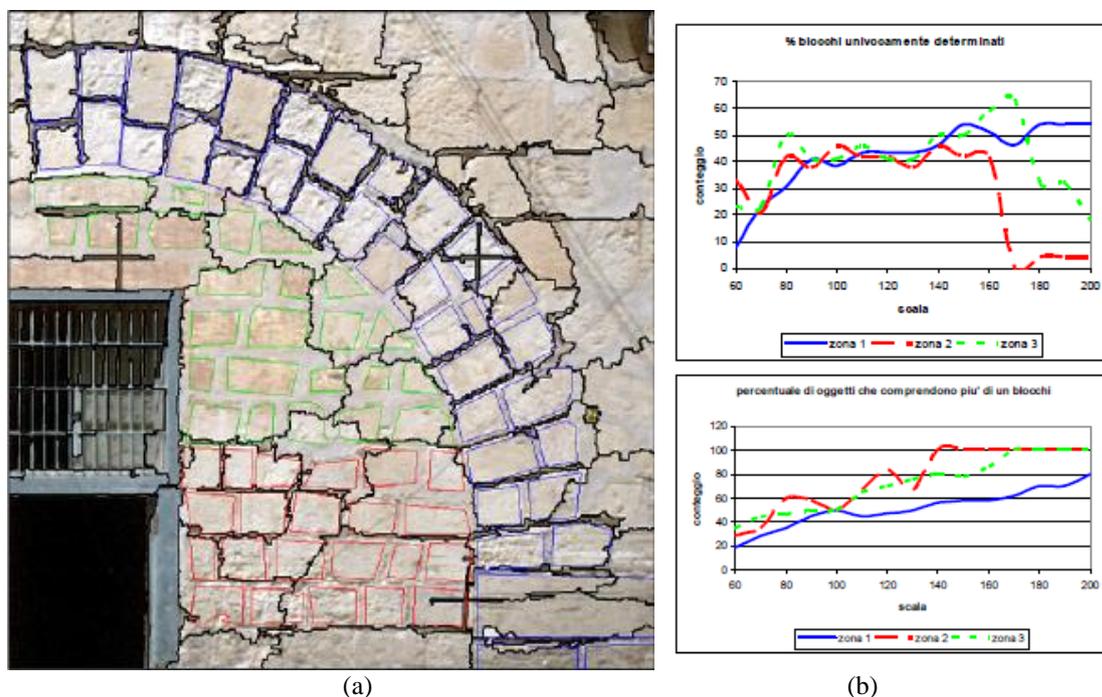


Figura 5.9-5 – Fotopiano di muratura nel bastione di Floriana, Malta: (a) esempio di segmentazione con un certo set di parametri (colore 0.3, compattezza 1.0) e valutazione dei risultati su tre zone diverse, riconoscibili dal colore di una schematica vettorializzazione manuale. (b) I grafici confermano come, al crescere del fattore di scala, la sola zona 1 (blu) fornisca risultati abbastanza buoni (Bitelli G. et al., 2005).

Per questa sperimentazione la tipologia di software adoperato nella fase di segmentazione dell'immagine non risulta sempre in grado di individuare object che comprendano solo un concio e

ciò è presentato nei grafici di figura 5.9-5(b), dove si può notare come al crescere della scala cresca il numero degli oggetti rappresentativi della classe concio che sono inglobati da più di un object. Il conteggio del costruito o di parti del territorio è una prerogativa di notevole importanza quando bisogna monitorare e gestire aree disastrose del territorio operando attraverso planimetrie o immagini a piccola scala, una sperimentazione a tale riguardo è stata svolta dal Dipartimento Distart di topografia dell'Università di Bologna, al fine di censire gli edifici collassati in seguito ad un forte terremoto manifestatosi il 26 Dicembre del 2003 sulla antica città di Bam, Arge Bam, il più grande complesso mondiale costruito in cotto, una città nella provincia di Kerman a sud-est dell'Iran, riconosciuta dall'Unesco come sito e paesaggio culturale mondiale. Mentre un'immagine Aster di 15 m di risoluzione a terra, prima dell'evento, non mostra il danno esistente (Fig.5.9-6a), una coppia d'immagini QuikBird pre e post evento (Fig.5.9-6b) mostra chiaramente una valutazione del danno in elevazione e gli effetti del terremoto sulle strutture e sulle fondazioni (Bitelli, et al., 2005).

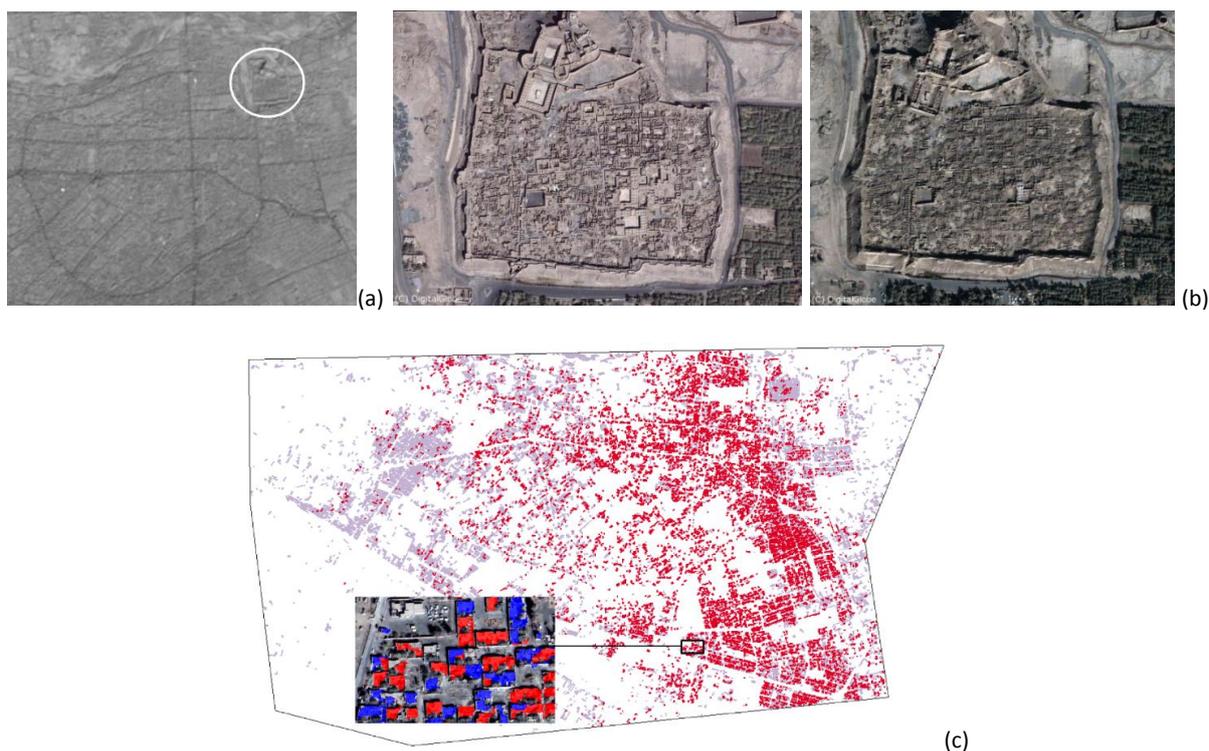


Fig.5.9-6 – Immagini satellitari intorno l'antica cittadella di Bam, Arge-Bam: (a) Immagine Aster, risoluzione di 15 m, dopo il terremoto con evidenziata Arge-Bam (immagine concessa dal LP DAAC-USGS); (b) Coppia di immagini QuickBird pre e post evento della cittadella, risoluzione di 0,60 m (immagine concessa dal Digital Globe); (c) Mappatura degli edifici danneggiati della città di Bam, basata su analisi di classificazione object-oriented di immagini QuickBird catturate prima e dopo il terremoto. Nell'ingrandimento a finestra sono evidenziati in diverso colore gli edifici collassati e non.

Partendo da immagini ad alta risoluzione, è stata eseguita una classificazione delle immagini della città (Fig.5.9-6c) usando un approccio di tipo object-oriented, dove il 40% nominale degli oggetti

indicato in rosso è stato classificato come collassato ed il restante indicato in blu come non collassato. L'ingrandimento in figura mostra un dettaglio della classificazione degli edifici.

L'esempio che è stato discusso mostra un'applicazione di gestione del rischio su un'area di grande interesse culturale, e rappresenta una delle sperimentazioni più emblematiche in grado di far comprendere quali siano oggi le notevoli potenzialità offerte dalle nuove tecniche geomatiche per il controllo, la salvaguardia e la gestione nel settore dei beni culturali. Nel prossimo paragrafo è presentato un piccolo test di classificazione che è stato condotto su più immagini multi-spettrali relative ad una porzione di affresco, per evidenziare le parti di affresco restaurate e non. Significativi sono i risultati osservati sull'immagine nel fluorescente visibile con eccitazione ultravioletta.

## **5.10 SPERIMENTAZIONE SU UNA PORZIONE DI AFFRESCO**

La grande cupola dell'Abbazia Benedettina della Madonna del Monte in Cesena presenta una superficie affrescata molto ampia, eseguita nello spazio di due anni, conclusa nel 1774 per opera di Giuseppe Milani, un artista di origini parmensi che ha operato incessantemente a Cesena ed in Romagna; si tratta dell'ultima grande cupola di Romagna e probabilmente d'Italia. La cupola della "Madonna del Monte" è la più significativa e complessa tra le opere di soggetto religioso sia sul piano pittorico che dal punto di vista iconografico. La cupola aveva subito danni ingenti durante l'ultima guerra ed era stata oggetto di un intervento di restauro negli anni successivi, protrattosi per circa due anni ed effettuato con i finanziamenti congiunti della Soprintendenza al Patrimonio Storico, Artistico e Etno-antropologico di Bologna e della Fondazione Cassa di Risparmio di Cesena. Da allora polvere, sporco, infiltrazioni, avevano offuscato l'intera superficie pittorica nascondendo così la bella qualità cromatica con la quale il pittore ha caratterizzato ogni figura e lo spazio infinito, dove l'immagine gloriosa dell'Assunzione della Madonna è rappresentata con una ricca "quadratura" pittorica, oltre ad ergersi da 31 metri d'altezza, circondata da numerose figure di angeli caratterizzate da profuse colorazioni ricche in pigmenti e difficilmente distinguibili dal basso. Tutto è realizzato ad affresco quasi certamente rifinito a secco; alcune finiture sono andate perdute in una delle tante manutenzioni del ciclo. L'apoteosi mariana è preceduta da otto storie sul tamburo della cupola, che è sorretto dai quattro evangelisti, mentre il ciclo mariano è introdotto dalle Virtù cristiane, caratterizzate da una diversa iconografia, e dai Profeti distinguibili dai cartigli che riportano versetti significativi. Si è condotta una sperimentazione riguardante l'affresco, sulla base di immagini multi-spettrali (colore, fluorescenza, infrarosso) messe a disposizione da parte del

Laboratorio M2ADL (Microchemistry And Microscopy Art Diagnostic Laboratory) dell'Università di Bologna, ed in particolare su una porzione dell'affresco della cupola della basilica di S. Maria del Monte di Cesena; e cioè il volto di un angelo posto ai piedi della Vergine Maria.



Fig.5.10-1 – Camera multi–spettrale Artist

Le immagini multi–spettrali sono state acquisite nel 2008, come fondamento di studi d'indagine diagnostica, al fine di una caratterizzazione materica e di una visualizzazione sullo stato conservativo dell'opera e dei restauri recentemente conclusi. Per la generazione delle immagini multi–spettrali di tipo Fluo e NIR , è stata adoperata la camera multi–spettrale Artist, la quale fornisce una conoscenza del dato in aggiunta all'informazione visibile in quanto: visualizza composizione e condizione del rilievo; distingue i restauri precedenti; analizza il colore e i pigmenti. La camera è dotata di sensore CCD che consente di registrare immagini ad elevata risoluzione impiegando come sorgenti *lampade alogene* a basso voltaggio per le riprese in luce visibile ed infrarossa, ed una *lampada allo xeno* con eccitazione a lunghezza d'onda prefissata pari a 365 nm per lo studio della fluorescenza visibile. L'integrazione tra le diverse immagini multi–spettrali e tra queste e le immagini fotogrammetriche, eseguite nel campo del visibile, è possibile se si co–registrano tra loro questi dati; a tal fine è stato condotto un test su una zona campione dell'affresco di ca.160 cm<sup>2</sup>, ipotizzata piana, date le dimensioni minime rispetto alla complessiva estensione della superficie decorata della cupola, stabilendo una piccola rete di quattro punti d'appoggio, calcolata per via topografica, che consentisse di avere le immagini dei diversi tipi ricampionate e perfettamente a registro tra loro. Scopo della sperimentazione è stato quello di usare congiuntamente immagini di diverse bande spettrali per classificare le tipologie di materiali e caratterizzare le parti soggette in passato a restauro, non direttamente riconoscibili nel campo del visibile.

Come mostrate in figura 5.10-2 le immagini di riferimento utilizzate riproducono il soggetto nel campo del Visibile (RGB); nella Fluorescenza Visibile (FLUO) con eccitazione ultravioletta, nell'Infrarosso vicino (IR1); con il Falso Colore (FCIR1).

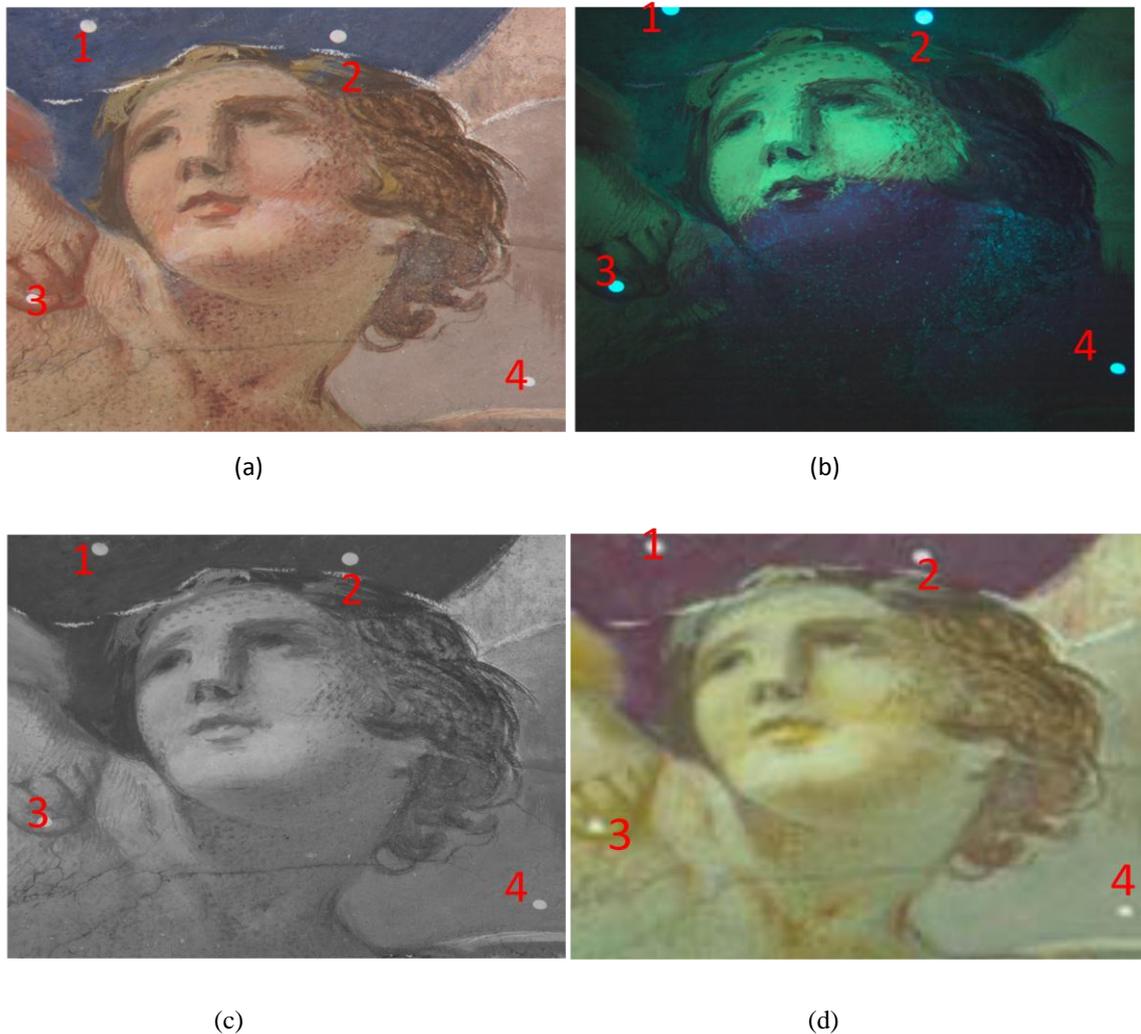


Fig.5.10-2 – Immagini adoperate nella sperimentazione con indicazione dei quattro punti fotogrammetrici d'appoggio  
 a) immagine nel campo del Visibile (RGB); b) immagine di Fluorescenza Visibile (FLUO) con eccitazione ultravioletta  
 c) Riflettografia Infrarossa (IR1); d) immagine a Falso Colore (FCIR1).

Le immagini prima d'essere state classificate sono state :

- Raddrizzate per correggere effetti prospettici,
- Co-registrate tra loro avvalendosi dei target apposti allo scopo.

Il raddrizzamento è stato eseguito in ambiente digitale utilizzando 4 GCPs (corrispondenti a 4 target visibili), le cui coordinate sono state espresse in un sistema di riferimento arbitrario.

Nella co-registrazione l'area ricampionata ha gli estremi di coordinate (in m):

$X_{in} = 0.037$ ,  $Y_{in} = 0.028$

$X_{fin} = 0.435$ ,  $Y_{fin} = 0.384$

Il lato del pixel dopo il ricampionamento è risultato pari a 0.17 mm.

Tali coordinate sono state misurate per trilaterazione compensandole mediante un software che lavora ai minimi quadrati avendo fissato precedentemente un sistema di riferimento e quindi le coordinate di un punto e una direzione.

Queste immagini (RGB, fluorescenza, infrarosso), così raddrizzate e co-registrate, sono state poi analizzate dal punto di vista spettrale utilizzando un software specifico per il trattamento e la classificazione di immagini telerilevate secondo un approccio object-oriented, come *Definiens Developer 7*. La tecnologia di Definiens è basata su “oggetti” e sul contesto in cui questi si trovano, come già illustrato in precedenza.

Sono state assegnate due classi nello spazio delle caratteristiche; la classe “restaurato” e la classe “originale”, volendo individuare quali sono state le aree interessate dall’intervento di restauro e quali non. Sulle immagini è stata svolta una prima indagine visiva, e si è riscontrato che le immagini acquisite nel campo di fluorescenza visibile sono quelle che descrivono meglio le due classi e che presentano il maggior contenuto spettrale. Nel canale di fluorescenza visibile “Fluo”, è chiaramente evidente l’impronta del restauro ed è possibile contornare l’area che vi ricade e segnare il piano di ripartizione tra le due classi che è accennato in figura 5.10-3.

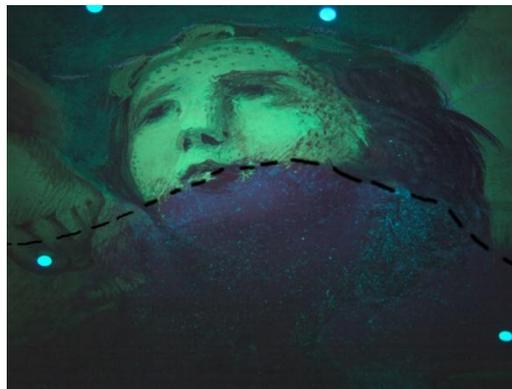


Fig.5.10-3 – Immagine fluo, sotto il tratteggio viene evidenziato il restauro.

Prima di essere classificata l’immagine è stata segmentata; in questa fase, che è il primo passo di un approccio object-oriented per definire gli oggetti nei quali suddividere l’immagine, avviene la suddivisione dell’immagine ed il passaggio dal livello image al livello image-object (come è stato evidenziato nel paragrafo 5.8). Dato che l’immagine presenta un significativo contrasto spettrale, e contiene oggetti immagine che hanno ad una certa risoluzione un’elevata eterogeneità spettrale e geometrica, è stata adoperata la multiresolution segmentation.

Nella segmentazione *multiresolution* sono stati settati i seguenti parametri: scala, peso del layer, fattore di forma e di colore, fattore di compattezza e di lisciatura. Si è considerato di dare il peso maggiore (cioè di 1), al layer immagine contenente il maggiore contenuto spettrale, considerando

un range di valori da 0 minimo ad 1 massimo, che in questo caso è stato attribuito al Layer “Fluo” (immagine di fluorescenza visibile eccitato nell’ultravioletto) ed al layer IR (immagine di riflettografia infrarossa), mentre per i restanti si sono adottati valori minori. Per poter riconoscere le due classi il problema è stato affrontato diversamente e a diversi fattori di scala. Considerando uno stesso progetto, si è confermato che, adottando un fattore shape 0,1 e di compactness 0,5, al diminuire del valore del fattore di scala, il numero degli object dopo la segmentazione è maggiore, e che al contrario, diminuisce aumentando la scala di segmentazione, restituendo object più discostati dal piano di separazione individuato tra le due classi. Per questo il problema è stato studiato adottando una scala maggiore di 65; con fattore di scala superiore a 100 gli object vengono descritti diversamente, dopo 500 si perdono i dettagli e non si hanno risultati di segmentazione significativi.

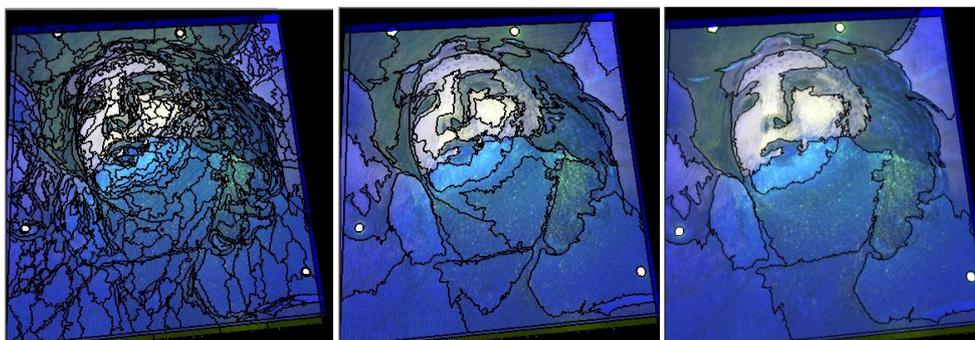


Fig.5.10-4 – Risultati di segmentazione per l’immagine nel campo della Fluorescenza visibile con fattore di scala:100; 500; 1000.

Il test d’individuazione delle due classi è stato studiato ampiamente ed a scale differenti, in particolare nella figura 5.10-5, dove sono messi a confronto tre diversi progetti, vengono riportati i risultati di un conteggio automatico degli object effettuato dal programma Definiens dopo la segmentazione dell’immagine; il numero minore d’oggetti conteggiati è per grandi valori di scala, ad una scala maggiore il software diminuisce il numero degli oggetti secondo i quali segmenta l’immagine e riesce meglio ad individuare la linea di separazione tra le classi.

Quindi le quattro immagini sono state segmentate adoperando un unico livello, con un fattore di scala di 65; un fattore di forma 0,1 e un fattore (complementare) di colore 0,9; un fattore di compattezza 0,5 ed un fattore (complementare) di lisciatura 0,5.

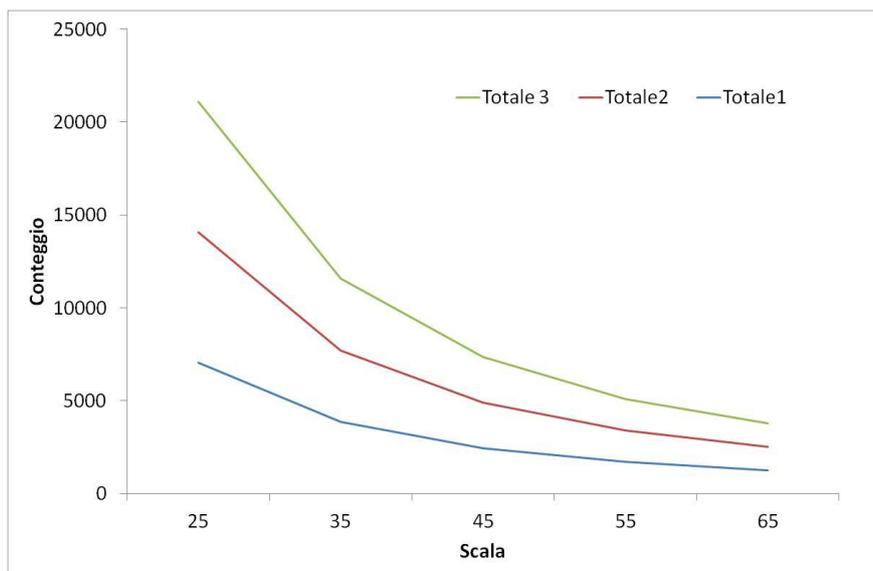


Fig.5.10-5 – La segmentazione effettuata a diverse scale riporta un conteggio degli object complessivo differente per i tre progetti.

A seguito della segmentazione sono stati ricercati gli attributi che definiscono al meglio le parti dell'affresco restaurate, i loro valori vengono usati per la descrizione delle classi. Per le classi di studio già introdotte vengono riportati nella figura 5.10-6 gli attributi che le contraddistinguono:

Classe	Colore	Descrizione
originale	giallo	Max.diff. $\leq 0,93$
restaurato	magenta	Aritmetic Feature $\leq 160$
Unclassified	nero	Max diff. =0

Fig.5.10-6– Gli attributi adoperati per la ricerca delle classi: originale, restaurato; non classificato.

Dove gli attributi utilizzati sono:

- l'algoritmo Max Diff., che calcola la massima differenza, cioè la differenza tra i valori significativi massimo e minimo, appartenenti ad un oggetto. Per ottenere i valori massimi e minimi, i valori medi di tutti i layer appartenenti a ciascun oggetto sono comparati a ciascun altro;
- la Brightness, che è la somma di tutti i valori medi dei layer, contenenti le informazioni spettrali, diviso la loro quantità calcolata per un'immagine oggetto. Quindi è il valore medio di tutti i valori medi spettrali di un oggetto immagine;
- le Aritmetic Features, che sono definite quando si vuole mettere in evidenza una particolare feature (caratteristica) presente su un'immagine da classificare, caratterizzata da più bande. Sono ottenute come differenza tra i valori medi spettrali di un layer oggetto, meno la somma dei medi

spettrali di tre layer oggetto più significativi. La classificazione è stata eseguita con l'algoritmo *Classification* che opera sull'intera immagine utilizzando la descrizione delle classi. Durante la classificazione iniziale è stata adoperata una classe filtro che ha facilitato il riconoscimento di parti comuni alle due classi. A seguito della prima procedura di classificazione, è necessario tentare un miglioramento dei risultati adoperando algoritmi di inclusione o esclusione rispetto ad un margine prefissato, ed essendo il fine ultimo l'individuazione delle parti restaurate, alla fine del processo di classificazione è stata prevista una fase di merge-objects per fondere tutti gli objects adiacenti che appartengono ad una delle due classi. La figura 5.10-7, illustra il processo sviluppato per il riconoscimento delle parti restaurate adoperando le immagini di fig.5.10-1.

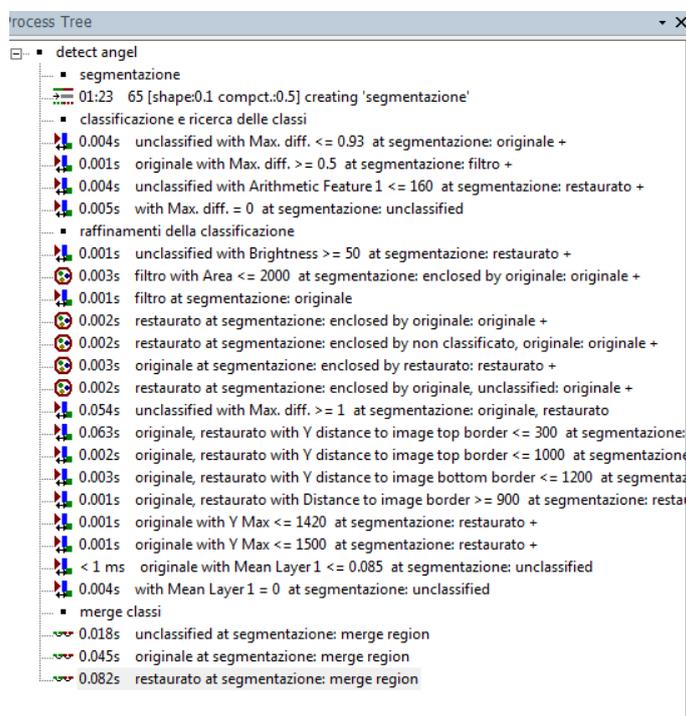


Fig 5.10-7 – Classificazione supervisionata e albero dei processi

È stata effettuata un'analisi dell'accuratezza della classificazione in termini di pixels utilizzando il software Definiens Developer 7. L'accuratezza della classificazione viene valutata tramite la matrice d'errore che necessita della conoscenza della reale natura dei pixels. Per dare questa conoscenza è necessario creare un secondo progetto caratterizzato dagli stessi parametri di segmentazione, classificare manualmente gli objects e salvare quest'informazione in un'immagine che viene detta TTA Mask. Per procedere alla valutazione dell'accuratezza vengono correlate le classi tra la TTA Mask e l'immagine classificata. L'immagine è formata da 15.000 pixels, la seguente matrice d'errore in termini di pixels ne mostra quantitativamente e qualitativamente la ripartizione tra le classi. Si ricorda che sulla diagonale principale si hanno i pixel correttamente

classificati mentre fuori dalla diagonale i pixel attribuiti ad elementi mal classificati. Dal valore dell'overall accuracy risultano ben classificati l'89% dei pixel, e dal valore di k superiore a 4 si può sostenere che la classificazione è avvenuta con successo.

User \ Referenc...	originale	restaurato	Sum
<b>Confusion Matrix</b>			
originale	279566	0	279566
restaurato	72902	427958	500860
unclassified	0	0	0
Sum	352468	427958	
<b>Accuracy</b>			
Producer	0.7931670	1	
User	1	0.8544464	
Hellden	0.8846549	0.9215110	
Short	0.7931670	0.8544464	
KIA Per Class	0.6777187	1	
<b>Totals</b>			
<b>Overall Accuracy</b>	<b>0.9065869</b>		
<b>KIA</b>	<b>0.808</b>		

Fig 5.10-8 – Matrice di confusione TTA Mask associata alle 2 classi

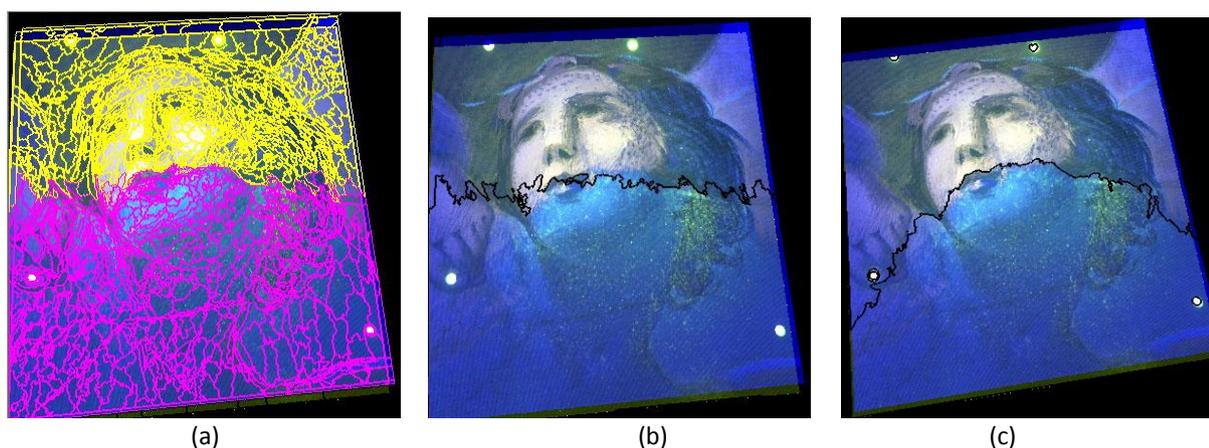


Fig.5.10-9 – Risultati di classificazione: (a)Immagine classificata visualizzata ad oggetti;(b) Piano di separazione tra le classi riconosciuto dal processo; (c) Piano di separazione tra le classi riconosciuto dal processo dopo le operazioni di miglioramento della classificazione.

L'algoritmo non è riuscito ad interpretare correttamente il piano di separazione tra le classi, ma sebbene l'immagine classificata non descriva esattamente il piano di divisione tra le classi, si può considerare a questo sufficientemente prossima nella parte centrale e di destra. I risultati finali dell'immagine classificata, possono essere migliorati in modo non rigoroso agendo direttamente sugli object modificandone anche le dimensioni e classificandoli, attraverso i tool di editing, adoperati per classificazioni veloci. In figura 5.10-11, è riportata l'immagine classificata, migliorata intervenendo direttamente sugli object e assegnandogli la corretta classe di appartenenza. In figura 5.10.12 è mostrata la TTAMask della nuova immagine classificata, dove si nota che, rispetto alla

classificazione precedente, i pixel correttamente classificati posti sulla diagonale principale, sono risultati in numero maggiore per la classe originale, mentre in numero minore per la classe restaurato, comportando il tutto un miglioramento dell'immagine risultante classificata.

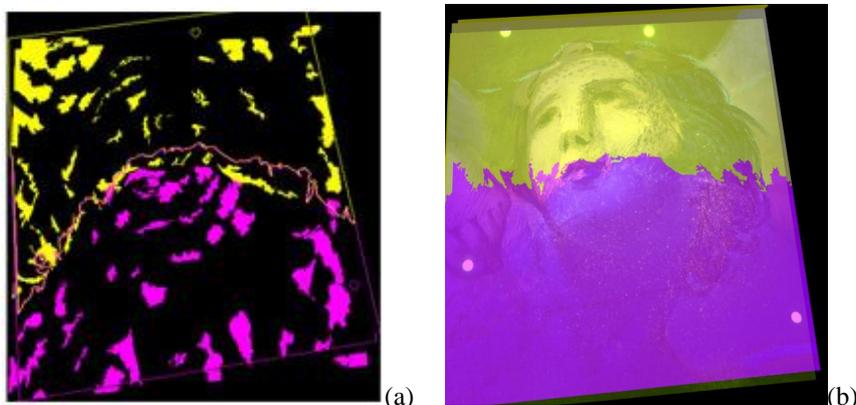


Fig.5.10-10 – (a)Immagine classificata in magenta il restauro in giallo la parte originale non restaurata; (b) Immagine classificata migliorata con le operazioni di editing su Definiens.

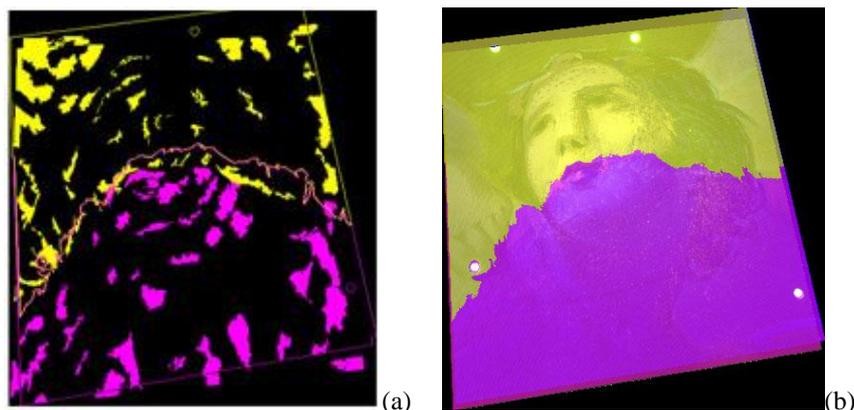


Fig.5.10-11 – (a)Immagine classificata in magenta il restauro in giallo la parte originale non restaurata; (b) Immagine classificata migliorata con le operazioni di editing su Definiens.

User \ Referenc...	originale	restaurato	Sum
<b>Confusion Matrix</b>			
originale	317416	6892	324308
restaurato	44600	403770	448370
unclassified	7227	37236	44463
Sum	369243	447898	
<b>Accuracy</b>			
Producer	0.8596399	0.9014776	
User	0.9787486	0.9005286	
Hellden	0.9153357	0.901	
Short	0.8438885	0.8198409	
KIA Per Class	0.7672751	0.7816891	
<b>Totals</b>			
<b>Overall Accuracy</b>	<b>0.8825723</b>		
<b>KIA</b>	<b>0.7741338</b>		

Fig.5.10-12 – TTA Mask risultante dopo le correzioni di editing attribuendo le classi corrette agli object.

Il presente studio, quindi, conferma quanto già affermato nella letteratura, dimostrando che è possibile effettuare, con immagini multi-spettrali e tecniche di data-fusion, la classificazione di immagini per condurre analisi multi-temporali su beni culturali o opere d'arte da salvaguardare. La sperimentazione discussa, riguardante una porzione di affresco del XVIII secolo di ca.160 cm<sup>2</sup>, ha permesso di evidenziare, da un'analisi del contenuto multi-spettrali delle immagini di partenza, le porzioni di affresco già restaurate e non, consentendo anche di quantificarle in termini di superficie. Difatti dal software di classificazione Definiens Developer, è possibile esportare l'immagine classificata finale, salvandola come file di tipo geotiff, e conoscerne le sue dimensioni importandola in un programma di elaborazione dati georiferiti. Per il caso esaminato si è verificato che le porzioni di affresco restaurate sono di c.a.73 cmq e quelle non restaurate di c.a.61 cmq.

**Capitolo 6****CASO DI STUDIO INTEGRAZIONE E TECNICHE NEL RILEVAMENTO DI UNA GRANDE PARTE AFFRESCATA****6.1 INTRODUZIONE**

Nel capitolo di presentano alcune esperienze effettuate nell'integrazione tra sensori diversi nel settore dei Beni Culturali: in particolare vengono trattati dati di tipo termico e ottico a supporto dell'analisi del degrado di affreschi. Le potenzialità di documentazione ed indagine nel campo dei Beni Culturali si sono accresciute in questi anni con lo sviluppo di nuovi sensori e strumenti, utilizzabili in modo autonomo o integrato fra loro: camere digitali ad elevate prestazioni, laser a scansione terrestri di diverse tipologie, camere multi-spettrali, iper-spettrali e termiche a risoluzione sempre maggiore, radar, ecc. Il progetto di intervento di manutenzione e restauro conservativo, volto alla riqualificazione del patrimonio culturale esistente, può giovare secondo diversi aspetti, con la possibilità di disporre di prodotti nuovi e di grande valenza ed interesse. Considerando per esempio le tecniche di restauro degli affreschi, esse nel passato hanno coinvolto sistemi tradizionali a vista, mentre ad oggi con l'avvento delle nuove tecnologie digitali, multi-spettrali e a scansione, è possibile ottenere un dato oggettivo, tridimensionale e geometricamente corretto. Il rilievo termico documenta la situazione di degrado o conservazione delle superfici murarie decorate a fresco, mettendo in evidenza la presenza di patologie superficiali presenti sulle murature legate a forti transitori termici e termo-igrometrici (zone calde/zone fredde/zone umide) dovuti ai materiali, alle tecniche costruttive, alle modifiche che l'oggetto ha subito nel tempo e al persistere di condizioni favorevoli alla loro manifestazione. L'analisi di immagini su affreschi con tecniche termo-spettrali fornisce la misura della radianza spettrale mediante il sensore infrarosso della camera termica, ma non consente come noto di risalire alla effettiva temperatura superficiale se non si conoscono le proprietà di emissività ed assorbimento dei materiali; su superfici affrescate, ai fini di determinare e delineare le diverse componenti, si procede con sollecitazioni indotte mediante tecnica d'approccio attivo. L'integrazione tra il dato termico e quello metrico (fotogrammetrico) a maggiore risoluzione è poi essenziale per una rappresentazione e mappatura accurata del degrado degli affreschi.

Ai fini dell'analisi del degrado presente su di una parete affrescata dell'inizio del XXVII secolo, si riporta uno studio di calibrazione condotto in laboratorio adoperando una camera termica FLIR 620 serie P dotata di un sensore multi-spettrale con risoluzione geometrica di 640x480 pixels (0.3 Mpixels) e di un sensore ottico operante nel visibile con risoluzione di 3.2 Mpixels.

Per questi due sistemi disallineati tra loro e di tipo non fotogrammetrico, risultano incogniti i parametri di orientamento interno, indispensabili ai fini di una successiva restituzione metrica dell'oggetto rilevato in fase di acquisizione. La calibrazione del sensore termico è essenziale per individuare un oggetto nella sua corretta posizione e consentire l'uso congiunto dell'immagine termica con quella ottica fornita da un rilievo fotogrammetrico o con dati di diversa natura ad alto dettaglio (es. mesh da rilievo laser a scansione). L'approccio scelto per la calibrazione è il bundle adjustment generale con field-calibration, mediante il quale vengono stimati i parametri di calibrazione incogniti e l'orientamento della camera, utilizzando un set di punti derivanti da un rilievo laser a scansione ad alta densità. La calibrazione avviene dunque attraverso misure condotte in situ, operando su un numero sovrabbondante di punti di controllo opportunamente scelti e distribuiti, collimati da una o più posizioni. La bontà del grado di accuratezza raggiunto è valutata in raffronto alle dimensioni del pixel.

## 6.2 L'AFFRESCO

L'affresco che si trova all'interno della sala teatro San Martino, prima biblioteca carmelitana, è accessibile dai locali del chiostro della basilica di San Martino a Bologna, si tratta di un'opera pittorica di notevoli dimensioni (12 x 8 m<sup>2</sup>), che occupa per tutta la lunghezza la parete di fondo della sala. L'affresco è stato realizzato nel 1629 per opera di Lucio Massari, un noto pittore bolognese vissuto e formatosi a Bologna alla scuola dei Carracci.

Da fonti certe a nessuno oggi è chiaro chi sia il soggetto principale della scena che Lucio Massari ha voluto raffigurare; c'è chi propende per San Cirillo, dottore della chiesa e patriarca d'Alessandria, il quale sostenne contro Acacio la consustanzialità della Trinità, o chi invece sostiene sia San Pier Tommaso religioso carmelitano e celebre maestro di teologia.

Trovandosi l'opera all'interno dei locali appartenenti all'ordine dei carmelitani.(sorto in oriente e sviluppatosi con fervore anche in occidente giungendo fino a Bologna) e trattandosi di un religioso carmelitano come riportato da ricerche bibliografiche, i presupposti ci portano ad affermare che si tratti proprio di San Pier Tommaso [1] religioso carmelitano e celebre maestro di teologia.

Il Massari in questo affresco intende di certo ricordare la disputa che ebbe il santo, nei riguardi della teologia, a Costantinopoli nel 1537 con il monaco greco Atanasio; e pertanto lo rappresenta qui con

atteggiamento solenne per simboleggiare il prestigio della teologia, mentre è seduto in cattedra ad insegnare con sapienza ad un folto gruppo di studiosi di diversa provenienza.

La scena si svolge in un grandioso interno porticato della città bolognese dove archi, intercolunni dorici, trabeazioni a triglifi e soffitti a lacunari sono magnificamente descritti da una ricca rappresentazione prospettica, in grado di delineare con chiarezza la ricchezza di uno spazio vissuto nell'interezza delle sue dimensioni. In questo scenario il Santo viene disposto in posizione centrale sotto l'arcata principale, seduto in atto di insegnare con una mano sul banco e con l'altra accompagna il discorso; intorno a lui stanno gli uditori in piedi o adagiati a sedere in gruppi di uomini e donne, secondo una moltitudine di sessanta personaggi, che vestiti con abiti settecenteschi formano una mescolanza di colori squillanti e disparati. Ai suoi piedi e a destra seggono due ecclesiastici, a sinistra un frate tiene la mitra del santo e un uomo in tunica gialla e mantello rosso stringe al petto un volume mentre lo ascolta attentamente. Di qua e di là si accalcano curiosi uditori, come due giovani seduti in prima fila alla destra del santo su di un gradino dell'atrio, dove uno con un mantello rosso interroga l'altro con un mantello giallo che lo ascolta tenendo un libro tra le mani. Non molto distante da loro, un uomo con una lunga barba ed un gran turbante, spiega una carta davanti ad un gruppo di persone, dove un personaggio seduto e vestito di giallo indica su di un libro il passo che si sta discutendo. Ed ancora accanto a loro un altro personaggio con una calotta rossa in testa foderata di bianco, porta la mano al mento in atto di meditazione. Alla sinistra del santo, invece un uomo trafelato in veste rossa e mantello verde, porge un libro ad un astante; seduto in prima fila un altro personaggio con turbante mostra un passo del libro che tiene tra le ginocchia, ad un vecchio con lenti, chino nello sforzo di leggere. La grande abilità compositiva d'insieme fa pensare all'affresco della "Scuola di Atene" rappresentato da Raffaello all'interno delle sale dei musei vaticani a Roma. Questo affresco è un vero capolavoro, "sebbene ricordi molte forme e motivi di Raffaello, deve essere lodato per la solennità dell'insieme, la vivacità delle movenze, lo spirito d'espressioni, la sapienza delle anatomie, la brillante forza dei colori" (Guido Zucchini, 1934, "Il comune di Bologna"). Prima di divenire "teatro San Martino" nel 1993 ed ospitare la compagnia teatrale Libero Fortebraccio, la sala che era stata adibita a biblioteca dei carmelitani fu dal 1946 al 1983 cinema parrocchiale di S. Martino, ed in quella occasione furono praticate sulla parete affrescata delle forature, poste in alto al centro per l'alloggiamento di un canale d'aerazione e sul lato sinistro per il posizionamento delle attrezzature dedicate alla proiezione cinematografica.

---

[1] San Pier Tommaso fu una figura europeistica ed ecumenica del sec. XIV., che si acquistò fama di apostolo per l'unità della Chiesa, fu primo fondatore dello statuto teologico a Bologna e fu prescelto dal Papa Urbano VI per essere ambasciatore ecumenico in importanti missioni di riconciliazione sia in Europa che in Oriente.

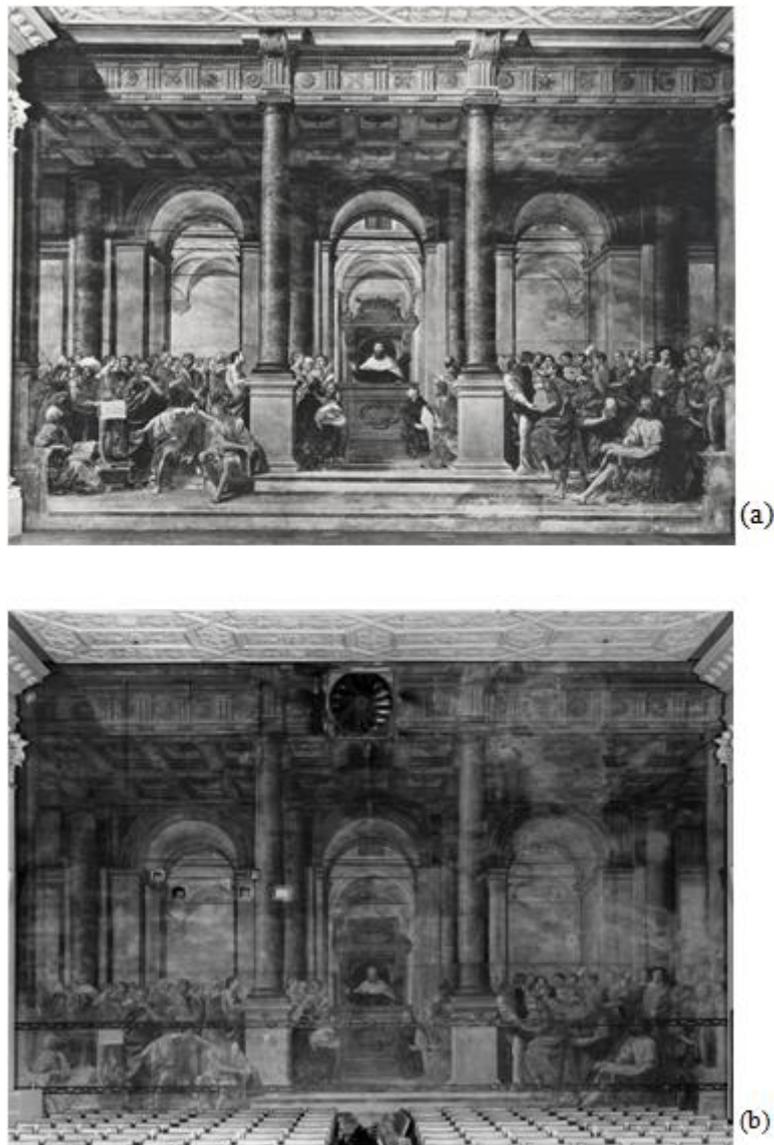


Fig.6.2-1– (a)Immagine storica dell'affresco nel 1975; (b) Immagine storica dell'affresco nel 1955

Le figure 6.2-1 e 6.2-2, sono due immagini dell'affresco relative a due periodi storici diversi, una del 1955 conservata dalla fondazione Zeri all'interno della sezione fototeca, e un'altra più recente del 1975 circa prodotta dallo studio fotografico CNB di committenza privata, dove sono evidenti le forature praticate per la proiezione cinematografica quando la sala divenne cinema S. Martino. La sala prima di diventare nel 1993 teatro san Martino, ha ospitato da gennaio a giugno del 1984, l'Università degli studi di Bologna per le lezioni della facoltà di giurisprudenza; in seguito il professor Umberto Eco della facoltà di lettere ed del dipartimento di musica e spettacolo qui tenne lezioni di semiotica, mentre dal 1987 al 1990 qui furono tenute lezioni della facoltà di Economia e Commercio e da ottobre del 1989 a giugno del 1990 lezioni pomeridiane di diritto.

Data la preziosità/ricchezza dell'opera in questione, un bene culturale di così notevoli dimensioni (13x8m) e di una tale singolarità pittorica, si ritiene sia considerevole promuovere azioni di tutela che consentano di salvaguardare l'integrità dell'opera e di conservarla nelle sue condizioni migliori così da poterla preservare dalle azioni molteplici di degrado e dall'incuria del tempo.

Infatti l'affresco risulta soggetto ad azioni di degrado prodotte dall'ambiente esterno specie nei mesi invernali (viene riportata come esempio una forte nevicata degli anni'50), che insieme alle scarse condizioni d'illuminazione naturale e di areazione naturale, favoriscono il presentarsi di fenomeni di condensa e quindi col tempo la formazione di efflorescenze[2]. A tal scopo si è voluta condurre un'analisi sul degrado superficiale presente sull'affresco, osservando il comportamento di tutta la parete sia nel visibile che nell'infrarosso termico. L'indagine svolta si è focalizzata in particolare sulla parte destra della parete affrescata, dove è in atto, a causa di un'efflorescenza, un meccanismo di degrado del materiale da costruzione costituente la parete e quindi minante lo stato di conservazione dell'affresco. La sperimentazione è stata condotta dal Dipartimento DICAM dell'Università di Bologna attraverso l'ausilio di tecniche diverse tra cui sensori termici calibrati geometricamente, per cui tra le problematiche affrontate vi è stata la calibrazione del dato termico e la fusione di data-set differenti. Il caso rappresenta un chiaro esempio di integrazione di tecniche geomatiche differenti quali: laser a scansione; fotogrammetria digitale; termografia.

Le strumentazioni usate per questo rilievo sono state uno scanner laser TLS Riegl VZ-400, una Termo-camera Flir serie P620, una fotocamera digitale Canon Eos MarkII; nella fase di registrazione delle prese ci si è serviti di target multi-sensore realizzati in laboratorio.

---

[2] [<http://www.culturalheritage.net/ortygia/italiano/Efflorescenze.html>]

Efflorescenza - Definizione (Normal 1/88 II° edizione) Formazione di sostanze, in genere di colore biancastro e di aspetto cristallino, polverulento o filamentoso, sulla superficie del manufatto. La cristallizzazione può avvenire anche all'interno del materiale provocando, spesso, il distacco delle parti più superficiali: il fenomeno, in questi casi, prende il nome di cripto efflorescenza o di sub/efflorescenza. Il meccanismo di degrado è conseguente alla pressione di cristallizzazione dei sali; alcuni hanno la caratteristica di aumentare notevolmente il loro volume nel corso del passaggio alla fase solida in seguito all'evaporazione del solvente; le pressioni provocate all'interno dei pori sono tali da superare la capacità di resistenza del materiale. Il risultato è la continua erosione degli strati superficiali. Diverse sono le fonti di origine di tali specie saline e possono provenire:

- dalla deposizione degli aerosol presenti nell'atmosfera naturale od inquinata
- dallo stesso materiale utilizzato per la costruzione

## 6.3 LE FASI DEL RILIEVO DELL’AFFRESCO

Le operazioni di rilievo condotte nella sala del teatro San Martino hanno riguardato:

1. Il posizionamento di target multi-sensore su di un reticolo di calibrazione tridimensionale;
2. l’acquisizione del reticolo nel termico;
3. la self-calibration delle immagini acquisite con la termo-camera Flir P 620 sul reticolo di calibrazione;
4. l’acquisizione delle immagini visibili sul reticolo di calibrazione di PhotoModeler;
5. la self-calibration delle immagini visibili acquisite dalla camera Canon Mark II sul reticolo di calibrazione;
6. il rilievo condotto con scanner laser terrestre TLS dell’affresco e della sala;
7. l’acquisizione di immagini fotogrammetriche e termiche dell’affresco;
8. la determinazione da TLS delle coordinate dei punti d’appoggio sull’affresco;
9. il rilievo fotogrammetrico e termico con orientamento del blocco fotogrammetrico adottando una field-calibration con soluzione per bundle adjustment.

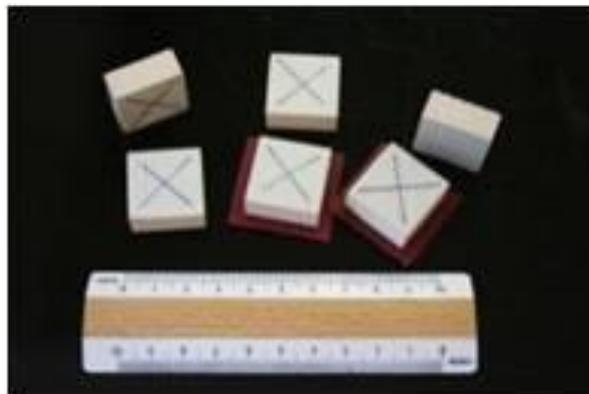


Fig.6.3.1-2–I target adottati per la calibrazione del reticolo e nelle operazioni di rilievo dell’affresco.

### 6.3.1 IL POSIZIONAMENTO DEI TARGET MULTI-SENSORE

I target realizzati per questo rilievo sono stati rilevati sia dalla camera termica Flir P620 che dallo scanner laser terrestre Riegl VZ-400 e dalla fotocamera Canon Eos 5 MarkII. Questi target sono stati realizzati in laboratorio, adoperando delle piastrelle quadrate in gres porcellanato di 3 cm x 3 cm, sulle quali è stato posizionato un tratto di nastro adesivo retroriflettente sul fronte, indicandone la posizione centrale tramite crocicchi sopra impressi, ed una basetta in gomma di 3mm di spessore

sul retro. I target così realizzati sono stati raffreddati e posti in acqua fredda prima d'essere applicati sulla parete, così da costituire un oggetto perfettamente identificabile all'infrarosso termico, e da risultare correttamente visibili sulle immagini termo-rilevate. La loro immagine visibile sulla camera termica è risultata ben nitida, senza aloni o scie di calore, presenti al contrario sui corpi caldi (come in fig. 6.3.1-1a), i quali, per loro natura, irradiano calore e lo disperdendo fino a raggiungere una temperatura di equilibrio con l'ambiente. Al contrario, i corpi freddi presentano una forma nitida e compatta, comportandosi come accumulatori di calore, non tendono a cedere calore, rispetto a come accade ai corpi caldi. Tale comportamento, è stato analizzato durante le prove sperimentali di laboratorio, nelle quali, ponendo il provino (la piastrella in gres porcellanato) in acqua fredda ed a basse temperature, si è riscontrato, anche a lungo termine, una buona tenuta del calore ed una minore dispersione, rispetto a quella riportata nelle stesse condizioni esterne da un provino caldo. I target raffreddati, come mostrato in figura 6.3.1-1 (b), hanno garantito, per tutto lo svolgimento delle operazioni del rilievo una buona visibilità nel termico, favorendo le operazioni di post-processing e di restituzione dei prodotti finali (ortofoto, ortofotomosaicatura delle immagini termiche).

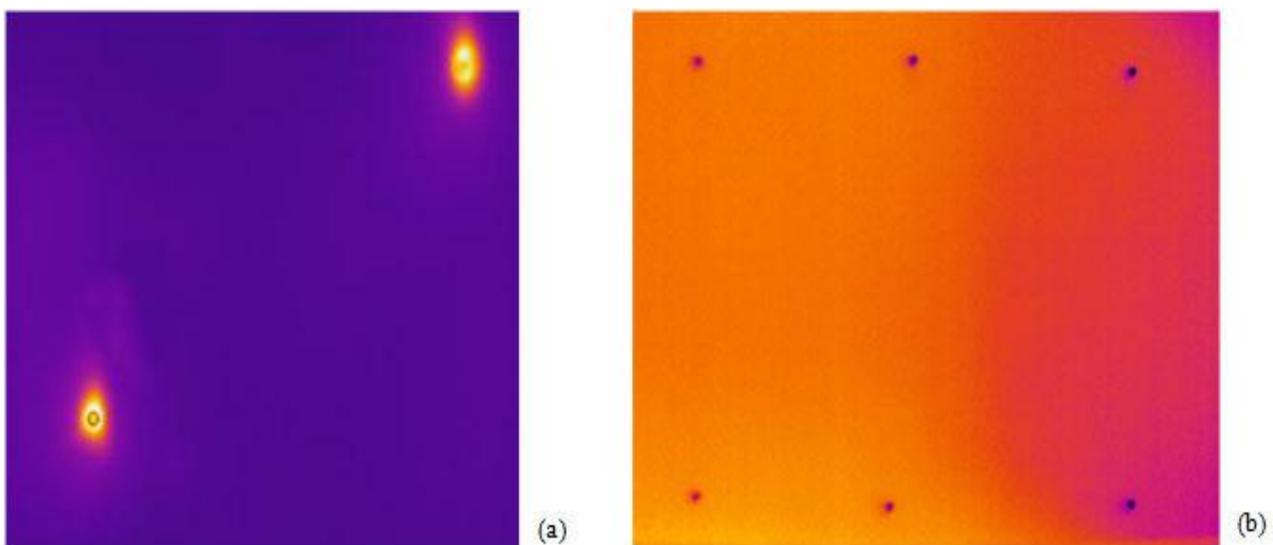


Fig. 6.3.1-1 (a)Immagine termica di un pannello in legno, dove sono visibili scie di alcuni chiodi pre-riscaldati;  
(b)Immagine termica coi target di gres porcellanato, pre-raffreddati e posti sulla parete affrescata.

Per posizionare i target sulla parete è stato posto dello scotch biadesivo dietro la basetta in gomma, oltre ad uno strato di scotch carta in modo da non aderire direttamente sulla parete e da essere facilmente rimosso al termine delle operazioni. Il tratto di nastro retroriflettente sopra impresso sulle piastrelle, ha permesso di identificarli perfettamente sulle immagini visibili, come target senza

l'uso del flash, anche in condizioni di scarsa illuminazione della sala. Ad un target così composto si possono attribuire le qualità di target “multi-sensore” o termico-laser-visibile, poiché allo stesso tempo agisce sia come target termico, che come target fotogrammetrico, permettendo di essere acquisito anche da altre strumentazioni, quali lo scanner laser o la total station, qualora siano necessarie anche delle operazioni di rilievo topografico.

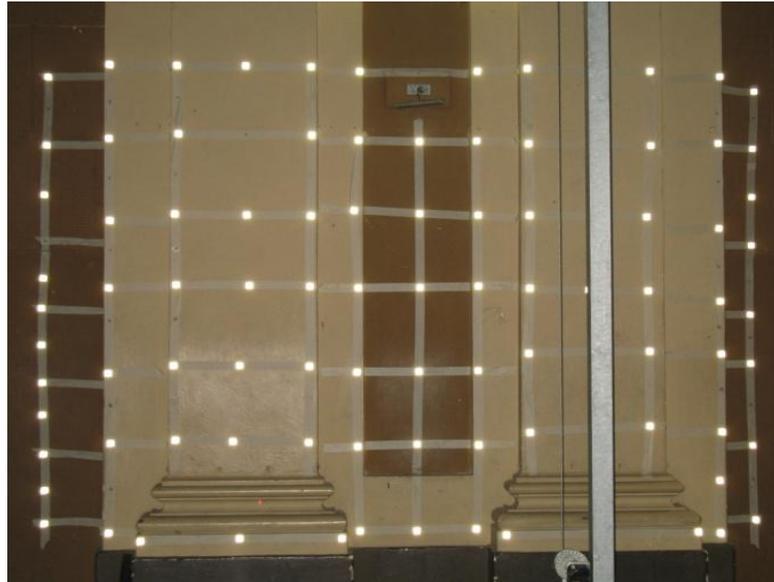


Fig.6.3.1-2–Reticolo di calibrazione tridimensionale visto nel visibile.

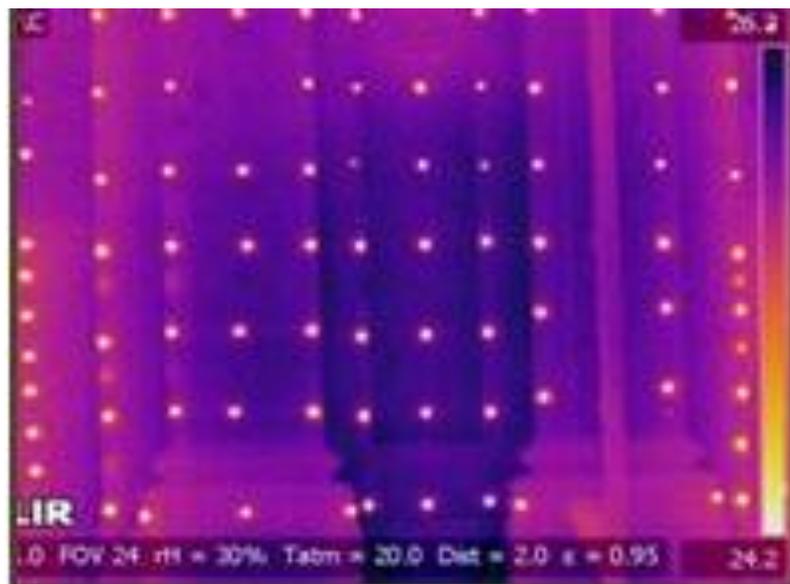


Fig.6.3.1-4– Reticolo di calibrazione tridimensionale visto nel termico.

Sul reticolo di calibrazione, costruito a parete, per l'orientamento delle immagini termiche, e mostrato in figura 6.3.1-4, è stata eseguita una self-calibration, (cioè senza alcuna informazione riguardo lo spazio oggetto, cioè risultano incogniti tutti i termini a destra del modello fisico dell'equazione di collinearità descritta nel paragrafo 3.3.4), sia in Australis che con PhotoModeler. Al termine della calibrazione, è stato possibile scalare tutte le immagini calibrate secondo una distanza nota dedotta dal rilievo laser (vedi fig.6.3.1-5). Dal rilievo laser il reticolo di calibrazione è risultato largo 3 m, alto 2,5 m e profondo c.a 0,5 m.

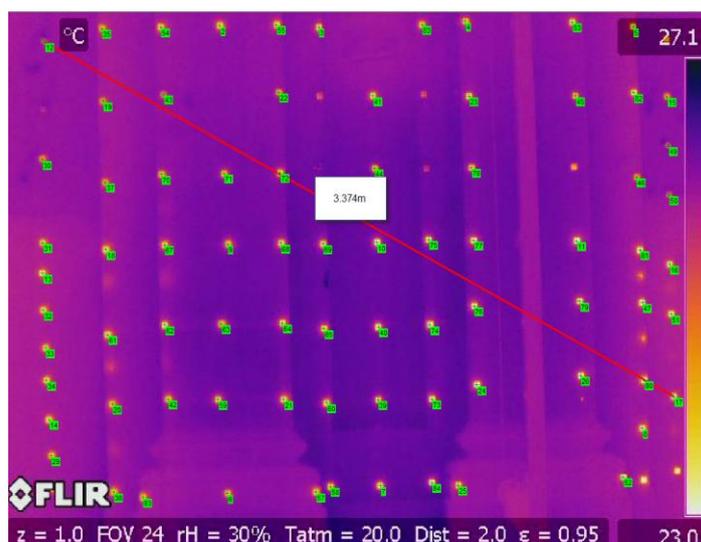


Fig.6.3.1-5– Reticolo di calibrazione coi punti fotogrammetrici d'appoggio; è indicata la distanza utilizzata per scalare tutte le immagini calibrate.

## 6.3.2 LA CALIBRAZIONE DELLE IMMAGINI TERMICHE

Per la calibrazione delle immagini termiche, si è utilizzato un reticolo tridimensionale, materializzato direttamente su una parete secondaria della sala, di profondità pari allo spessore di due pilastri, posti agli estremi del reticolo. Sul reticolo sono state eseguite 50 acquisizioni nel termico, delle quali ne sono state adoperate 31 nelle operazioni di orientamento (preliminari alla fase di calibrazione delle immagini). Le immagini sono state riprese nelle condizioni di assetto normale, ed inclinato a  $+90^\circ$  e  $-90^\circ$ , per correggere le distorsioni tangenziali dovute agli effetti di non planarità del piano immagine, causate dall'eventuale non planarità del chip del sensore della camera o da effetti elettronici. Sul reticolo, sono state poste 93 tessere rivestite con nastro adesivo retroriflettente di 3cm di lato (vedi paragrafo successivo), rilevate alla distanza di 8 m, in modo che è stato possibile osservare l'intero poligono di calibrazione dal sensore della termo-camera.

Le acquisizioni sono state eseguite sulla parete e contemporaneamente sull'affresco, nelle stesse condizioni strumentali di messa a fuoco, alla stessa distanza di presa ed evitando di spegnere la camera per non variarne l'assetto ottico, determinato dai seguenti parametri: le coordinate del punto principale  $(x_0, y_0)$ ; la distanza principale  $c$ ; i parametri della distorsione radiale  $(K_1; K_2; K_3)$ ; i parametri della distorsione tangenziale  $(P_1; P_2)$ ; i parametri della distorsione affine  $(b_1; b_2)$ . In particolare sono indicati come APs (i parametri aggiuntivi correttivi del modello di collinearità), i parametri:  $K_1; K_2; K_3; P_1; P_2; b_1; b_2$ . Nelle operazioni di calibrazione, si sono determinati i parametri di calibrazione della camera, insieme alla posizione e all'assetto della camera anch'essi incogniti. Tali parametri sono stati ottenuti operando con una self-calibration, mediante il modello risolutivo per bundle adjustment, utilizzando come punti di controllo i punti d'appoggio, rappresentati dalle tesserine in gres poste sul reticolo. L'operazione di calibrazione della camera termica, è stata eseguita con lo scopo di avere termogrammi calibrati geometricamente, e spendibili per la generazione di elaborati di studio, come l'ortofotomosaico che verrà descritto nel paragrafo 6.5.

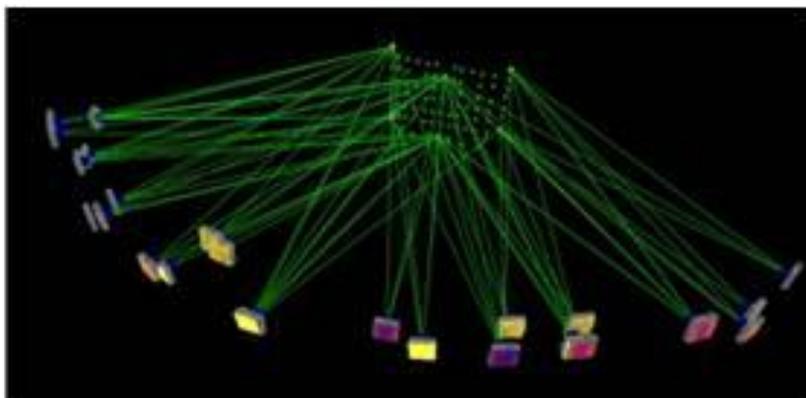


Fig.6.3.2-1– Soluzione del blocco fotogrammetrico delle immagini termiche per bundle adjustment.

I software di calibrazione adoperati sono stati Australis e PhotoModeler, la procedura risolutiva adottata, come già descritto al punto precedente, è stata quella nota in letteratura come Bundle Adjustment; in senso geometrico si può pensare ad un aggiustamento progressivo del fascio di raggi devianti dalla condizione prospettica di collinearità, che vengono proiettati da un centro di proiezione sull'area dell'immagine. Le operazioni di calibrazione, consistono nella determinazione di tutti quei parametri intrinseci della camera ed elencati precedentemente.

Poiché il numero di parametri intrinseci o d'orientamento interno, è superiore al numero delle equazioni di collinearità (equazioni risolutive), per poter ottenere un sistema risolvibile si utilizzano gruppi di punti nello spazio misurati con altre tecniche, (ad esempio come si è fatto col laser, in modo da avere una griglia di riferimento). Per ogni singolo punto misurato è possibile scrivere due equazioni di collinearità, del tipo 3.2. Considerando incogniti i 6 parametri di orientamento esterno della camera (posizione ed orientamento della camera) e i 9 parametri di orientamento

interno, per un totale di 15 incognite, questi possono essere determinati risolvendo un sistema lineare di 15 equazioni. Nella realtà il sistema di equazioni risolutive di cui si dispone non è lineare e necessita di un numero sovrabbondante di equazioni risolutive. In queste condizioni, il modello funzionale risolutivo adottato, è quello ai minimi quadrati che prevede la ricerca della soluzione che minimizza lo scostamento tra la soluzione approssimata ed il valore vero. Per funzionare correttamente, il processo di minimizzazione deve partire da una soluzione molto approssimata, che può essere ricercata rendendo lineare il sistema di equazioni di collinearità (vedi paragrafo 3.2.2), pertanto la soluzione che soddisfa in maniera migliore il sistema viene ricercata in modo iterativo. Essendo 15 il numero delle incognite, serve un numero sovrabbondante di equazioni, ed almeno 8 punti pari alla metà delle incognite più uno.

Per la calibrazione delle immagini prodotte dalla termo-camera, e per il calcolo dei parametri di calibrazione, la procedura implementata dai software utilizzati per la calibrazione, prevede: la creazione di un progetto nuovo, nel quale viene indicata la dimensione in pixel del sensore della termo-camera, l'importazione delle immagini, il riconoscimento ed etichettatura dei punti omologhi, lavorando per coppie di fotogrammi ad assi convergenti, in modo da minimizzare la correlazione tra i parametri caratteristici di calibrazione. Dopo aver completato questo task, il processo di calibrazione può essere avviato e si può considerare concluso quando l'errore commesso, cioè lo scarto quadratico medio, è al di sotto delle dimensioni di un pixel. Per il programma Australis, valori di RMS (errore di registrazione tra due immagini), piccoli di  $0,1 \div 2$  pixel, indicano grande accuratezza, valori pari a  $0,2 \div 1,5$  pixel, sono da raggiungere quando si vuole lavorare nelle condizioni di camera calibrata. Sono stati eseguiti dei test statistici, sui valori dei parametri di calibrazione ottenuti con i due software adoperati Australis e Photomodeler, per valutare la bontà dei risultati della calibrazione condotta sulle immagini termiche. I risultati dei test, sono riportati in figura 6.3.2-2, la significatività dei valori indica che questi sono da considerare accettabili. Il test, è stato fatto rispetto ad una popolazione di  $n$  campioni o misure (con  $n$  pari a 25, il numero di immagini calibrate), adoperando le tabelle di Student, e calcolando un indice  $t_\alpha$  di Student per una probabilità considerata  $\alpha$  in funzione di  $n-1$  gradi di libertà, tale che il parametro è da ritenere significativo, se  $t > t_\alpha$ . I test condotti per valutare la significatività dei parametri d'orientamento interno e degli Aps, sono risultati significativi tranne il valore della coordinata  $y_p$  del punto principale, calcolata con Australis, mentre è risultato significativo il valore di  $y_p$  calcolato con PhotoModeler e pari a 0,48 mm. Si è utilizzato dunque tale valore per  $y_p$ .

Nella figura 6.3.2-4, non si sono riportati i coefficienti della distorsione tangenziale P1 e P2, perché questi sono risultati indeterminati, in quanto i loro valori di scostamento dal valore normale, cioè di deviazione standard sono risultati dello stesso ordine di grandezza del parametro stesso.

Lo stesso comportamento, e quindi la stessa indeterminatezza si è riscontrata per i parametri di distorsione radiale K2 e K3 calcolati con PhotoModeler, mentre diversamente questi sono risultati di valore determinato con Australis; sebbene si siano ottenuti risultati diversi operando con i due software (Photomodeler e Australis), si è considerato di trascurarli trattandosi di misure condotte su immagini prodotte da sensori operanti nell'infrarosso termico, per le quali non è richiesta un'elevata accuratezza (le dimensioni del pixel nel termico sono più grandi e a bassa risoluzione radiometrica rispetto ad uno stesso sensore nel visibile).

Parametro	Australis		PhotoModeler	
	Ratio	Significatività	Ratio	Significatività
c	277.4	Si	248.1	Si
xp	-20.1	Si	2.9	Si
yp	0.6	No	2.9	Si
k1	7.7	Si	23.7	Si
k2	-3.3	Si	0.0	No
k3	3.486	Si	0.0	No
P1	0.0	No	0.0	No
P2	0.0	No	0.0	No

Fig.6.3.2-2–Risultati dei test di significatività degli Aps condotti sulle immagini termiche.

Aps	Australis		PhotoModeler	
	Value [mm]	St.Dev [mm]	Value [mm]	St.Dev [mm]
c	38.2855	0.138	37.955	0.153
xp	-1.5256	0.076	0.53	0.184
yp	0.0367	0.062	0.48	0.167
k1	3.21E-04	4.18E-05	2.06E-04	8.70E-06
k2	-3.21E-06	9.87E-07	0	0.0
k3	2.44E-08	7.00E-09	0	0.0
P1	0.00E+00	6.99E-13	0	0.0
P2	0.00E+00	6.99E-13	0	0.0

Fig. 6.3.2-3–Valori calcolati per i parametri di calibrazione delle immagini acquisite con la termo camera FlirP620.

Aps	Australis		PhotoModeler	
	Value [mm]	St.Dev [mm]	Value [mm]	St.Dev [mm]
c	38.2855	0.138	37.955	0.153
xp	-1.5256	0.076	0.53	0.184
yp	0.0367	0.062	0.48	0.167
k1	3.21E-04	4.18E-05	2.06E-04	8.70E-06

Fig. 6.3.2-4–Valori Considerati dei Parametri di calibrazione delle immagini termiche.

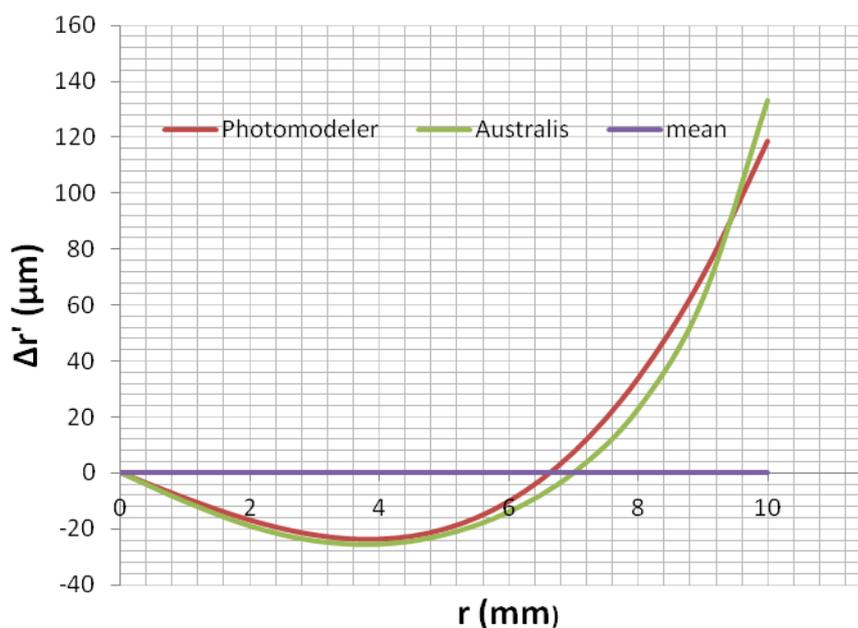


Fig. 6.3.2-5– Curve calibrate di distorsione radiale della termocamera ottenute con PhotoModeler e Australis.

### 6.3.3 IL RILIEVO LASER: ACQUISIZIONE E REGISTRAZIONE

Il rilievo laser è stato eseguito nella sala del teatro San Martino da tre stazioni differenti, di cui una centrale alla sala e due equidistanti da questa ed opposte. Le due non centrali sono una frontale all'affresco, la  $S_1$  ed una frontale alla parete opposta della sala la  $S_2$ . La  $S_1$  è stata eseguita ponendosi alla distanza di 7 m dalla parete, da questa posizione si è eseguita anche una scansione inclinando la testa dello scanner di  $+90^\circ$  per rilevare il soffitto a cassettoni. I target collimati come punti d'appoggio sono stati dei target catarifrangenti quadrati di 3 cm, oltre le piastrelle in gres, poste sul reticolo tridimensionale, descritto nel capitolo precedente, e sull'affresco. Nel rilievo, si è

proceduto posizionando i target in numero sufficiente e adeguatamente distribuiti, non allineati e anche su piani diversi dalla superficie dell'affresco da restituire, così da vincolare l'oggetto scansionato alla rototraslazione; i target sono stati quindi posizionati sia sulla parete dell'affresco, sia su una parete dove è stato costruito il reticolo di calibrazione tridimensionale (descritto nel paragrafo 6.3.2), e sia lungo le pareti della sala. E' stata fatta una scansione dell'intera sala in modalità panoramica, ponendoci in posizione centrale alla sala con un IFOV di  $360^{\circ} \times 80^{\circ}$ , con una risoluzione minima di scansione di  $0,2^{\circ}$ , ottenuta in circa 1 min., mentre sull'affresco è stata fatta una scansione di dettaglio con un intervallo angolare di  $0,03^{\circ}$ , ottenendo una risoluzione spaziale di 2mm a 10 m. Rigidamente collegata allo scanner è stata posta la camera digitale Canon Eos 5 Mark II (sensore full frame), ad alta risoluzione con un obiettivo grandangolo di 24 mm. Terminata la fase d'acquisizione della scena, è stata eseguita l'operazione di re-find dei target. Durante questa operazione, lo scanner opera un riconoscimento automatico dei target sulle scansioni e sulle immagini scattate dalla fotocamera esterna realizzando una co-registrazione automatica.



Fig.6.3.3-1– Acquisizione della nuvola di punti dalla stazione 1 a distanza di 7 m dall'affresco.

Terminata la fase di acquisizione, l'elaborazione dei dati è stata effettuata con il programma RiSCAN PRO in dotazione dalla Riegl, adoperando i target che sono stati posizionati come punti omologhi durante le operazioni di allineamento, fusione e registrazione delle scansioni. La procedura di registrazione ha previsto un pre-allineamento delle scansioni per coppie, con almeno tre target riconoscibili per ciascuna di esse in modo completamente automatico. L'elevato numero

dei target ha permesso di snellire la fase di allineamento delle tre scansioni, con l'uso di almeno tre target sulle scansioni adiacenti. La nuvola dei punti risultante sulla parete dell'affresco dopo le operazioni di filtraggio ha compreso c.a. 30 milioni di punti. Il sistema di coordinate laser, presenta l'asse Z lungo l'asse principale dello strumento, e gli assi X e Y sul piano. Dopo le operazioni di allineamento e registrazione delle nuvole, l'intero modello ottenuto è stato rototraslato in modo da definire un unico sistema di riferimento laser e fotogrammetrico, con origine sul piano dell'affresco e asse z uscente. Dopo le operazioni di filtraggio, sebbene il laser raggiunga un'accuratezza di 5mm, sulla facciata dell'affresco è stato generato un DSM con passo di 5cm, riducendo così la nuvola di punti ad un punto ogni 5cm per un complessivo di circa 45000 punti. Calcolato il DSM, della superficie affrescata, è stato possibile ricavare da questo le coordinate sia dei punti di controllo che di altri punti naturali, che sono state adoperate nelle operazioni di orientamento dei fotogrammi nel visibile e nel termico e per la costruzione dell'ortofoto della parete affrescata.

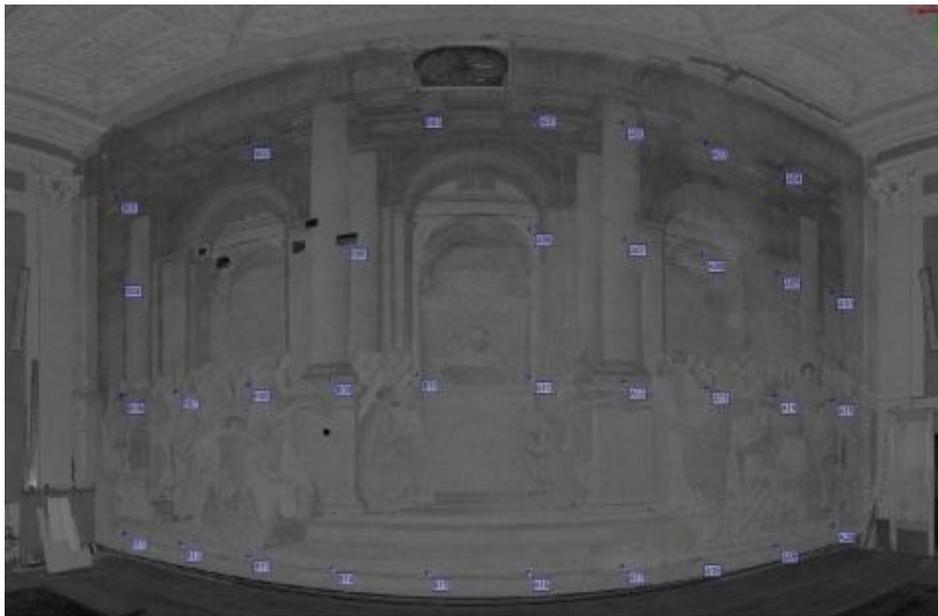


Fig.6.3.3-2– Nuvola di punti acquisita dal laser, con indicazione, sul piano della parete affrescata, della disposizione dei target adoperati come punti fotogrammetrici d'appoggio.

### 6.3.4 IL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO E TERMICO

Per l'acquisizione dei fotogrammi sono state posizionate sull'affresco 35 tessere in gres porcellanato, di 3 cm x 3 cm, utilizzate come target o punti fotogrammetrici d'appoggio. Le acquisizioni della parete sono state eseguite con prese nadirali da 8 posizioni camera differenti (per

un totale di 7 modelli fotogrammetrici), ricoprendo tutta l'estensione della parete mantenendo l'assetto nadirale, mediante un treppiede telescopico, che è stato esteso fino ad un'altezza di c.a. 7 m dal piano di calpestio della sala. Come da progetto, sono stati acquisiti sull'affresco 24 fotogrammi da una distanza di 4,80 m dalla parete, con un ricoprimento longitudinale del 20%, e quindi con una baseline di 1.60 m, acquisendo così il blocco fotogrammetrico secondo tre strisciate etichettate come up, medium e low. La fotocamera adoperata per le prese fotogrammetriche, è stata una Canon Eos 5 Mark II, munita di sensore CMOS di tipo full frame di dimensioni 36x24 e di obiettivo grandangolare di 24 mm. Gli scatti, sono stati eseguiti comandandoli a distanza, adoperando un'apertura di diaframma di 0.9 ed un tempo d'esposizione di 1 secondo. La termo-camera adoperata, è stata una Flir serie P620 avente una dimensione della cella termica di 16x12 mm, fornita di un obiettivo grandangolare di 40 mm; in questo caso, le acquisizioni sono state fatte da 3 posizioni stazione-camera differenti, ad una distanza dall'affresco di 8 m, adottando una baseline di 1,30 m, secondo tre strisciate fotogrammetriche (up, medium e low) acquisendo un complessivo di 9 termogrammi.



Fig.6.3.4-1– Fotocamera Canon Eos MarkII montata su treppiede telescopico all'altezza di circa 4 m dal pavimento della sala teatro per la ripresa della seconda strisciata dell'affresco.

In figura 6.3.4-2, è mostrata la planimetria della sala, con indicate le dimensioni dell'ambiente rilevato, dal laser nelle tre posizioni stazione indicate dalle lettere "s", dalla camera EOS 5 MarkII nelle otto posizioni stazione "f", ed inoltre dalla camera Flir nelle tre stazioni camera "t", entrambe nadirali alla parete affrescata A.

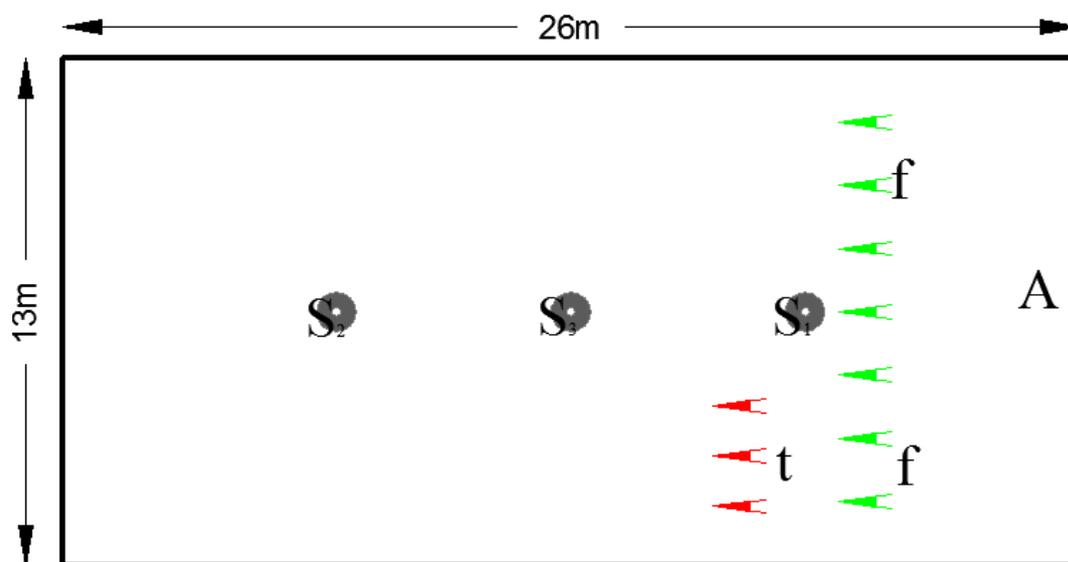


Fig.6.3.4-2–Planimetria della sala del teatro San Martino, con indicati i punti stazione delle prese laser scanner (s), termiche (t), fotogrammetriche (f) dirette in posizione nadirale sull'affresco (A).

Come da progetto, avendo l'intenzione di voler realizzare un blocco fotogrammetrico dell'intera parete larga 13m e alta 8m alla scala di restituzione di 1:50, sono stati acquisiti 15 fotogrammi nel visibile, con un GSD (Ground Sample Distance) di 1,3 mm ad una distanza di 4,80 m dalla parete, e 9 fotogrammi nel termico con un GSD di 0,5 cm ponendoci ad una distanza di 8 m. Volendo rilevare la condizione di degrado peggiore presente sull'affresco (descritta al paragrafo 5.2), nell'infrarosso termico, è stata rilevata la porzione di superficie affrescata posta a destra di dimensioni 6 m x 8 m, perchè maggiormente assoggettata da azioni di degrado ben visibili ad occhio nudo sotto forma di sali solubili: le efflorescenze. Non è stato possibile operare, per tutte le immagini acquisite nel visibile, una correzione radiometrica mediante il bilanciamento del bianco, adoperando sistemi come il color-checker, perché sulla scena non era presente una condizione omogenea d'illuminante, ma direzionata con un faretto solo sulla parte centrale.

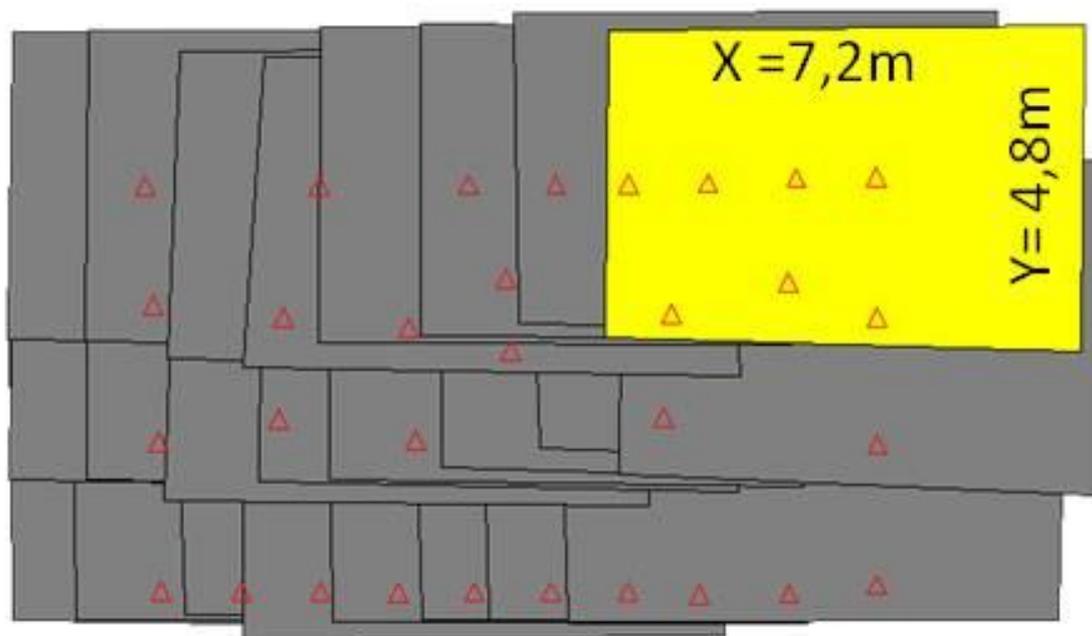


Fig. 6.3.4-2– Il blocco fotogrammetrico nel visibile e nel termico con indicate le dimensioni di un singolo fotogramma

## 6.4 ORTOFOTO DIGITALE

Con le informazioni sul dato tridimensionali, raccolte dalle coordinate dei target posti sulle range map (nuvole laser), è stato costruito il DEM dell'intera superficie affrescata, sul quale sono state fatte delle analisi sul comportamento della distribuzione spaziale delle altezze, prima di decidere se realizzare o meno l'ortofoto dei fotogrammi visibili. Analizzando i valori del DSM è stata riscontrata la non planarità della superficie affrescata, che ha presentato uno scostamento di 4÷5cm dalla verticalità (si veda figura 6.4-4), cosicché terminate le operazioni di orientamento del blocco fotogrammetrico, si è ritenuto opportuno completare le operazioni di restituzione dei prodotti anche mediante la realizzazione di un'ortofoto. Per una migliore documentazione di valenza metrica, quale è la restituzione dell'ortofoto della parete affrescata, sono state eseguite con la stessa camera, montata sulla testa dello scanner, delle prese normali all'affresco ad una distanza di progetto di 4,80 m con un ricoprimento longitudinale del 20%, adoperando un treppiede telescopico per spostarsi in altezza (nelle condizioni di presa normali) giungendo fino a circa 7 m d'altezza (figura 6.4-3–a; b; c). La camera è stata calibrata in un secondo momento ponendola nelle stesse condizioni di presa (cioè con un'apertura del diaframma di 0.9 e un tempo d'esposizione di 1 secondo) e con focale posta ad infinito. Per la produzione dell'ortofoto nel visibile sono stati utilizzati una serie di punti di controllo (i target in gres, posizionati prima del rilievo fotogrammetrico, laser e termico) di

coordinate rese note dalle operazione di rilievo laser precedente. Tali coordinate, sono state utilizzate nell'operazione d'orientamento dei fotogrammi, che è stato calcolato per via indiretta a partire da tali punti.

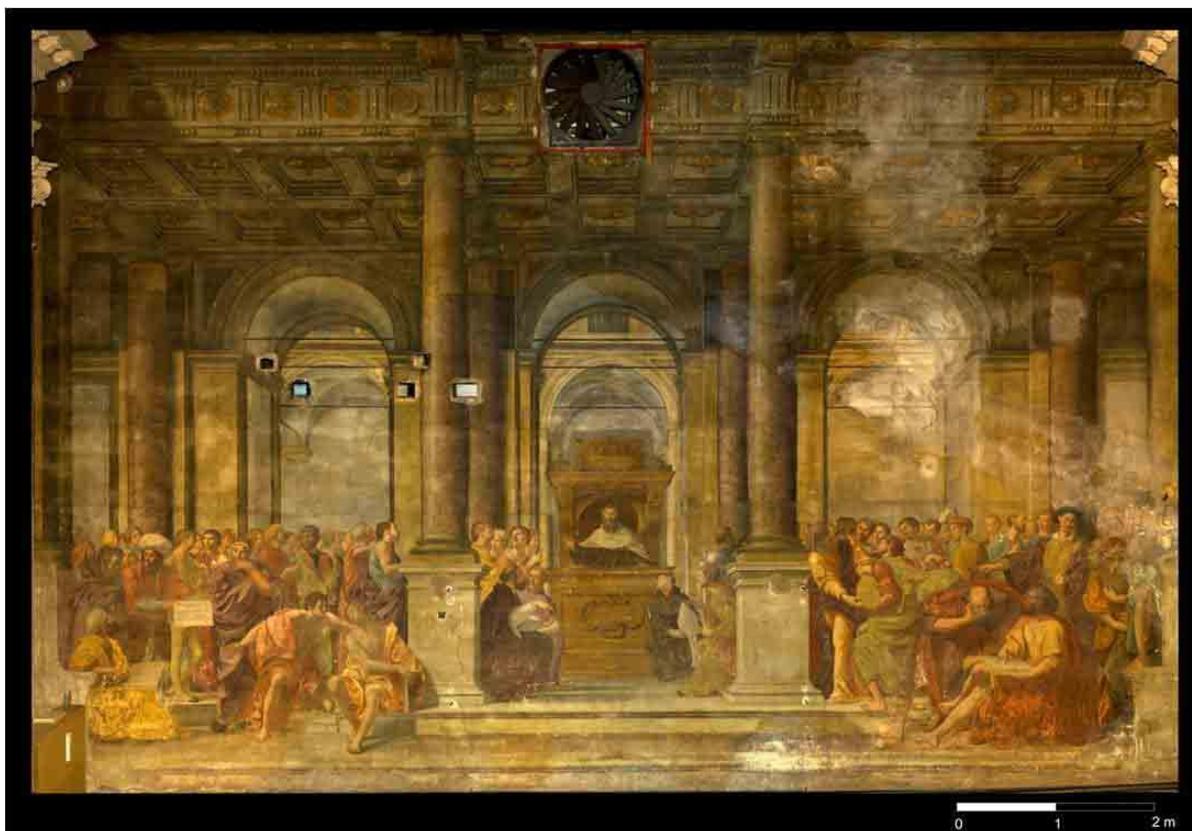


Fig.6.4-1– Ortofoto dell'affresco con risoluzione del pixel di 2 mm in scala 1:50.

L'ortofoto mostrata in figura 6.4-1, è stata prodotta in scala 1:50 ed ha una risoluzione di 2mm; sovrapponendo ad essa alla stessa scala l' ortofotomosaico prodotto nel termico, è possibile fare delle considerazioni sulle condizioni di degrado presenti sull'affresco, particolarmente presente nella zona di sovrapposizione tra l'ortofoto nel visibile e l'ortofotomosaico realizzato con le termiche, dov'è l'efflorescenza maggiore. La zona di sovrapposizione interessata dall'efflorescenza, corrisponde con una superficie a temperatura minore, stesse considerazioni possono ripetersi su altre parti fredde dislocate sulla parte alta come mostrato nelle figure 6.4-1 e 6.4-2. Secondo queste considerazioni, si può pensare di prestare più attenzione sulle parti di superficie che si sono rivelate più fredde, ripetendo su di queste un'azione di monitoraggio ciclica, considerando di far intervenire anche professionisti specializzati in restauro e conservazione, per poter definire insieme dei valori limite di temperatura ed umidità, tali da garantire una condizione puntuale o areale di salvaguardia dell'affresco.

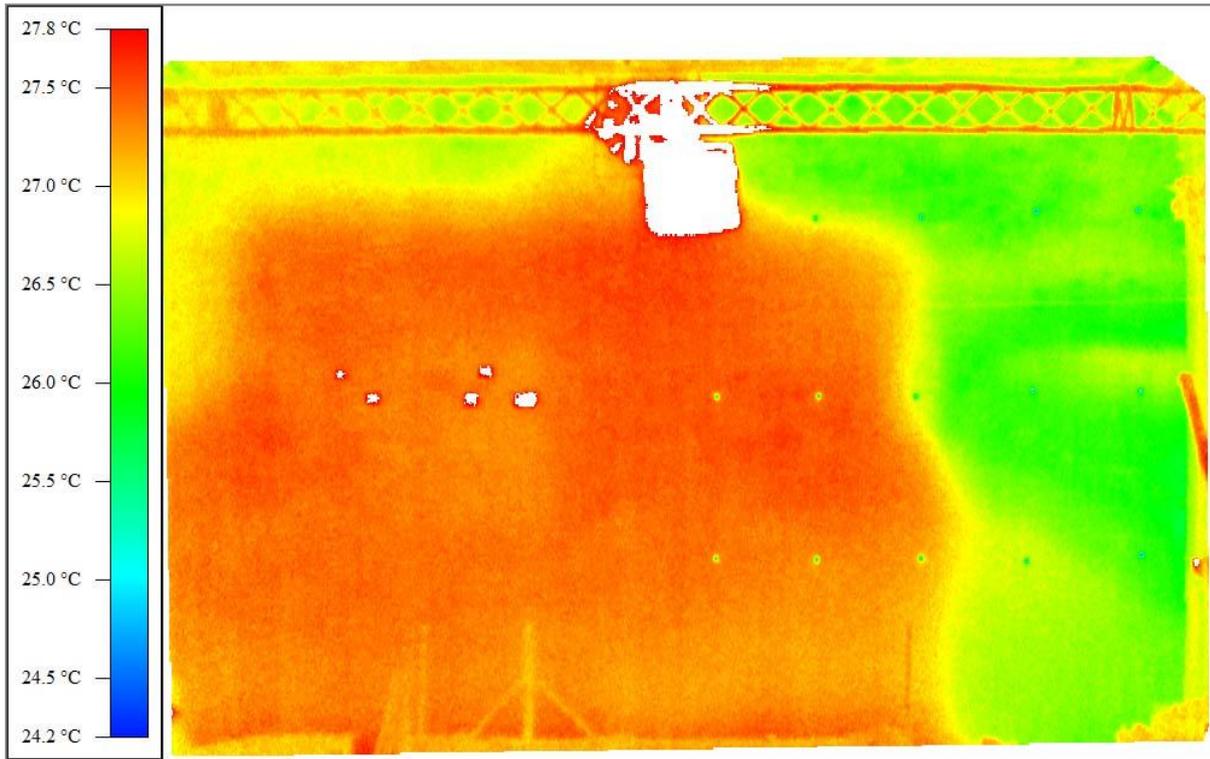


Fig.6.4-1–Immagine termica della parete affrescata alla distanzxa di 24 metri.

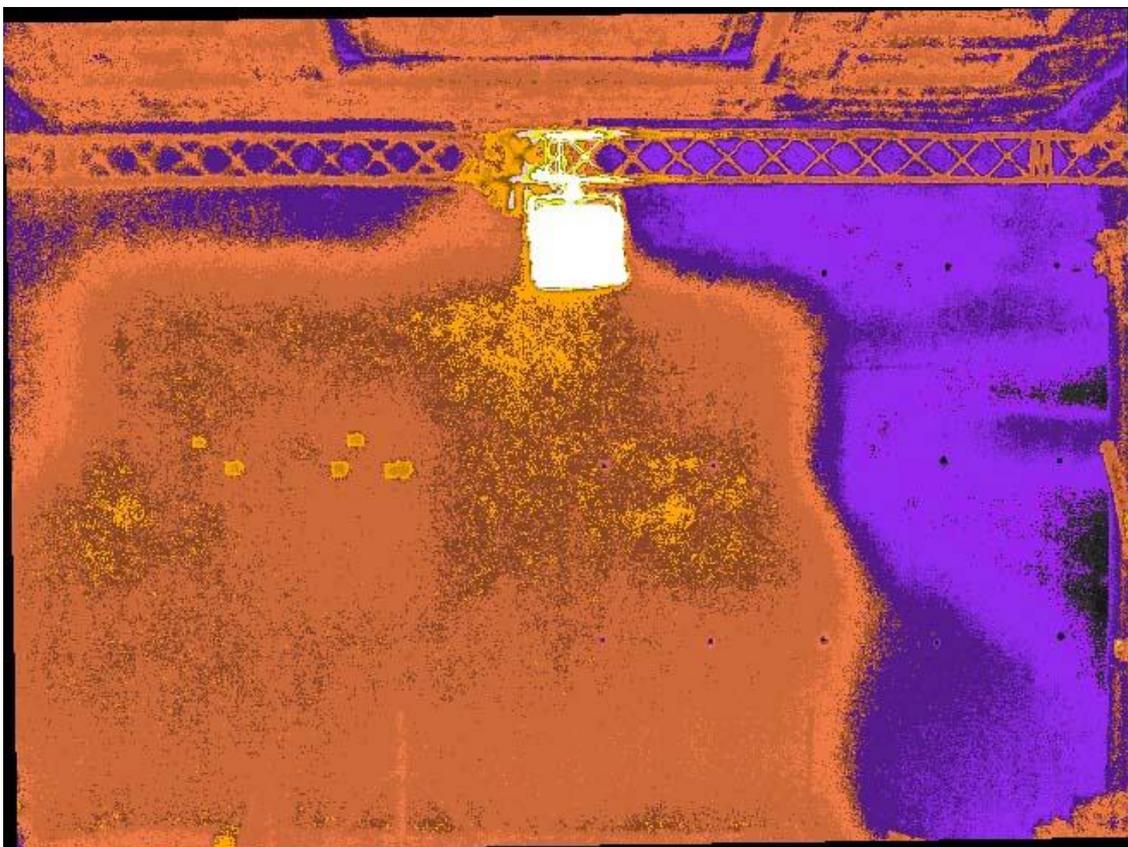


Fig.6.4-2–Immagine tremica della parete classificata con la tecnica del density slicing con range delle temperature di ventesimi di grado



Fig 6.4-3- (a);(b);(c) – particolari del trepiede telescopico utilizzato fino a 7 m d'altezza.

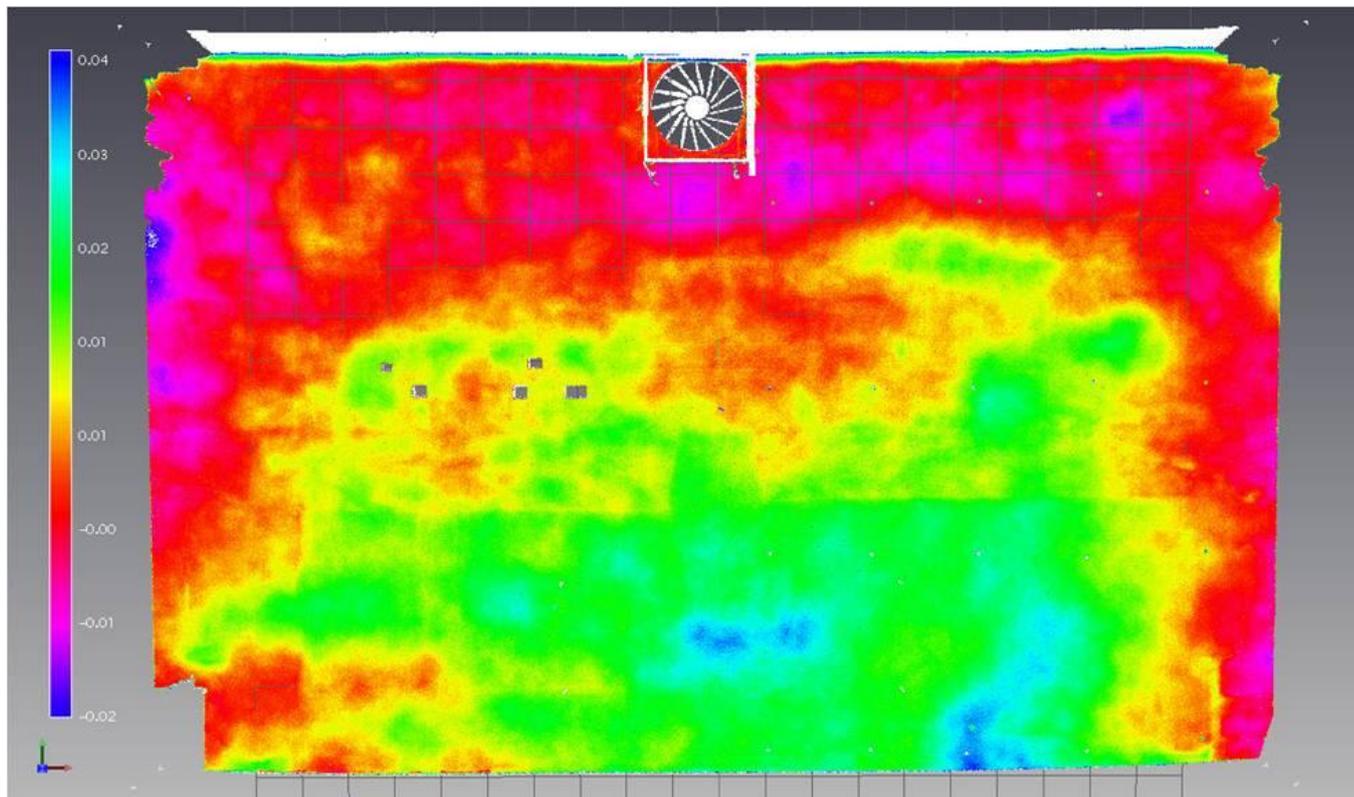


Fig.6.4-4– Una rappresentazione con palette di colori della superficie rilevata dal laser a scansione, che mostra le variazioni in Z dai -2 cm ai 5 cm con un  $\Delta z$  di 5 cm sulla parte inferiore centrale. La rappresentazione è stata fatta su cicli di gradazione del colore secondo una palette preferita ( in questo caso rainbow) dove sono state impostate all'interno dello stesso ciclo delle variazioni parziali di 1 cm.

## 6.5 L'ORTOFOTOMOSAICO DELLE TERMICHE

I fotogrammi delle immagini termiche (termogrammi) sono stati corretti radiometricamente, ed equalizzati rispetto ad un'immagine campione, ricadente nell'area dove è presente l'efflorescenza, comune alle nove immagini termiche, che è stata evidenziata in figura 6.5-1. Le correzioni radiometriche dei restanti otto termogrammi, sono state fatte utilizzando le temperature, lette sulle immagini termiche, di sei punti di riferimento comuni, prossimi ad i target dell'immagine centrale (utilizzati come punti di riferimento, perché distinguibili sui termogrammi[4]).

[4] Difatti i bordi radiometrici perfettamente riconoscibili sulle immagini visibili, risultano spesso incerti e privi di correlazione rispetto a quelli sulle immagini termiche, dove i punti naturali non risultano chiaramente distinguibili; l'adozione di punti fotogrammetrici d'appoggio che siano ben identificabili nel tempo, risulta di fondamentale importanza per la loro identificazione e per il loro orientamento.



Per la mosaicatura delle immagini corrette si è adoperato il software LPS Erdas della Leica, con il quale è stato applicato l'orientamento interno ed esterno (calcolato in fase di calibrazione sulla base dei parametri caratteristici e di orientamento come descritto al paragrafo 6.3-2), e la mosaicatura delle immagini orientate. Il risultato ottenuto, è stato richiamato nel modulo orthomosaicing di Erdas insieme al DEM del laser (inserito come dato sorgente), in modo da poter eseguire un'ortoproiezione delle immagini mosaicate su quest'ultimo, ed ottenere come risultato finale l'ortofotomosaico complessivo delle immagini termiche.

L'ortotermosaico ottenuto (vedi figura 6.5-2), descrive correttamente il contenuto radiometrico e geometrico sulla base del campionamento eseguito, descritto ai punti precedenti, e della calibrazione geometrica effettuata nel paragrafo 6.3-2. L'ortotermosaico è stato classificato con la tecnica del density slicing, che fornisce un'immediata lettura dei valori di temperatura di radianza; essa rappresenta una sorta di tavola tematica alla quale sono associati attributi spaziali oltre che di temperatura; costituisce una tavola di valida utilità per gli specialisti esperti in conservazione sui beni culturali, qualora debbano essere intrapresi studi particolareggiati sul degrado presente sull'affresco, e debbano essere affrontati studi preliminari ad un'azione di restauro di tipo conservativo.

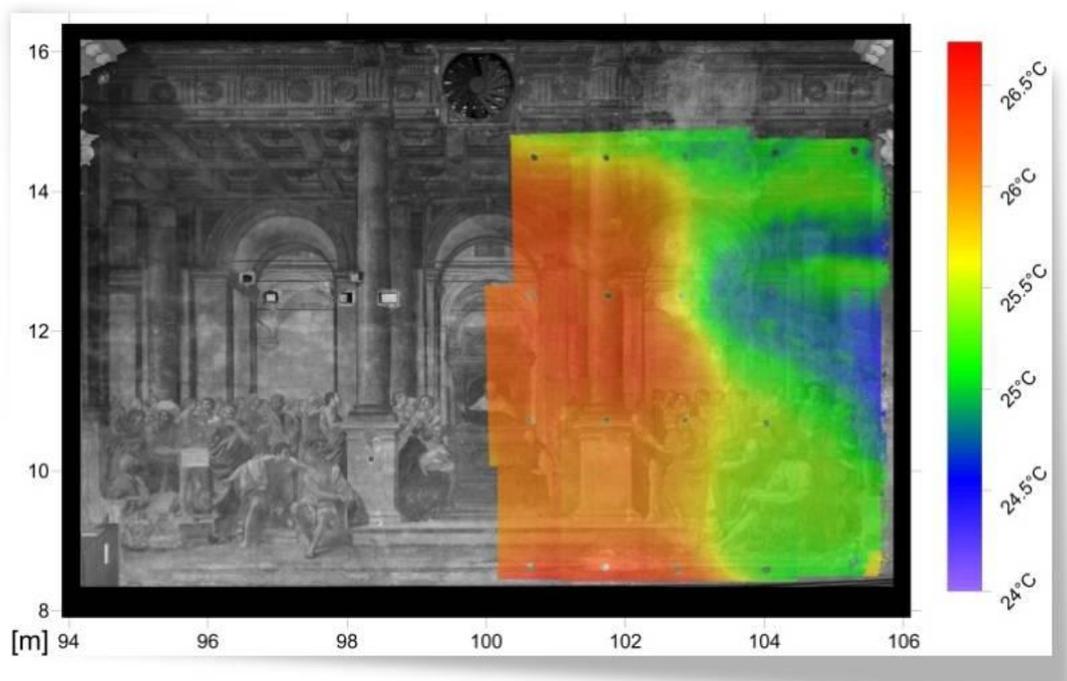


Fig.6.5-2– Overlay ortofoto visibile e ortofotomosaico del termico ad alta risoluzione, classificato per density slice, con indicazione delle temperature di radianza spettrale

Sono state fatte delle indagini sulle condizioni di temperatura di radianza spettrale presente sull'affresco, e si è effettuato un primo overlay dell'ortofoto nel visibile in scala 1:50 e dell'immagine classificata nel termico con la tecnica del density slicing, mostrata in figura 6.5-2 ed un secondo overlay confrontando un fotopiano a bassa risoluzione con GSD di 17,5 mm dell'intera parete ripresa da 26 m di distanza, ed un'immagine storica del 1975 mostrata al paragrafo 6.5-4.

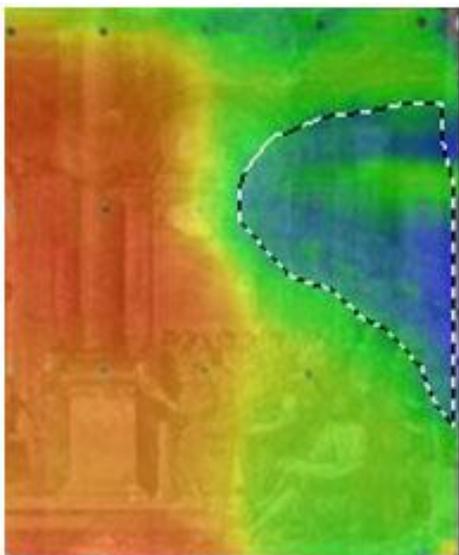


Fig.6.5-3– Particolare della mosaicatura delle termiche sovrapposta all'ortofoto nel visibile, con indicata in tratteggio la porzione di superficie degradata dall'efflorescenza.

Confrontando le condizioni attuali del settembre 2011, periodo in cui sono state fatte le acquisizioni, ed il fotopiano del 1975, al quale sono state sovrapposte le immagini termiche parziali e quella d'insieme, mostrata in figura 6.5-4, da un'analisi visiva si può ipotizzare un'analogia distribuzione del dato di mappatura termica, sebbene non si sia fatto uso, nel caso della immagine storica, di una fotomosaicatura aggiornata. Dai risultati conseguiti nella fase finale del rilievo, è stata confermata la scelta della scala di restituzione impiegata (1:50), la quale è stata ritenuta la più idonea a descrivere, sia la risoluzione del dato visibile, che di quello termico. Infatti nel caso del rilievo termico, sono state riscontrate variazioni del centesimo di grado, che non sarebbero state percepibili adoperando una grande scala e posizionandoci ad una distanza notevole come è visibile nell'immagine riportata in figura 6.5-4. Sebbene si poteva, rilevare il contenuto di vapor d'acqua e di umidità relativa presente sulla parete, utilizzando delle termocoppie poste a contatto per non danneggiare la parete affrescata, e in tal modo conoscere le specificità presenti sulla parete, come i fenomeni di condensa, lo scopo della sperimentazione è stato altro, volgendo maggiore interesse verso lo studio di una procedura rigorosa, in grado di fornire per il sensore termico e visibile, una corretta risposta sia geometrica che radiometrica.

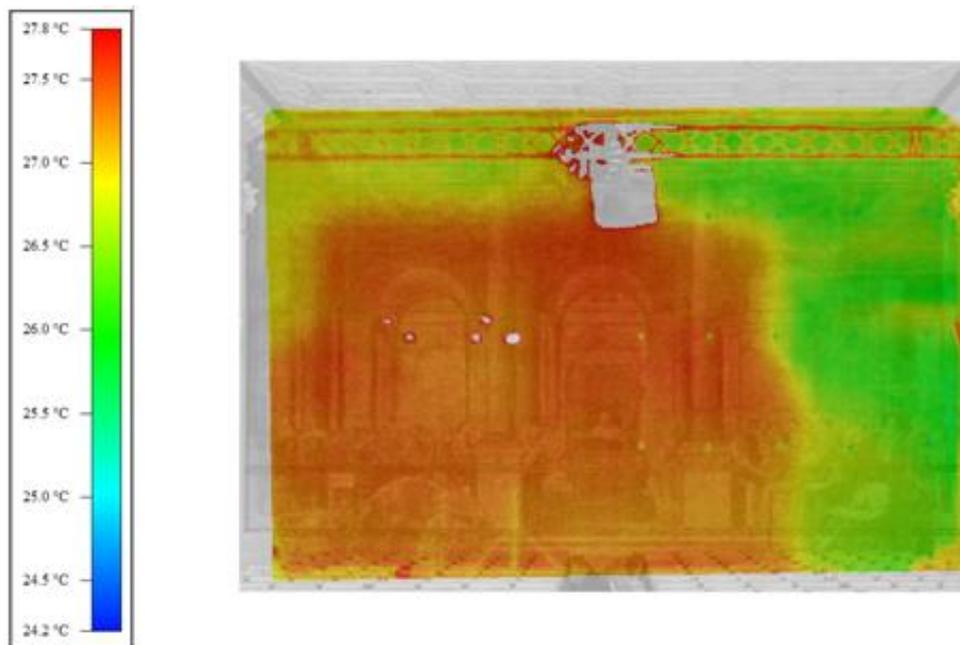


Fig. 6.5-4– Overlay tra il fotopiano di un'immagine storica del 1975 (quando la sala era ancora cinema S. Martino) e il raddrizzamento di un'immagine termica d'insieme a bassa risoluzione acquisita alla distanza di 26 m dalla parete affrescata

## 6.6 CONCLUSIONI

Il lavoro si è proposto di illustrare le attività preliminari alle operazioni di restauro, presentando un caso di studio ed indicando la metodologia di registrazione delle acquisizioni effettuate coi due sistemi ottici (visibile e termico), allo scopo di co-registrarle ed orientarle spazialmente, per la produzione di ortofoto e per procedure di classificazione. L'esperienza ha confermato le grandi potenzialità delle moderne tecniche digitali nella fusione di dataset di diversa natura, a supporto delle pratiche di conservazione e di documentazione dei beni culturali. Un rilievo condotto con tecniche integrate è stato in grado di fornire dati essenziali per la mappatura dell'affresco e del degrado superficiale che lo interessa, la cui distribuzione spaziale ha in gran parte confermato le ipotesi preliminari specialmente sulla parte centrale alta a destra della parete. Dall'analisi delle immagini prodotte si sono evidenziate delle zone critiche distinte e/o circostanti alle aree dove sono presenti delle efflorescenze. Grazie al rilievo laser si è riscontrato che la parete affrescata non è perfettamente piana, ma presenta un  $\Delta z$  di 4÷5 cm nella parte inferiore

Le maggiori problematiche affrontate sono state quelle di calibrazione del sensore termico, sia dal punto di vista geometrico (attraverso il calcolo dei parametri intrinseci di calibrazione della camera termica), che radiometrico (omogeneizzazione del dato di temperatura per tutte le singole scansioni termiche prodotte).

Operando in questo modo, è possibile condurre sull'affresco operazioni di controllo e monitoraggio con sistemi di rilevamento non invasivi e non distruttivi; esempi di prodotti sono le ortofoto realizzate e la rappresentazione per density slice dei valori di radianza spettrale rilevati nel termico. Il rilievo che è stato descritto può essere evidentemente di supporto ad un'azione di intervento di carattere multidisciplinare che coinvolga tecnici esperti nel campo della conservazione e del restauro dei beni culturali, al fine di individuare le parti che più necessitano di un'azione di intervento, o per le quali è necessario condurre ulteriori indagini di rilievo strumentale.

## Capitolo 7

# CONCLUSIONI

Come è stato sottolineato nel secondo capitolo della Tesi, la salvaguardia dei Beni Culturali è strettamente legata alla loro conoscenza tramite una documentazione adeguata. La stessa gestione del rischio legato al Patrimonio Culturale, nelle varie fasi in cui essa si articola (mitigazione, preparazione all'emergenza, recupero e ripristino), può ampiamente beneficiare delle nuove tecniche e tecnologie della Geomatica, tutte su base digitale, con potenzialità nuove e caratteristiche di notevole interesse rispetto al passato, oltre che con una interessante predisposizione verso la produzione di informazioni condivisibili da sistemi informativi dedicati. Un esempio di questi, proposto da tempo nel nostro paese, è la Carta del Rischio, che, avvalendosi della piattaforma di un Sistema Informativo Territoriale, può archiviare ed elaborare, da notevoli quantità di dati, le condizioni legate ai fattori di Vulnerabilità e Pericolosità dei Beni Culturali, coinvolgendo organismi preposti e coordinati per la conservazione, sicurezza e salvaguardia.

La Carta del Rischio costituisce una risorsa notevole per la tutela e la salvaguardia del Patrimonio Culturale presente nel nostro Paese; tale sistema informativo offre la possibilità di visualizzare ogni tipo di informazione descrittiva, storica, geometrica e territoriale dei principali beni culturali, e nel contempo correla ad essi dati fondamentali per elaborare analisi di rischio.

Le tecniche e tecnologie geomatiche, che si sono notevolmente evolute negli ultimi anni, sono di valido supporto nella fase di predisposizione di una Carta del Rischio; esse intervengono nelle fasi di rilievo e monitoraggio dei beni culturali, e forniscono, con elevata accuratezza, una preziosa fonte di conoscenza.

Le informazioni derivabili dal data processing dei dati del rilievo condotto con tecniche geo-topo-cartografiche sono oggi rese disponibili dall'ICCD e messe a disposizione degli enti locali operanti sul territorio a scala regionale e comunale. Da quanto emerso tuttavia da un sondaggio effettuato nel progetto di ricerca europeo EU-CHIC, (si veda il paragrafo 2.5), la maggior parte dei sistemi informativi sui Beni Culturali (MiBac, ISCR, ICCD, SIRBeC, etc.), non sono ancora accessibili sul web tramite internet e la maggior parte dei cataloghi non sono computerizzati; pertanto, la Carta del Rischio potrebbe non essere stata ancora pienamente recepita sul territorio nazionale, dove esistono a volte Sistemi Informativi locali, ritagliati ad hoc sul territorio in base a specifiche esigenze, e regolarizzati secondo propri fattori. Per una tale ragione, risulta quindi necessario condurre un'azione di uniformità e di integrazione dei risultati secondo gli

standard legislativi nazionali vigenti per azioni mirate di tutela e salvaguardia.

All'interno della Geomatica, con particolare riguardo all'ambito applicativo dei Beni Culturali, sono racchiuse le principali discipline che riguardano il rilievo e la rappresentazione : la topografia, la fotogrammetria, la cartografia numerica, il telerilevamento, la scansione 3D, l'interferometria SAR, il GPS, ma anche i sistemi informativi territoriali, i sistemi di supporto alle decisioni, i WebGIS. Nel loro insieme queste tecniche, accomunate dall'adozione di dati in forma digitale, sono in grado di offrire un insostituibile supporto alla documentazione e alla tutela del nostro prezioso patrimonio culturale.

Per una più ampia diffusione di queste tecniche si dovrebbe operare sia per massimizzarne il rendimento a fronte di elevati costi che alcune di esse ancora comportano, sia perché il risultato del rilievo sia realmente condivisibile e condiviso dall'utente finale (un esempio è ancora oggi fornito dal laser a scansione, il cui prodotto di norma non viene sfruttato nella sua interezza, ma solo con prodotti secondari derivati). E' importante sfruttare le tecniche geomatiche non solo per le loro potenzialità di "fotografare" in modo rigoroso ed articolato lo stato di un bene, ma anche per le possibilità che oggi offrono di realizzare un vero e proprio monitoraggio, essenziale per programmare in modo consapevole e nel momento più opportuno eventuali interventi su beni soggetti a rischio.

Grazie alle moderne tecniche e tecnologie è oggi possibile nel campo dei Beni Culturali:

- effettuare in caso di emergenza operazioni di rilevamento in tempi molto ridotti, anche su aree vaste, con precisioni molto elevate sia in termini assoluti che relativi;
- integrare fra loro dati digitali acquisiti con tecniche diverse ed anche in tempi diversi, archiviando quando necessario i dati su database geografici che ne consentano una consultazione efficiente e flessibile;
- automatizzare operazioni di rilevamento ripetute, effettuate anche con scansione temporale molto elevata per fenomeni dinamici (monitoraggio in real-time), archiviando i dati su supporto digitale e con possibilità di trigger al presentarsi di situazioni critiche;
- mettere a disposizione nuovi strumenti non invasivi di indagine;
- offrire tecniche di visualizzazione e rappresentazione innovative, atte a gestire il dato "fedele al vero" ma anche contenuti di realtà virtuale.

In ultima analisi la geomatica può oggi supportare efficacemente un'ampia varietà di attività a carattere multidisciplinare di conoscenza e diagnostica legate al rischio sul bene culturale, attività che coinvolgono competenze tecnico-scientifiche diverse, dall'esperto in conservazione e restauro

al chimico, dall'ingegnere all'architetto ed al fisico (Bitelli & Mannina, 2010).

Nella tesi si è posta l'attenzione sui beni culturali immobili, ripercorrendo l'intero processo che va dalla documentazione alla gestione, dalla salvaguardia al controllo, dalla conservazione alla protezione delle condizioni di degrado, individuate al paragrafo 2.7., e quindi di rischio (definito attraverso indici calcolati al paragrafo 2.4). Sono stati mostrati alcuni esempi riguardanti alcune delle tecnologie ad oggi più innovative, in particolare attraverso le sperimentazioni descritte nei capitoli quinto e sesto.

La classificazione di immagini multispettrali sviluppatasi con il telerilevamento, orientata ai pixel, o, attraverso gli sviluppi offerti dalla recente tecnologia software orientata ad oggetti, può essere applicata con successo anche su oggetti di interesse nel campo dei Beni Culturali, in cui sovente la diagnostica si avvale di questo tipo di dati (capitolo 5). Possono essere usate tecniche di data-fusion per migliorare la rappresentazione e la comprensione dell'immagine ed i processi di classificazione, noti i parametri utilizzati, possono essere successivamente replicati.

La sperimentazione integrata tra le tecniche laser a scansione - fotogrammetria - termografia ha permesso, partendo da una delicata calibrazione del dato sia radiometrico che geometrico, l'analisi e l'indagine delle condizioni di degrado di un affresco, come discusso nel sesto capitolo, fornendo prodotti completi come DSM, ortofoto ed ortofotomosaico di immagini termiche. Attraverso sensori digitali calibrati si rende possibile l'overlay del dato visibile sul termico, consentendo una buona spendibilità delle informazioni in essi contenute, preziose, per gli aspetti legati alla conoscenza delle condizioni di conservazione del bene anche in vista di una eventuale azione di recupero e di salvaguardia.

Le tecniche geomatiche sono dunque da privilegiarsi quando il bene deve essere analizzato senza agire con metodi diretti o invasivi, secondo quanto previsto dalla Carta ICOMOS al punto 3.7 in tema di tutela e conservazione dei beni culturali.

## BIBLIOGRAFIA

I riferimenti bibliografici sono in ordine alfabetico e sono utilizzate le seguenti abbreviazioni:

ISPRS: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing

AIPND: Associazione Italiana Prove non Distruttive

CIPA: International Committee for Architectural Photogrammetry

SIFET: Società Italiana Fotogrammetria e Topografia

ASITA: Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e ambientali

BAR: British Archaeological Reports

IAPRS&SIS: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences

NDT :Non-Destructive Testing

PRS: Photogrammetry and Remote Sensing

SPIE: International Society for Optical Engineering

IS&T: Society for Imaging Science and Technology

WCNDT: World Conference on Non-Destructive Testing

Adams B. J., Bitelli G., Eeri M., Gusella L., Huyck C.K., Mognol A., 2005: "Object-oriented image understanding and post-earthquake damage assessment for the 2003 Bam, Iran, earthquake", *Earthquake Spectra* 21, pp. S225-S238.

Alba M.I., Barazzetti L., Scaioni, Rosina E., Previtali M., 2011: "Mapping infrared data on terrestrial laser scanning 3D models of buildings", *Remote Sensing*, Politecnico di Milano, pp.1847-1870.

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

Baatz M, Schäpe A., 2000: "Multiresolution segmentation – an optimisation approach for high quality multi-scale image segmentation", *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XI, Vorträge zum AGIT-Symposium Salzburg*, Strobl J, Blaschke Th, Griesebner G (eds). Herbert Wichmann, Heidelberg, 12-23.

Bartolucci D., 2009: "Principi di laser scanning 3D", Flaccovio, Palermo.

Bauer N., 2008: "Handbuch zur Industriellen bildverarbeitung", Fraunhofer IRB Verlag, Stoccarda.

- Bitelli G., 2002: "Moderne tecniche e strumentazione per il rilievo dei beni culturali", Atti 6° Conferenza Nazionale ASITA, Vol.1, IX-XXIV, Perugia.
- Bitelli G., Gusella L., Mognol A., 2005: "Determinazione dei parametri di segmentazione in immagini aeree e telerilevate: un approccio semantico all'ottimizzazione", Convegno SIFET 2005, Palermo.
- Bitelli G.,Girelli V.A, Gusella L., Zanutta A., 2005: "Estrazione automatica di oggetti da immagini nel settore dei beni culturali: problematiche ed applicazioni", Atti 9° Conferenza Nazionale ASITA, Catania.
- Bitelli G., 2008: "Multiscale integrated application of geomatic techniques for documentation of Cultural Heritage". In: Marchetti N. and Thuesen I. (eds.), "Archaia. Guidelines on Research Planning, Characterisation, Conservation and Management in Archaeological Sites", British Archaeological Reports International Series, BAR S1877, 53-58, Archaeopress, Oxford.
- Bitelli G., Faranda F., Gatta G., Mazzeo R., Zanutta A., 2008: "Rilevamento e studio multi-temporale della cupola affrescata di S. Maria del Monte di Cesena attraverso tecniche integrate", Atti 12° Conferenza Nazionale ASITA, Aquila.
- Bitelli G., Mannina M, 2010: " Geomatica e beni culturali: tecniche integrate per la documentazione e per la gestione dei beni culturali", Atti 14° Conferenza Nazionale ASITA, pp. 279-283, Brescia.
- Bitelli G., Girardi F.,Mannina M., 2011 "Analisi del degrado nel campo dei Beni Culturali con sensori termici calibrati geometricamente", Atti 15° Conferenza Nazionale ASITA, Colorno.
- Böhler, W., 2005:" Comparison of 3D scanning and other 3D measurement techniques", Proc. International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage, Centro Stefano Franscini, Monte Verità, Ascona, pp.89-99, Svizzera.
- Bonora V., Tucci. G., 2007 : "Il laser scanner terrestre e il rilievo dei Beni Culturali", in G. Tucci, F. Sacerdote, "Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio", Alinea, ISBN 978-88-6055-119-1, Firenze.
- Borgogno Mondino E., Grua M., Lingua A., Giulio Tonolo F., 2005: "Tecniche Innovative per il rilievo di affreschi murali", Atti 9° Conferenza Nazionale ASITA, Catania.
- Brivio P.A., Lechi G. Zilioli E., 2010:"Principi e metodi di telerilevamento", Città Studi,Torino.
- Brumana R., Monti C., 2004: " La Carta del Rischio del patrimonio culturale in Lombardia. Guida per la georeferenziazione dei beni storico-architettonici", Guerini e Associati, Milano.

- Cabrelles M., Galcera' S., Navarro S., Lerma J.L., Akasheh T., Haddad N., 2009: "Integration of Laser scanning, photogrammetry and thermography to record architectural monuments", CIPA Symposium, Kyoto, Japan.
- Capizzi P., Cosentino P., Fiandaca G., Messina P., Terranova L., 2004: "Structural investigations by infrared thermography and SPR", 1° Conferenza di Geofisica applicata all'ingegneria, Messina.
- D'Ayala, D., Smars, P., 2003: "Minimum requirement for metric use of non-metric photographic documentation", University of Bath, United Kingdom..
- Definiens eCognition, 2008: "User Guide", München, Germany.
- EOS Systems Inc., 2004: "PhotoModeler Pro 5 users manual", Canada.
- ERDAS, 2008: "ERDAS Field Guide", Norcross, USA.
- Fiani M., Menna F., Troisi S., 2008: "Integrazione di Tecniche di Fotogrammetria e Laser Scanning per la modellazione 3d della carena di una imbarcazione", Bollettino SIFET 1, Università di Salerno.
- Folloni G., 2006: "Principi di Topografia Ingegneria applicata-1", Pàtron, Bologna.
- Fraser, C.S., 1996: "Network design. In: Close-range Photogrammetry and Machine Vision", Atkinson, Whittles Publishing, UK, pp.256-282.
- Fraser, C. S., 1997: "Digital self calibration". ISPRS, Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 52, pp. 149-159.
- Fraser C., Remondino F., 2006: "Digital camera calibration methods: consideration and compararions", ISPRS, Commission V Symposium "Image Enigeering and Vision Metrlogy", Vol.36(B5), Dresden, Germany, pp.266-272.
- Gomasasca M.A.,2000: "Elementi di Geomatica", A.I.T. , Milano.
- Gianinetto M., Giussani A., Roncoroni F., Scaioni M., 2005: "Integration of Multi-Source Close-Range Data", CIPA XX Internazionale Symposium, Torino.
- Gianinetto M., Roncori F., Scaioni M.,2005: "Calibration of close-range thermal imagery for integration into 3D VR Models.", Proc. of Work. Italia-Canada 2005 "3D digital imaging and modeling: applications of heritage, industry, medicine and land", Padova.
- Girelli V., 2006: " Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e al rappresentazione nel campo dei beni culturali", Tesi di dottorato in Scienze Geodetiche e Topografiche, ciclo XIX, Università di Bologna.

Kraus, K., 1993: "Photogrammetry", Dümmler Verlag, Volume 1, Bonn, Germany.

ITT, ENVI, 2009: "User Guide", United States.

Lagueta S., Martinez J., Armesto J., Arias P., 2010: "Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies", *Energy and Buildings* 43, pp.1216-1221, University of Vigo, Spain

Lagueta S., Martinez J., Armesto J., Arias P., 2011: "Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements", *Infrared Physics & Technology* 54, pp.92-99, University of Vigo, Spain.

Luhmann T., Ohm J., Piechel J., Roelfs T., 2010: "Geometric calibration of thermographic cameras", *V Symposium*, Newcastle, UK, pp.411-416.

Maldague X., 2000 : "Applications of infrared thermography in non destructive evaluation". In *trends in Optical Non-Destructive Testing and Inspection*; Rastogi P.K., Inaudi D., Eds., Elsevier: Amsterdam, the Netherlands, pp.591-609.

Martelli C., 2009: "Estrazione di features con tecniche di classificazione Pixel e OBJECT-ORIENTED", Tesi di laurea specialistica in Ingegneria Civile, Università di Bologna.

Paolo Mandrioli, Caneva G., 1998: "Aerobiologia e beni culturali: metodologie e tecniche di misura", Nardini, Firenze.

Patias P. 2006: "Cultural Heritage documentation", *International Summer School*, Aghios Nikolaos, Crete, Grece, pp.1-26.

Pelagotti A., Del Mastio A., Razionale A., 2007: "Active and passive sensors for art works analysis and investigations. Videometrics IX, Proc. SPIE-IS&T Electronic Imaging, Vol. 6491

Peloso D., 2005: "Tecniche laser scanner per il rilievo dei beni culturali", *Archeologia e Calcolatori* n. XVI-2005, pp. 199-224, Università di Siena.

Photometrix, 2008: "iWitness and I Witness Pro users manual", Australia.

Rizzi A., Voltolini, Remondino F., Girardi S., Gonzo L., 2007: "Optical measurement techniques for the digital preservation, documentation and analysis of cultural heritage", 8° Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Zurich, pp.16-24.

Rosina E., Avdelidis. N.P., Moropoulou A., Della Torre S., Pracchi V. Suardi G., 2004: "IRT Monitoring in planned Preservation of built Cultural Heritage", *Atti 16° WCNDT*, Montreal, Canada.

Rosina E. ,Suardi G., 2007: “Adeguamento impiantistico in edifici storici:Procedure per il controllo degli edifici degli effetti sulle superfici interne”, Atti 12° Conferenza Nazionale AIPND, Milano.

Sgrenzaroli M.,Vassena G.P.M.,2007: ”Tecniche di rilievo tridimensionale mediante laser scanner”, Volume 1°, Starrylink, Milano.

Sicondini E., Ronchi G., 2010: “Basilica di San Martino Maggiore in Bologna”, Costa, Bologna.

Spanò A., Massa A., Testa P., Volinia M., 2005: “Integrazione e confronto di dati termografici e fotogrammetrici per la conservazione dei beni culturali”, Convegno SIFET, Palermo.

Tucci G.,Sacerdote F.2007: ”Sistemi a scansione per l’architettura”, Alinea, Firenze.

Guidi G.,Russo M., Beraldin J.-A., (2010), " Acquisizione 3D e modellazione poligonale", McGraw-Hill, Milano.

Ullrich A., Schwarz R., Kager H., 2003: ”Using hybrid multi–station adjustment for an integrated camera laser–scanner”, 6° Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Zurich, pp.298–304.

Vecco M., 2010: “A definition of cultural heritage: from the tangible to the intangible”, Journal of cultural heritage 11 ,Venice, pp.321-324.

## SITOGRAFIA

Andreotti G.D., Castagnoli A., Manovale L.: “ Sperimentazioni di tecniche di telerilevamento nell’infrarosso termico per il monitoraggio dei distacchi di affreschi nella cappella Centoni della Cattedrale di Parma”, [http://www.fe.infn.it/~ciullo/Cattedrale\\_di\\_Parma.pdf](http://www.fe.infn.it/~ciullo/Cattedrale_di_Parma.pdf) – febbraio 2012.

[http://www.fe.infn.it/~ciullo/Termologia/Termologia\\_10\\_2009\\_2010%20\\_2pg.pdf](http://www.fe.infn.it/~ciullo/Termologia/Termologia_10_2009_2010%20_2pg.pdf), “ termogarfia e colore” – febbraio 2012.

[http://www.fe.infn.it/~ciullo/Termologia/termologia\\_07\\_new.pdf](http://www.fe.infn.it/~ciullo/Termologia/termologia_07_new.pdf), “tecniche diagnostiche in infrarosso” – febbraio 2012.

[http://it.wikipedia.org/wiki/Abbazia\\_di\\_Santa\\_Maria\\_del\\_Monte](http://it.wikipedia.org/wiki/Abbazia_di_Santa_Maria_del_Monte) – febbraio 2012

sito <http://scanning.fh-mainz.de/> – febbraio 2012

<http://www.nextengine.com/>

<http://www.definiens.com/>

[http://www.heritage.unibo.it/HeritageEn/research/Surveying\\_and\\_Monitoring\\_of\\_Cultural\\_Heritage.htm](http://www.heritage.unibo.it/HeritageEn/research/Surveying_and_Monitoring_of_Cultural_Heritage.htm) – marzo 2012.

[http://it.wikipedia.org/wiki/Patrimonio\\_dell'umanit%C3%A0](http://it.wikipedia.org/wiki/Patrimonio_dell'umanit%C3%A0) – marzo 2012  
[www.carta del rischio.it](http://www.carta-del-rischio.it)

<http://cipa.icomos.org/> – marzo 2012

[http://it.wikipedia.org/wiki/International\\_Council\\_on\\_Monuments\\_and\\_Sites](http://it.wikipedia.org/wiki/International_Council_on_Monuments_and_Sites) – marzo 2012

[<http://en.wikipedia.org/wiki/ISPRS> – marzo 2012

[http://it.wikipedia.org/wiki/Ministero\\_per\\_i\\_Beni\\_e\\_le\\_Attivit%C3%A0\\_Culturali](http://it.wikipedia.org/wiki/Ministero_per_i_Beni_e_le_Attivit%C3%A0_Culturali)] – marzo 2012

[http://it.wikipedia.org/wiki/Patrimonio\\_dell'umanit%C3%A0](http://it.wikipedia.org/wiki/Patrimonio_dell'umanit%C3%A0) – marzo 2012

[http://www.dieet.unipa.it/cali/didattica/mat\\_didatt/Rivelatori.pdf](http://www.dieet.unipa.it/cali/didattica/mat_didatt/Rivelatori.pdf) – consultazione marzo 2012  
[www.eu-chic.eu](http://www.eu-chic.eu)

<http://www.heritageportal.eu/>

[http://ordineingegneri.monzabrianza.it/upload/documenti/Ordine/Convegni/Ricca\\_I\\_parte.pdf](http://ordineingegneri.monzabrianza.it/upload/documenti/Ordine/Convegni/Ricca_I_parte.pdf) –  
aprile 2012

<http://www.culturalheritage.net/ortygia/italiano/Efflorescenze.html> – aprile 2012

[http://www.mazzacanemurolo.it/files/Termografia\\_Applicazioni\\_01.pdf](http://www.mazzacanemurolo.it/files/Termografia_Applicazioni_01.pdf) – aprile 2012

<http://www.ilcarmelo.it/santi-e-beati/san-pier-tommaso.html> – aprile 2012

[http://cdm.unimo.it/home/dimec/teggi.sergio/Presentazione\\_classificazione.pdf](http://cdm.unimo.it/home/dimec/teggi.sergio/Presentazione_classificazione.pdf) – aprile 2012

[http://www.dispenseagrariatorino.it/forestale/difedelsuolo/difedelsuolo1livello/2anno/topografi\\_aeomatica/Fotogrammetria/fotogrammetria.pdf](http://www.dispenseagrariatorino.it/forestale/difedelsuolo/difedelsuolo1livello/2anno/topografi_aeomatica/Fotogrammetria/fotogrammetria.pdf) – aprile 2012

<http://www.iscr.beniculturali.it/pagina.cfm?usz=1> – aprile 2012

---

**Appendice****Organismi nazionali ed internazionali citati nella tesi****MiBAC (Ministero per i Beni e le Attività Culturali):**

E' il dicastero del Governo Italiano preposto alla tutela della cultura, dello spettacolo, alla tutela e alla conservazione del patrimonio artistico e culturale, del paesaggio e del turismo.

**ISCR (Istituto Superiore per la conservazione ed il restauro):**

E' stato fondato nel 1939 su suggerimento di Giulio Carlo Argan e diretto dai suoi inizi fino al 1959 da Cesare Brandi. E' stato istituito con DM del 7 ottobre 2008, è un organo tecnico del Ministero per i Beni e le Attività Culturali ed afferisce al Segretariato Generale; è specializzato nel campo del restauro e della conservazione delle opere d'arte e del patrimonio culturale. Un aspetto importante dell'impegno dell'istituto è stato la realizzazione del Sistema Informativo Territoriale della "Carta del rischio del Patrimonio Monumentale".

**UNESCO (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Educazione, la Scienza e la Cultura):**

E' stata fondata dalle Nazioni Unite il 16 novembre 1945, per incoraggiare la collaborazione tra le nazioni nelle aree dell'istruzione, scienza, cultura e comunicazione. Sono membri dell'UNESCO, all'ottobre 2011, 194 Paesi più 7 membri associati. Il quartier generale dell'UNESCO è a Parigi ed opera programmi di scambio educativo, scientifico e culturale da 60 uffici regionali sparsi per tutto il mondo. I progetti sponsorizzati dall'UNESCO comprendono programmi scientifici internazionali; programmi di alfabetizzazione, tecnici e di formazione degli insegnanti; progetti regionali e di storia culturale; e cooperazioni internazionali per conservare il patrimonio culturale e naturale del pianeta e per preservare i diritti umani. L'UNESCO fornisce fondi al Consiglio Internazionale della Scienza. Una delle missioni dell'UNESCO è quella di mantenere una lista di patrimoni dell'umanità.

**ICOMOS (L'International Council on Monuments and Sites):**

E' stato fondato nel 1965 come risultato della Carta di Venezia del 1964, e dà consigli all'UNESCO sui Patrimoni dell'umanità. Il quartier generale dell'ICOMOS è nel Regno Unito a Londra. L'ICOMOS è una organizzazione internazionale non governativa che ha principalmente lo scopo di promuovere la teoria, la metodologia e le tecnologie applicate alla conservazione, alla protezione e alla valorizzazione dei monumenti e dei siti di interesse culturale. Ne fanno parte oltre 7000

membri, provenienti da diversi paesi ed esperti di diverse discipline: architetti, storici, archeologi, storici dell'arte, geografi, antropologi, ingegneri e urbanisti.

**CIPA (Il Comitato scientifico per la documentazione del Patrimonio Culturale):**

E' uno dei comitati internazionali di ICOMOS (Consiglio Internazionale dei Monumenti e Siti), ed è stato realizzato in collaborazione con ISPRS (Società Internazionale di Fotogrammetria e Telerilevamento). Il suo scopo principale è il miglioramento di tutte le tecniche per il rilevamento dei monumenti e dei siti culturali, soprattutto per mezzo di un risultato integrato ottenuto dalla combinazione di tecniche particolari specialmente della fotogrammetria in tutte le sue espressioni, in qualità di un contributo fondamentale per la documentazione ed il monitoraggio del patrimonio culturale, alla conservazione e al restauro di qualsiasi bene culturale architettonico pregiato o altro monumento culturale, dell'oggetto o del sito, come supporto alle indagini architettonico, archeologico e storico-artistiche. ISPRS e ICOMOS hanno creato CIPA, perché entrambi credono che un monumento può essere restaurato e protetto solo quando è stato completamente misurato e documentato e, quando il suo sviluppo è stato documentato più volte, cioè monitorato, anche in relazione al suo ambiente, e conservato nel proprio patrimonio informativo e in sistemi di gestione.

**ISPRS (The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing):**

E' una organizzazione non governativa dedicata allo sviluppo della cooperazione internazionale per l'avanzamento della fotogrammetria, telerilevamento e scienze dell'informazione e le loro applicazioni spaziali. Fondata nel 1910 dal professor Dolezal presso l'Università Tecnica di Vienna, Austria, ISPRS è la più antica organizzazione internazionale. Gli interessi scientifici della Società comprendono la fotogrammetria, il telerilevamento, le informazioni spaziali sistemi e le discipline affini, così come le applicazioni di cartografia, geodesia, topografia, ambiente, terra e scienze ingegneristiche, e del monitoraggio ambientale. Ulteriori applicazioni comprendono la progettazione industriale di produzione e di conservazione, architettura e monumenti, la medicina e altri.



description of history data	
<b>Q15 Building elements</b>	<input type="checkbox"/> 1.Structural analysis <input type="checkbox"/> 2.Materials identification <input type="checkbox"/> 3.Risks identification <input type="checkbox"/> 4.Technical characteristics <input type="checkbox"/> 5.Other (describe)
Q15 A Brief description of elements data	
<b>Q16 State of conservation and restoration activities</b>	<input type="checkbox"/> 1.Previous works identification <input type="checkbox"/> 2.Documentation related to these works <input type="checkbox"/> 3.Pathology analysis <input type="checkbox"/> 4. Other (describe)
Q16 A Brief description of conservation data	
<b>Q17 Survey</b>	<input type="checkbox"/> 1.General dimensions <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 2.Laboratory analysis <input type="checkbox"/> 3.Other (describe)
Q17 A Brief description of survey data	
<b>Q 18 Legal conditions and constrains</b>	<input type="checkbox"/> 1.Ownership <input type="checkbox"/> 2.Constrains description <input type="checkbox"/> 3.Related managements plans or similar <input type="checkbox"/> 4.Other (describe)
Q 18 A Brief description of legal conditions data	

3. DATA RANKING					
	1.Not considered	2.Superficially described	3.Described	4.Well described	5.Description of missing information or data to be implemented
<b>Q19 A Location</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<b>Q19 B History</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<b>Q19 C Restoration activities</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<b>Q19 D State of conservation</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

<b>Q19 E Materials</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<b>Q19 F Structure</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<b>Q19 G Surveys</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<b>Q19 H Risks prevention</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<b>Q19 I Legal conditions</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<b>Q19 J Other (specify)</b>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

### Notes and suggestion:

Please describe lacks and improvements identified, best practices cases etc..

Describe in which dimension is analysed the cultural heritage: divided by structural elements or materials; the element is considered as one piece etc.

### Check list editor:

<b>Partner:</b>	
<b>Editor name:</b>	
<b>e- mail:</b>	
<b>Date:</b>	

# RINGRAZIAMENTI

In questa pagina posso finalmente ringraziare di cuore tutti coloro che hanno contribuito allo svolgimento e conclusione di questo lavoro.

Cominciando per ordine il primo grazie ufficiale è per il Professor Gabriele Bitelli, il quale mi ha accolto nella grande famiglia di Topografia, facendomi sentire a mio agio anche quando ero appena arrivata a Bologna

Ringrazio ufficialmente Padre Roberto Toni, Priore della Basilica di San Martino a Bologna, per avermi dato il permesso di poter svolgere le operazioni di sopralluogo e di rilievo dell'affresco opera dell'artista Lucio Massari posto all'interno della sala del teatro San Martino.

Si ringrazia il Dott. Camillo Tarozzi per l'utile documentazione fotografica fornita.

Ringrazio i professori, Luca Vittuari e Maurizio Barbarella, per avermi fornito chiarimenti e spiegazioni, anche comprendendo i miei disagi negli spostamenti, specialmente nel seguire i loro corsi di lezione a Lazzaretto.

Adesso ringrazio tutti i miei colleghi sia dottorandi che post, per la loro simpatia, per il loro aiuto ed i loro consigli utili, sostenendomi nei delicati momenti dei tre anni di dottorato.

E così, volendovi ricordare tutti vi ringrazio cominciando dal mio ufficio, Emanuele, Paolo, Michaela, Luciano, Andrea Lugli, Andrea Meffe, Roberto, Luciano, Fabrizio, le due colleghe del piano del mio ufficio preferito nei vari momenti di soccorso: Valentina e Giorgia.

Ma vanno anche ricordati i tecnici di laboratorio Pino, Chiara e Alessandra, che mi hanno tollerato tutte le volte che sono scesa al piano terra per lavorare insieme a Fabrizio per controllare qualcosa da definire meglio durante la ricerca, interrompendo qualvolta il loro lavoro piombando all'improvviso.

Devo anche ringraziare tutti per la vostra grande cordialità mostratami, per la vostra simpatia, specie nei momenti di ricercata convivialità, dove ognuno si è contraddistinto con una sua specialità, dai dolci di Giorgia, ai Cocktail di Fabrizio.

Ringrazio tutti i miei cari amici sparsi tra Bologna e Palermo, Daniela, Lisa, Marika e tutti i miei amici del Don Bosco, la mia cara cuginetta Loredana, i miei cari amici carmelitani Fra Michel e Fra Roberto ed in particolare Emanuele, e la mia cara famiglia, che mi hanno accompagnato durante tutti i momenti salienti del mio dottorato di ricerca.

E ancora chi non si può non ringraziare? Grazie Mamma e grazie Papà, grazie perché siete una forte e bella squadra che non si ferma mai, grazie per la fede con la quale mi avete educata e che per grazia di Dio è divenuta forza così da suggerirmi in queste ultime righe quanto qui di seguito vi riporto:

*Se dovrai attraversare le acque, sarò con te,  
i fiumi non ti sommergeranno;  
se dovrai passare in mezzo al fuoco, non ti scotterai,  
la fiamma non ti potrà bruciare;  
poiché io sono il Signore tuo Dio,  
il Santo di Israele, il tuo Salvatore.  
Isaia 43,2-3*