

Rapporti tecnici

INGV

**Modellazione tridimensionale di edifici
mediante tecnologia laser
a scansione terrestre**

321



Direttore Responsabile

Stefano Gresta

Editorial Board

Luigi Cucci - Editor in Chief (INGV - RM1)

Andrea Tertulliani (INGV - RM1)

Nicola Pagliuca (INGV - RM1)

Umberto Sciacca (INGV - RM2)

Alessandro Settimi (INGV - RM2)

Aldo Winkler (INGV - RM2)

Salvatore Stramondo (INGV - CNT)

Milena Moretti (INGV - CNT)

Gaetano Zonno (INGV - MI)

Viviana Castelli (INGV - BO)

Antonio Guarnieri (INGV - BO)

Mario Castellano (INGV - NA)

Mauro Di Vito (INGV - NA)

Raffaele Azzaro (INGV - CT)

Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)

Mario Mattia (INGV - CT)

Marcello Liotta (INGV - PA)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (RM1)



Rapporti tecnici INGV

MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE DI EDIFICI MEDIANTE TECNOLOGIA LASER A SCANSIONE TERRESTRE

Mario Minasi¹, Antonio Costanzo¹, Giorgia Rossi², Giorgio P.M. Vassena², Matteo Sgrenzaroli²,
Fawzi Doumaz¹, Giuseppe Casula³, Massimo Musacchio¹, Antonio Montuori¹,
Maria Giovanna Bianchi³, Carmelo La Piana¹ e Maria Fabrizia Buongiorno¹

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Centro Nazionale Terremoti)

²GEXCEL (Geomatics & Excellence, Brescia)

³INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

321

Indice

Introduzione	7
1. Il Laser	8
1.1 Misure di distanze con distanziometri laser	9
2. Il Laser a Scansione Terrestre	10
2.1 Calibrazione del Laser Scanner	11
2.2 Esecuzione di un rilievo	13
3. Trattamento del dato TLS	13
3.1 Colorimetria nuvole di punti	14
3.2 Z+F Laser Control	14
3.3 Il pacchetto di analisi Gexcel JRC 3D Reconstructor®	18
3.4 Input dati	18
3.5 Filtraggio	20
3.6 Registrazione	22
3.7 Aggregazione ed esportazione	24
3.8 Procedura di Ispezione	24
3.9 Calibrazione manuale delle immagini	27
3.10 Triangolazione o <i>Meshing</i>	31
Conclusioni	32
Ringraziamenti	32
Bibliografia	32

Introduzione

Negli ultimi anni i sistemi laser a scansione terrestre (TLS) sono divenuti sempre più sovente strumenti utili al monitoraggio: sia di fenomeni di dissesto come frane e problemi di stabilità di versante, ma anche per il monitoraggio di aree crateriche dei vulcani o di caldera. Sono frequenti le applicazioni nelle cave o nelle saline per il monitoraggio dei volumi di materiale estratto. Sono state effettuate applicazioni per lo studio e la geo-referenziazione della struttura complessa delle grotte, il monitoraggio per la stabilità delle dighe o dei ponti, lo studio dell'evoluzione del corpo dei ghiacciai e dei fenomeni di dissesto a questi associati [<http://www.microgeo.it/LaserScanner/applicazioni-laser-scanner-3d.php>; Fantini, 2015; Zogg et al., 2008; Shen-En Chen, 2012; Alba et al., 2006; Bauer, 2003; Bauer et al., 2005; Micheletti et al., 2014].

L'evoluzione della moderna tecnologia vede laser sempre più potenti e sicuri per l'occhio umano, l'implementazione di sistemi con memorie a stato solido di dimensioni pari a diverse decine di Giga byte, schermi integrati a cristalli liquidi dotati di tecnologia *touch screen* in grado di comandare in maniera *user friendly* la strumentazione. I moderni firmware consentono la visualizzazione dell'oggetto in esame già in fase di rilievo. Infine la portata può raggiungere e superare i 3 Km per i sistemi very long range [Pesci et al., 2011; Abmayr et al., 2005], mentre la frequenza di acquisizione supera il milione di punti al secondo per i sistemi laser utilizzati tipicamente in ambito architettuale.

Nel campo dell'industria meccanica e automobilistica sono stati implementati laser a scansione terrestre triangolatori che funzionano in virtù della tecnica dell'intersezione in avanti e che sono in grado di raggiungere delle precisioni di alcune decine di μm . Inoltre, meritano menzione i sistemi laser 3D a luce strutturata [Pesci et al., 2011; Abmayr et al., 2005], che consentono la modellazione di piccoli oggetti con precisioni estreme come quelle già citate.

Fra i più vasti settori di applicazione della tecnologia TLS vi è tuttavia, il rilievo morfologico e la modellazione 3D degli edifici sia storici che moderni [Casula et al., 2009; Costanzo et al., 2015; Casula et al., 2015]. Nel caso di antiche costruzioni è sempre necessaria una preliminare ricerca storica finalizzata alla ricostruzione stratigrafica degli interventi di restauro, seguita poi da indagini in laboratorio per l'analisi delle caratteristiche petrografiche, granulometriche e compositive dei materiali compositi utilizzati per la costruzione degli edifici stessi [Casula et al., 2009; Costanzo et al., 2015; Casula et al., 2015; Doglioni, 1997]. Per quanto riguarda i fabbricati moderni, le cui tipologie costruttive vanno dalle murature animate al calcestruzzo animato, hanno forme architettoniche meno travagliate, ma comunque per l'analisi dello stato di conservazione delle murature è sempre necessario applicare diverse tecniche d'indagine sia distruttive che non distruttive (NDT) per studiare come evolve l'usura nel tempo dei materiali da costruzione, come previsto dalla legislazione [Casula et al., 2009; Costanzo et al., 2015; Casula et al., 2015].

Nel caso del monitoraggio degli edifici oltre che per la realizzazione di piante e sezioni utili ai tecnici per la progettazione o la variazione di uso degli edifici stessi, la tecnologia TLS costituisce un metodo utile per la realizzazione di test non distruttivi atti alla verifica strutturale di elementi portanti dei manufatti analizzati come: pareti, pilastri portanti, solai e pavimentazioni.

Esistono infine, applicazioni per grandi opere, dov'è necessario l'utilizzo di sistemi laser montati su veicoli o su droni [Girelli, 2007; Doglioni, 1997].

All'evoluzione strumentale corrisponde uno sviluppo altrettanto importante del software e dell'hardware per la restituzione del dato. I computer consentono, allo stato attuale, l'installazione di memorie di massa con volumi di dimensioni di diverse decine di Tera byte. I processori dei moderni calcolatori sono dotati di core con più CPU (central processing unit) integrate e persino i processori grafici sono dotati di più processori e memorie pari a 6 Giga byte con frequenze di clock elevate.

Tra i più noti software object oriented per Graphic User Interface (GUI), abbiamo il pacchetto JRC 3D Reconstructor® della Gexcel (<http://www.gexcel.it>). Sviluppato in virtù delle più moderne e veloci versioni del compilatore Microsoft Visual C++, tale software consente sia di effettuare in maniera grafica interattiva l'analisi del dato TLS, sia di interfacciarsi con ambienti AutoCAD®.

“La maggior parte delle attività descritte in questo lavoro sono state finanziate con fondi del progetto PON01_02710 MASSIMO-Monitoraggio in Area Sismica di Sistemi Monumentali”.

Il progetto PON MASSIMO nasce con la prerogativa di produrre uno strumento dedicato alla tutela di strutture a valenza storico – artistica. Questo avviene attraverso un percorso di catalogazione, analisi del bene inteso come elemento costituito da elementi resistenti e da materiali, ubicazione e studio del sito della struttura, attività di monitoraggio dove le variabili che definiscono il livello di affidabilità e di esposizione possano essere aggiornate periodicamente in funzione degli eventi che si susseguiranno negli anni e del fisiologico impoverimento dei materiali presenti.

Il progetto ha come principale obiettivo quello di fornire un software di controllo del patrimonio storico, basato sull'acquisizione di dati provenienti da strutture e siti opportunamente monitorati, in grado di produrre risultati utili già nella fase di acquisizione minima dei dati. Inoltre, sarà concepito in modo da ridurre fortemente le attività decisionali legate alle interpretazioni soggettive dei tecnici.

Ovviamente, tale software di gestione sarà opportunamente validato su due edifici prototipo, scelti dall'analisi di quanto è già stato eseguito sul territorio in termini di identificazione e catalogazione, secondo gli standard nazionali, delle strutture architettoniche e dei beni culturali del patrimonio Calabrese come ad esempio il complesso monumentale di Sant'Agostino a Cosenza.

In questo lavoro sono descritte, le procedure di acquisizione ed analisi del dato TLS nell'ambito del progetto PON MASSIMO, nell'area di convergenza sita nel territorio della Regione Calabria, mediante strumento TLS di tipo architettonico Z+F 5010c®; inoltre verrà illustrato il processo di elaborazione dei dati tramite il potente pacchetto software Reconstructor®. Questo ci fornirà la possibilità di ottenere modelli 3D che serviranno come base per la pianificazione di altri test NDT.

1. Il Laser

Il L.A.S.E.R. (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), è un dispositivo atto all'amplificazione, collimazione e coerenza della luce per effetto del fenomeno fisico dell'emissione stimolata di radiazione.

La scoperta fondamentale che ha permesso l'emissione della luce laser è dovuta ad A. Einstein nel 1917. Nel 1958 i fisici statunitensi Arthur Schawlow e Charles Hard Townes brevettarono il primo dispositivo laser. Ma nel 1960 il fisico statunitense Gordon Gould ne rivendicò la paternità [Bornaz, 2004].

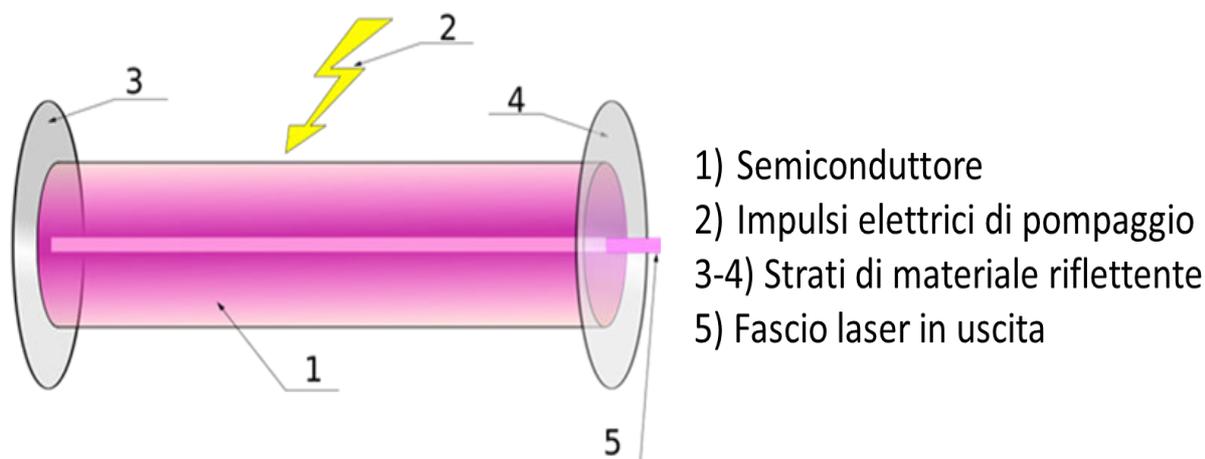


Figura 1. Schema della camera di pompaggio di un laser a semiconduttore.

Sempre negli anni '60 il fisico Theodore Maiman (ricercatore presso i laboratori Huyghens-California) osservò il primo fascio laser in un cristallo di rubino. Nello stesso periodo il fisico statunitense di origine iraniana Ali Javan costruì il primo dispositivo a elio-neon.

Fra i vari tipi di laser, quello a semiconduttore è il più utilizzato per dispositivi che misurano le distanze, fra cui anche il laser scanner distanziometrico oggetto di questa pubblicazione.

Questi tipi di laser sono caratterizzati dalle dimensioni compatte e il loro funzionamento si basa sull'iniezione diretta di continui impulsi di corrente elettrica e sulla giunzione tra semiconduttori a diversa conducibilità elettrica come ad esempio: il fluoruro di litio, lo stronzio (o calcio) e l'alluminio drogato con cerio. La radiazione laser viene generata all'interno di una particolare struttura, cavità risonante, confinata mediante pareti di materiale riflettente la luce (**Figura 1**). La luce laser in uscita è costituita da treni d'onda paralleli collimati mediante sistemi di lenti e coerenti sia spazialmente essendo caratterizzati dalla medesima lunghezza d'onda, sia temporalmente perché aventi la stessa fase.

Teoricamente l'intensità della luce laser non avrebbe limiti. Generalmente la lunghezza d'onda della luce laser dei predetti dispositivi varia tra il visibile e l'ultravioletto vicino cioè tra lunghezze d'onda variabili tra 0.2 e 1.5 μm a seconda del tipo di laser utilizzato (**Figura 2**).

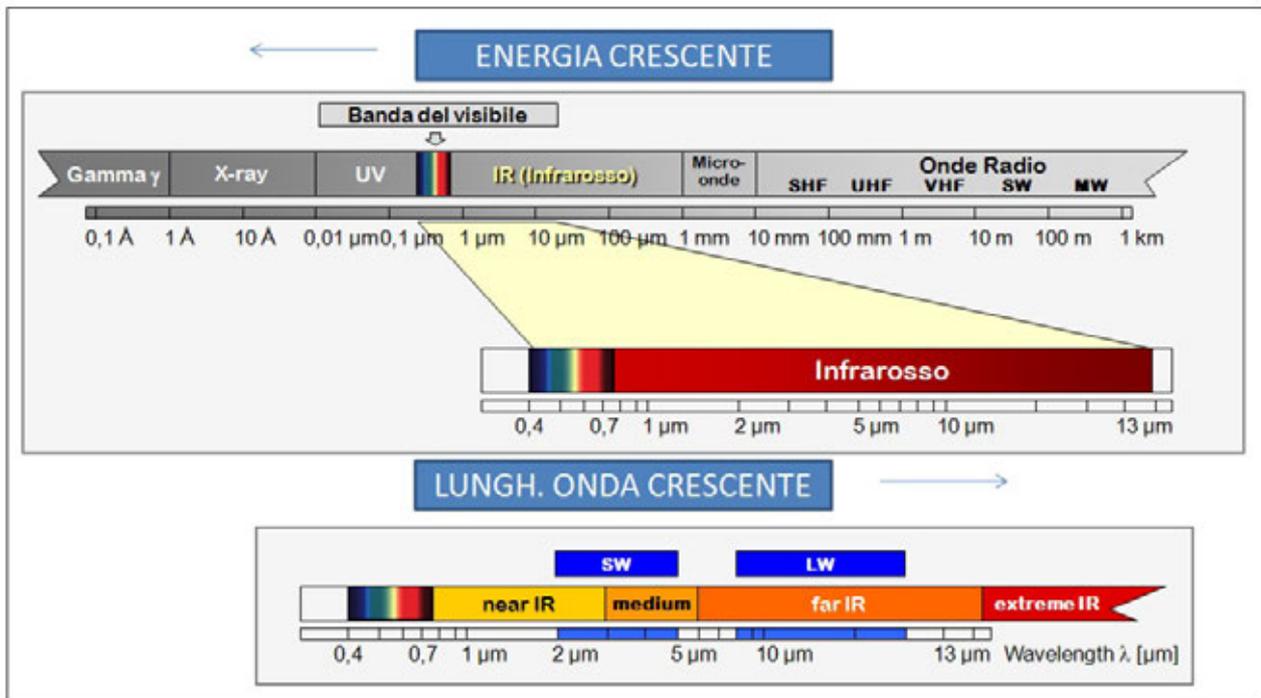


Figura 2. Schema dello spettro della radiazione elettromagnetica.

1.1 Misure di distanze con distanziometri laser

La tecnica di misura di distanze con distanziometri a laser è nata nel 1993 grazie al brevetto dell'inventore sovietico Balaicov (1933). In seguito nel 1938, un altro scienziato russo (Lebedev) mise a punto il primo prototipo. I primi distanziometri ad onde vennero realizzati e messi in commercio anche per gli utenti 'minori' agli albori degli anni '70. L'introduzione di questi sensori causò la scomparsa dei metodi originali di misura delle distanze a favore di quelli più precisi ed immediati con l'ausilio dei distanziometri laser [Bornaz, 2004; Vassena et al., 2007].

Per effetto dell'introduzione nel mercato dei distanziometri laser a basso costo si è verificata una vera e propria rivoluzione nelle tecniche di rilievo classico. I vecchi sistemi di rilievo sono stati soppiantati a favore delle nuove tecnologie che hanno consentito di ottenere maggiori precisioni in tempi più brevi (**Figura 3**).



Figura 3. Dispositivi per la misura di distanze a laser da sinistra: stazione totale, treppiedi geodetici, paline e prisma retroriflettore.

2. Il Laser a Scansione Terrestre

I laser scanner terrestri (TLS), sono in pratica delle stazioni totali ad elevata automazione, la cui radiazione emessa dal fascio del laser ha una lunghezza d'onda compresa fra lo spettro della luce visibile e l'infrarosso vicino quindi da 0.2 a 1.5 μm . A secondo del tipo di laser utilizzato, in genere i laser cosiddetti "verdi", ovvero sicuri per la vista (classe 1/1A), secondo la normativa CEI EN 60825, hanno una lunghezza d'onda compresa nella regione dello spettro elettromagnetico corrispondente all'infrarosso vicino (1.5 μm). Il laser scanner terrestre è in linea di principio un distanziometro laser ad alta automazione che, mediante un sistema interno di specchi rotanti e/o oscillanti, è in grado di inviare il segnale su una griglia angolare calibrata e precisissima in modo da investire in modo regolare una quantità di punti estremamente elevata sulla superficie fisica di interesse (**Figura 4**) [Pesci et al., 2011].

In questo rapporto le superfici d'interesse sono prospetti di edifici.

I laser scanner comunemente utilizzati in geodesia sono di tipo distanziometrico, ne esistono essenzialmente due tipi: a tempo di volo (o impulso) e a differenza di fase (o segnale continuo).

Nel primo "tipo" il sensore misura il tempo di volo Δt impiegato dal segnale per viaggiare dall'emettitore (TLS) all'oggetto riflettore e ritorno.

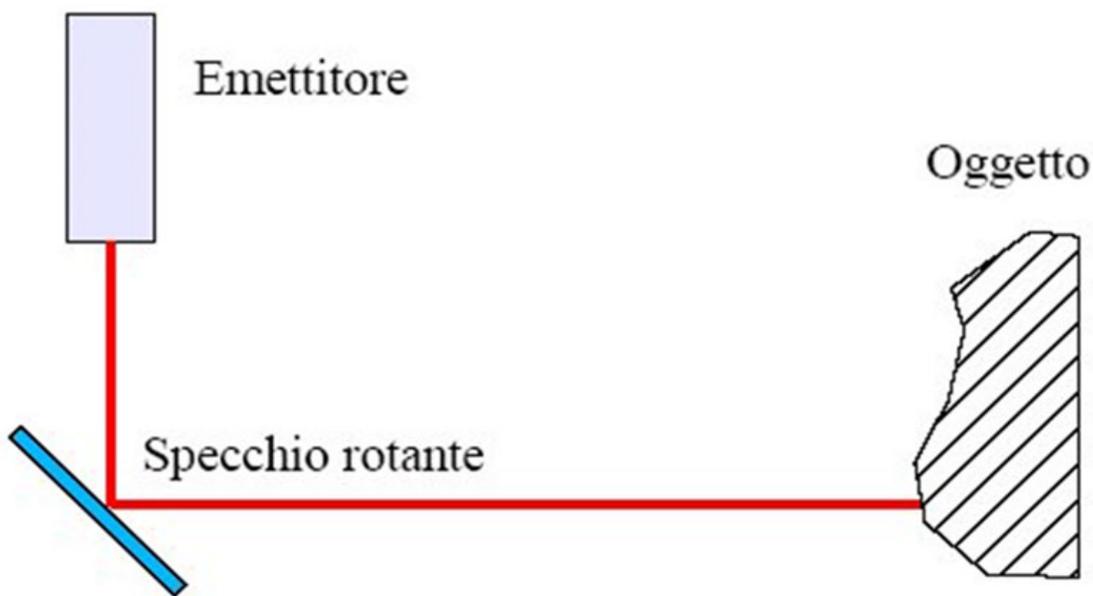


Figura 4. Schema del principio di funzionamento del Laser Scanner Terrestre.

Nota la velocità dell'onda c si ottiene una stima della distanza percorsa e quindi della posizione dei punti che costituiscono la superficie investigata (**Figura 5**).

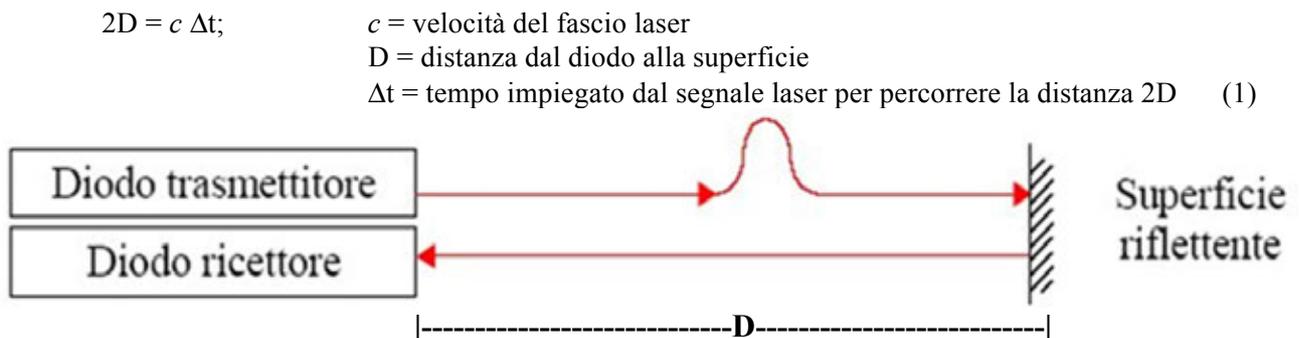


Figura 5. Schema del principio di funzionamento del laser a tempo di volo.

Nel secondo “**tipo**” mediante un comparatore di fase, è possibile calcolare lo sfasamento fra il segnale in uscita dal sensore ed il segnale in entrata a seguito di riflessione sulla superficie dell’oggetto investigato. La relazione esistente fra la differenza di fase e la distanza percorsa dal segnale è indicata nella seguente equazione (2):

$$D = k + n \lambda/2 ; k = \lambda\phi / 4\pi \quad (2)$$

Come ben noto dalla letteratura delle tecniche interferometriche [Bornaz, 2004; Vassena et al., 2007; Casula et al., 2009], lo sfasamento fra segnale emesso e riflesso dal target è noto a meno di un numero intero n , multiplo della semi lunghezza d’onda del segnale ($\lambda/2$). Tale numero è detto ambiguità intera e la portata dei laser scanner a differenza di fase è limitata dalla distanza massima alla quale questa incognita può essere risolta. Per esempio se si considera il laser scanner terrestre Z+F modello *Imager*® 5010c ossia il modello Leica® HDS 7000n i cui sensori sono integrati dalla Zoller-Fröhlich *GMBH*® (**Figura 6**), la distanza massima nominale alla quale l’elettronica del laser è in grado di risolvere l’ambiguità intera e quindi alla quale il medesimo può operare è circa 187 m.

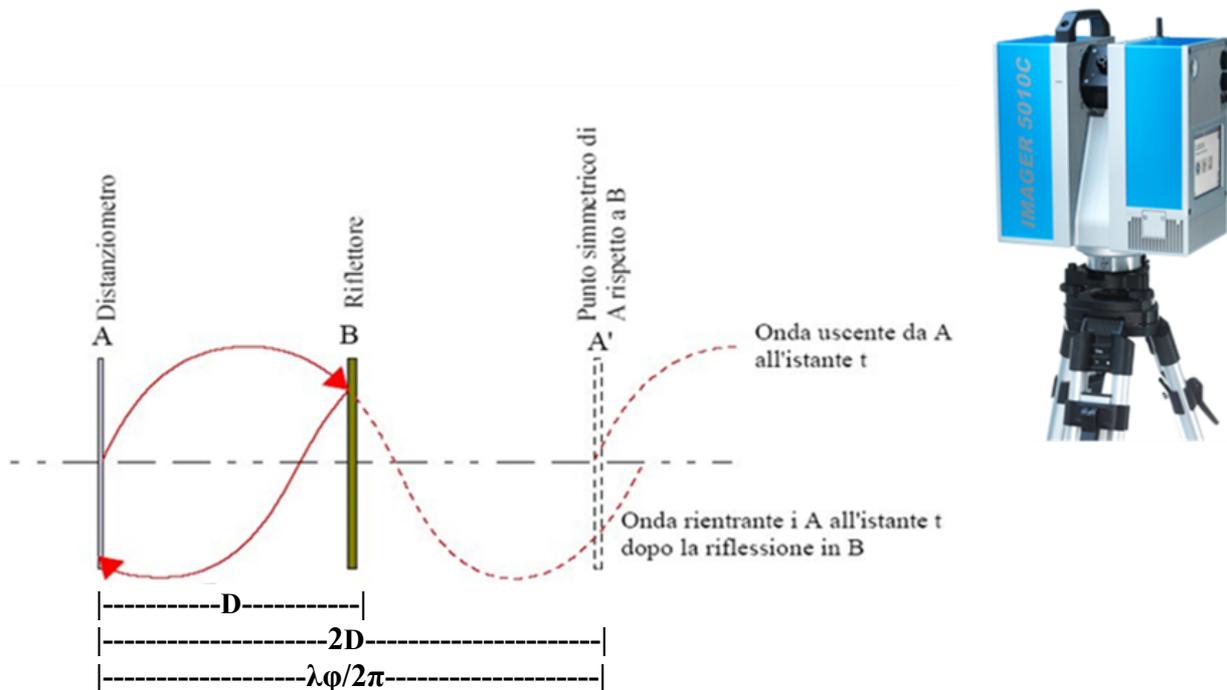


Figura 6. Schema di funzionamento dei sensori a differenza di fase.

In base a quanto sopra espresso è facile notare che i laser scanner terrestri sono sensori attivi in quanto emettono un segnale laser generato internamente ai loro sensori.

2.1 Calibrazione del Laser Scanner

La calibrazione dei laser scanner è quell’insieme di procedure atte a stabilire quale sia la reale risoluzione dello strumento, ma anche finalizzata allo studio delle fonti di errore della misura della posizione di un punto [Pesci et al., 2011; Pesci et al., 2013]; fra queste si ricordano: la divergenza del fascio laser, gli errori angolari e la risoluzione lineare, cioè la precisione nella misura della distanza in linea diritta (vedi **Tabella 1** - Tabella di calibrazione). Per evitare implicazioni legali è opportuno che la calibrazione venga effettuata da un ente certificatore come per esempio l’Institute of Geodesy and Photogrammetry (IGP) del Politecnico di Zurigo (ETHZ) [Shultz, 2009]. La calibrazione lineare viene effettuata per confronto fra due diversi strumenti di misura della distanza: quello da calibrare (laser scanner) e quello di riferimento (interferometro laser). Gli strumenti vengono posti su una linea di calibrazione di 50 m dotata di un binario

sul quale può scorrere un carrello mobile che consente la verifica della linearità della traiettoria del laser su target solidi (sfere) posti a distanze variabili. Questo consente di evitare gli errori di linearità che possono arrivare a +/-3mm. Vengono effettuate delle serie di misure mirando una sfera del diametro di 12 o 15 cm e di colore bianco, la sommatoria dei residui tra le misure del laser a scansione terrestre e la misura della stessa distanza effettuata con l'interferometro laser assunta come valore di riferimento fornisce una stima della sensibilità del Laser Scanner utilizzato, secondo la seguente formula:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - L)^2}{N-1}} \quad (3)$$

La formula rappresenta la deviazione standard del campione delle differenze tra i valori previsti x_i , ed i valori osservati L .

Per una buona calibrazione certificabile occorre tener conto anche della verticalità dei target e dei sensori assicurata mediante livelle sferiche e toriche montate su basette sulla linea di calibrazione e della temperatura ambiente che dev'essere mantenuta al valore di 20.0 +/- 0.5 gradi centigradi.

Esiste poi la possibilità di verificare la precisione angolare del laser scanner misurando una grandezza lineare nota, ottenuta con diverse angolazioni e distanza del raggio laser. L'errore angolare è causato essenzialmente dagli elementi rotanti in gioco come gli specchi ed il sensore, ma anche alla distorsione del fascio laser. Infine, fra le fonti di errore va considerato anche l'effetto della divergenza del laser dovuto al non perfetto parallelismo dei treni d'onda, questo comporta che l'area della superficie investita dal fascio del laser in uscita dal sensore non sia puntiforme ma abbia la forma di un cerchietto di circa 3 mm di diametro per gli standard architettonici, ed aumenti in maniera lineare, al crescere della distanza, di un angolo pari a circa 0.2 mrad.

Questi valori valgono esclusivamente per lo strumento Z+F modello *Imager*® 5010c il cui diametro del fascio laser aumenta linearmente con la distanza di un fattore pari a circa 0.2 mm/m.

Considerati tutti gli effetti che perturbano le misure effettuate con il laser scanner si ottiene una tabella di calibrazione come quella rappresentata in **Tabella 1**.

Tabella di Calibrazione TLS Imager ZF5010c

Parameter	Specifications	Measured Value	Result
Linearity error	≤ 1mm	≤ 0,44mm	Pass
Range noise at 10m *			
> Reflectivity 14% (black)	≤0,5 mm rms	0,21 mm rms	Pass
> Reflectivity 37% (grey)	≤0,4 mm rms	0,13 mm rms	Pass
> Reflectivity 80% (white)	≤0,3 mm rms	0,10 mm rms	Pass
Range noise at 25m *			
> Reflectivity 14% (black)	≤1 mm rms	0,44 mm rms	Pass
> Reflectivity 37% (grey)	≤0,6 mm rms	0,23 mm rms	Pass
> Reflectivity 80% (white)	≤0,5 mm rms	0,16 mm rms	Pass
Range noise at 50m *			
> Reflectivity 14% (black)	≤2,7 mm rms	1,32 mm rms	Pass
> Reflectivity 37% (grey)	≤1,2 mm rms	0,59 mm rms	Pass
> Reflectivity 80% (white)	≤0,8 mm rms	0,33 mm rms	Pass
Vertical accuracy ** (High Enc)	0,007* rms (= 0,122 mrad)	0,085 mrad	Pass
Horizontal accuracy ** (Low Enc)	0,007* rms (=0,122 mrad)	0,074 mrad	

Tabella 1. Tabella di calibrazione certificata dal costruttore del Laser Scanner Z+F Imager® 5010c.

2.2 Esecuzione di un rilievo

Per rilevare un oggetto di forma complessa nella sua interezza limitando le zone d'ombra, il diradamento dei punti, la deformazione dell'area d'impatto del laser, gli errori di inclinazione e l'effetto della divergenza, la strumentazione deve essere installata in differenti punti di presa o stazione.

Da ciascuna stazione si rilevano una o più aree dell'oggetto da modellare mantenendo un certo grado di sovrapposizione tra le scansioni.

Nella pianificazione del rilievo occorre tener conto di tutte le difficoltà che si potranno presentare all'atto della realizzazione delle scansioni, come quella di dover scegliere punti stazione in posizione dominante per poter acquisire i tetti delle strutture in esame o comunque scansioni a scala più vasta, di natura areale, utili alla registrazione globale delle varie nuvole di punti acquisite. Un rilievo TLS va fatto precedere da uno studio di fattibilità che tenga conto oltre che delle caratteristiche della strumentazione in uso anche della tempistica necessaria al completamento della campagna di misure in relazione al tempo disponibile.

Il numero di punti di presa (o stazioni pianificabili), dipenderà dalla complessità dell'oggetto in esame e dal grado di automazione della strumentazione da utilizzare. Inoltre, in relazione alla precisione richiesta occorre impostare la risoluzione angolare dello strumento a valori adeguati, questo però comporta un aumento dei tempi di esecuzione e della mole del dato da processare [Vassena et al., 2007; Rinaudo et al., 2007; Casula et al., 2009].

I risultati di un rilievo con la tecnologia TLS sono nuvole di punti "strutturate" come *array*, in cui ciascuna riga contiene la posizione del punto in un sistema di riferimento arbitrario interno allo scanner (*Intrinsic Reference System* - IRS) espressa in coordinate cartesiane (X,Y,Z) e un valore intero o normalizzato ad 1, variabile fra 0 e 255, che esprime la riflettività del materiale sottoposto ad indagine, cioè il rapporto fra la radiazione riflessa e la radiazione incidente sul target. Nel caso degli scanner Z+F la riflettività, in dipendenza del sensore utilizzato, è un numero reale inferiore a 1 e assume dei valori pari a circa l'80% per il colore bianco, il 40% per il colore grigio ed il 15% per il colore nero. Nel caso in cui venga utilizzata la videocamera interna allo scanner, le righe dell'array di cui sopra, sono completate da tre valori. Pertanto avremo che la struttura del file apparirà riga per riga come: (N. P., X, Y, Z, ρ, R, G, B). Nel caso di nuvole di punti strutturate oltre alle coordinate cartesiane, valori di riflettività e colorimetria i file delle nuvole di punti conterranno anche informazioni sui valori della griglia di acquisizione o meglio i dati saranno distribuiti su di una griglia regolare di passo noto [Vassena et al., 2007]. A secondo del fatto che una nuvola di punti sia strutturata o meno variano il formato dei dati e le operazioni eseguibili sul dato rappresentato.

3. Trattamento del dato TLS

Come già espresso in precedenza i moderni laser scanner architettonici sono in grado di acquisire dati con una frequenza di oltre un milione di punti al secondo e su di un angolo solido pari a $360 \times 340^\circ$. Alla luce di questo fatto il trattamento del dato derivante dalla tecnologia TLS risulta un compito che richiede un dispendio di tempo pari a circa 10 volte il tempo necessario per l'acquisizione [Vassena et al., 2007].

In particolare, nello studio di oggetti di forma composita come gli edifici, lo schema di analisi del dato apparirà come quello indicato in **Figura 7**.

Alla pianificazione del rilievo seguirà il flusso del trattamento del dato che dall'input del dato grezzo, passando per l'applicazione di algoritmi di filtraggio, porta al processo di registrazione e pulitura delle nuvole di punti, fino all'aggregazione e generazione di modelli 3D che possono portare a studi morfologici e a modelli a *mesh* che possono poi venire utilizzati in ambienti AutoCAD®.

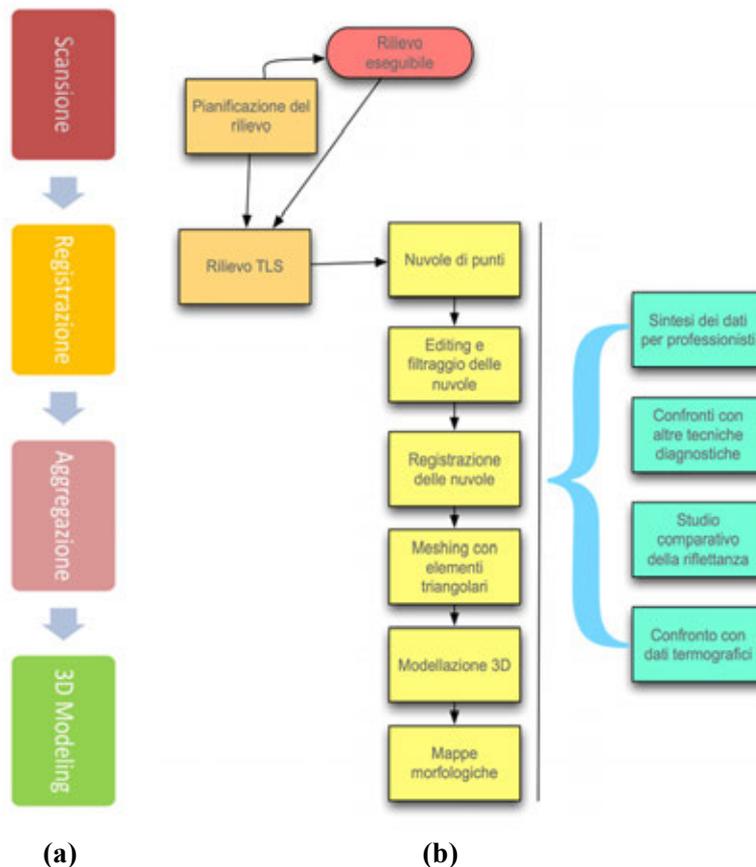


Figura 7. (a) Diagramma generale di flusso dell'analisi del dato TLS. (b) Schema del processo di registrazione e aggregazione delle nuvole di punti.

3.1 Colorimetria nuvole di punti

Quando si effettua un rilievo TLS, molti laser scanner permettono di acquisire, attraverso una fotocamera montata all'interno o all'esterno dello scanner, delle foto che servono a colorare le nuvole di punti acquisite. Il processo di colorare le nuvole ottenute, spesso non è immediato ma va fatto a posteriori attraverso dei software. In questo rapporto viene descritto il procedimento di associazione del dato RGB alle nuvole di punti attraverso il software Z+F LaserControl, software fornito a corredo del laser scanner in dotazione modello Z+F *Imager*® 5010c.

3.2 Il software Z+F LaserControl

Il programma è abbastanza semplice e intuitivo e permette di eseguire tutte le operazioni che servono per gestire una o più nuvole di punti, dal filtraggio all'allineamento, dalla colorazione della nuvola al post-processing.

La parte più interessante però è proprio l'associazione del dato RGB alle nuvole. Naturalmente, come già spiegato prima, questo processo può avvenire se e solo se sono state acquisite delle foto subito dopo la scansione.

Come primo passaggio bisogna importare nel software il progetto da colorare (**Figura 8**).

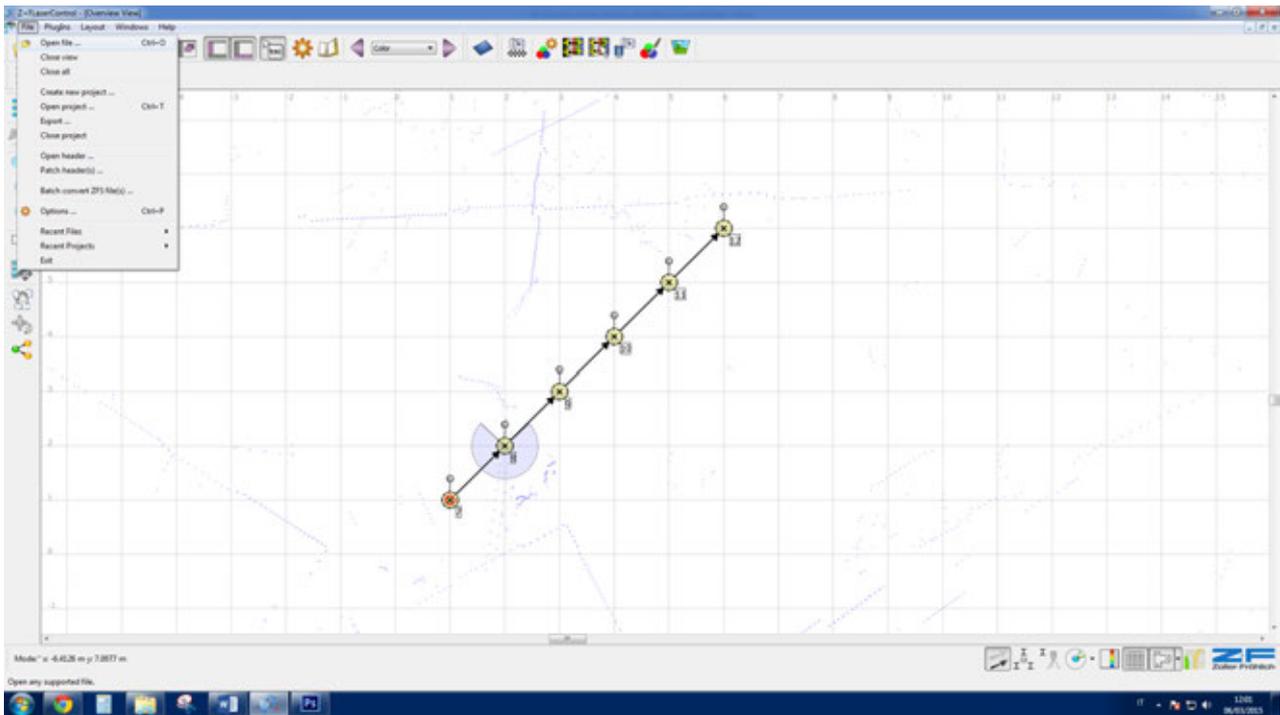


Figura 8. Procedura di importazione del progetto (Z+F LaserControl).

Successivamente, dal menù a tendina, dove è possibile effettuare tutte le operazioni, scegliamo color (Figura 9).

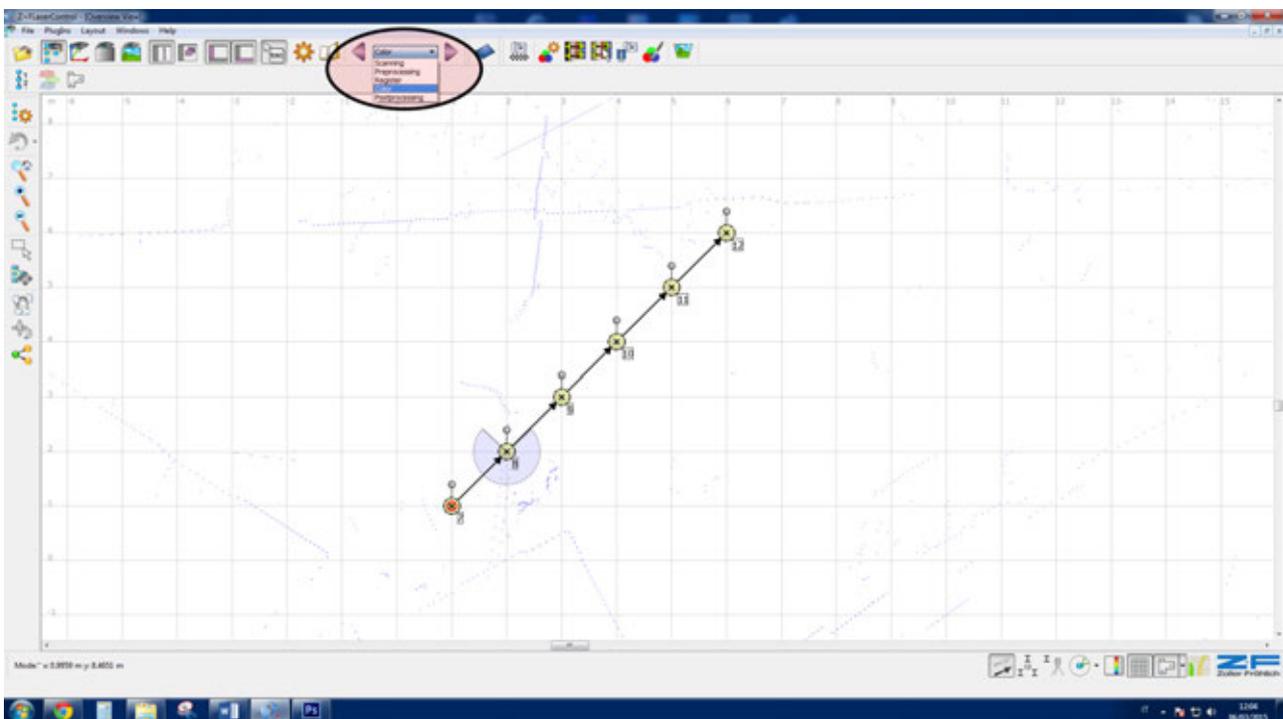


Figura 9. Scelta operazione da menù.

Come si nota di fianco al menù vengono listate le operazioni che si possono effettuare una volta selezionata la voce che ci interessa.

Premendo sul tasto *Color Mapping Properties*, si accede alla tendina che lista tutte le proprietà che ci servono per procedere alla colorazione delle nuvole (Figura 10).

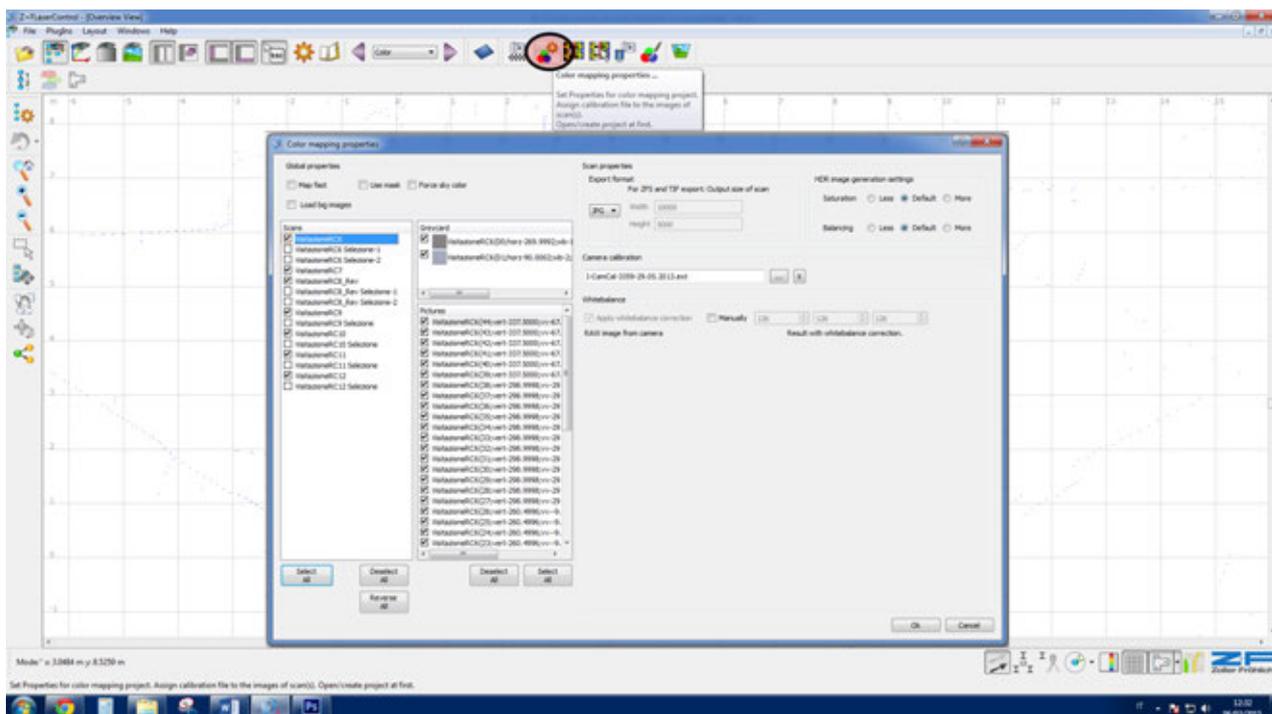


Figura 10. Color Mapping Properties.

Si nota subito che il programma nella sezione *Scans* ha già individuato e quindi selezionato in automatico, le nuvole di punti da associare alle foto che possiamo vedere e scorrere nella sezione *Pictures*. Gli ultimi due passaggi da fare nelle impostazioni, riguardano la selezione del formato grafico secondo cui esportare le foto (jpg, tiff, png, zfs) e le impostazioni di saturazione e bilanciamento del colore da assegnare all'immagine HDR (Figura 11).

La tecnica dell'HDR serve a ridurre al minimo i problemi legati all'esposizione. Vengono scattati un certo numero di fotogrammi a differenti tempi di esposizione, al fine di rilevare tutti gli oggetti sovraesposti e sottoesposti per avere una maggiore completezza della scena ripresa.

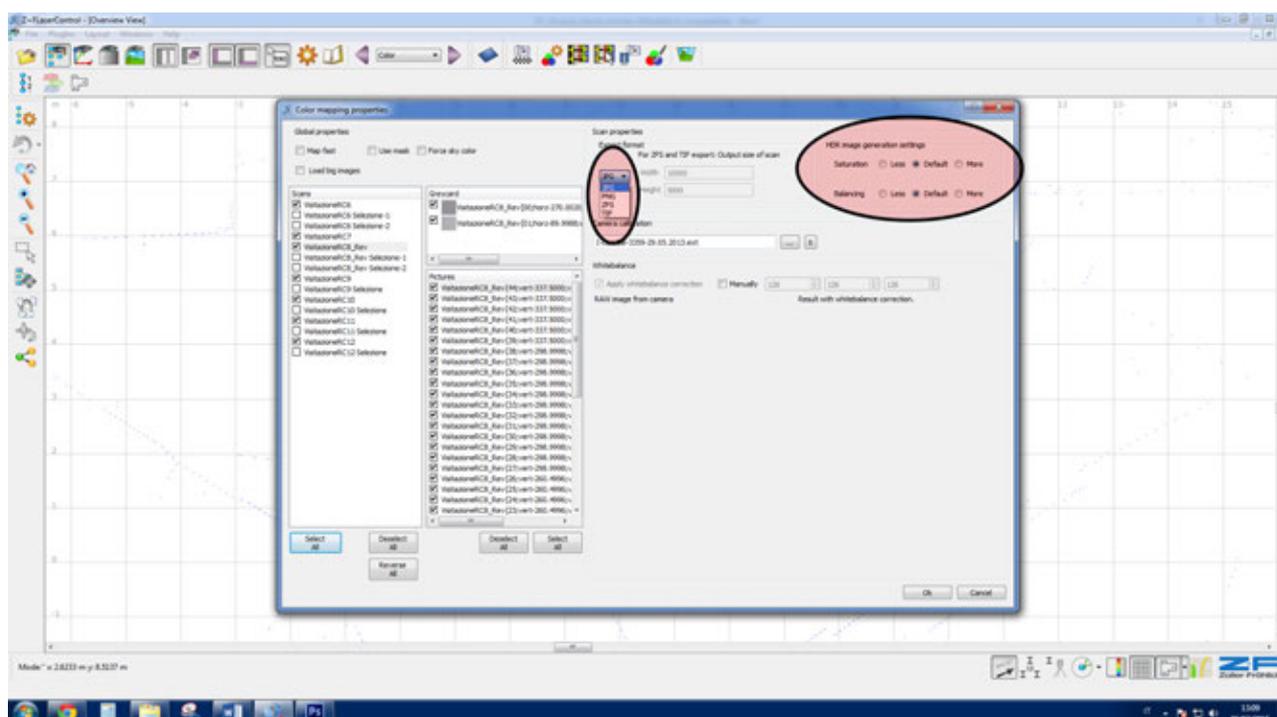


Figura 11. Salvataggio e settaggi immagine HDR.

Una volta impostati tutti i parametri selezioniamo l'opzione ok ed usciti dalla schermata di impostazioni, premiamo sul tasto *Generate Color Scans* per far partire il processo (**Figura 12**), o su una singola nuvola o su tutto il progetto importato.

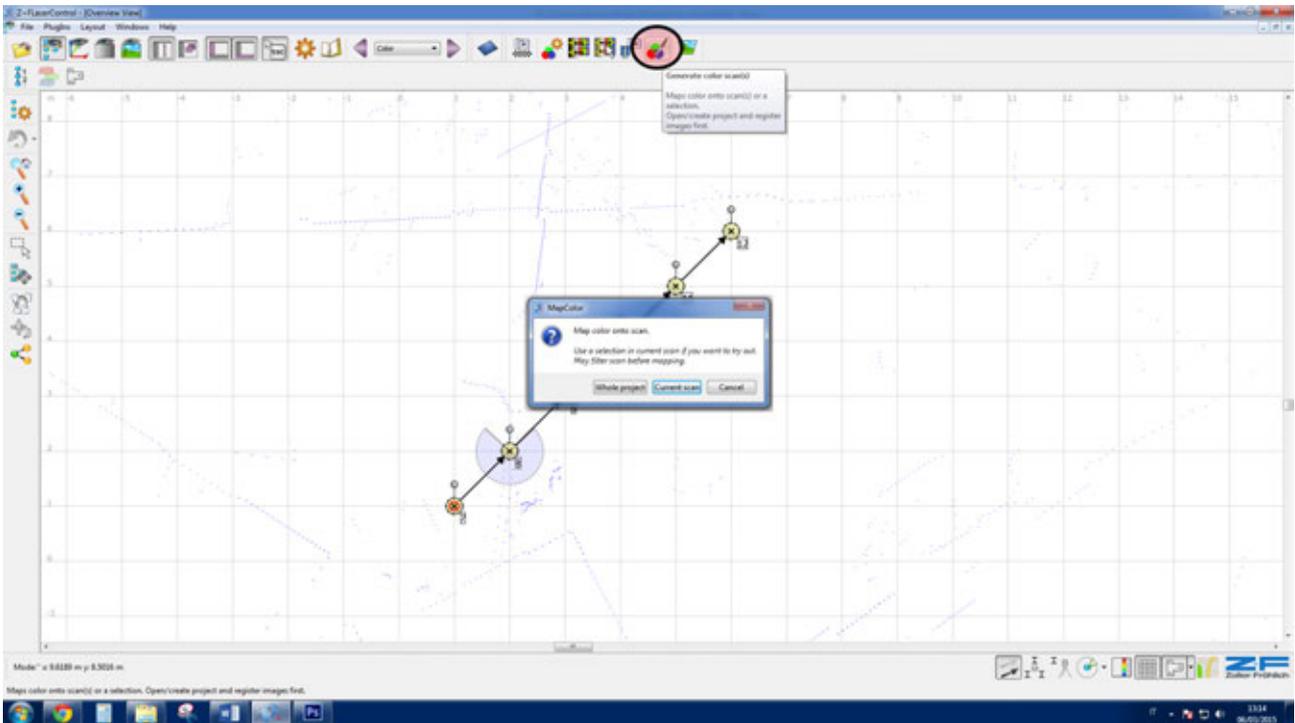


Figura 12. Avvio del processo di colorimetria.

Conclusa la procedura, la nuvola di punti iniziale (**Figura 13**) viene trasformata come appare nella **Figura 14**:

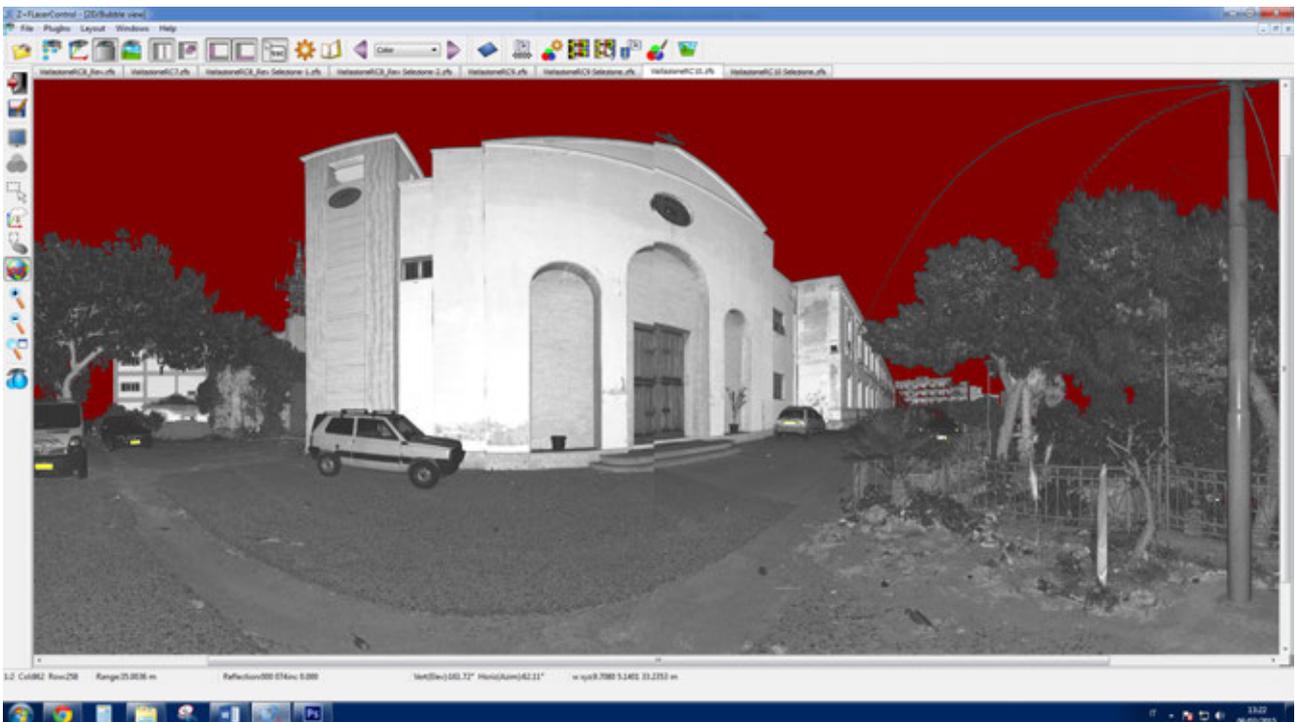


Figura 13. Nuvola di punti prima della colorazione.



Figura 14. Nuvola di punti dopo la colorazione.

3.3 Il pacchetto di analisi Gexcel JRC Reconstructor®

A cura di Gexcel® è stato implementato un pacchetto di analisi del dato TLS denominato JRC 3D Reconstructor® atto alla restituzione del dato Laser a Scansione Terrestre compatibile con i maggiori standard hardware del settore, fra i quali: Faro, Z+F, Leica, Optec ecc. ecc..

Il manuale del software si trova sul sito (<http://www.gexcel.it>), con filmati che documentano le fasi principali e delicate dell'analisi del dato TLS (**Figura 7 (a) e (b)**). Di seguito si descrivono alcune fasi salienti del trattamento del dato con lo standard precedentemente descritto, con l'obiettivo di fornire alcune principali linee guida.

3.4 Input dati

Il software Reconstructor® è dotato di un'interfaccia utente flessibile e completa di una serie di funzioni che consentono il processamento in maniera interattiva del dato TLS. L'interfaccia utente è composta dai seguenti componenti: una barra dei menu nella parte superiore della finestra, una barra degli strumenti con i tasti di scelta rapida per attivare alcuni comandi a portata di mano, una finestra di visualizzazione principale, una finestra di progetto (mobile), che elenca gli oggetti che compongono la scena 3D. È dotata, inoltre, di un editor di proprietà (mobile), che permette di visualizzare e modificare le proprietà degli oggetti selezionati, di un'area editing dei punti e delle poligoni in basso, di una finestra dei punti attuali a destra in alto. Infine, è presente anche un'area procedure e log procedurale a destra: al centro ed in basso (**Figura 15**).

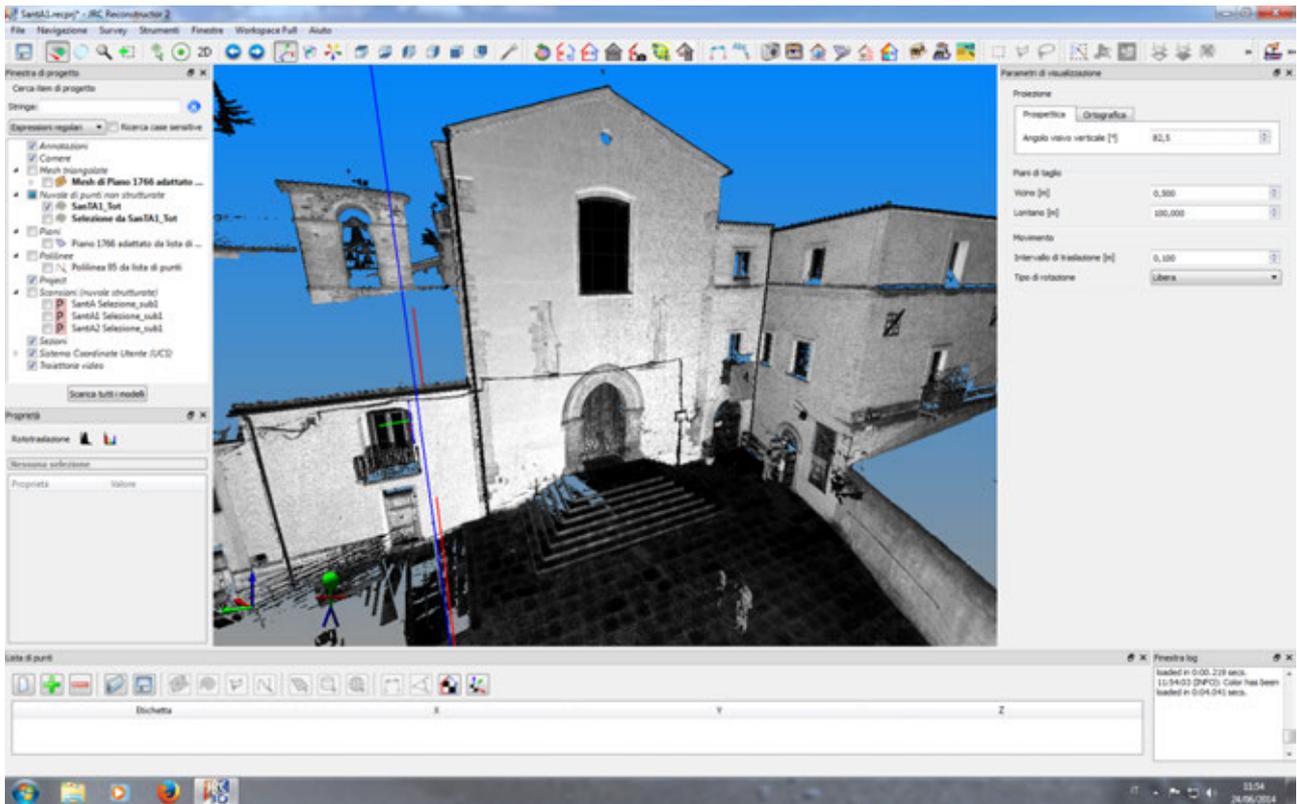


Figura 15. Interfaccia utente del software JRC Reconstructor® della Gexcel.

L'input del dato TLS può essere effettuato dall'interfaccia utente selezionando lo strumento TLS utilizzato, nel caso di Z+F è possibile anche importare il file di progetto. Dopo aver creato il progetto, si esegue la sequenza dei comandi: file, importa formato e scansione, poi si seleziona il tipo di dato (Figura 16).

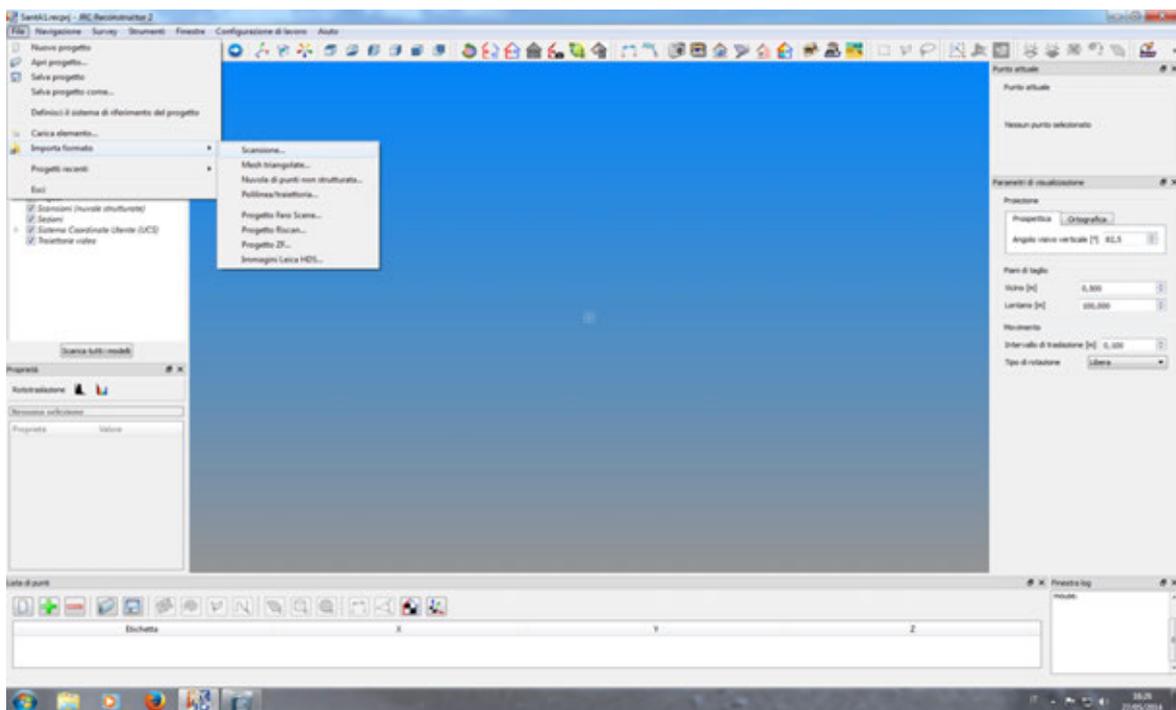


Figura 16. Procedura di importazione dei dati (JRC Reconstructor®).

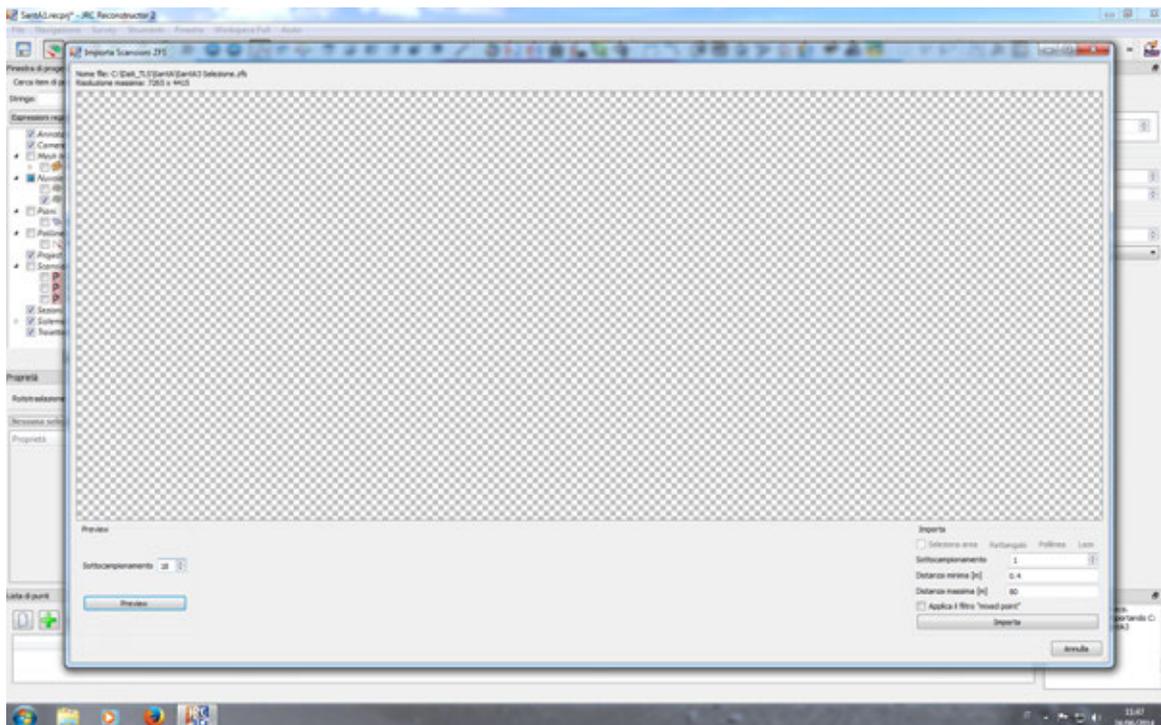


Figura 17. Menù di importazione del dato grezzo Z+F del pacchetto Reconstructor®.

Dalla schermata in **Figura 17** è possibile visualizzare il dato grezzo che si vuole importare premendo, in basso a sinistra, il tasto *preview* selezionando anche il valore della sottocampionatura per la visualizzazione. Sulla destra invece si possono impostare i valori per la decimazione del dato, e si può scegliere se applicare un filtro di “punti misti” (mixed point), per rimuovere i punti più vicino ai bordi.

3.5 Filtraggio

Il filtraggio del dato TLS consente di eliminare dati fuori tolleranza o non significativi presenti nelle nuvole di punti che derivano dalle prese effettuate con i Laser Scanner. In prima approssimazione i filtri agiscono sul valore della riflettanza, tuttavia esistono innumerevoli algoritmi che consentono di eliminare i dati in maniera selettiva e automatica. In particolare, esistono algoritmi automatici implementati nei pacchetti di analisi del dato laser scanner, che consentono il filtraggio dei dati durante la fase di pre-processamento, nel caso del software JRC Reconstructor® della Gexcel oggetto di questo rapporto queste operazioni si effettuano ad esempio con l’ausilio dei ben noti filtri mediani, filtri mixed point e filtri distanza-riflettività [JRC 3D Reconstructor® – Operation manual]. Il filtro mixed point serve per eliminare i punti difettosi allineati lungo la direzione del raggio laser (per esempio i punti vicini ai bordi, o punti mirati con angolo di inclinazione troppo grande, o punti derivanti da riflessi del laser). Il filtro mediano serve essenzialmente per lisciare la nuvola di punti dal rumore locale di rugosità. Il filtro distanza-riflettività serve per rimuovere i punti caratterizzati da valori di distanza troppo elevati o di riflettività troppo bassa.

Infine, esiste la possibilità per l’operatore di selezionare i punti indesiderati mediante *box* rettangolari o poligonali ed eliminarli manualmente.

Per il pacchetto Reconstructor® la procedura di pre-filtraggio consente di eliminare buona parte del rumore che affligge i dati Z+F, la sequenza dei comandi è: dalla selezione delle scansioni strutturate dall’area dati in alto a sinistra, con il tasto destro del mouse, dalla tendina corrispondente selezionare: *Filtering&Clustering* e pre-processamento scansioni (**Figura 18**).

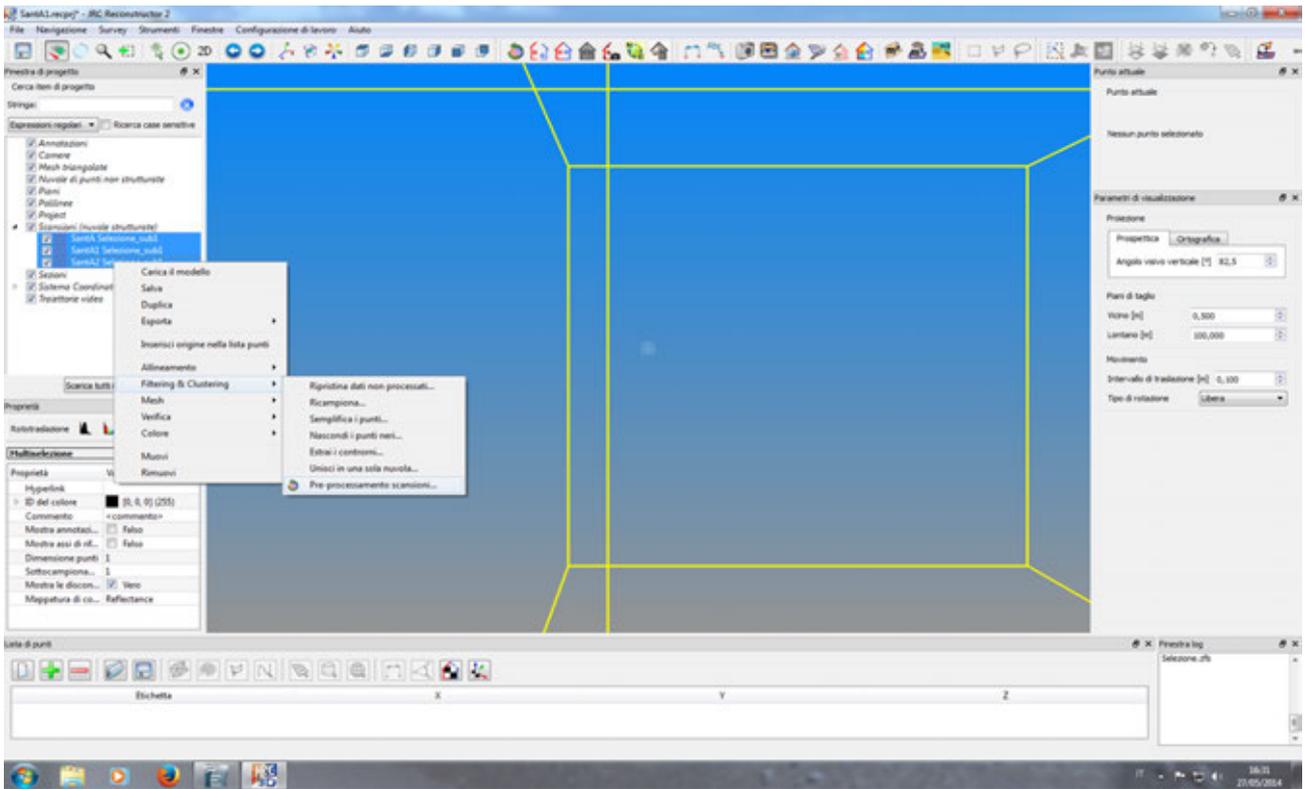


Figura 18. Procedura di pre-filtraggio scansioni.

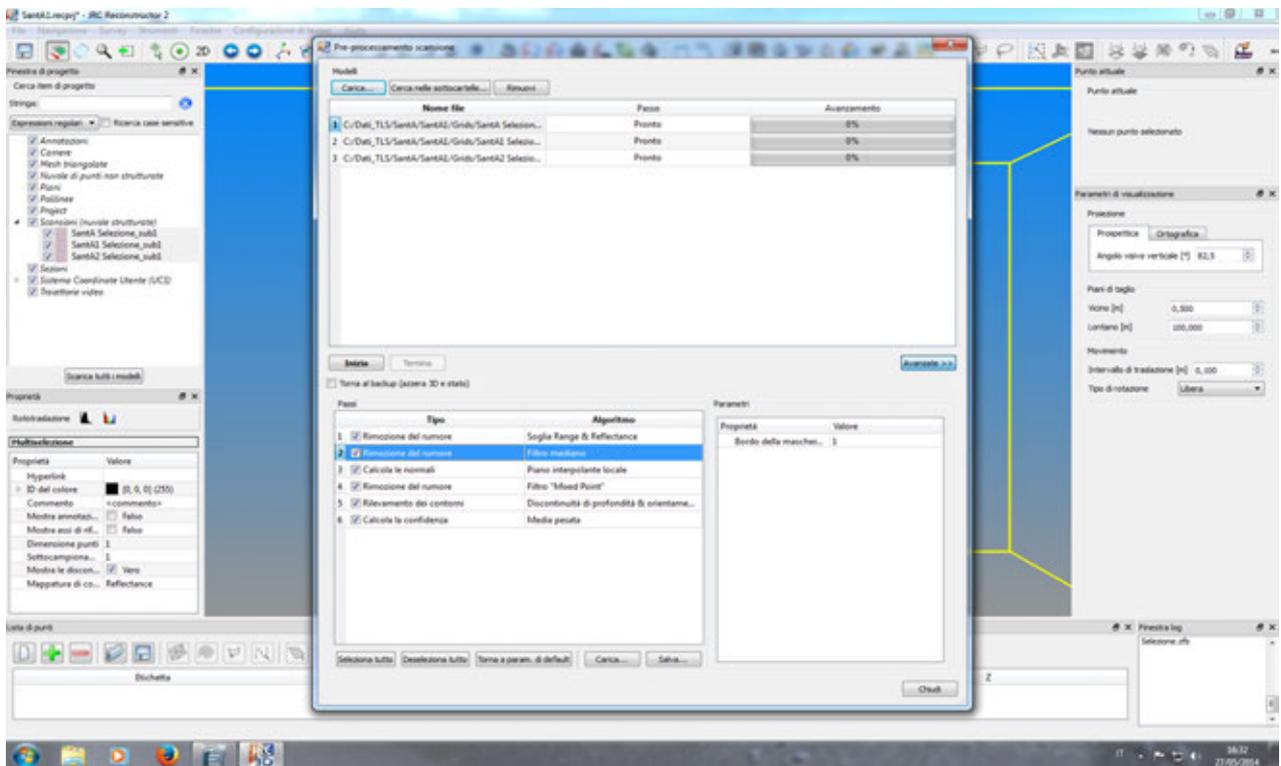


Figura 19. Opzioni del Menù di pre-filtraggio di Reconstructor®.

Il corrispondente menù di pre-filtraggio del programma consente di selezionare le opzioni avanzate dei filtri del pacchetto (**Figura 19**).

Gli algoritmi che vengono richiamati durante l'opzione di filtraggio utilizzano parallelamente tutte le CPU del core e le memorie RAM, questo consente una riduzione dei tempi di calcolo.

3.6 Registrazione

Generalmente la sequenza corretta per la registrazione delle scansioni ottenute con l'acquisizione da più punti scansione o stazioni in un rilievo di un oggetto dalle forme complesse come un edificio od un complesso monumentale consiste nell'effettuare una prima operazione di roto-traslazione con stima approssimata dei parametri mediante la selezione manuale di punti omologhi ossia target naturali sulle scansioni oppure, nel caso siano stati introdotti, la scelta manuale di target artificiali piani o solidi. In questa operazione il software è dotato di *facility* molto performanti. In un secondo tempo una volta che l'operazione di pre-registrazione è andata a buon fine si applicano algoritmi di allineamento globale delle scansioni, basati sul metodo **ITERATIVE CLOSEST POINT (ICP)** [Besl & Mckay, 1992].

La sequenza dei comandi del pacchetto sarà: selezione delle scansioni da allineare, strumenti, pre-allineamento (**Figura 20**).

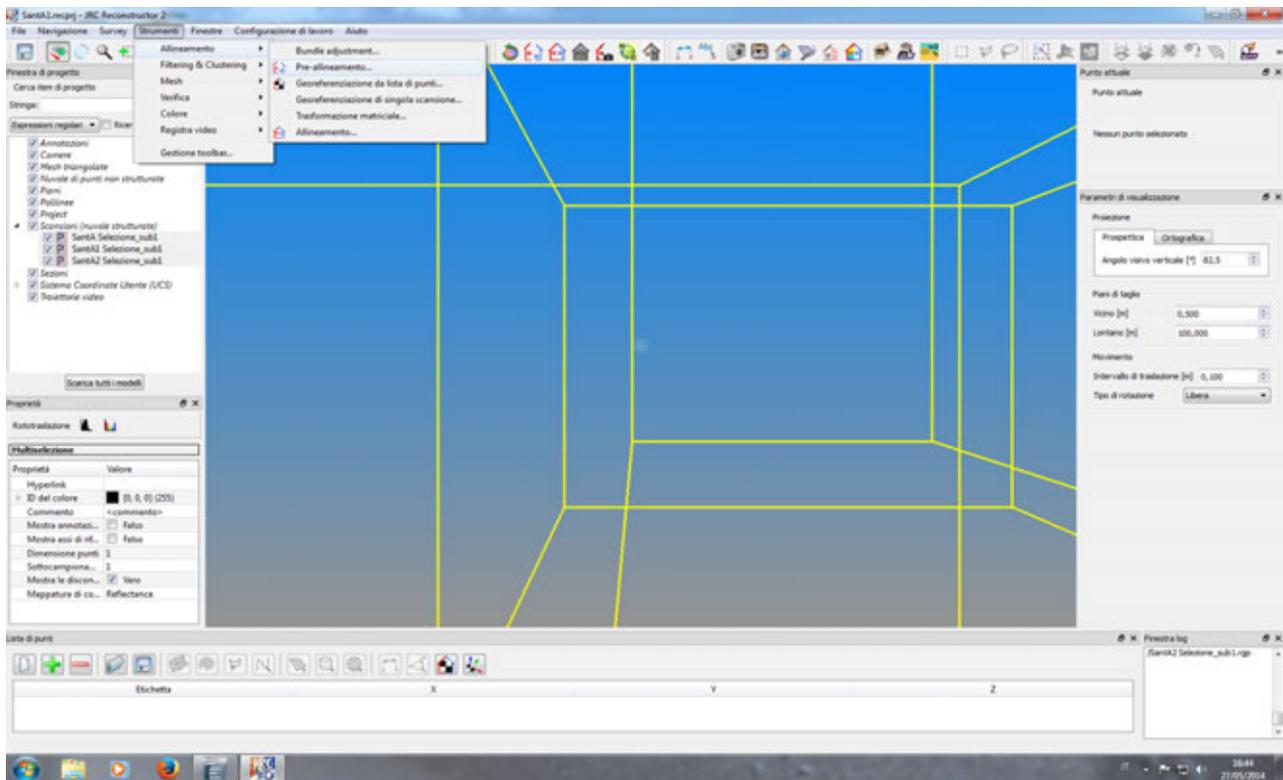


Figura 20. Procedura di attivazione del menu di pre-allineamento.

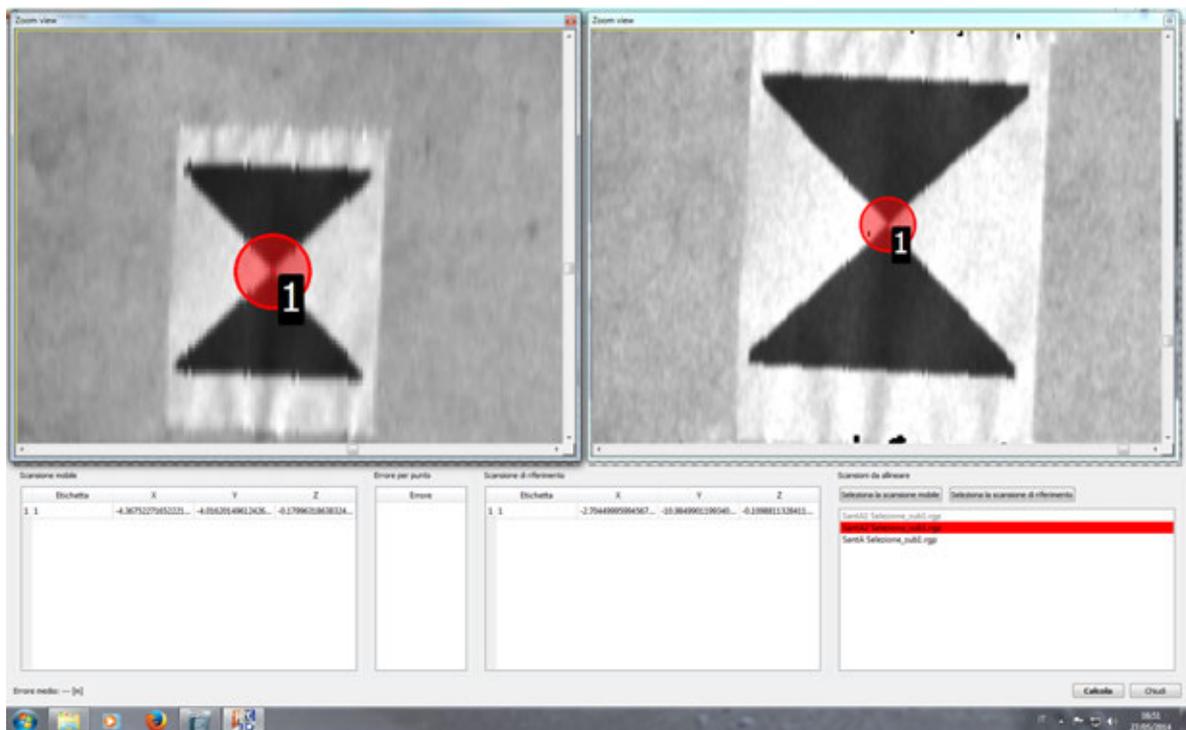


Figura 21. Scelta del primo punto omologo.

L'ambiente consente la selezione in maniera interattiva di un insieme di punti omologhi (almeno 3), tra coppie di scansioni, necessari alla determinazione dei parametri di roto-traslazione (Figura 21).

Al termine della scelta dei punti omologhi sulle scansioni da allineare è possibile calcolare i parametri di roto-traslazione ed applicare la trasformazione di allineamento fra le due scansioni in esame. Alla fine del processo le nuvole selezionate per il pre-allineamento dovranno sovrapporsi.

A questo punto mediante la sequenza di comandi: strumenti, allineamento, si apre un menù nel quale si deve scegliere una o più scansioni di riferimento e si avvia la procedura di registrazione (Figura 22).

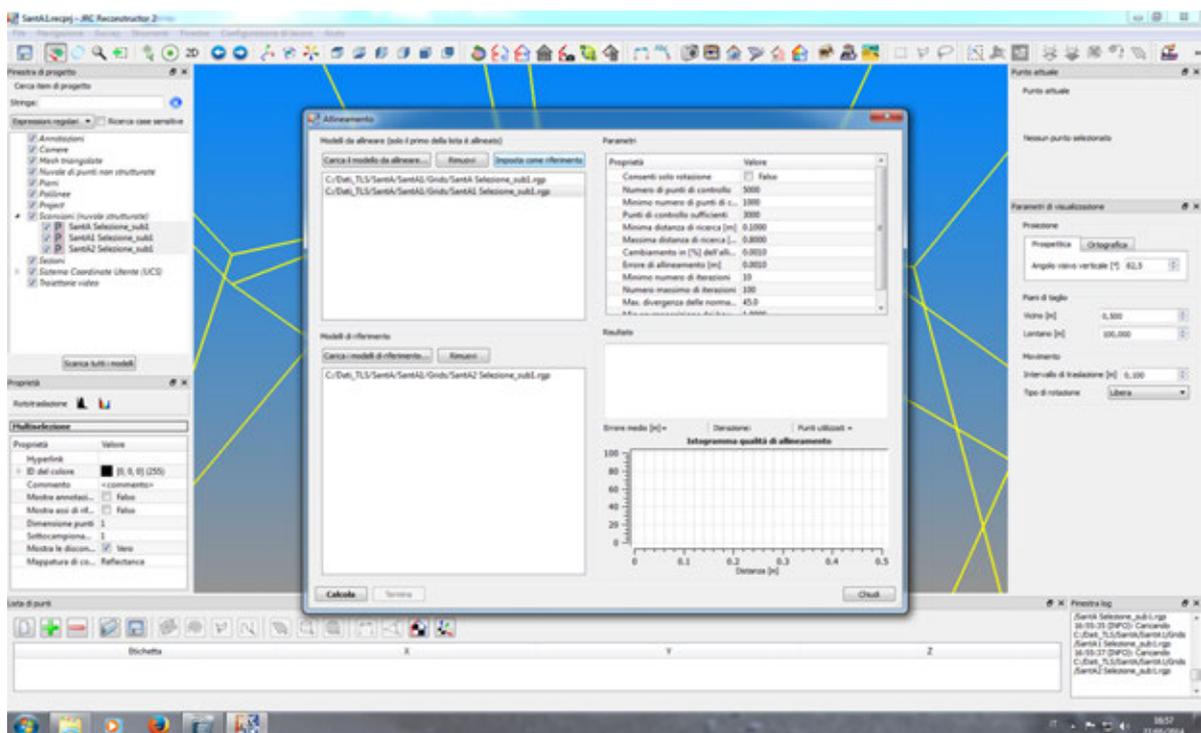


Figura 22. Procedura di Registrazione in fase di esecuzione.

Questa sequenza è indicata in letteratura come ottimale per la registrazione di più nuvole strutturate derivanti da più scansioni su differenti punti stazione. Si noti che nello stesso punto di presa è possibile acquisire più scansioni anche con differenti risoluzioni spaziali; se lo strumento non viene spostato tutte le scansioni sono definite nello stesso IRS [Vassena et al., 2007].

3.7 Aggregazione ed esportazione

Al termine della procedura di Allineamento fine o Registrazione la stima dei parametri delle roto-traslazioni viene perfezionata fino alla miglior sovrapposizione delle nuvole di punti in esame. Di seguito è possibile aggregare le nuvole di punti registrate in un'unica nuvola di punti non strutturata, tramite la sequenza di comandi: *Filtering&Clustering*, Unisci in una sola nuvola (**Figura 23**).

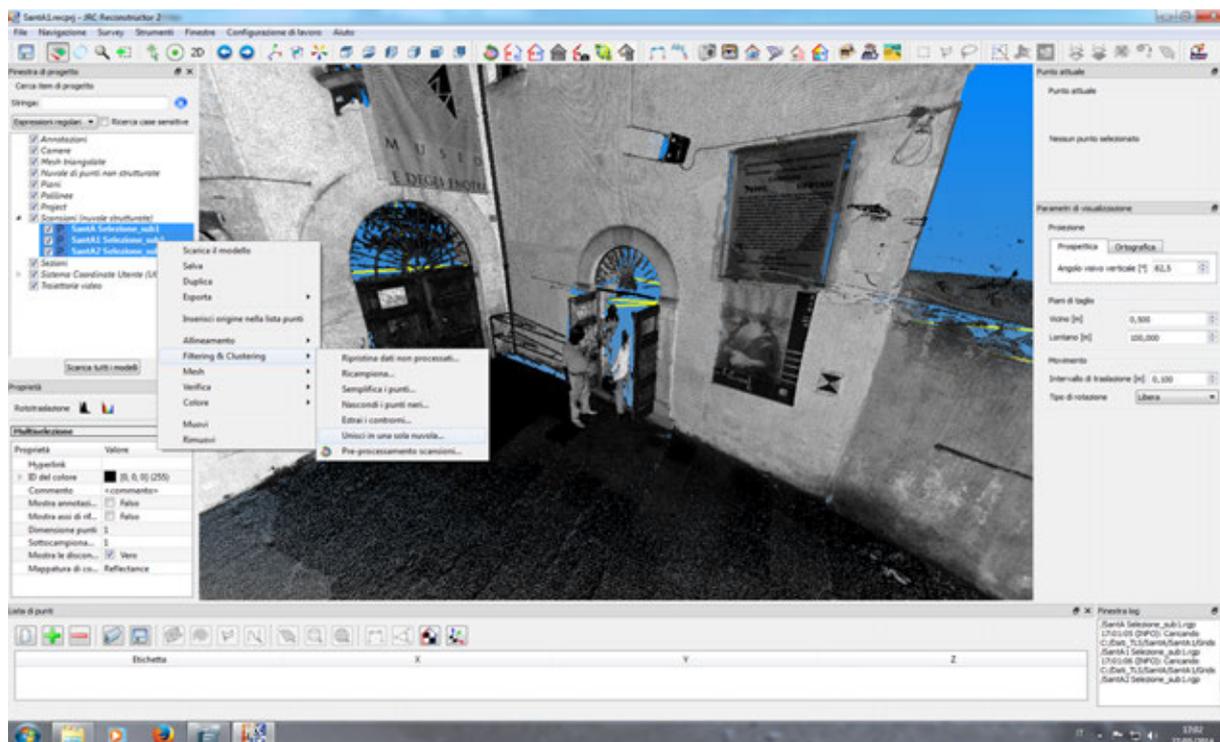


Figura 23. Unione di più nuvole strutturate in una sola nuvola non strutturata.

La creazione di una nuvola non strutturata per aggregazione di più scansioni a seguito del processo di registrazione fine consente l'esportazione in formati di scambio standard per il dato laser come: E57, LAS, PLY eccetera. A seguito di questo procedimento il modello 3D può essere esportato, trasmesso, importato in programmi gratuiti per successive elaborazioni o per semplice visualizzazione.

3.8 Procedura di Ispezione

Le procedure cosiddette d'ispezione sono uno dei punti di forza del pacchetto JRC 3DReconstructor® della Gexcel®. Ad esempio, è possibile selezionare un'area di una nuvola di punti non strutturata derivante dall'aggregazione di più nuvole strutturate precedentemente sottoposte ad allineamento fine come indicato in precedenza. Ma anche selezionare parti di nuvole strutturate per esempio attivando la modalità di selezione di punti mediante una polilinea precedentemente creata dalla selezione manuale di punti sulla scena. La sequenza di comandi sarà (**Figura 24**): *Survey*, Strumenti di Selezione, Selezione di punti con polilinea.

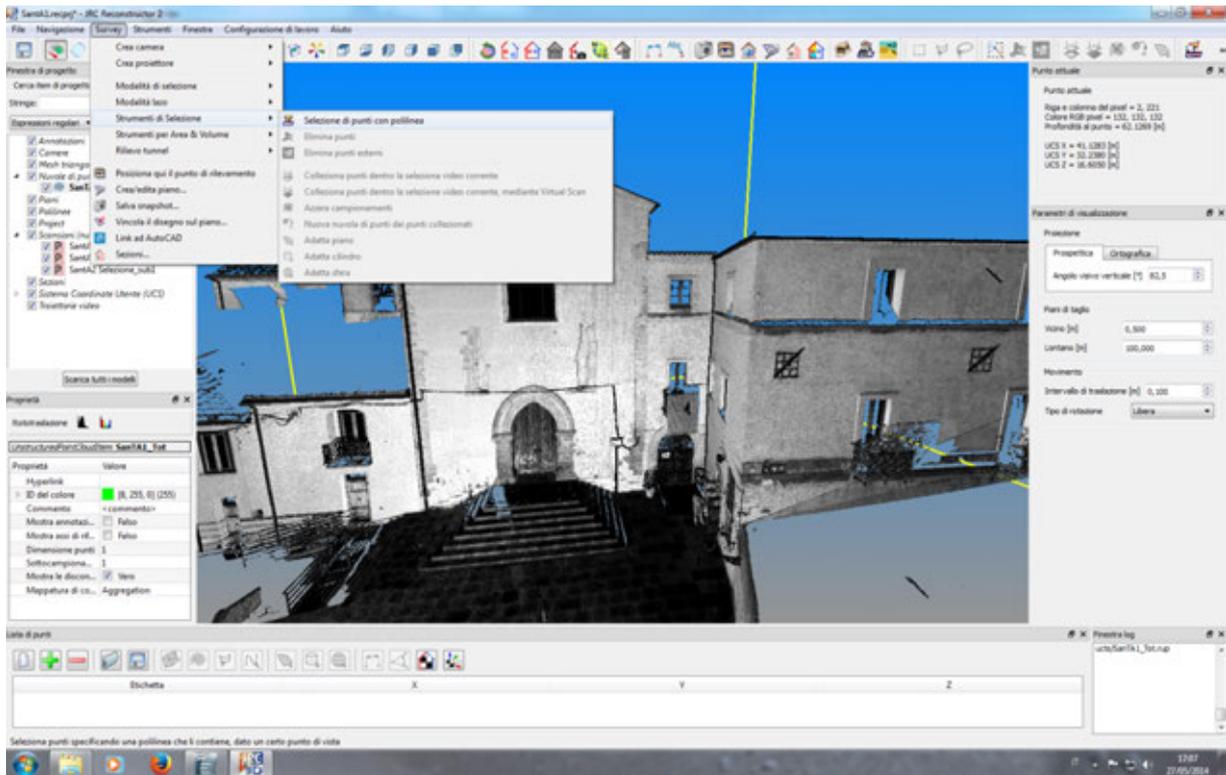


Figura 24. Modalità di selezione di punti mediante polilinea.

Una volta effettuata la selezione della parte di nuvola da studiare è possibile ripulirla da eventuali punti esterni all'area interessata (Figura 25).

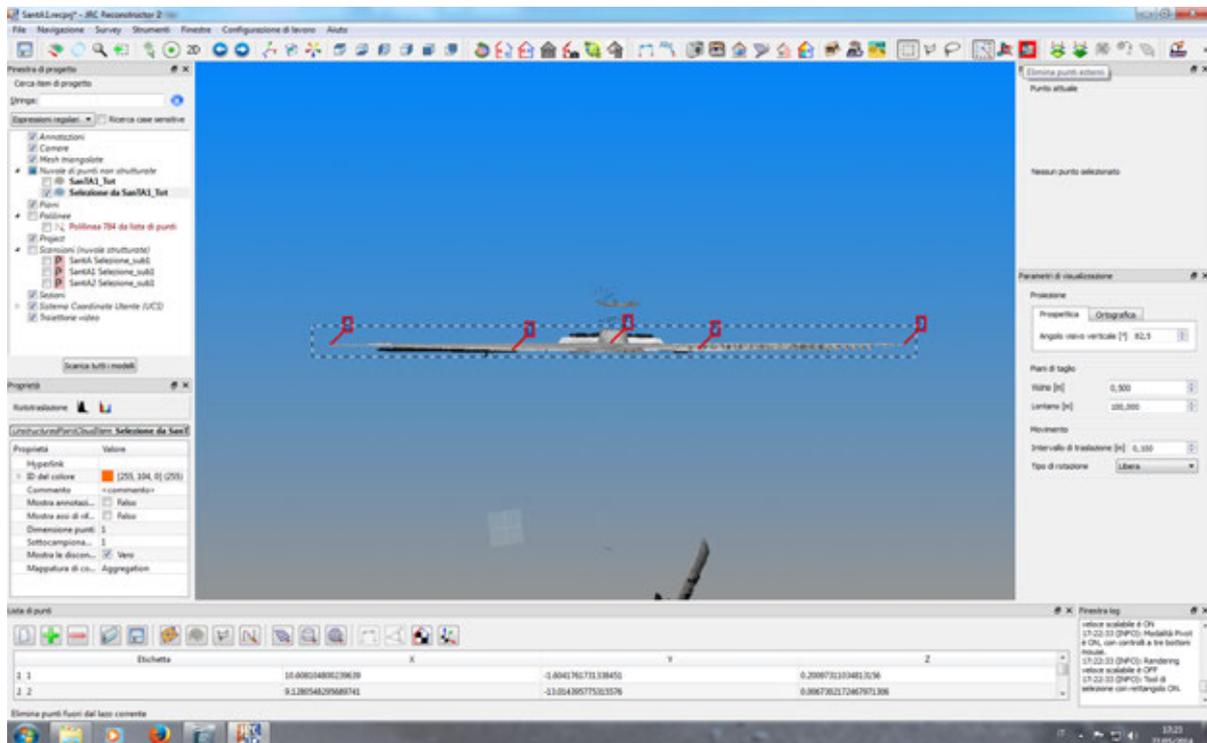


Figura 25. Con la barra spaziatrice si attiva un box rettangolare di selezione punti da rimuovere.

A questo punto si può procedere con la procedura di verifica, selezionando la sequenza di comandi: Verifica, Ispezione (Figura 26 e Figura 27).

Il menù d'ispezione richiede la selezione di una nuvola da analizzare e un modello di riferimento, come la *mesh* del piano di *fit* precedentemente ottenuta.

Inoltre è possibile scegliere fra 4 opzioni la convenzione da adottare nel calcolo e nella rappresentazione del residuo. Di fatto questa procedura fornisce le anomalie o residui della parte di nuvola analizzata rispetto a un piano di *fit* o una sfera o un cilindro.

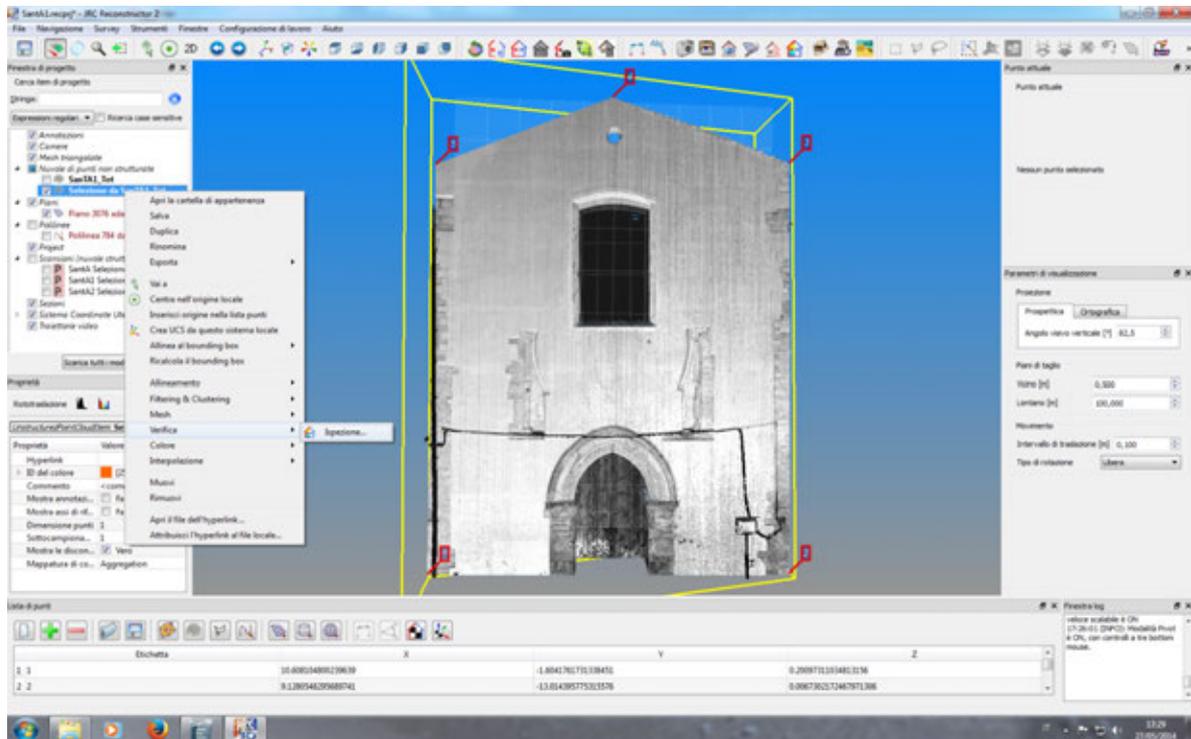


Figura 26. Attivazione della procedura d'ispezione in JRC 3D Reconstructor®.

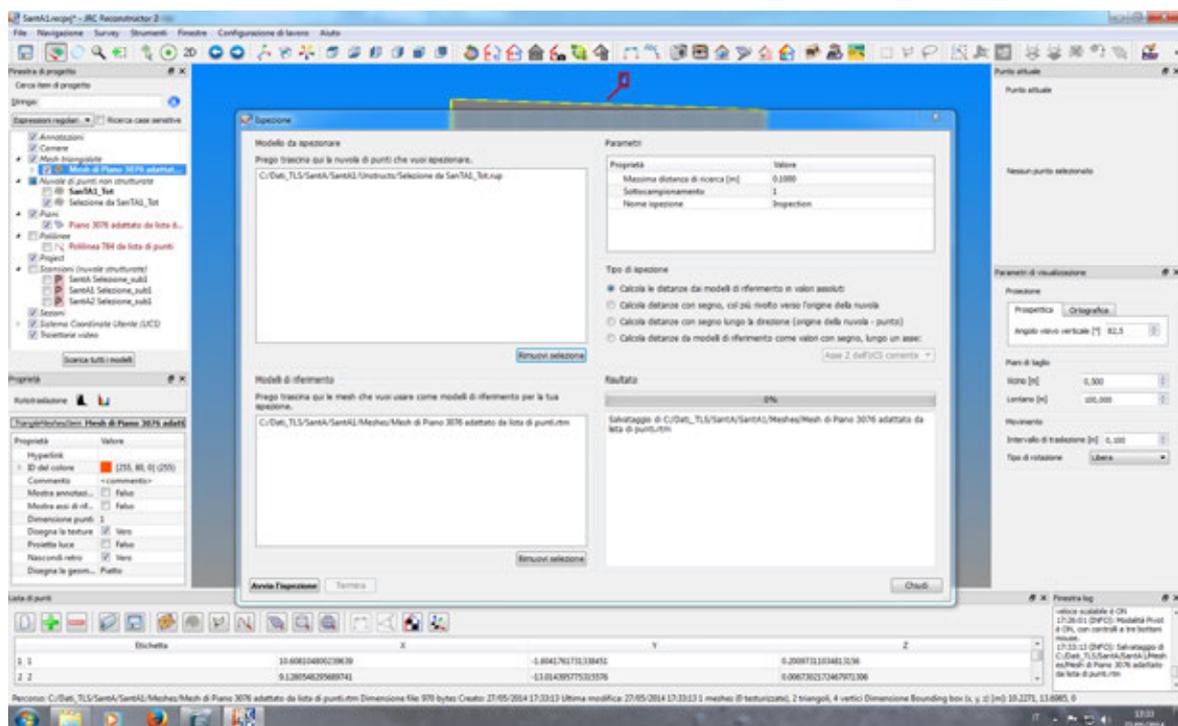


Figura 27. Procedura di Ispezione di parti di nuvole di punti.

Il risultato finale consente di studiare le irregolarità morfologiche di elementi strutturali di edifici e di confrontarle con altre tecniche d'indagine non distruttive come la termografia ad infrarossi o gli ultrasuoni (Figura 28).

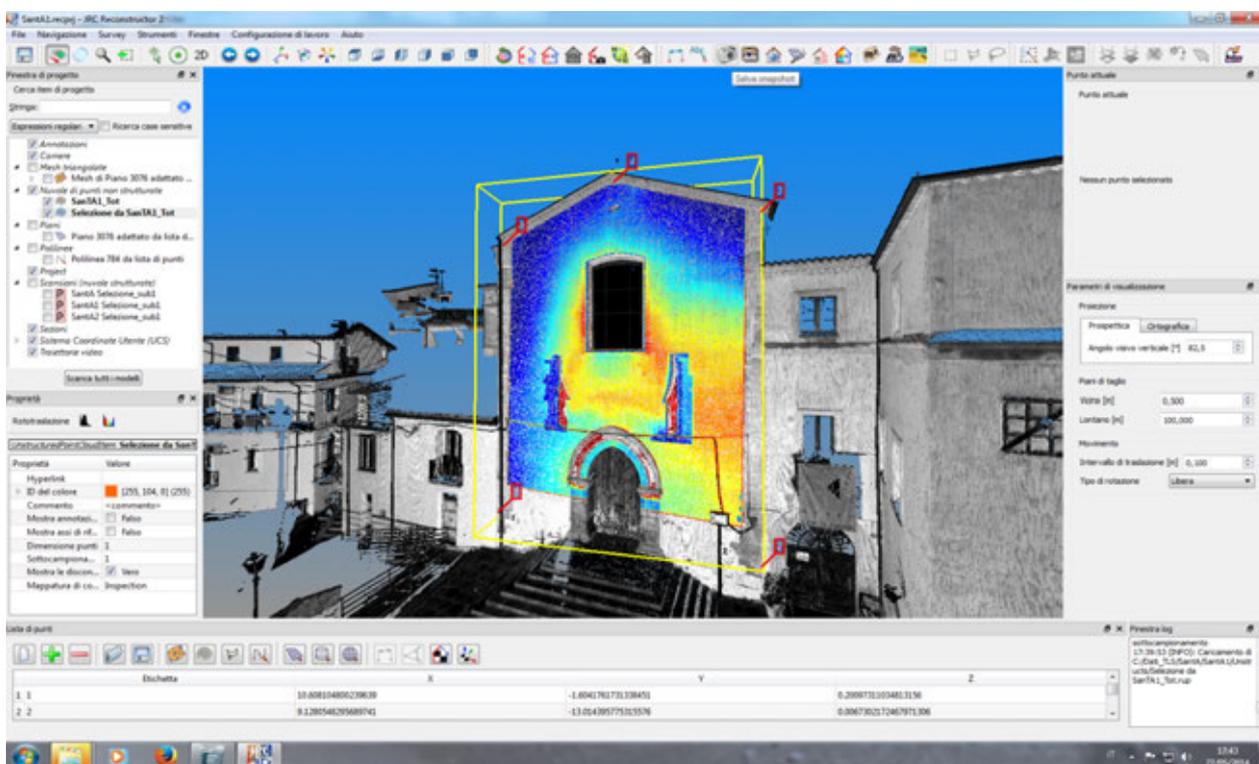


Figura 28. Sovrapposizione dell'ispezione della facciata della chiesa di Sant'Agostino a Cosenza sulla nuvola aggregata.

3.9 Calibrazione manuale delle immagini

La calibrazione manuale delle immagini, serve a spalmare su una nuvola di punti, una qualsiasi immagine acquisita (foto, immagini termografiche). Il processo è abbastanza semplice si tratta di individuare un numero minimo di punti omologhi tra l'immagine e la nuvola di punti interessata.

Come prima operazione individueremo, dalla schermata iniziale, il comando per la calibrazione selezionando la sequenza di comandi: Strumenti, Colore, Calibrazione camera usando una nuvola strutturata (Figura 29).

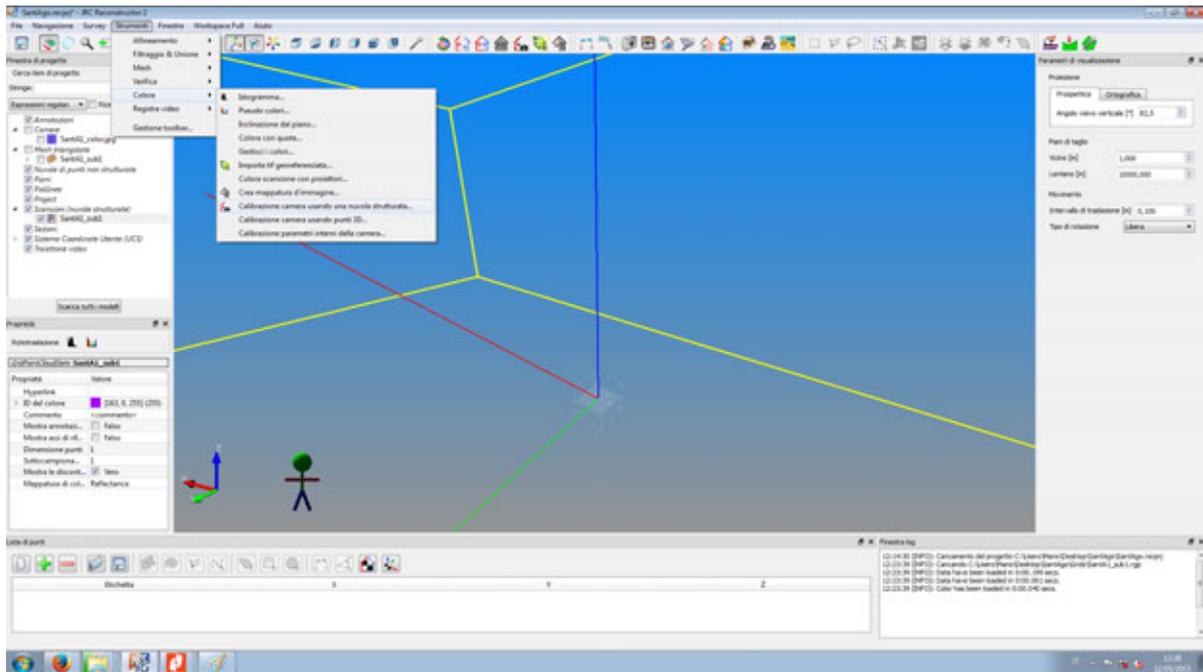


Figura 29. Procedura di attivazione calibrazione in JRC 3D Reconstructor®.

Una volta attivata la procedura si aprirà una nuova finestra, dove dopo aver caricato la nuvola di punti e l'immagine selezionata, in questo caso un'immagine termografica, in modo del tutto analogo alla pre-registrazione, si andranno a ricercare i punti omologhi tra l'immagine e la nuvola di punti interessata (**Figura 30**, **Figura 31** e **Figura 32**).

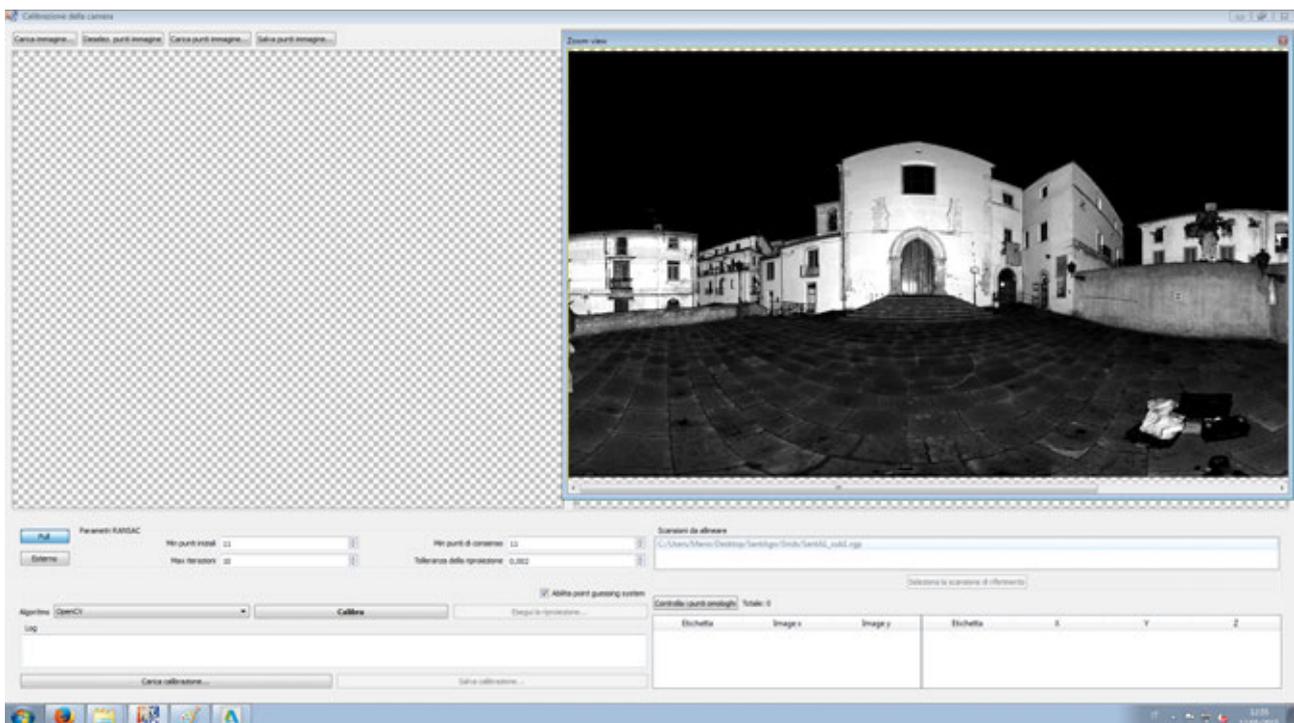


Figura 30. Caricamento nuvola di punti.

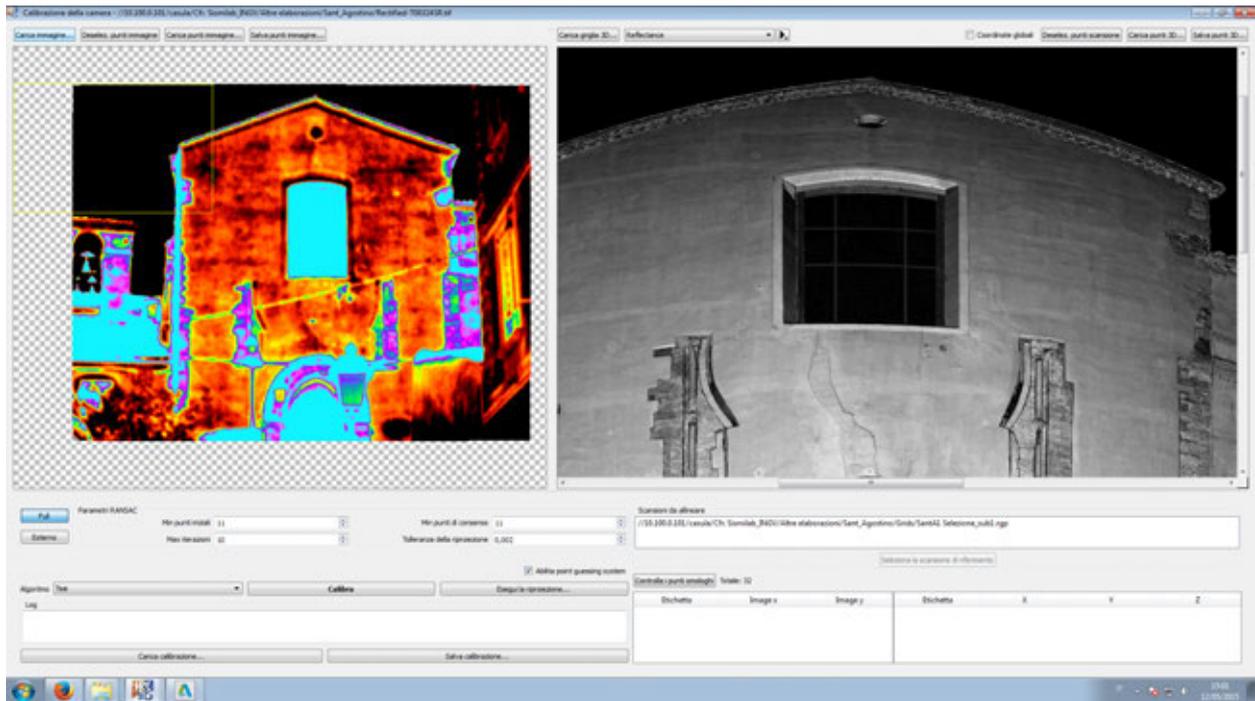


Figura 31. Caricamento immagine termografica.

L'individuazione dei punti omologhi è effettuata selezionando con il mouse un "punto" ritenuto tale sia sulla nuvola di punti sia sull'immagine scelta e secondo l'algoritmo RANSAC¹, o del tipo di algoritmo scelto per la calibrazione, dovremmo individuare un numero minimo di punti omologhi che varia tra i 4 e gli 11. Naturalmente più sono i punti selezionati, maggiore sarà l'accuratezza e la precisione del processo di sovrapposizione.

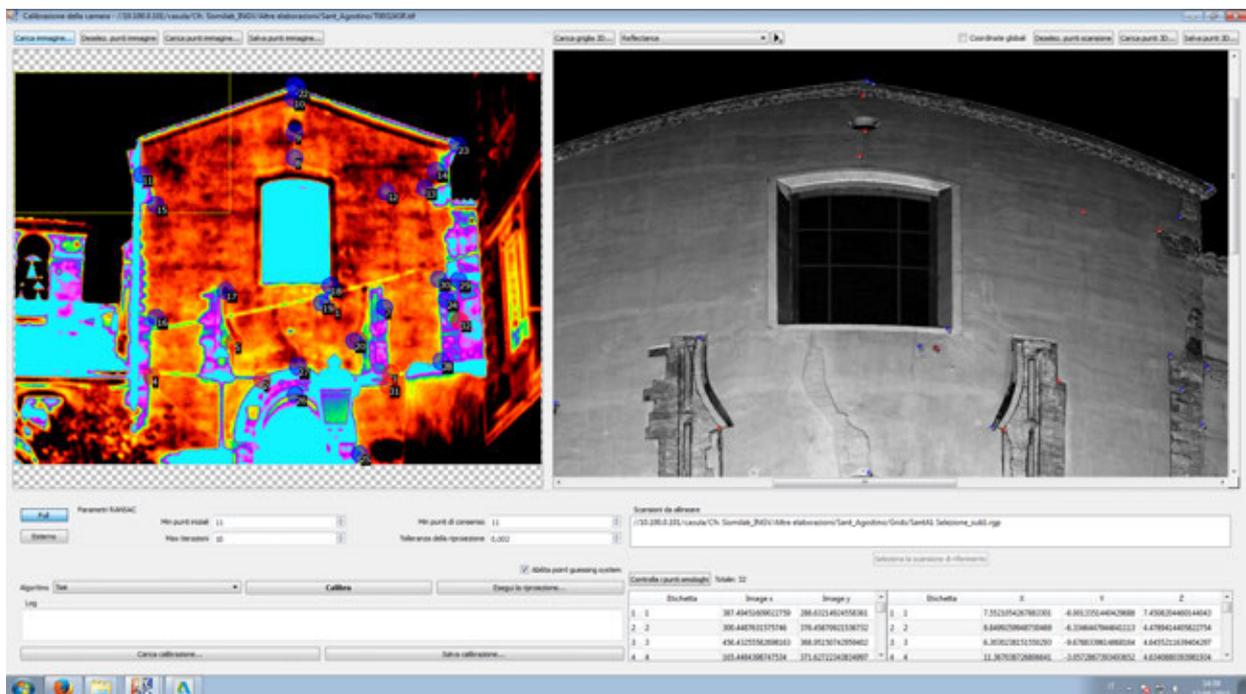


Figura 32. Selezione punti omologhi.

¹ "Random SAmple Consensus". Metodo iterativo per la stima dei parametri di un modello matematico a partire da un insieme di dati.

Cliccando su tasto calibra si completa la procedura (**Figura 33**).

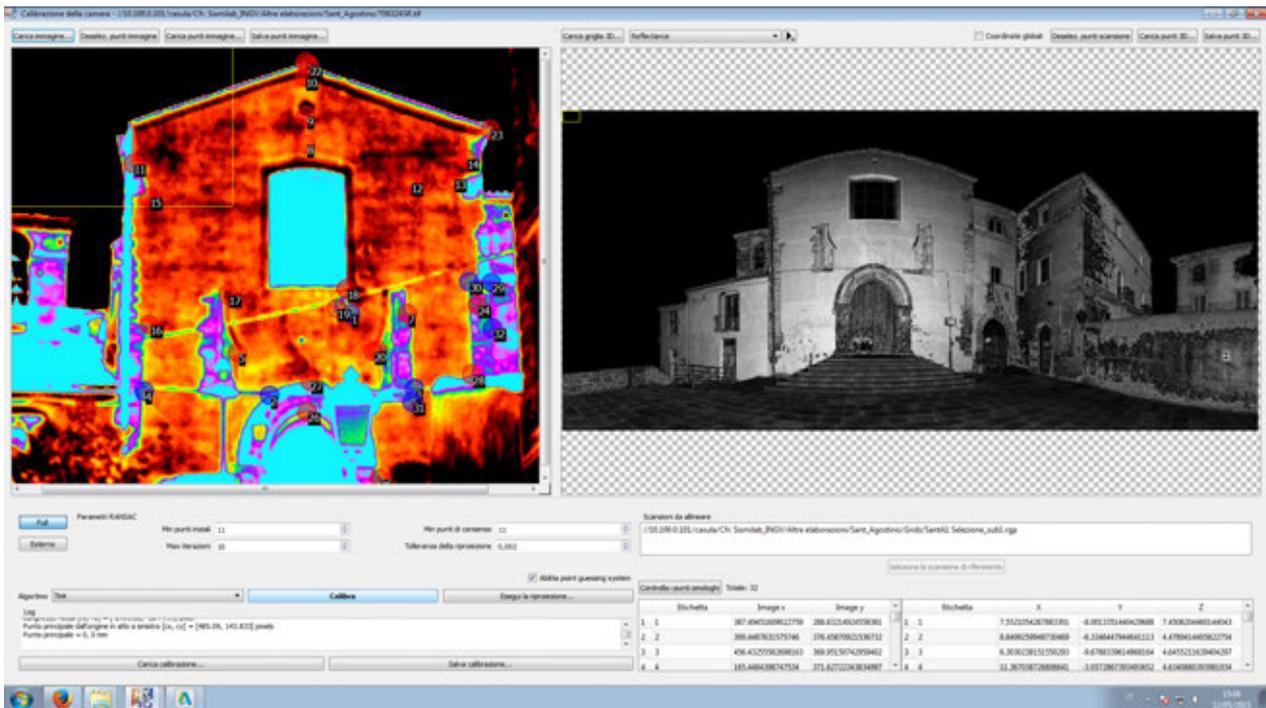


Figura 33. Calibrazione.

Il risultato finale, creerà un proiettore che “acceso” spalmerà sulla nuvola di punti, l’immagine che abbiamo calibrato (**Figura 34**).

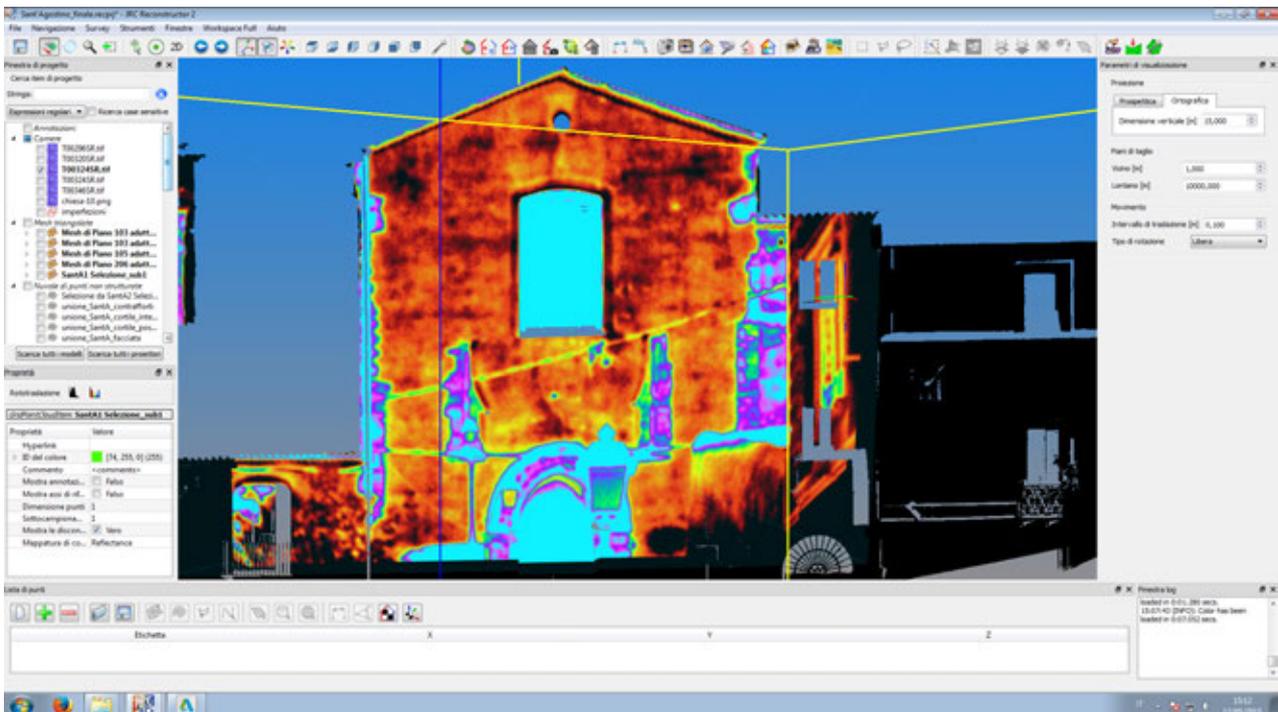


Figura 34. Sovrapposizione dell’immagine sulla nuvola di punti.

3.10 Triangolazione o *Meshing*

Il *meshing* è quell'operazione finalizzata alla suddivisione di un insieme di punti 3D in una superficie fatta da elementi che possono essere triangoli o poligoni regolari, costituiti da vertici equidistanti, oppure triangoli o poligoni irregolari e quindi i corrispondenti vertici non saranno equidistanti fra di loro. Anche nell'ambito del pacchetto JRC 3D Reconstructor®, l'algoritmo maggiormente utilizzato per il *meshing* delle nuvole di punti è quello di Delaunay. Nel caso di misure ambientali per la creazione di modelli digitali del terreno (DEM) il *meshing* è realizzato con determinati accorgimenti, finalizzati a ridurre i tempi e la mole del calcolo in base al tempo macchina disponibile e per passaggio attraverso la creazione di una TIN (Triangulated Irregular Network) [Casula et al., 2010].

Lo scopo della trasformazione di nuvole di punti strutturate o non strutturate in modelli a mesh è molteplice come: la riduzione della mole dei dati, la riduzione di una nuvola formata da punti non connessi tra di loro ad elementi connessi e continui, cioè la creazione di superfici [Vassena et al., 2007].

L'operazione di triangolazione può venire effettuata su nuvole di punti strutturate che poi possono subire un processo di aggregazione oppure su nuvole di punti non strutturate derivanti da procedure di registrazione e aggregazione.

I modelli a *mesh* possono a loro volta essere esportati in ambiente AutoCAD® per la successiva utilizzazione in ambito ingegneristico e architettonico.

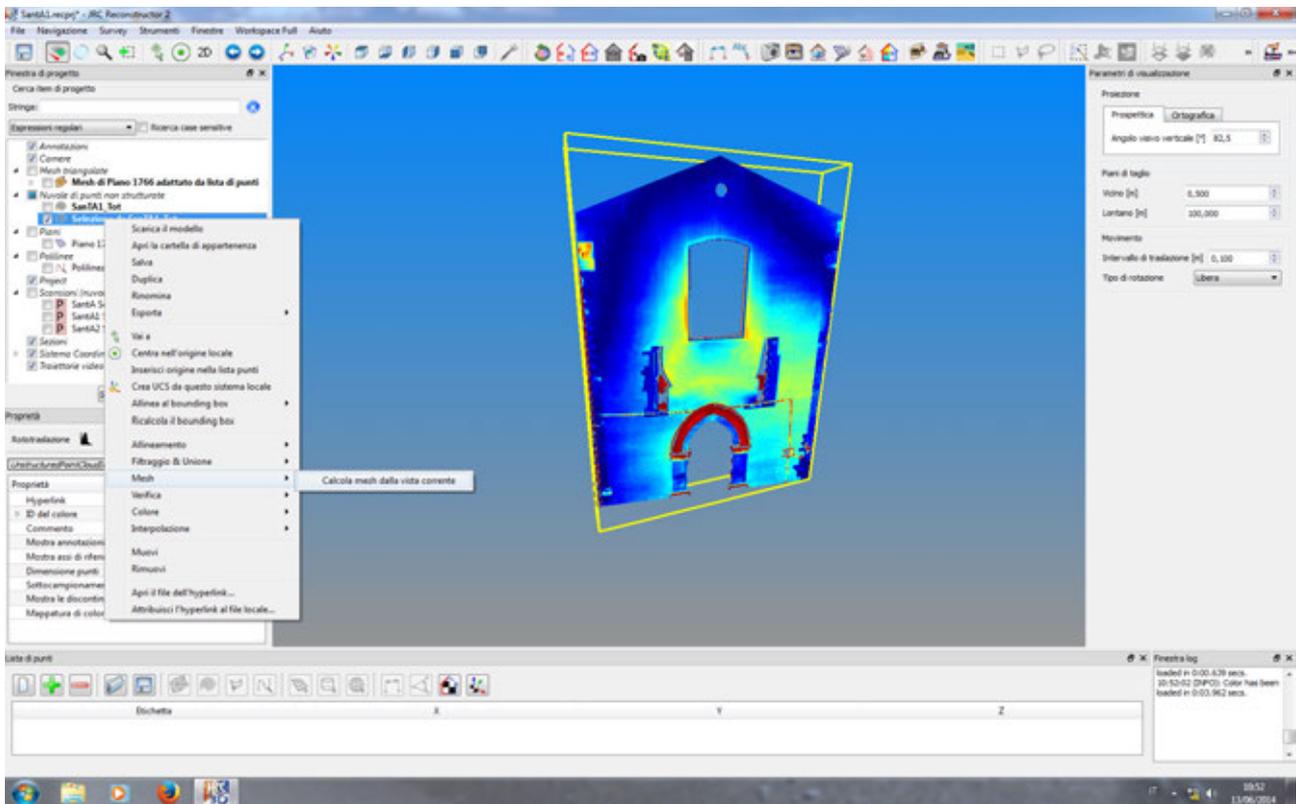


Figura 35. Attivazione del procedimento di *mesh* in ambiente JRC 3DReconstructor®.

Dall'area file in alto a sinistra in **Figura 35** con il tasto destro del mouse dalla tendina selezionare *Mesh*, *Calcola Mesh* dalla vista corrente. Oppure dalla barra degli oggetti in alto selezionare l'icona corrispondente.

Conclusioni

In seguito agli ultimi sviluppi tecnologici nel settore è oggi possibile l'acquisizione di diverse decine di milioni di punti relativi ad edifici di forma articolata e complessa come il complesso museale di Sant'Agostino a Cosenza (**vedi Figure 15-23**).

La restituzione del dato derivante da rilievi anche speditivi può essere effettuata in pochi giorni di lavoro con i moderni *software* atti alla restituzione del dato TLS. In particolare fra questi gli autori hanno scelto il pacchetto JRC 3D Reconstructor® della ditta Gexcel di Brescia. Tale ambiente consente l'analisi in maniera grafica interattiva del dato TLS derivante fra i vari standard strumentali anche dallo strumento Z+F 5010c Imager®, in dotazione alla sede di Cosenza dell'INGV nell'ambito del progetto PON MASSIMO.

Mediante il predetto pacchetto software è stato possibile implementare delle procedure di verifica della morfologia di complessi monumentali come quello descritto in precedenza, finalizzate alla creazione di test non distruttivi per la diagnostica strutturale.

La validazione delle mappe di anomalie morfologiche è realizzata, mediante confronti fra varie tecniche NDT applicate sui medesimi elementi di edifici come muri, colonne, solai e pilastri portanti, alla luce del fatto che spesso le stesse possono derivare da interventi antropici, soprattutto nei complessi monumentali antichi [Casula et al., 2009].

Ringraziamenti

Si ringrazia la Dottoressa Cerzoso direttrice del museo dei Brettii e degli Enotri a Cosenza per l'assistenza fornita durante i rilievi nell'area museale.

Gli autori desiderano ringraziare tutti i ricercatori e tecnici coinvolti nei lavori del progetto PON01-02710 *MASSIMO-Monitoraggio in Area Sismica di Sistemi Monumentali* per il supporto fornito.

Il presente lavoro è stato finanziato dal Ministero dell'Università, dell'Istruzione e della Ricerca (MIUR) nell'ambito del progetto di ricerca PON01-02710 *MASSIMO-Monitoraggio in Area Sismica di Sistemi Monumentali*.

Bibliografia

- Abmayr T., Härtl F., Reinköster M., Fröhlich C., (2005). *Terrestrial laser scanning – applications in cultural heritage conservation and civil engineering*. ISPRS Archives - Vol. XXXVI - 5/W17, 2005. TS3 Laser Scanner Application, pag. 1-6. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-W17>
- Alba M., Giussani A., Roncoroni F., Scaioni M., Valgoi P., (2006). *Geometric Modelling of a Large Dam by Terrestrial Laser Scanning*. In Proc. of XXIII FIG Congress, Munich (Germany), 8-13 Ott, pp.15.
- Alba M., Fregonese L., Giussani A., Prandi F., Roncoroni F., Savi C., Scaioni M., Valgoi P., (2006). *Monitoraggio strutturale di una grande diga mediante Laser Scanning Terrestre*. In: Atti della 10a Conferenza Nazionale delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali, Bolzano, pp. 6.
- Bauer A., Paar G., Kaufmann V. (2003). *Terrestrial laser scanning for rock glacier monitoring*. Phillips M., Springman S.M. & Arenson L.U. (eds.) Proceedings of the 8th International Permafrost Conference, Zürich, 55-60.
- Bauer A.K., Pirklbauer A., Avian M., Kaufmann V., (2005). *Five years of monitoring the front slope of the highly active Hinteres Langtal rock glacier using terrestrial laser scanning: A case study in the Central Alps, Austria*. Terra Nostra, 2nd European Conference on Permafrost, Potsdam, 91.
- Besl P.J., and McKay N.D., (1992). *A Method for Registration of 3d-Shapes*. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. VOL. 14, NUM. 2, February 1992.
- Bornaz L., (Novembre 2004). *I sistemi a scansione laser*. Udine, 24-26.
- Casula G., Mora P., and Bianchi M., (2010). *Detection of Terrain Morphologic Features Using GPS, TLS, and Land Surveys: "Tana della Volpe" Blind Valley Case Study*. J. Surv. Eng., 136(3), 132–138.
- Casula G., Fais S., and Ligas P., (2009). *Experimental Application of 3-D Terrestrial Laser Scanner and Acoustic Techniques in assessing the quality of stones used in monumental structures*. Int. J. Microstructure and Materials Properties, Vol. 4, No. 1, Pag. 45-56.

- Casula G., Fais S., Bianchi M.G., Cuccuru F., Ligas P., (2015). *Integration of terrestrial laser scanner, ultrasonic and petrographical data in the diagnostic process on stone building materials*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-1708, EGU General Assembly 2015.
- Costanzo A., Minasi M., Casula G., Musacchio M., Buongiorno M.F., (2015). *Combined Use of Terrestrial Laser Scanning and IR Thermography Applied to a Historical Building*. Sensors, 15, 194-213.
- Dogliani F., (1997). *Stratigrafia e Restauro - Tra conoscenza e conservazione dell'architettura*. Ed. LINT, Trieste, pp. 312.
- Fantini G., *Morfometria della Grotta dell'Orso (Ponte di Veja, Monti Lessini) mediante laser scanner*. Anno Accademico 2014-2015. Scuola di Scienze, Corso di Laurea in Scienze Geologiche. Pag 1-27.
- Girelli V.A., (2007). *Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali*. Università di Bologna Alma Mater Studiorum, DISTART, Dottorato di ricerca in SCIENZE GEODETICHE E TOPOGRAFICHE, IX ciclo, pag. 1-203.
- Manuale di termografia su edifici, © Copyright 2011, FLIR Systems, pag. 1-67.
- Micheletti N., (2014). *The potential of the latest developments in terrestrial laser scanning technologies for monitoring and investigating periglacial and glacial processes in Alpine environments*. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. p. 2591.
- Paoletti D., Ambrosini D., Sfarra S., Bisegna F., (2013). *Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation*. J. Cult. Hrit.14, 116–121.
- Pesci A., Casula G., Bonali E., and Boschi E., (2011). *Un metodo per lo studio di edifici storici mediante laser a scansione terrestre: le due torri di Bologna*. Rapporti Tecnici INGV, n. 178. Pag. 1-23.
- Pesci A., Teza G., Bonali E., Casula G., Boschi E., (2013). *A laser scanning-based method for fast estimation of seismic-induced building deformations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 79 185–198.
- Pesci A., Casula G., Bonali E., Boschi E., (2011). *Il laser scanner Optech ILRIS LR: nuove specifiche per applicazioni su lunga distanza*. Rapporti Tecnici INGV, n. 194, pag. 1-14.
- Rinaudo F., Guarnieri A., Vettore A., Visintini D., Bonora V., Tucci G., Bini M., Forlani G., (2007). *Sistemi a Scansione per l'architettura e il territorio*. Alinea Editrice s.r.l. Firenze 2007. ISBN 978-88-6055-119-1. Pag. 1-169.
- Schultz T., (2009). *Calibration of terrestrial laser scanner for engineering geodesy*, Phd DISS. ETH NO. 17036.
- Sgrenzaroli M., and Vassena G.P.M., (2007). *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner*. Volume 1 – Introduzione Generale. © StarLink Editrice Brescia. Stampa Selecta Milano. ISBN: 978-88-89720-73-8. Pag. 1-95.
- JRC 3D Reconstructor® — Operation manual. Geomatics & Excellence — A University of Brescia Spin Off Company: Brescia, Italy, 2012. Available online: http://www.gexcel.homeip.net/Reconstructor/R_Manual/R_Manual_EN.pdf (accessed on 23 December 2014).
- Shen-En Chen, (2012). *Laser Scanning Technology for Bridge Monitoring, Laser Scanner Technology*. Dr. J. Apolinar Munoz Rodriguez (Ed.), ISBN: 978-953-51-0280-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/laser-scanner-technology/laser-scanning-technology-for-bridge-monitoring>
- Zogg H.M., Ingensand H., (2008). *Terrestrial laser scanning for deformation monitoring - load tests on the Felsenau viaduct (CH)*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Pag 555-652.
- Per le applicazioni fare riferimento al sito web: <http://microgeo.it/Laser-Scanner/applicazioni-laser-scanner-3d.php>

Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2015 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia