

## **Metodologie integrate per la georeferenziazione e rilievi 3D terrestri nell'antica città di Palmyra (Siria)**

Massimo Fabris (\*), Vladimiro Achilli (\*), Ivan Bonardi (\*\*), Denis Bragagnolo (\*),  
Sara Favaretto (\*), Matteo Frassine (\*\*\*), Maria Teresa Grassi (\*\*),  
Andrea Menin (\*), Gabriele Targa (\*)

(\*) LRG – Laboratorio di Rilevamento e Geomatica, DAUR, Università degli Studi di Padova,  
via Marzolo, 9, 35131 Padova, tel. 049 8271614, fax: 049 8275582, e-mail: massimo.fabris@unipd.it

(\*\*) Dipartimento di Scienze dell'Antichità, Università di Milano,  
via Festa del Perdono, 3, 7, 20122 Milano

(\*\*\*) Soprintendenza per i Beni Archeologici del Friuli Venezia Giulia,  
Piazza della Libertà, 7 – 34135 Trieste

### **Riassunto**

L'integrazione delle metodologie di rilievo quali la topografia classica, il GPS, la fotogrammetria digitale ed il laser scanning terrestre permette la descrizione completa, dettagliata e ad alta risoluzione di oggetti a diverse scale di rappresentazione.

Questo approccio è stato utilizzato per il rilievo 3D di alcuni siti della città di Palmyra (Siria); relativamente al quartiere sud-ovest dell'antica città, oggetto dell'intervento della Missione Archeologica Italo-Siriana PAL.M.A.I.S., è stata definita una rete topografica di inquadramento misurata nel sistema assoluto nazionale siriano e sono state acquisite immagini fotogrammetriche terrestri per il rilievo ad alta risoluzione del paramento murario occidentale dell'Agora, di un arco al confine settentrionale del quartiere e dello scavo dell'Edificio con Peristilio. Per ciascuno degli elementi rilevati sono stati misurati anche punti fotografici d'appoggio necessari per l'orientamento delle immagini. L'elaborazione dei dati con software fotogrammetrici ha permesso la generazione di modelli digitali 3D texturizzati e ad alta risoluzione con finalità conoscitive e di catalogazione oltre che per analisi dettagliate.

### **Abstract**

The integration of survey methodologies as classical topography, GPS, digital photogrammetry and terrestrial laser scanning allows complete, detailed and high resolution descriptions of objects at different scale of representation.

This approach was used for the 3D survey of some sites of Palmyra city (Syria); a topographic reference network measured in the national absolute Syrian system was defined in the south-west district of the ancient city where operate the Italian-Syrian Archaeological Mission PAL.M.A.I.S. Moreover, photogrammetric terrestrial images were acquired for the high resolution survey of the western wall of the Agora, of northern boundary arch of the quarter and the excavation of the Peristyle building.. For each surveyed object, terrestrial ground control points were measured since they are necessary for the images orientation phase. Data processing by means of photogrammetric software allowed to extract high resolution 3D textured digital models which led to a deeper knowledge, cataloguing phase and detailed analysis.

### **Introduzione**

Come noto, l'integrazione di differenti metodologie di rilievo come la topografia classica, il sistema GPS, la fotogrammetria digitale ed il laser scanning, permette la descrizione metrica completa di oggetti in diversi ambiti disciplinari; nei settori archeologico e dei beni culturali, il GPS e la

topografia classica permettono la definizione della rete topografica di inquadramento, georiferita rispetto ai sistemi di riferimento globali e/o locali; la fotogrammetria digitale ed il laser scanning terrestri consentono di georiferire rilievi dettagliati 3D nello stesso sistema di riferimento (Bitelli, 2002; Fabris et al., 2009).

In questo lavoro vengono descritte e analizzate le fasi relative al rilievo 3D di alcuni siti dell'antica città di Palmyra (Siria). La città, oggi chiamata Tadmor, si trova in prossimità di un'oasi a 240 km da Damasco in direzione nord-est e a 200 km dalla città di Deir ez-Zor in direzione sud-ovest, a circa metà strada tra il Mediterraneo e l'Eufrate. E' stata per lungo tempo un vitale centro carovaniero per i viaggiatori ed i mercanti che attraversavano il deserto siriano per collegare l'occidente (Roma e le principali città dell'Impero) con l'oriente (la Mesopotamia, la Persia, fino all'India e alla Cina), ed ebbe un notevole sviluppo tra il I ed III secolo d.C.. Una lunga e consolidata tradizione di ricerche e studi sulla città, ad opera degli studiosi siriani e delle missioni archeologiche straniere, offre un quadro articolato di conoscenze sull'urbanistica, e in particolare sulla rete di vie monumentali, sui grandi complessi pubblici e sugli edifici religiosi, oltre che sui peculiari esiti architettonici di tali strutture. Ben note sono anche le vaste e ricche aree sepolcrali che cingono il centro cittadino, caratterizzate da grandi tombe familiari di diverse tipologie, in cui erano posti i celeberrimi ritratti funerari dei 'signori' di Palmyra e delle loro mogli: ancora numerosi a Palmyra, sono inoltre diffusi ovunque, nei musei di tutto il mondo. Molto meno nota è invece, finora, l'edilizia residenziale privata; ma la situazione di Palmyra non risulta anomala, se inserita nel quadro più generale delle conoscenze sulle abitazioni urbane dell'età imperiale nell'Oriente Romano. Nell'area della città antica restano ancora ampi settori da indagare: nuove ricerche sono indispensabili non solo per conseguire una piena conoscenza della struttura e della destinazione funzionale di tutti i quartieri del sito, ma anche per definire la cronologia del progressivo sviluppo urbanistico di Palmyra.

La Missione Archeologica Congiunta Italo-Siriana (PAL.M.A.I.S.), attiva nel sito dal 2007, si è quindi posta come obiettivo l'esplorazione del quartiere sud-occidentale della città, rimasto fino ad oggi totalmente escluso da indagini di scavo sistematiche ed approfondite, pur essendo un quartiere centrale dell'antica città. Compreso tra l'Agora, le cosiddette Mura di Diocleziano, la Via Colonnata Trasversale e la Grande Via Colonnata, le sue dimensioni massime sono di circa 547x281 m, con una superficie totale di circa 114.000 m<sup>2</sup> (figura 1).

L'apparente assenza, in quest'area, di resti di edifici monumentali per i quali sia ipotizzabile una funzione di carattere pubblico induce a supporre una sua prevalente, se non esclusiva, destinazione residenziale, ma risulta evidentemente necessaria una verifica a tale ipotesi attraverso l'esecuzione di un'approfondita indagine archeologica supportata dalle metodologie di rilievo ad alta risoluzione (Grassi, 2009; <http://users.unimi.it/progettopalmyra/index.html>).

I rilievi sono stati effettuati mediante la definizione di una rete topografica di inquadramento materializzata e misurata mediante l'integrazione delle metodologie topografiche classiche con il sistema GPS nel sistema di riferimento nazionale siriano. I rilievi 3D di dettaglio ad alta risoluzione sono stati effettuati mediante la fotogrammetria digitale terrestre utilizzando una camera digitale metrica mentre i punti fotografici d'appoggio, necessari per l'orientamento delle immagini, sono stati misurati nel sistema della rete topografica di inquadramento: sono stati rilevati dettagliatamente il paramento murario occidentale dell'Agora, l'arco al confine settentrionale del quartiere sud-ovest e lo scavo dell'Edificio con Peristilio.

### **Definizione della rete di inquadramento**

Utilizzando due ricevitori Leica System 1200, sono state effettuate misure in modalità statica in corrispondenza di 5 vertici della rete topografica nazionale siriana localizzati in prossimità della città antica e di coordinate note nel sistema assoluto siriano: il ricevitore master è stato posto sul punto R81 della rete topografica, materializzato mediante una croce verniciata sulla roccia. Utilizzando i dati di due stazioni GPS permanenti della rete IGS è stato possibile determinare, mediante il software Leica GeoOffice, le coordinate del vertice R81 nel sistema internazionale ITRS. Con il secondo ricevitore

sono stati misurati gli altri 4 vertici (materializzati in modo analogo e denominati S39, B45, P8 e 529) per determinare le rispettive *baseline*: l'acquisizione dei dati è avvenuta con velocità di campionamento di 15 secondi e tempi di misura di 60 minuti. Quindi sono state determinate le coordinate anche degli altri 4 vertici. Tramite la procedura di roto-traslazione a 7 parametri applicata a questi 5 vertici di coordinate doppie note, è stato possibile determinare i parametri di trasformazione per il passaggio dal sistema internazionale ITRS al sistema nazionale siriano (figura 1).

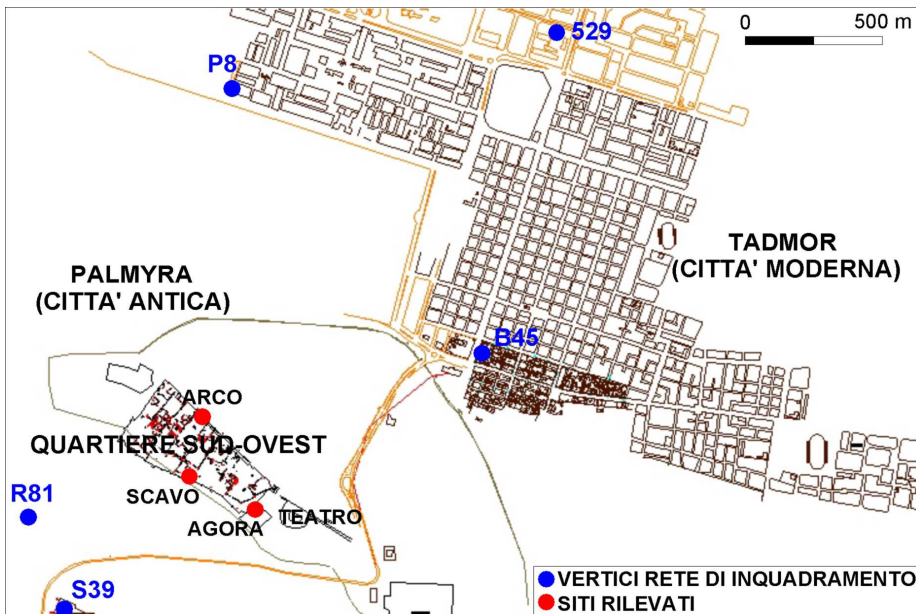


Figura 1 – Localizzazione di Palmyra (città antica) e Tadmor (città moderna), del quartiere sud-ovest, dei 5 vertici della rete nazionale assoluta siriana e dei 3 siti oggetto dei rilievi di dettaglio ad alta risoluzione.

In un secondo momento la rete è stata raffittita all'interno del quartiere sud-ovest della città antica mediante vertici costituiti da centrini metallici stabilmente materializzati e misurati con metodologia GPS in modalità statica (tempi di acquisizione di 30 minuti con passo di campionamento di 15 secondi): alla fine la rete di riferimento risulta costituita da 15 vertici. Inoltre il GPS è stato utilizzato anche in modalità fast-static misurando altri 82 punti naturali allo scopo di definire il perimetro del quartiere sud-ovest di pertinenza della missione italiana.

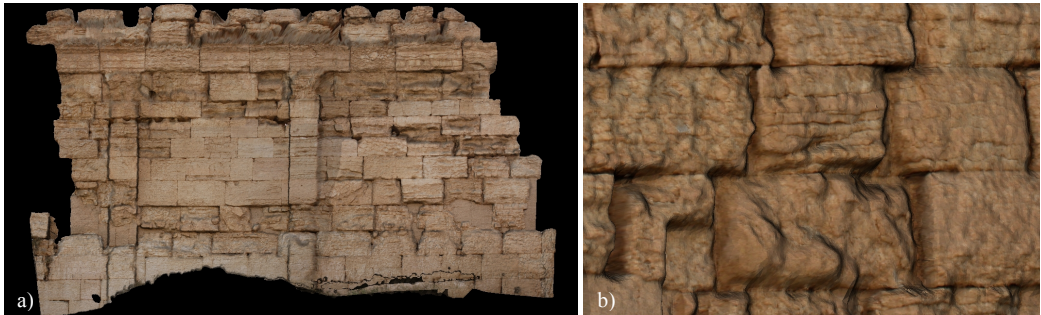
### I rilievi ad alta risoluzione

All'interno della città antica sono state identificate alcune aree, particolarmente interessanti per gli studi inerenti sia gli aspetti archeologici che quelli architettonici, ed eseguito un rilievo ad alta risoluzione mediante l'utilizzo della fotogrammetria digitale terrestre (figura 1). Per l'acquisizione delle immagini è stato utilizzando il sistema Zscan costituito da una barra calibrata ed una camera digitale metrica Canon EOS 1 DS MARK II con obiettivo da 28 mm e risoluzione di 16.7 Megapixel. Il sistema prevede l'acquisizione di 3 immagini con base calibrata per la successiva estrazione di nuvole di punti (Fabris et al., 2008). Il rilievo dei punti fotografici d'appoggio è stato realizzato orientando la stazione integrata Leica TCR1201 rispetto alla rete topografica di inquadramento georiferita nel sistema nazionale siriano (relativamente ai soli vertici materializzati con centrino metallico): sono stati scelti punti naturali univocamente definiti e ben visibili sia sulle immagini che in fase di acquisizione con la stazione integrata.

### **Il muro occidentale dell'Agora**

Le immagini fotogrammetriche sono state acquisite con una distanza camera oggetto di circa 10 m ottenendo una dimensione del pixel sulla parete dell'ordine di 2.5 mm. Per la copertura completa del muro, lati interno ed esterno oltre alle porzioni laterali, sono state acquisite 15 triplette. Utilizzando il software Zscan per ogni tripletta è stata estratta una nuvola di punti con passo medio della griglia di 2 cm.

Le nuvole di punti sono quindi state allineate mediante il software Zmap: le scansioni provviste di punti fotografici d'appoggio (in questo caso 18) sono state co-registrate direttamente nel sistema della rete topografica, mentre quelle sprovviste di punti noti sono state allineate con quelle già georiferite utilizzando il metodo di co-registrazione tra nuvole di punti: i sistemi di riferimento locali di due generiche scansioni sono stati avvicinati mediante punti naturali omologhi e, applicando successivamente l'algoritmo ICP (*Iterative Closest Points*), è stato ottenuto l'allineamento più preciso (Besl, McKay, 1992; Chen, Medioni, 1992). La mosaicatura complessiva è stata ottenuta con errore massimo di 1.2 mm (figura 2).



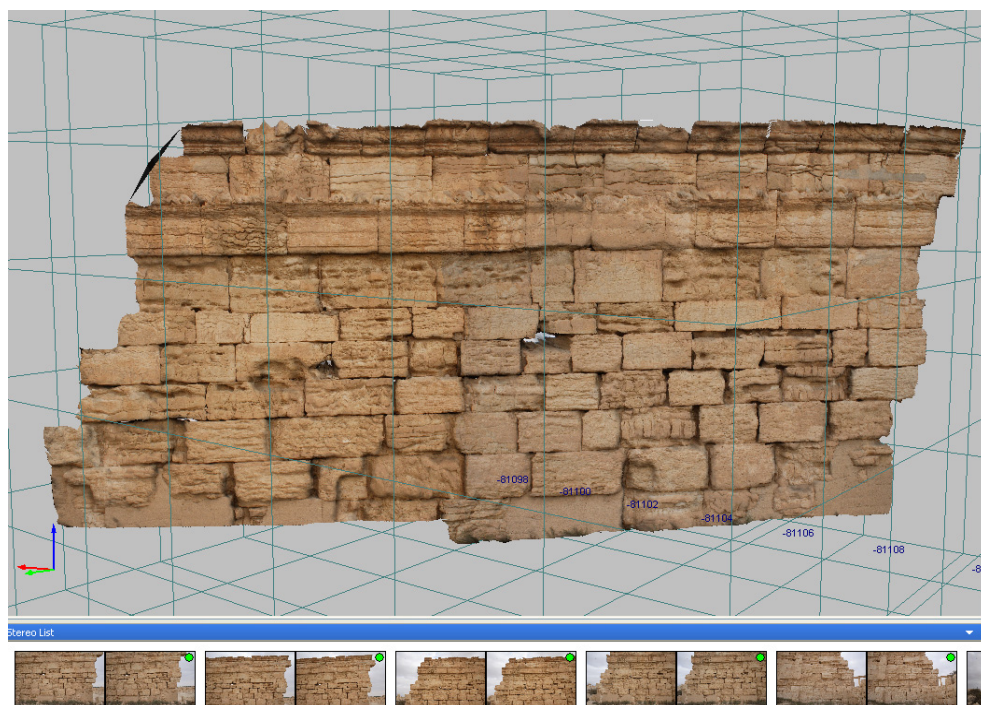
*Figura 2 – a) Allineamento delle 15 nuvole di punti relative al muro occidentale dell'Agora (software Zscan e Zmap); b) Dettaglio di una porzione del lato esterno all'Agora.*

Considerando solo le immagini laterali di ciascuna tripletta acquisita con il sistema Zscan è stato possibile ottenere coppie stereoscopiche ed utilizzare il software Topcon Image Master Photo per la generazione dei modelli fotogrammetrici tradizionali: il software non necessita dei sistemi di visione stereoscopica in quanto la coppia di immagini viene visualizzata simultaneamente affiancando una fotografia all'altra. Le immagini sono state trattate come appartenenti a due diverse strisciate generando quindi ogni singolo modello anche mediante l'utilizzo degli stessi punti fotografici d'appoggio impiegati nel software Zmap. Successivamente è stata estratta la corrispondente superficie triangolata: in questo caso, allo scopo di non appesantire il progetto, è stato scelto di operare con passo medio della griglia di 5 cm (figura 3).

### **L'arco al confine settentrionale del quartiere sud-ovest**

Analogamente al rilievo del muro dell'Agora, anche in questo caso sono state acquisite triplette di immagini mediante il sistema Zscan e 26 punti fotografici d'appoggio naturali mediante l'utilizzo della stessa stazione integrata. La distanza camera-oggetto è stata scelta pari a circa 10 m in modo da ottenere una dimensione del pixel sulla parete di circa 2.5 mm (focale 28 mm). Il rilievo è stato effettuato non solo in corrispondenza dell'arco ma anche delle due colonne laterali a sinistra e a destra dello stesso appartenenti alla Grande Via Colonnata. L'elaborazione dei dati ha permesso di estrarre nuvole di punti dell'arco a partire da 10 triplette con passo medio della griglia di 5 cm: le nuvole di punti sono state allineate con il software Zmap con errore massimo di 1.1 mm (figura 4).





*Figura 3 – Superficie triangolata e texturizzata ottenuta dall'allineamento di 8 immagini appartenenti a 2 differenti strisciate relative al paramento murario occidentale dell'Agora (software Topcon Image Master Photo).*



*Figura 4 – Allineamento delle 10 nuvole di punti relative all'arco localizzato al confine settentrionale del quartiere sud-ovest (software Zscan e Zmap).*

Considerando le coppie stereoscopiche, ottenute dalle immagini laterali di ciascuna tripletta acquisita con il sistema Zscan, è stato utilizzato il software Image Master Photo. In questo caso, utilizzando i 26 punti fotografici d'appoggio, è stato generato un modello stereoscopico relativamente ad ogni coppia di immagini. Successivamente da modello fotogrammetrico è stata estratta la corrispondente superficie triangolata con passo medio della griglia di 5 cm; in questo caso è stato possibile restituire anche le colonne laterali dell'arco (figura 5).

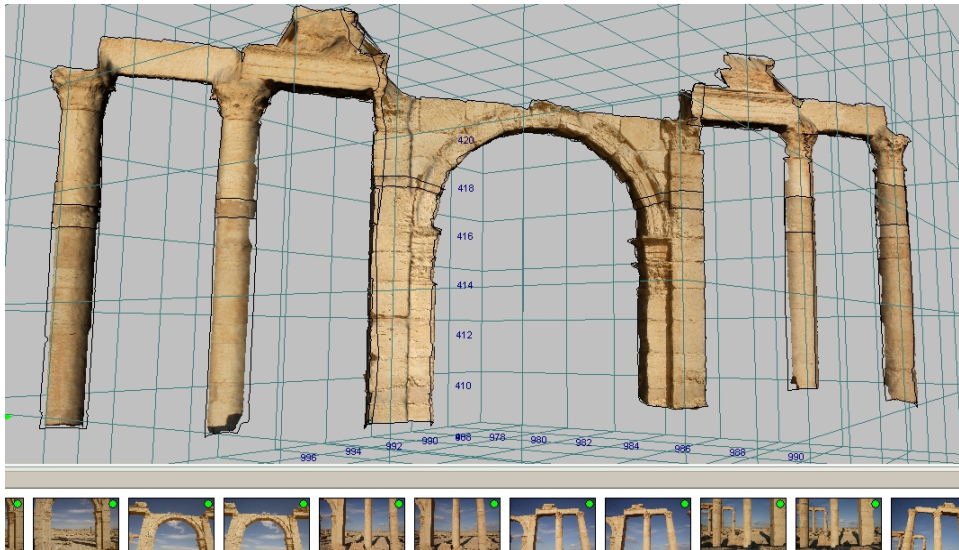


Figura 5 – Superficie triangolata e texturizzata ottenuta dall'allineamento di 12 immagini relative all'arco localizzato al confine settentrionale del quartiere sud-ovest (software Topcon Image Master Photo).

## Conclusioni

In questo lavoro l'integrazione di differenti metodologie di rilievo è stata utilizzata nell'antica città di Palmyra (Siria): il sistema GPS ha permesso la definizione e la misura di una rete topografica di riferimento inquadrata nel sistema nazionale assoluto siriano; la fotogrammetria digitale terrestre è stata impiegata per rilievi di dettaglio ad alta risoluzione del paramento murario occidentale dell'Agora e di un arco al confine settentrionale del quartiere sud-ovest; le tecniche topografiche classiche sono state utili per la misura dei punti fotografici d'appoggio naturali.

I risultati hanno permesso di ottenere le coordinate di 15 vertici della rete di inquadramento nel sistema assoluto nazionale siriano. Le nuvole di punti dei rilievi ad alta risoluzione sono state estratte ed allineate utilizzando due differenti software fotogrammetrici fornendo la descrizione metrica dettagliata degli oggetti rilevati.

## Bibliografia

- Besl PJ, McKay N.D. (1992), "A method for registration of 3-D shapes", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14 (2): 239-256
- Bitelli G. (2002), "Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei beni culturali", *Atti della 6<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA (Perugia 2002)*, 1: IX-XXIV
- Chen Y, Medioni G. (1992), "Object modelling by registration of multiple range images", *Image and Vision Computing*, 10 (3): 145-155
- Fabris M, Achilli V, Boatto G, Bragagnolo D, Menin A. (2008), "Integrazione di metodologie di rilievo terrestre ad alta risoluzione per il rilievo di fossili", *Atti della 12<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, (L'Aquila 2008)*, 2: 1097-1102
- Fabris M, Achilli V, Artese G, Boatto G, Bragagnolo D, Cancheri G, Meneghello R, Menin A, Trecroci A. (2009), "High resolution data from laser scanning and digital photogrammetry terrestrial methodologies. Test site: an architectural surface", *ISPRS The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII, part 3/W8: 43-48
- Grassi M.T. (2009), "Il 'progetto Palmira' (Siria)", *LANX*, 2: 194-205
- <http://users.unimi.it/progettopalmyra/index.html> (ultimo accesso: 27 agosto 2010)