

La ricostruzione in 3D del sito archeologico di Santa Giulitta a Bagnasco (CN)

Walter Alberto^(a), Chiara Devoti^(b), Gabriele Garnero^(b),
Paola Guerreschi^(b), Luigi Perotti^(c)

^(a) Imageo srl, Spin-off dell'Università di Torino, walter.alberto@imagerosrl.com

^(b) Dipartimento DIST, Politecnico e Università di Torino

chiara.devoti@polito.it, gabriele.garnero@unito.it, paola.guerreschi@unito.it

^(c) Geositlab, Dipartimento Scienze della Terra, Università di Torino, luigi.perotti@unito.it

Riassunto

La scuola di specializzazione in "Beni Architettonici e del Paesaggio" del Politecnico di Torino da alcuni anni conduce un programma d'indagine presso il complesso di Santa Giulitta, nel comune di Bagnasco in provincia di Cuneo. Il sito è posto a una quota di circa 900 m slm ed è immerso in una fitta boscaglia. Solo alcuni punti interessanti dell'articolato insieme architettonico (la torre, la chiesa e i resti di un muro) sono posti in luoghi più aperti e visibili, almeno sulla verticale. Come supporto all'attività di ricerca, in particolare per gli aspetti archeologici, è stato predisposto un volo con un drone sull'intero complesso, con riprese eseguite nel mese di aprile 2017 a mezzo di un DJI Phantom 4. Per l'appoggio è stata eseguita una rete GNSS compensata sulla rete regionale GNSS Piemonte con coordinate RDN-ETRF2000. Dai fotogrammi ottenuti, utilizzando il software 3DZephyr, sono state elaborate le ricostruzioni in 3D dell'intero complesso e di alcune zone particolari, richieste specificatamente dagli storici e dagli archeologi impegnati nella ricerca. L'ortofoto finale è stata ottenuta con un GSD di 5 cm.

A supporto del lavoro di dettaglio è stata acquisita ed elaborata un'ortofoto satellitare invernale World View2 (WV02) multispettrale a 8 bande, con risoluzione MS di circa 2 metri, e una PAN di circa 50 cm. Da ultimo, è stata prodotta una visualizzazione in 2.5D su base del DTM Regione Piemonte ICE 2009 (GSD 5m) sul quale è stata drappeggiata l'ortofoto satellitare. Ne è quindi risultata una base conoscitiva ottenuta integrando i dati di due basi differenti (Ortofoto VHR da drone e WV2) che permette di rendere disponibile agli studiosi una mappa del complesso di Santa Giulitta ricostruendo con continuità alcune strutture non accessibili.

Abstract

All the activities for the documentary base of the Santa Giulitta complex in Bagnasco are presented.

Introduzione

La Scuola di Specializzazione in "Beni Architettonici e del Paesaggio", istituita nel 1989 e da allora sempre attiva nel campo dell'alta formazione *post-*

lauream, offre, nel suo programma di studi, oltre al percorso didattico frontale, anche attività sul campo, che permettano agli specializzandi di testare direttamente, in un contesto reale, quanto appreso o approfondito nell'ambito dell'attività frontale. Nel 2012, sulla scia di rapporti instaurati con le amministrazioni locali e con il Fondo Storico "Alberto Fiore" di Garessio, molto attivo nell'area, la scuola ha intrapreso una campagna di studi sul sito pluristratificato noto come *castrum* di Santa Giulitta sopra l'abitato di Bagnasco, in Alta Val Tanaro. L'area, fortemente determinante per l'equilibrio intervallivo, è posta al confine tra Piemonte e Liguria, connotata da un'estesa e antica antropizzazione e da consolidati rapporti viari a scala transregionale, che ponevano in connessione il territorio di Albenga, sulla costa, con l'entroterra pedemontano. Il sistema infrastrutturale appare di estrema rilevanza e contraddistingue non solo il sito, ma l'intera area cerniera dell'Alta Val Tanaro, con tracciati di antica data (Demeglio, 2013; Demeglio, 2014).

Alla prima ricognizione, nell'estate del 2012, il sito appariva di scarsa riconoscibilità, eccezion fatta per una grande chiesa barocca sul cui fianco, in prossimità del portico coperto d'ingresso, sporgeva una cappella medievale (di XI secolo), con monofore nel settore absidale, decorata da un pregevole ciclo di affreschi (Garrone et al., 1999), e per qualche lacerto, affiorante dalla ricca vegetazione da rimboschimento, di una struttura dalla massiccia muratura a blocchi spaccati, presumibilmente una torre, a un notevole dislivello rispetto al centro devozionale; qualche sporadica traccia – quasi più riconoscibile per variazioni di quota e massi affioranti al disotto della ricca copertura di rampicanti – lasciava presagire forse un muro di collegamento tra la quota della chiesa e quella della struttura sommitale.

Al termine della prima campagna di pulitura, accompagnata dalla potatura della vegetazione addossata alle murature, dall'eliminazione dei rampicanti e dall'asportazione di numerosi strati di depositi fogliari, si potevano apprezzare i primi muri liberati della torre, un ampio tratto di cortina che seguiva il pendio verso il complesso di culto e una struttura più articolata, riconosciuta come una porta del sistema difensivo, circa a metà strada tra la sommità e il pianoro su cui sorge la chiesa con annessa cappella. Le tre aree così individuate erano oggetto di un'ampia campagna fotografica e di un rilevamento per unità stratigrafiche murarie, del quale rendeva conto il capomissione in una prima scheda di segnalazione (Demeglio, 2013), cui sarebbe seguito un più ampio resoconto, con la fondamentale contestualizzazione territoriale (Demeglio, 2014).

Nel corso delle successive campagne, in particolare quella del 2015, si procedeva a un rilievo strumentale delle strutture in elevato, anche con notevole attenzione al dato materico della tessitura muraria, da riconnettersi alle schede di unità stratigrafica muraria (USM) approntate nel corso del progressivo processo di pulitura, ma senza che fosse possibile, stante i notevolissimi dislivelli, in alcuni casi a strapiombo, la densa vegetazione rimasta e la generale connotazione del sito di grande complessità, ottenere un rilievo globale, determinante anche per la comprensione della logica di formazione del complesso fortificato, nonché forse in grado – in assenza di un'attività di scavo che potesse fornire reperti – di agevolare nella datazione delle diverse parti del complesso e nella comprensione dei loro mutui rapporti di interrelazione. Successivi rilievi di dettaglio venivano approntati per tutte e tre le porzioni

principali del sistema fortificato e culturale, ma senza che fosse possibile ottenere una visione complessiva dell'intero sistema del *castrum*. Ne scaturiva il coinvolgimento del LARTU al fine di migliorare la base conoscitiva esistente.

Dati e Metodologia

Il progetto di ricognizione presso il sito di Santa Giulitta a Bagnasco (CN) risale al 2011. In questi anni sono state compiute annualmente diverse campagne di indagine a cura di architetti, archeologi, storici e specializzandi della scuola di specializzazione in "Beni Architettonici e del Paesaggio" del Politecnico di Torino. Nonostante il gruppo di ricerca avesse elaborati cartografici delle murature del sito prodotte quale risultato di acquisizioni fotogrammetriche da terra e documentazione fotografica, non si era in possesso di una visione complessiva del sito che potesse venire in aiuto per comprendere le modalità, per esempio, di attestazione della struttura muraria agli elementi rocciosi presenti nella parte alta del sito. Vista la conformazione morfologica del territorio, immerso in una fitta boscaglia, che presenta punti scoscesi impossibili da raggiungere per operare in sicurezza su alcuni elementi architettonici, si è pensato di utilizzare un Aereomobile a Pilotaggio Remoto (APR o UAV) per eseguire un rilevamento fotografico idoneo a essere processato con tecniche fotogrammetriche SfM (*Structure for Motion*) (Remondino, 2011) (Figura 1).



Figura 1 - A sinistra rilievo della posizione delle strutture emergenti; in basso il complesso religioso, poco oltre la metà della salita la porta e un tratto nel muro di fortificazione e sulla sommità la torre. Un ampio tratto del muro perimetrale risultava di difficile rilevamento vista l'asperità del terreno.

A destra immagine fotografica del sito, in primo piano la chiesa e nel riquadro la torre.

Questa tecnica è in grado di estrarre in modo quasi automatico nuvole di punti da cui derivare, in seguito, la rappresentazione di un oggetto realistico in tre dimensioni, modelli digitali della superficie terrestre e ortofoto.

Nel caso del sito di Santa Giulitta la fotogrammetria è venuta in supporto allo studio per ottenere una visione tridimensionale dell'intero sito archeologico e di alcune parziali opere murarie presenti, ripulite dalle piante infestanti durante le campagne di ricognizione, quali la torre, un muro isolato vicino a essa, la chiesa e gli speroni rocciosi presenti sul versante sud.

Raccolta dati

La campagna di rilievo è avvenuta tramite acquisizione di immagini nadirali durante il rilievo con un drone Phantom 4 prodotto dalla DJI (Figura 2), eseguito nel mese di aprile 2017.



Figura 2 – A sinistra, Drone utilizzato DJI Phantom 4. Al centro, GNSS stazione master. A destra, esempio di manufatti e mire utilizzate con GCPs.

Questo modello, dal peso di poco inferiore a 1,4 kg, è dotato di una camera connessa alla componente gimble, collegato a sua volta ad un giroscopio che regola automaticamente le inclinazioni orizzontale e verticale per stabilizzare la fotocamera e ottenere immagini a 12 megapixel il più possibile stabili. Si tratta di uno strumento ormai economicamente accessibile, adatto alle differenti attività professionali su piccole porzioni di territorio che, abbinato all'uso di hardware e software *lowcost*, permette di ottenere risultati di buona qualità metrica.

L'utilizzo dell'APR è regolamentato in modo rigoroso e ogni rilievo deve essere eseguito nel rispetto della normativa in vigore. La direttiva ENAC stabilisce che un APR può compiere le operazioni di ripresa volando entro i 70 metri di quota e in orari diurni, affinché l'operatore, munito di un valido patentino per il pilotaggio, sia in grado costantemente di seguire visivamente il mezzo; le operazioni devono essere condotte in zone non critiche, in altre parole in uno scenario operativo nel quale, in caso di malfunzionamento del velivolo, non si prevedono ragionevolmente danni a terzi.

Per l'appoggio è stata realizzata una rete GNSS compensata sulla rete regionale GNSS del Piemonte con coordinate RDN-ETRF2000.

Per poter effettuare l'inserimento corretto del modello nella rete di inquadramento nazionale si è creata una rete topografica a terra con stazione GNSS master posizionata sulla torre e un certo numero di punti di appoggio a terra. Questi ultimi, materializzati con target dalle forme quadrate e dipinti a colori vivaci, sono fondamentali e devono essere riconoscibili immediatamente sui fotogrammi (Figura 2).

Elaborazione dati

Il software fotogrammetrico utilizzato per questo lavoro è 3DFZephyr Aerial prodotto da 3Dflow (<https://www.3dflow.net/it/>).

Il principio fondamentale su cui si basa la ricostruzione 3D è legato alla presenza di un elevato numero di fotogrammi che abbiano un ricoprimento longitudinale almeno del 60% ed uno trasversale almeno dell'30-40%. Nel nostro caso il drone è stato programmato per l'acquisizione di un'immagine ogni due secondi per tutta la durata del tempo di volo (circa 40 minuti): si

sono ottenute quindi circa 1600 fotogrammi con un ricoprimento adeguato. Sono state scattate fotografie sia nadirali sia oblique.

La ricostruzione del modello tridimensionale fotorealistico, definita *Structure from Motion* nell'ambito della Computer Vision, è il risultato di quattro distinte elaborazioni automatiche:

- la creazione del progetto di lavoro con l'orientamento relativo delle fotocamere e l'estrazione della nuvola sparsa di punti;
- l'infittimento della nuvola sparsa con la realizzazione della nuvola densa di punti;
- il ricoprimento della stessa con faccette triangolari ottenendo la mesh;
- infine la sovrapposizione alla mesh di una texture estratta dalle foto originali (James and Robson, 2012, Remondino et al., 2014).

Per l'elaborazione dell'intero sito, sono state caricate tutte le foto ma ne sono state orientate meno di due terzi (Micheletti, 2015, Smith, 2015).

La prima fase ha visto la creazione del progetto di lavoro e il caricamento nel software delle foto da processare. Il software ha individuato automaticamente i dati dell'Exif (*EXchangeable Image File*) registrati ad ogni scatto (FC330 – 4 mm 4000x3000 px) che rappresentano le specifiche del formato immagine incorporate nell'immagine stessa, ovvero il modello della macchina e la lunghezza focale con cui sono state riprese, cercando on-line i certificati di calibrazione, quando viene abilitata tale opzione.

La creazione del modello avviene in modo automatico ma, per ogni fase, il settaggio dei parametri è molto variabile. I parametri impostati di default funzionano nella maggior parte dei casi, ma spesso è necessario intervenire manualmente. L'algoritmo "Samantha", implementato nel software, ha come primo obiettivo l'allineamento automatico dei fotogrammi e l'estrazione dei punti chiave utili alla generazione di un "*coarse alignment*" del futuro modello. Si può stabilire il numero di *keypoint* da estrarre ed il tipo di *matching* che presiede l'allineamento delle immagini.

Al termine della definizione delle corrispondenze il software controlla l'errore di proiezione riscontrato per ogni punto e verifica il numero minimo di punti che sono necessari per agganciare tra loro un insieme d'immagini.

Per supportare il software nel riconoscimento delle immagini e velocizzare le operazioni di *match* è indispensabile stabilire la metodologia di acquisizione, scegliendo tra sequenziale, sparsa, circolare oppure griglia approssimata (Figura 3).

3DFZephyr ha concepito quest'ultima tipologia in particolare pensando alle immagini acquisite da drone, in cui vi è una buona percentuale di sovrapposizione tra le stesse. Questa fase termina con *Image Alignment*. Al termine si ottiene una prima approssimata ricostruzione della scena in 3D.

Nella seconda fase il software agisce per restituire una nuvola più definita, più densa, e per produrre l'effetto 3D stereoscopico ovvero per creare la mappa di profondità (*depth map*). Importante è anche il livello di discretizzazione della porzione di spazio che si sta ricostruendo in funzione del dettaglio che si vuole ottenere.

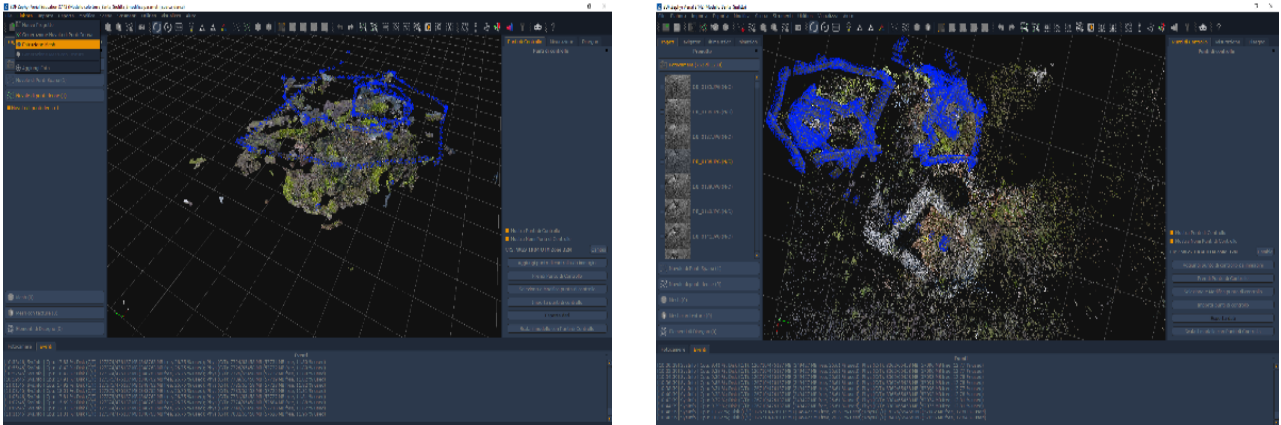


Figura 3 – A sinistra, le fasi di lavoro nel software 3DZephyr. A destra, image alignment

Nella fase successiva, quella della generazione delle superfici o *mesh*, è necessario impostare i parametri che controllano le faccette triangolari contigue (TIN - *Triangulated Irregular Network*) che vengono ad appoggiarsi alla nuvola densa.

E' possibile proseguire l'affinamento del modello scegliendo tra una ricostruzione a spigoli netti oppure smussati. Si è osservato che nel caso di ricostruzione aerea di ambienti naturali, molto vegetati si sono ottenuti interessanti risultati attivando l'opzione "spigoli smussati", invece per ambienti dove l'interesse è rivolto maggiormente al costruito, settare "spigoli netti" sembra più performante. Nella ricostruzione del modello degli speroni rocciosi posti sul versante orientato a ovest si è utilizzata la modalità "foto aeree" con una ricostruzione a "spigoli smussati" che ha generato un'immagine realistica delle chiome della vegetazione presente, mentre per il modello della chiesa, della torre e del muro isolato a lato della torre si è utilizzata la modalità "ambiente urbano" con un tipo di ricostruzione a "spigoli netti" che è risultata essere più performante nel cogliere il dettaglio architettonico (Figura 4).



Figura 4 – A sinistra, ricostruzione SfM dell'intero sito. Al centro, particolare della chiesa. A destra, particolare della torre.

Per pervenire al modello tridimensionale fotorealistico, l'ultima elaborazione che deve essere eseguita consiste nel sovrapporre una *texture*, tratta dalle immagini, alle superfici triangolari generate poco prima. È assegnato il valore del pixel della *texture* alla faccetta triangolare della *mesh*. L'algoritmo implementato in 3DFZephyr gestisce in autonomia il bilanciamento del colore tratto dalle fotocamere. Se si desidera ottenere un risultato finale ad alta risoluzione il tempo macchina per elaborare il modello aumenta notevolmente e così la dimensione del prodotto elaborato.

La produzione del modello 3D, in sintesi, ha richiesto 9 giornate di elaborazione con PC intel® Xenon® CPU E5-1650 v3 @ 3.50 GHz e 64 Gb di RAM; in particolare la scelta della "dimensione della texture" (8192 o 16384) è l'elemento che incide maggiormente sul tempo di elaborazione della macchina.

	torre	chiesa	speroni rocciosi	verde lato torre	muro isolato e torre
numero immagini	691	274	372	68	145
BA Mean Square Error	1.8586 px	1.7514 px	3.36954 px	5.29339 px	2.41602 px
BA Reference Variance	1.65609 px	0.42889 px	1.29834 px	13.6307 px	2.48643 px
nuvola sparsa					
tempo di elaborazione	0d 15h 33m	0d 2h 5m	0d 4h 6m	0d 0h 13m	0d 0h 52m
numero punti	42458	115808	191188	1527	6427
nuvola densa					
tempo di elaborazione	0d 12h 15m	0d 2h 31m	0d 3h 52m	0d 0h 25m	0d 18h 52m
numero punti	1029787	2991690	9666142	4732713	142987
mesh					
tempo di elaborazione	0d 5h 6m	2d 16h 51m	0d 2h 42m	0d 0h 31m	0d 1h 55m
numero punti	7607323	3678475	5497155	1710611	2982242
numero poligoni	15197664	7346360	10899687	3361783	5951647
mesh con texture					
tempo di elaborazione	0d 0h 36m	2d 22h 40m	0d 0h 26m	0d 0h 5m	0d 0h 9m
numero punti	1011469	4311237	10495216	2728982	3580891
numero poligoni	1425405	6593326	10899687	3361783	5698877

Figura 5 – Informazioni sinottiche sulle ricostruzioni in 3D

Di particolare interesse è stata la ricostruzione della torre per lo studio dell'aggancio della struttura muraria alla parete rocciosa posteriore, irraggiungibile dagli studiosi che hanno effettuato la campagna di ricognizione archeologica. L'ultimo prodotto realizzato con il software fotogrammetrico è stato l'ortofoto con una risoluzione di 5 centimetri. E' stata approntata anche un'ortofoto per ogni singolo dettaglio.

Per quanto riguarda il lavoro di supporto a scala più piccola di dettaglio è stata acquisita ed elaborata una immagine satellitare invernale World View2 (WV02) utilizzando unitamente i dati ortofoto e DTM ICE Regione Piemonte.

Sono state effettuate le pre-elaborazione radiometriche: passaggio a riflettanza, *dark subtraction* e passaggio da 11 a 8 bit. Successivamente è stata ortoproiettata tramite modello rigoroso utilizzando PCI Geomatica con 15 punti di appoggio derivati dai dati della Regione Piemonte. L'ortofoto ottenuta è stata utilizzata come base per una modellazione 3D di un'area più ampia, inserendo successivamente i dati derivanti dalla produzione fotogrammetrica.

Al fine di divulgare quanto prodotto e consentirne un utilizzo anche didattico, si è voluto pubblicare su web il risultato di uno dei modelli fotorealistici prodotti, utilizzando l'applicazione *free online Sketchfab*. Questo servizio di condivisione dei modelli 3D offre la possibilità di effettuare un *upload* della scena ricostruita mediante *computer vision* e quindi di poter navigare interattivamente spostandosi all'interno della scena. Il modello pubblicato della porzione del rilievo che riguarda la torre è:

<https://sketchfab.com/models/b3a2cef8ff254186b684739442566b5d>

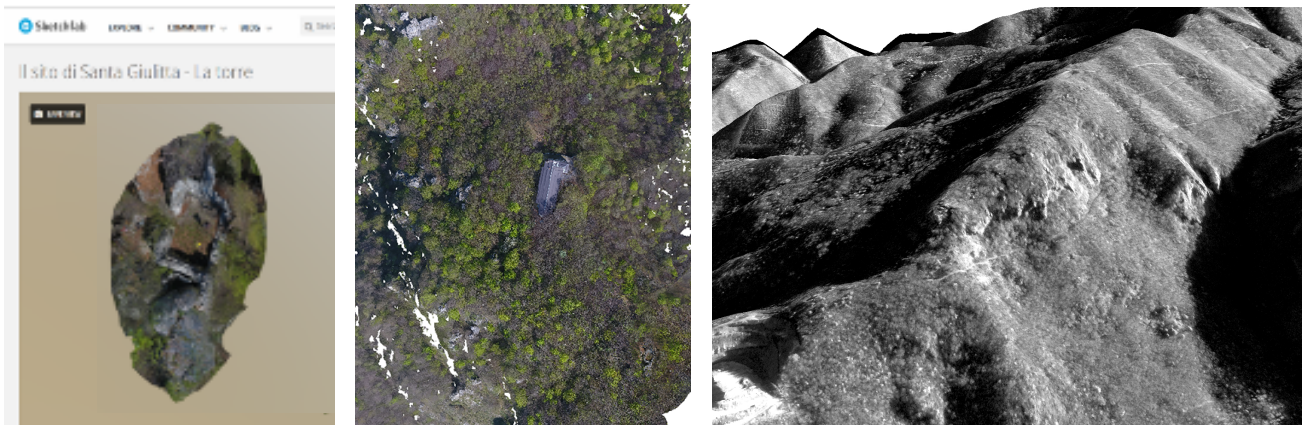


Figura 6 - A sinistra, modello interattivo online navigabile. Al centro, particolare dell'ortofoto. A destra, immagine PAN Worldview.

Bibliografia

- Micheletti N., Chandler J. H., Lane, S.N. (2015), "Section 2.2. Structure from Motion (SfM) photogrammetry", in: Cook S.J., Clarke L.E. and Nield J.M. (eds) *Geomorphological Techniques* (Online Edition), British Society for Geomorphology, London, UK, ISSN: 2047-0371
- Smith M.V., Carrivick, J.L., Quincey, D.J. (2015), "Structure from motion photogrammetry", *Physical geography*, 40(2): 247-275, doi: 10.1177/0309133315615805
- Remondino F., Spera, M.G., Nocerino E., Menna F., Nex F. (2014), "State of the art in high density image matching", *The Photogrammetric Record*, 29: 144-166
- Demeglio P. (2014), "Il sito fortificato di Santa Giulitta a Bagnasco (Alta Val Tanaro, CN)", *Atti Accademia Roveretana degli Agiati*, 264(IX): 167-183
- Demeglio P. (2014), "Nucetto, Bagnasco, Priola, Garessio, Ormea. Alta Val Tanaro. Indagini preliminari paesagistico-archeologiche", *Quaderni della Soprintendenza Archeologica del Piemonte*, 29 (Notiziario): 102-104
- Demeglio P. (2013), "(CN) Bagnasco, loc. Santa Giulitta", *Archeologia Medievale*, XL (Schede): 288-289
- James, M.R., Robson S. (2012), "Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application", *Journal of Geophysical Research*, 117: 1-17, F03017
- Remondino F., Rizzi A., Agugiario G., Jimenez B., Menna F., Nex F., Baratti F. (2011), "Rilievi e Modellazione 3D", *Atti 15° Conferenza Nazionale ASITA*, 15-18 novembre 2011, Reggia di Colorno, 1825-1836
- Galante Garrone G., Griseri A., Lombardini S., Mamino L., Torre A. (a cura di) (1999), *Le risorse culturali delle valli monregalesi e la loro storia*, L'Artistica Savigliano, Savigliano