



Il *Balloon Mapping* per lo studio di due castellieri sul Carso isontino e triestino

Balloon mapping for the study of two “castellieri” in the Karstic areas of Trieste and Gorizia provinces

ANDREA FAVRETTO, GIOVANNI MAURO, CLAUDIO ZACCARIA

Dipartimento di Studi Umanistici – Università di Trieste

Riassunto

Il contributo presenta i primi risultati di alcune indagini compiute con la tecnologia *Balloon Mapping* (BM) su due castellieri del Carso isontino e triestino.

Nello specifico, viene presa in esame una serie di immagini acquisite con il pallone aerostatico sui siti di San Polo, presso Monfalcone (Provincia di Gorizia) e di Monte Trmun, presso Caresana (Provincia di Trieste). Dopo una selezione delle immagini telerilevate, sono stati creati degli ortomosaici, utilizzando in rete l'ambiente operativo di MapKnitter. Per il sito di Caresana sono stati inoltre elaborati due ulteriori ortomosaici, ottenuti da immagini scattate con una macchina fotografica sensibile all'infrarosso vicino. Su tali ortomosaici è stato creato l'indice di vegetazione NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Infine è stata prodotta una cartografia dedicata, riportante un presunto crop mark positivo, ottenuto sulla base dell'interpretazione visiva dell'indice di vegetazione, opportunamente classificato in dieci classi di intervallo.

Parole chiave

Balloon Mapping, Carso, Castellieri, ortomosaici, NDVI, crop mark

Abstract

In the paper we present the first results of a research carried on using Balloon Mapping techniques over two ‘castellieri’ (ancient fortified boroughs) in the karstic areas of Trieste and Gorizia Provinces (North East of Italy).

Several remote sensed images, taken from a helium filled balloon in the two areas of San Polo (Monfalcone Municipality, Gorizia Province) and Trmun mountain (Caresana Village, Trieste Province), have been considered. After a first selection, several orthomosaics have been realized, using the MapKnitter cloud computing environment. Besides, two additional orthomosaics for the Caresana location have been produced using some near infrared images. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), has been calculated for the Caresana site and the two obtained NDVI layers have been classified in ten classes of interval. A positive crop mark on the Caresana site have been recognized and drawn on one classified NDVI layer.

Keywords

Balloon Mapping, Karst, Castellieri, orthomosaic, NDVI, crop mark

1. Introduzione

L'archeologia si avvale non da poco tempo della fotografia aerea per l'ottenimento di immagini telerilevate, al fine di scoprire, delimitare e proteggere siti archeologici. Esiste, infatti, un settore disciplinare pluri-cenenario, denominato "Archeologia Aerea" (AA), che si occupa di acquisire immagini da remoto, interpretarle, elaborarle e trasformarle in cartografia (attraverso la cosiddetta restituzione grafica/cartografica¹), nonché di produrre schede descrittive, da inserire in formato digitale in *database* tematici (cfr. fra gli altri, Ceraudo, 2004; Musson, 2005; la rivista internazionale "Archeologia Aerea. Studi di Aerotopografia Archeologica", attiva dal 2004).

In particolare, per il trattamento delle immagini telerilevate, l'AA si appoggia ad altre discipline quali il Telerilevamento e la Fotogrammetria, tradizionalmente utilizzate per il controllo del territorio con fini di carattere ambientale o socio-economico; la restituzione cartografica delle immagini presuppone invece la conoscenza di elementi di Cartografia e Geodesia; infine, la gestione delle schede archeologiche e l'analisi spaziale dei risultati sono collegate alle metodologie dei *database* e dei Sistemi Informativi Geografici (GIS)².

Il contributo delle discipline suddette è stato reso possibile, da un punto di vista tecnico, dall'evoluzione della tecnologia informatica. Ci si riferisce, naturalmente, al progressivo abbattimento dei costi collegati all'hardware (desktop computer e server di dati) e al software *open source*³ ma soprattutto alle risorse computazionali e cartografiche reperibili in rete.

1 La principale differenza fra le due è legata all'unità di misura della precisione: quella grafica ha un'accuratezza metrica mentre quella cartografica centimetrica o sub-centimetrica (cfr.: Musson, 2005).

2 Esiste una ricchissima bibliografia su applicazioni di GIS e Telerilevamento in Archeologia. Fra i testi, possiamo ricordare Conolly *et al.*, 2006; Chapman, 2006; Wheatley D., 2002; Parcak S., 2009.

3 Un software *open source* è rilasciato (generalmente gratuitamente), con un tipo di licenza che permette una collaborazione allargata nello sviluppo e nel controllo degli errori. Esso può essere infatti perfezionato da tutti gli sviluppatori attraverso la diffusione via Internet del codice sorgente (da qui il termine *open source*; cfr. per approfondimenti: Bertani, 2004 e il portale Open Source Initiative che riporta una bibliografia ricchissima di risorse web e bibliografiche su tale tipologia di software (<http://opensource.org/links>).

La rete e più precisamente le tecnologie collegate al Web, il suo più famoso servizio, è stata il volano che ha prodotto i maggiori risultati. Il *cloud computing*, ovvero l'informatica basata sulla nuvola/rete, sta di fatto rivoluzionando il modo di intendere, distribuire ed utilizzare il software⁴. La nuvola fornisce il software, eventualmente l'hardware virtualizzato⁵ ed anche la base cartografica per posizionare le planimetrie dei siti archeologici. La base cartografica può essere disegnata (si pensi ad OpenStreet Map⁶, il famoso progetto internazionale per la realizzazione di cartografia libera ad opera dei cosiddetti volontari dell'informazione geografica - VGI⁷); oppure telerilevata e resa disponibile attraverso i *geobrowser*⁸, a titolo più o meno gratuito, da colossi informatici quali Google o Microsoft.

Si è già sottolineata l'utilità della fotografia aerea come strumento sussidiario per la ricerca archeologica e se ne è tracciata una stringata evoluzione storica (si vedano: Favretto e Mauro, 2015; Mauro, 2015). Si desidera aggiungere che una ricognizione aerea è soprattutto in grado di spiegare le dinamiche territoriali attorno ad una microarea ove sia stato scoperto uno specifico monumento. Ciò è particolarmente importante per capire quali possono essere state le relazioni fra il sito archeologico e le aree circostanti in quanto "molte volte emer-

4 Secondo la definizione del NIST (National Institute of Standards and Technology) del 2011, "*Cloud Computing* è un modello che prevede la possibilità di distribuire risorse informatiche ad una moltitudine disomogenea di dispositivi informatici collegati alla rete". Per approfondire, si veda Mell and Grance, 2011.

5 Si intende con il termine virtualizzazione un metodo per ricreare macchine virtuali sulla stessa piattaforma hardware. Partizionando per esempio una macchina di tipo server è possibile installare un sistema operativo α su una macchina virtuale e un sistema operativo β su un'altra macchina virtuale, ambedue ottenute dal partizionamento del server di partenza.

6 Per approfondimenti su OSM si rimanda, oltre al sito <http://www.openstreetmap.org/>, ai testi di Bennet, 2010 e di Ramm *et alii*, 2011.

7 VGI (*Volunteered Geographic Information*), è l'informazione geografica prodotta gratuitamente da mano d'opera volontaria in rete. Si tratta di escursionisti, turisti, appassionati di cartografia digitale, studenti che, utilizzando il GPS o gli altri strumenti informatici disponibili sul Web, mappano con cura e periodicità le aree geografiche dove vivono o che hanno visitato. Si veda a tal riguardo Goodchild, 2007; Sui *et alii*, 2013.

8 Per approfondire si veda, ad esempio, Goodchild, 2008; Favretto, 2009.

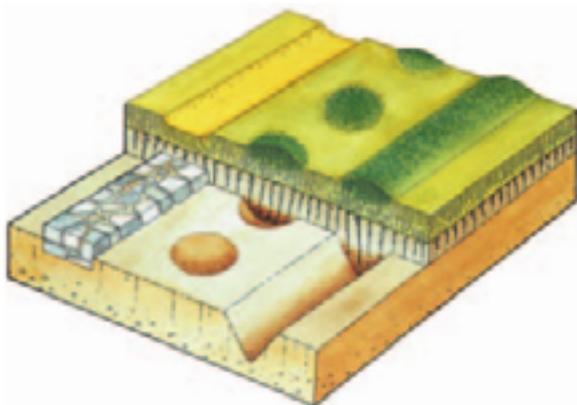
gono dati rilevanti non nel sito di primo interesse ma nelle aree limitrofe o nei siti adiacenti alla zona indagata [...] Tutte le tracce riscontrabili in foto aerea [...] sono da considerarsi archeologiche in seguito alla verifica sul terreno con ricognizioni di superficie o scavo stratigrafico” (Mastroianni, 2014). Infine, va ricordato che le fotografie aeree possono essere verticali (l’apparecchio fotografico è rivolto al terreno in direzione ortogonale rispetto al piano della fotografia), oppure oblique (il piano della fotografia presenta una certa angolazione rispetto al piano del terreno) (cfr. Musson, 2005). Le foto oblique sono infatti molto utili per scopi archeologici in quanto, scattate in determinate condizioni di illuminazione (per sfruttare la luce radente), possono evidenziare la presenza di microrilievi sul terreno.

Il costo delle ricognizioni aeree ha spinto gli operatori del settore a ricercare delle soluzioni alternative più a buon mercato. Oltre alle riprese da pallone aerostatico (che sono il filo rosso che congiunge i lavori del vol. 155), vanno ricordate altre risorse fotografiche cosiddette *offline* e *online*. Le prime sono i ben noti archivi fotografici di enti quali l’Istituto Geografico Militare di Firenze o l’Aerofototeca nazionale a Roma. Le seconde sono tutte le cartografie e le immagini telerilevate accessibili via Web. Ci si riferisce sia ai repertori di mappe e/o immagini

delle varie Regioni italiane (accessibili ad esempio attraverso il portale cartografico nazionale – <http://www.portalecartografico.it/>), sia ai repertori di enti nazionali (ad esempio il Geoportale Nazionale del Ministero dell’ambiente – <http://www.pcn.minambiente.it/GN/>). Non solo: l’archeologo che sia interessato alle immagini telerilevate di una certa zona può trovare in rete tali risorse a costo zero, accessibili attraverso i *geobrowser*, che permettono di visualizzare le immagini telerilevate negli enormi database di società private multinazionali quali Google o Microsoft. In particolare, le fotografie oblique ad alta definizione fornite da Bing Maps di Microsoft si sono dimostrate particolarmente efficaci nell’aerofotointerpretazione archeologica di un sito noto quale la città etrusca di Veio (cfr. Mastroianni, *op. cit.*).

Come è noto, gli elementi che in una fotografia aerea possono denunciare la presenza di un sito archeologico sono essenzialmente di due tipologie: si possono riconoscere discontinuità sul suolo nudo (cosiddetti *soil mark*), oppure nella copertura vegetale (*crop mark*).

I *soil mark* (figura 1B) sono essenzialmente tracce visibili dall’alto in aree non vegetate, dovute al fatto che il suolo, se alterato o ricoperto con materiali da riporto per interventi antropici, non può essere riportato alle originali condizioni di uniformità del suo aspetto



1A



1B

FIGURA 1 – *Crop mark* positivi e negativi (1A); esempio di *soil mark* (1B) (fonte: Musson *et al.*, 2005)

visto dall'alto. L'improvvisa presenza di terreno ad alto contenuto pietroso in suoli sciolti può rendere evidenti tracce di antiche costruzioni o viabilità. Le stesse tracce saranno ancora più evidenti in determinate condizioni di umidità del terreno e pertanto la possibilità di eseguire delle fotografie nei migliori momenti possibili (dopo una pioggia che interrompe un periodo di siccità, ad esempio), rende ancora più efficaci le riprese stesse.

I *crop mark* (figura 1A) sono invece discontinuità della copertura vegetale, che si palesano in modo più evidente sotto forma di variazioni di colore e/o crescita in campi coltivati (cereali o colture pratensi). I *crop mark* sono positivi quando appaiono tracce verdi su un fondo maggiormente giallo (denotando, ad esempio, la presenza di un antico fossato, che assicura un maggior contenuto di umidità al terreno); negativi quando la traccia è, invece, di colore più giallo rispetto al resto del campo (per una riduzione del nutrimento alla pianta o, semplicemente, della disponibilità idrica alla pianta in quella zona). In questo caso la traccia può denunciare la presenza di muri o di altre strutture ipogee.

Nel contributo vengono messi a confronto i primi risultati di alcune indagini compiute nelle aree di due castellieri⁹ del Carso isontino e triestino, sulla base di fotografie riprese da pallone aerostatico.

Le due aree sono quella di San Polo (Monfalcone – Provincia di Gorizia) e di Caresana-monte Trmun (Provincia di Trieste). L'obiettivo è stato quello di testare l'efficacia della cosiddetta mappatura da pallone (*balloon mapping* – BM) su due siti citati in alcuni testi dedicati ai castellieri locali (cfr., fra gli altri: Marchesetti, 1903; Flego *et al.*, 1993; Montagnari Kokelj, 1989; Montagnari Kokelj, 2001; Betic *et alii*, 2008). Si è appositamente voluto indagare dei siti conosciuti per avere un primo riscontro della procedura d'indagine all'oggetto. Mentre però il Castelliere di San Polo, che si inserisce in un sistema di abitati fortificati allineati a oriente di Monfalcone, è ben noto e rilevato fin dalle più antiche indagini su questi insediamenti (cfr. Marchesetti 1903), la pre-

senza di un castelliere sul monte Trmun, che verrebbe a completare un sistema di abitati di altura strategicamente disposti nell'area tra la foce del rio Ospso e l'altopiano carsico (Stramare, Montedoro, Prebenico, San Rocco, Monte Carso, San Michele, San Servolo, Grociana Piccola: cfr. Bernardini *et al.* 2013; Bernardini *et al.* 2015), è stata finora soltanto supposta sulla base di pochi resti archeologici affioranti (Flego *et al.*, 1993; Progetto Interreg Italia-Slovenia IIIA AltoAdriatico: Carta Archeologica – Elenco UT 85 Presunto castelliere di Trmun).

Naturalmente si considera tale procedura complementare alle analisi archeologiche tradizionali, da impiegare preliminarmente ad esse, in quanto meno costosa ed impattante, sia parallelamente e posteriormente ad esse, in modo da evidenziare eventuali ulteriori zone da scavare.

I due siti sono stati ripresi dall'alto in occasione di alcune uscite, realizzate durante il 2014 e il 2015. Più precisamente, il sito di San Polo è stato ripreso nell'aprile 2014 mentre quello di Trmun – Caresana è stato indagato durante le tre uscite di marzo 2014, dicembre 2014 e marzo 2015. Nelle due ultime uscite a Caresana è stato utilizzato un apparecchio fotografico sensibile all'infrarosso vicino.

Durante i voli, effettuati in giornate terse e con calma di vento, l'apparecchio fotografico portato dal pallone è stato programmato in modo da scattare continuamente le fotografie. Il controllo a terra del pallone, mediante i cavi di sicurezza regolati da verricello, non è stato statico, nel senso che gli operatori si sono mossi nell'area per garantire una maggior area ripresa dalle fotografie. Ciò ha prodotto un cospicuo numero di fotogrammi, alcuni dei quali sono stati mosaicati dopo essere stati raddrizzati con tecniche fotogrammetriche.

La mosaicatura delle immagini richiede, come noto, la disponibilità di fotografie ortogonali al terreno. Questo ha determinato la totale assenza di fotografie oblique in questa prima fase della ricerca. Naturalmente questo potrà essere l'oggetto di ulteriori indagini (peraltro in calendario, essendo il presente progetto stato rifinanziato per il triennio 2014-2016). Le uscite di marzo e aprile 2014 (rispettivamente a Caresana e San Polo), sono state fatte senza alcuna stabilizzazione dell'apparecchio fotografico mentre nelle due successive a Caresana si sono utilizzati due stabilizzatori, ovvero quello artigianale

⁹ Com'è noto, i castellieri sono villaggi fortificati con cinte di mura in pietra posti sulla cima dei rilievi e delle alture carsiche e risalenti all'età del bronzo. Di loro attualmente rimane solo qualche residua testimonianza come, ad esempio, anomali cumuli di pietre o particolari geometrie sul territorio (cfr., fra gli altri: Marchesetti, 1903; Flego *et al.*, 1993; Montagnari Kokelj, 2005).

con bottiglia di plastica e quello con il picavet (cfr. Mauro, 2015). Anche l'altezza delle riprese è stata progressivamente incrementata (da 60-75 metri circa ai 100 metri dell'ultima effettuata). Ciò ha consentito di utilizzare un minor numero di fotogrammi per il mosaico.

Nel contributo si illustra brevemente il procedimento di accostamento delle immagini adottato (utilizzando l'applicativo in modalità *cloud computing* MapKnitter), e si presentano gli ortomosaici prodotti in tal modo, frutto delle quattro uscite sul campo. A seguire, per il solo sito di Caresana, viene presentata un'elaborazione degli "ortomosaici" di dicembre 2014 e marzo 2015; è stato infatti calcolato per ambedue un indice di vegetazione (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*¹⁰), successivamente classificato in 10 classi di intensità dello stesso.

Sulla base delle cartografie tematiche realizzate, si sono infine identificate alcune possibili anomalie della vegetazione per il sito di Caresana, potenziali *crop mark* che potrebbero indicare la presenza di rovine ipogee, oggetto di possibili future analisi stratigrafiche.

2. I dati utilizzati e l'ambiente operativo di MapKnitter 2.0

Come accennato, nel corso del periodo 2013-2014 sono state realizzate diverse uscite sul campo, inizialmente per acquisire dimestichezza con il pallone aerostatico e per ottimizzare le modalità di ripresa; in una seconda fase sono state acquisite le immagini utili alla ricerca in corso.

Le immagini selezionate sono state georiferite utilizzando il software in modalità *cloud* MapKnitter. Come già evidenziato in Mauro 2015, l'utente iscritto può modificare la direzione e le dimensioni delle immagini, senza applicare precedentemente alcuna trasformazione.

¹⁰ Come già accennato in Mauro, 2015, l'NDVI - Normalized Difference Vegetation Index è un indice di vegetazione molto usato nel Telerilevamento. Sfrutta la risposta spettrale della vegetazione nel rosso e nell'infrarosso applicando un algoritmo normalizzato che fornisce ai pixel un valore compreso fra -1 e 1 (cfr. Brivio *et alii*, 2006). Per un applicazione di tale indice in archeologia si può vedere, tra gli altri, Parcak, 2009; Corrie, 2011.

Nello specifico, l'utente deve dapprima 'creare una mappa': in termini concreti, ciò significa denominarla, individuare la posizione sulla quale desidera essa sia centrata, richiamando la località di riferimento (ad esempio, Caresana - Trieste), decidere se la cartografia risultante debba essere di pubblico dominio (oppure no) e salvare la mappa. L'operatore può inserire anche ulteriori dettagli sull'ortomosaico che sta realizzando. Tutte queste informazioni sono visibili in qualsiasi fase di trattamento delle immagini (figura 2A) nel menù che riporta i metadati ('About'). In un secondo momento, l'autore deve 'importare' le fotografiche acquisite dall'alto ritenute utili per la creazione dell'ortomosaico. La dimensione massima consentita è di 10 Megabyte. Le immagini selezionate vengono salvate sul *server* cartografico di MapKnitter (figura 2B).

Successivamente, l'utente può posizionare le singole immagini sulla base cartografica di riferimento, ossia quella di Google (Google satellite) o di OpenStreetMap. Con gli strumenti messi a disposizione (figura 3), l'utente può: 1) posizionare l'immagine al centro del punto di ripresa trascinandola con la modalità 'shift and drag'; 2) ruotare l'immagine secondo la direzione più corretta; 3) stirare l'immagine, selezionando gli angoli e trascinandoli sulla posizione più corretta, e usando la cartografia di base come riferimento; 4) controllare la corretta sovrapposizione della foto sulla cartografia, lavorando sull'opacità o sulla trasparenza; 5) bloccare le posizioni degli angoli una volta raggiunto un risultato soddisfacente.

Una volta che le immagini siano state correttamente posizionate, l'utente può esportare la cartografia realizzata. Le singole immagini vengono accostate in un unico prodotto finale; l'utente può definire la risoluzione spaziale finale dell'immagine (figura 4A). Una volta completata l'esportazione dell'ortomosaico, l'operatore può scegliere in quale formato acquisire il prodotto (figura 4B). Se inizialmente l'utente ha scelto di rendere pubblico il proprio lavoro, qualsiasi navigatore (senza essere per forza iscritto a MapKnitter) può 'scaricare' dalla rete il risultato.



FIGURA 2
 A) Metadati sull'ortomosaico;
 B) alcune delle immagini inserite per la creazione dell'ortomosaico

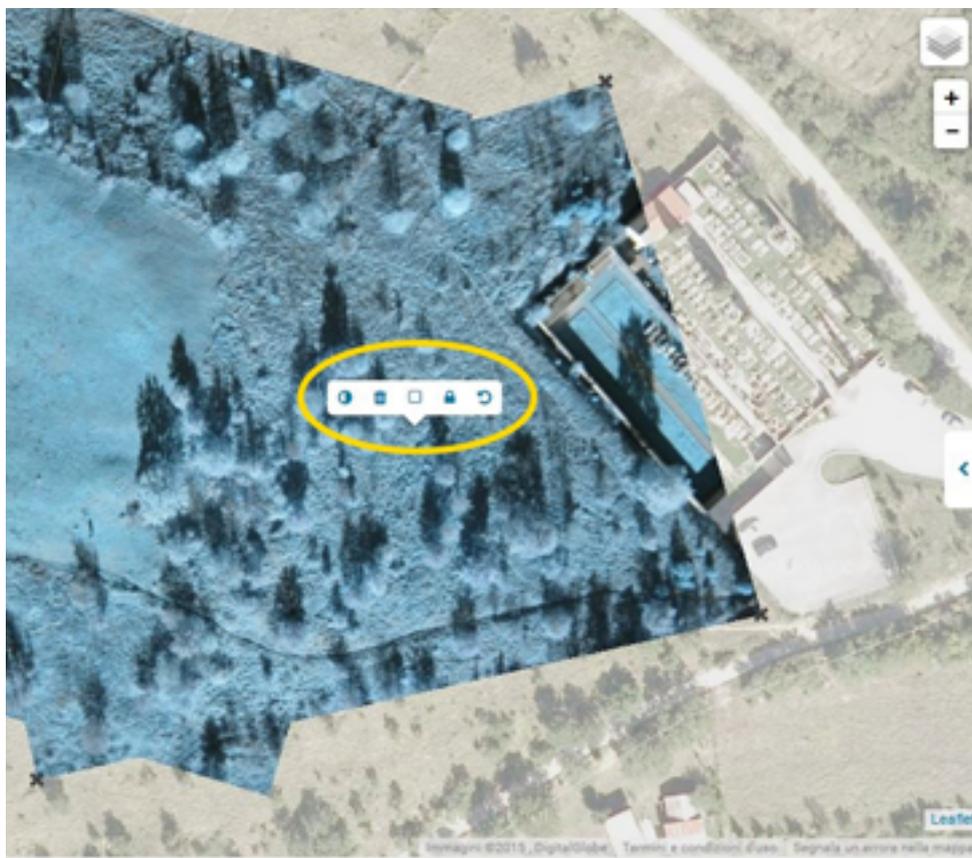


FIGURA 3
 L'ambiente grafico di MapKnitter 2.0. In alto a destra l'icona *multilayer* che permette di selezionare la cartografia di base (nel presente caso, Google satellite) e l'icona zoom. Al centro, gli strumenti per lavorare sulla singola immagine. Da destra a sinistra: 1) strumento per ruotare l'immagine; 2) strumento per 'bloccare' le posizioni degli angoli, una volta raggiunto un risultato soddisfacente; 3) strumento per la sola visualizzazione dei bordi dell'immagine (trasparenza 100%); 4) strumento per eliminare l'immagine; 5) strumento per regolare l'opacità dell'immagine al 50%

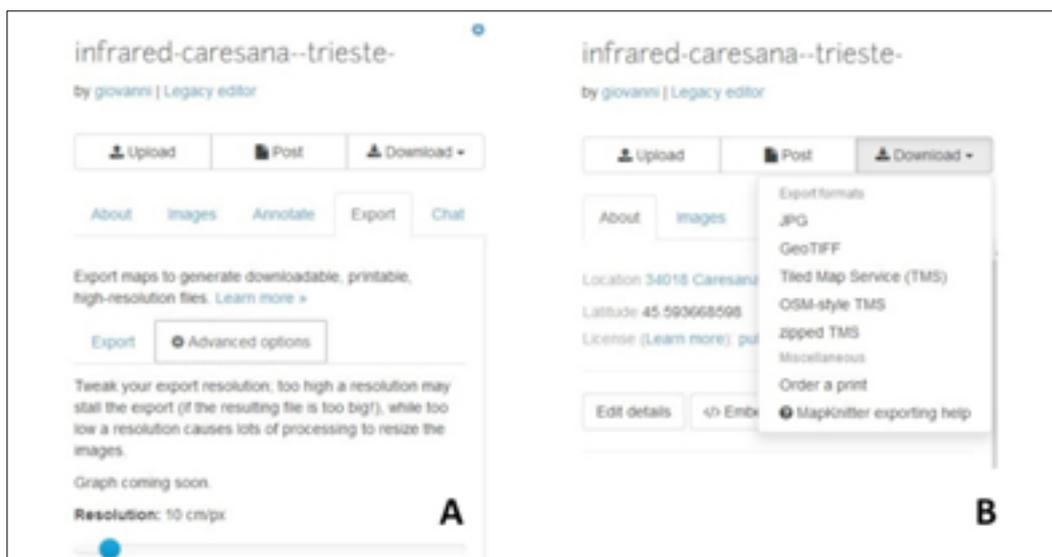


FIGURA 4 – A) il pannello per l'export dell'ortomosaico; B) i formati in cui l'utente può salvare il risultato

3. Gli ortomosaici dei castellieri di Caresana e San Polo

Vengono di seguito riportati i principali risultati realizzati con il programma MapKnitter e relativi ai due castellieri oggetto di studio. Tutte le cartografie realizzate hanno una risoluzione spaziale uniforme, ossia 10 cm/pixel, corrispondenti ad una scala di circa 1:500. Come sottolineato da Musson *et al.* (2005), “trovare la scala giusta” è uno dei problemi più rilevanti anche in funzione della scala finale a cui viene restituita graficamente la carta. Una rappresentazione a grandissima scala, come quella del presente caso, permette di documentare i dettagli minimi e di poter valutare (anche metricamente) tutti gli elementi contenuti nella carta. Tutte le carte sono inquadrature nel sistema di riferimento WGS84 (EPSG: 4326) e il formato prescelto per il salvataggio dei risultati è GeoTiff.

Cronologicamente, il primo ortomosaico realizzato è relativo al sito di Caresana (uscita di marzo 2014 – figura 5): si tratta di un'elaborazione fatta su quindici immagini acquisite con una fotocamera digitale Pentax 3, (cfr. per le specifiche tecniche relative alla macchina fotografica, Mauro, 2015). In questo caso il pallone aerostatico era posizionato ad un'altezza di circa cinquanta metri. La cartografia finale copre un'area abbastanza irregolare, è lunga circa 300m e larga circa 130m. Vi-

sto il numero elevato delle immagini che compongono la cartografia risultato e il loro originale grado di distorsione, fortemente condizionato dall'assenza di uno stabilizzatore per la fotocamera sul pallone, il prodotto finale non ha raggiunto un risultato soddisfacente da un punto di vista strettamente cartografico¹¹.

Situazione analoga da un punto di vista cartografico è anche quella relativa al sito di San Polo. L'ortomosaico è il risultato di un'elaborazione di sole due immagini acquisite, come nel caso precedente, dalla fotocamera Pentax 3, montata sul pallone con staffa (quindi senza stabilizzatore). Il numero esiguo di immagini è dovuto al fatto che le foto raccolte sono molto oblique e ciò ostacola fortemente, come ricordato, le procedure di mosaicatura delle stesse. In figura 6 si può vedere il risultato ottenuto.

Le figure 7 e 8 riportano, invece, i due ortomosaici relativi al sito di Caresana, realizzati rispettivamente nel dicembre 2014 e nel marzo 2015, utilizzando la macchina fotografica Canon modificata per catturare l'in-

¹¹ In un precedente contributo (Mauro, 2014) tale errore è stato stimato essere qualche metro (circa 3,5 m). La stima è stata realizzata con il programma MapAnalyst per definirne gli 'errori interni' (distorsione e rotazione), mediante l'identificazione di punti doppi sulla cartografia di riferimento (nel caso specifico, l'ortofotocarta del Friuli Venezia Giulia e la cartografia realizzata dal pallone aerostatico).



FIGURA 5 – Castelliere di Caresana – Elaborazione su MapKnitter (sullo sfondo la base telerilevata fornita da ESRI)

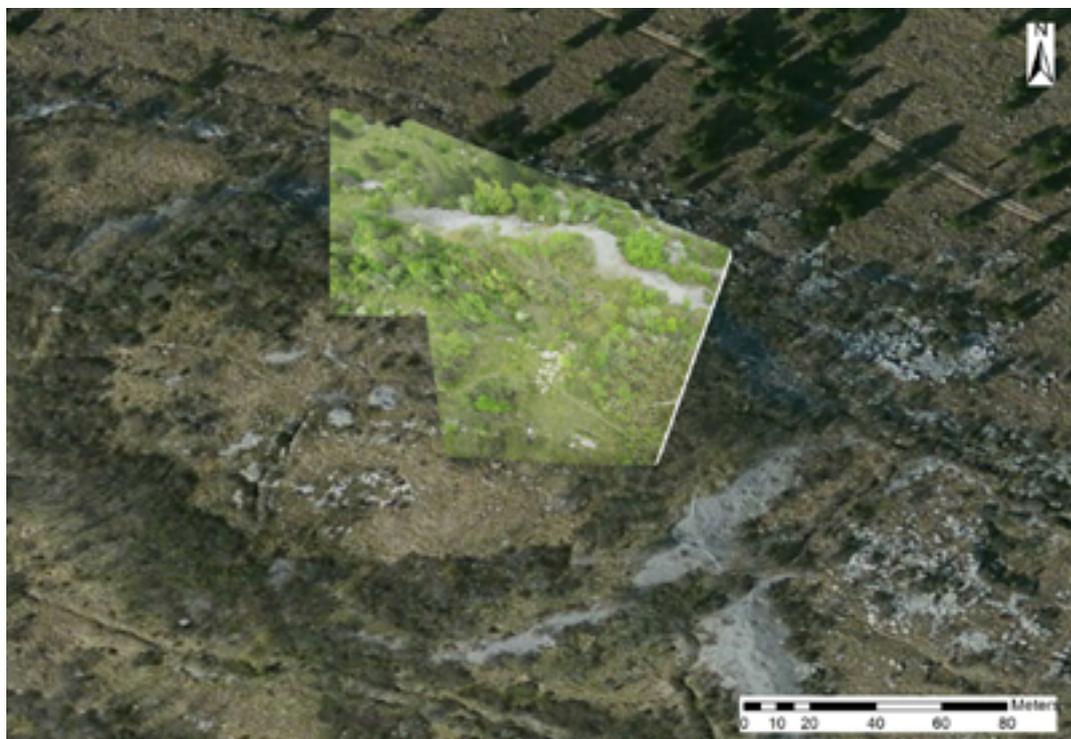


FIGURA 6 – Ortomosaico del castelliere di San Polo – Elaborazione su MapKnitter (sullo sfondo la base telerilevata fornita da ESRI)

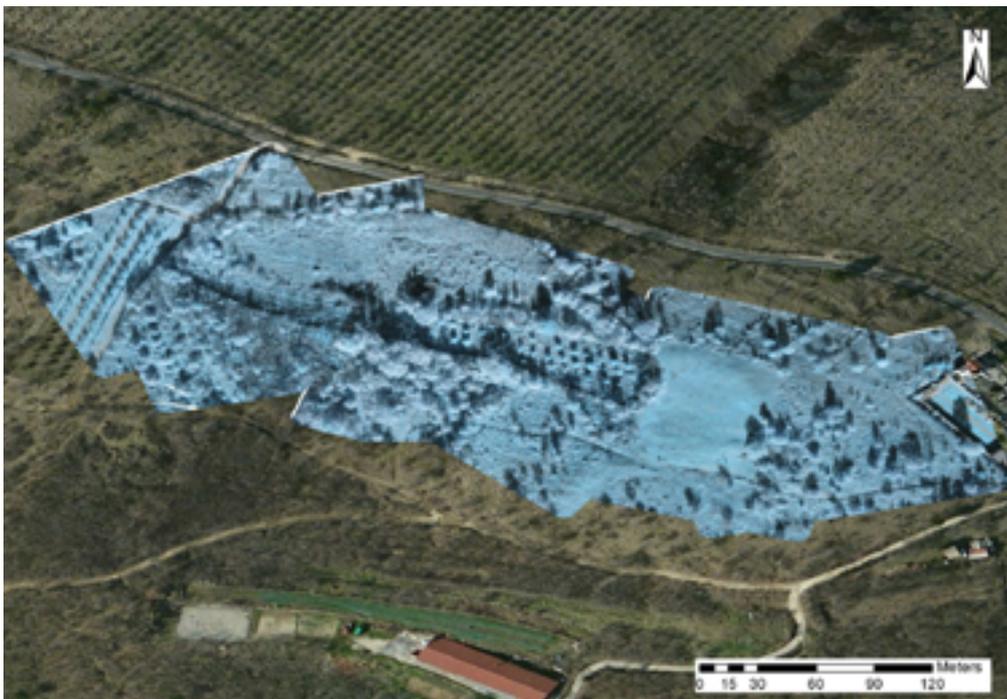


FIGURA 7 – Ortomosaico del castelliere di Caresana, realizzato con foto sensibili all'infrarosso vicino da fotocamera Canon su pallone aerostatico posizionato a circa 75m di altezza (sullo sfondo la base telerilevata fornita da ESRI)

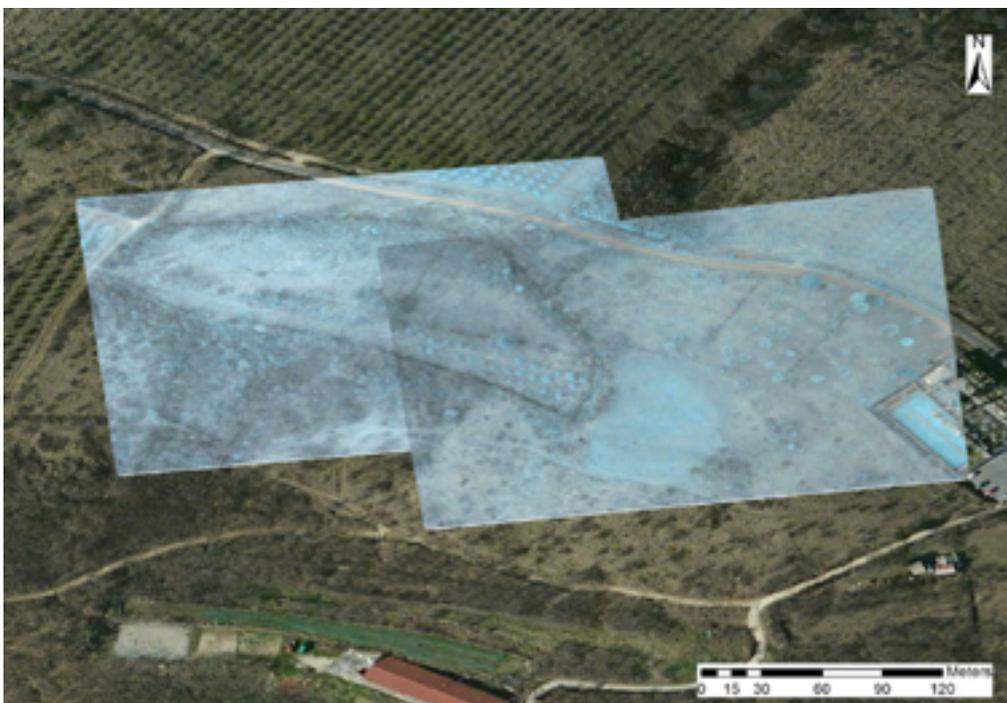


FIGURA 8 – Ortomosaico del castelliere di Caresana realizzato con foto sensibili all'infrarosso vicino da fotocamera Canon su pallone aerostatico posizionato a circa 100 m di altezza (sullo sfondo la base telerilevata fornita da ESRI)

frarosso vicino. Come già ricordato da Mauro (2015), attraverso l'eliminazione del filtro per la luce infrarossa e l'inserimento di un filtro Wratten 25A per la selezione dell'infrarosso vicino (NIR – *Near InfraRed*), si ottiene che la macchina fotografica acquisisca dei fotogrammi con i seguenti tre strati:

- un canale totalmente infrarosso vicino (NIR puro), da noi visualizzato con il canale blu nelle due foto a falsi colori;
- un canale con predominanza di infrarosso vicino e un certo ammontare residuale di rosso (NIR + RED), da noi visualizzato con il canale verde nelle due foto a falsi colori;
- un canale con predominanza di rosso ed un certo ammontare residuale di infrarosso vicino (RED + NIR), da noi visualizzato con il canale rosso nelle due foto a falsi colori.

Poiché le fotografie sono state prese in un ambiente naturale con poche pietre affioranti e nessuna costruzione antropica, la predominanza della radiazione NIR, visualizzata con i canali blu e verde, sovrasta la componente rossa dell'immagine, conferendo in tal modo la predominanza blu alle foto, come si può osservare negli ortomosaici di figure 7 e 8.

Nell'uscita di dicembre 2014 la macchina fotografica è stata stabilizzata mediante il metodo della bottiglia di plastica mentre il pallone aerostatico è stato sollevato a circa 75 m di altezza. Per realizzare l'ortomosaico sono state utilizzate sei fotografie (meno della metà del caso di figura 5). In questo caso infatti le foto non erano affette da forte distorsione zenitale e il mosaico finale è risultato perciò decisamente migliore rispetto al caso precedente.

Nella successiva uscita di marzo 2015 il pallone aerostatico è stato sollevato a circa 100 m di altezza ed è stato usato il *picavet* come metodo di stabilizzazione della macchina fotografica. Come si vede dalla figura 8, in questo caso è stato sufficiente posizionare due fotografie in MapKnitter per coprire l'area oggetto di studio, garantendo di fatto una cartografia con un complessivo minore grado di distorsione¹².

¹² L'obiettivo dell'analisi è l'identificazione di anomalie per la individuazione di eventuali siti archeologici. Per tale ragio-

I due ortomosaici delle figure 7 e 8 sono poi stati elaborati in modo da calcolare, per ogni pixel, l'indice di vegetazione NDVI. Quest'ultimo è stato calcolato utilizzando lo strato NIR puro e quello RED + NIR di ciascun ortomosaico, utilizzando la formula: $NIR-RED/NIR+RED$.

Il risultato è stato quindi un singolo strato (per ciascun ortomosaico), con una variabilità dei valori dei pixel compresa da -1 a +1 (assenza di vegetazione – valori negativi; vegetazione da pratense a forestale – valori positivi in progressivo incremento). I due strati dei valori dell'indice di vegetazione NDVI sono stati successivamente classificati in dieci classi di intervallo, utilizzando come algoritmo di classificazione quello dei quantili.¹³ Le figure 9 e 10 mostrano rispettivamente gli strati NDVI classificati in dieci classi relative all'ortomosaico di Caresana di dicembre 2014 e quello di marzo 2015.

4. Individuazioni di eventuali anomalie della vegetazione per il sito di Caresana – Trmun

Prima di presentare i risultati relativi al sito di Caresana – Monte Trmun, si desidera riassumere brevemente le condizioni meteorologiche del sito nei due momenti delle riprese (effettuate il 12 dicembre 2014 e il 30 marzo 2015). In particolare, sono stati presi in considerazione i dati dell'Osservatorio meteorologico regionale del Friuli Venezia Giulia (OSMER FVG), relativi a precipitazioni, umidità e temperatura, per la stazione meteo di Muggia¹⁴, la più vicina al sito. Il periodo per il quale sono stati regi-

ne, una ridotta distorsione delle immagini selezionate (acquisite con un sistema di sospensione della fotocamera utile a tale fine) non compromette il fine ultimo della ricerca. Proprio per questo motivo non sono state condotte analisi approfondite sugli 'errori interni' sull'ortomosaico di Caresana.

¹³ Come è noto tale algoritmo prevede la suddivisione della distribuzione dei dati in classi con medesima frequenza. Nel caso specifico il 10%.

¹⁴ Le altre stazioni meteo più vicine afferenti, alla rete "OSMER FVG" sono: Trieste (molo Bandiera), Borgo Grotta Gigante e Sgonico. La prima è posizionata sul mare, le altre due nel Carso interno (entrambe quindi poco simili meteorologicamente a Caresana). Si è optato di considerare i dati di Muggia in quanto essa è la stazione più prossima ed è localizzata a 35 m s/m (un centinaio di metri più in basso rispetto al Monte Trmun, che è a 157 m s/m).

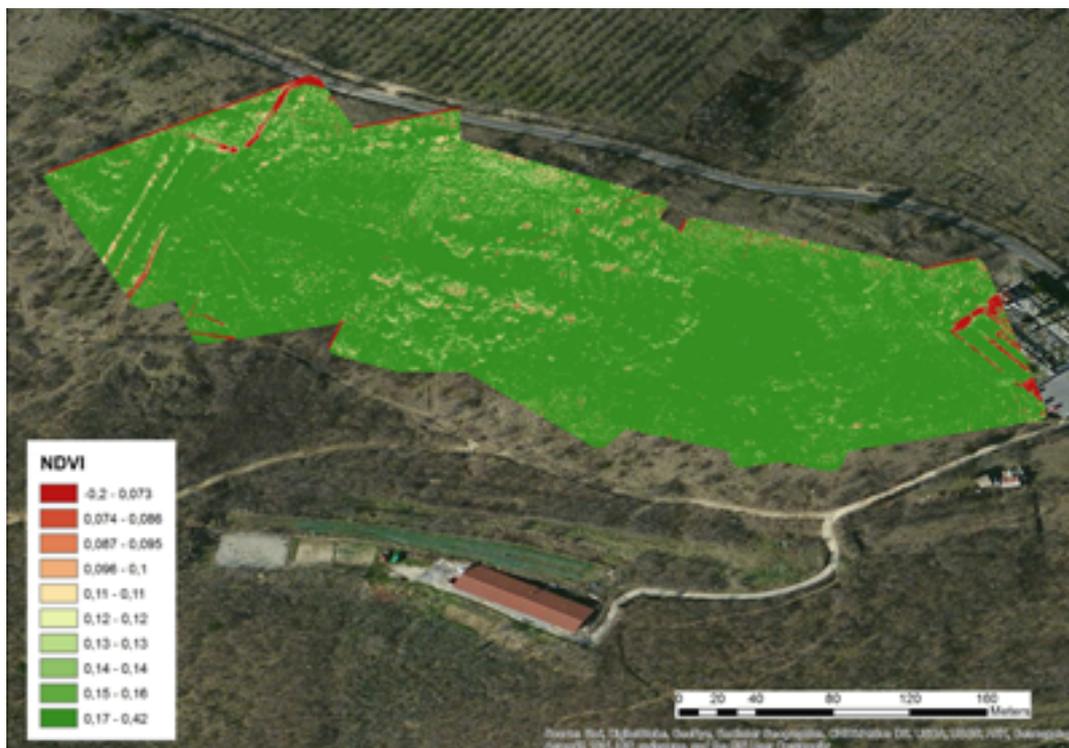


FIGURA 9 – NDVI classificato 12 dicembre 2014 (algoritmo di classificazione: quantili; 10 classi) (sullo sfondo la base telerilevata fornita da ESRI)

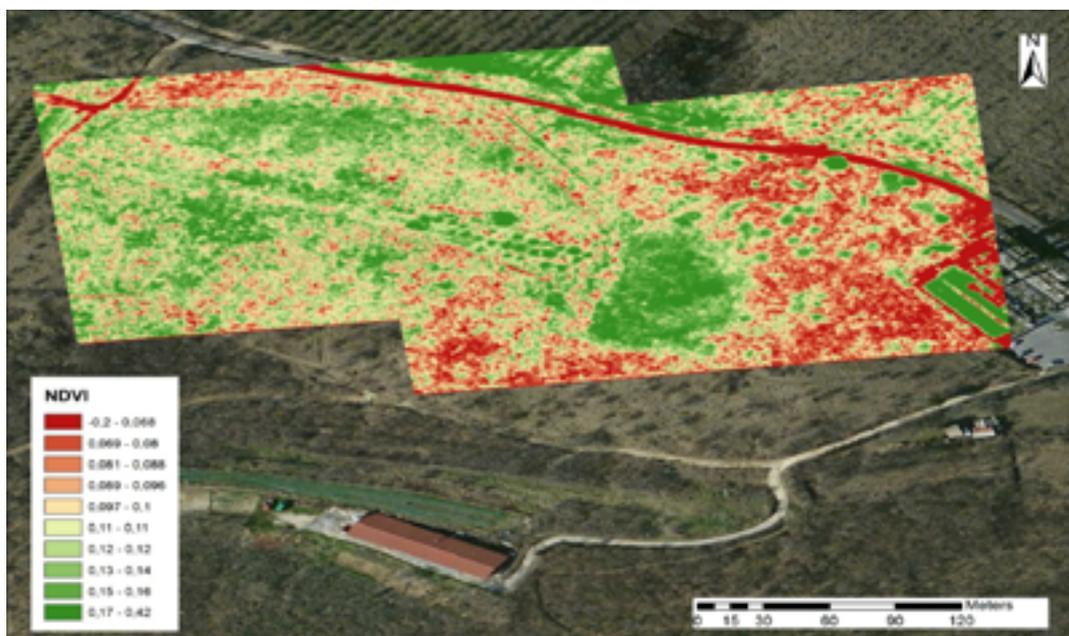


FIGURA 10 – NDVI classificato 30 marzo 2015 (algoritmo di classificazione: quantili; 10 classi) (sullo sfondo la base telerilevata fornita da ESRI)

strati i dati è stato, in entrambi i casi, il mese precedente la data dell'uscita (rispettivamente: 12 novembre – 12 dicembre e 28 febbraio – 30 marzo).

Pur nelle limitazioni legate alla distanza e all'influenza del mare (la cittadina di Muggia è posta sul mare ad una distanza di quasi 6 km in linea d'aria da Caresana, che invece si trova in prossimità dell'altipiano carsico), la conoscenza delle diverse condizioni meteo, come si vedrà, è stata utile per capire alcune differenze, riscontrate nelle condizioni dei prati alle due date.

In sintesi:

- dicembre 2014: temperatura non troppo rigida, considerata la stagione (da circa 15° di novembre ai 9° del 12 dicembre); precipitazioni abbondanti circa dieci giorni prima la data dell'uscita; umidità elevata tutto il mese, anche se in calo il giorno dell'uscita;
- marzo 2015: temperatura leggermente più rigida, non nel giorno di acquisizione ma durante tutto il mese precedente (siamo alla fine dell'inverno); precipitazioni di una certa consistenza circa cinque giorni prima la data dell'uscita; umidità molto più bassa, sia nel giorno dell'uscita che in tutto il mese precedente.

L'analisi delle figure 7, 8, 9, 10 ha permesso di derivare le seguenti ipotesi riguardo ad eventuali *crop mark* in loco:

- osservando i due ortomosaici di figure 7 e 8, ovvero le fotografie a falsi colori con predominanza delle tonalità del blu, appaiono evidenti in ambedue, sulla cima erbosa del monte, uno spiazzo appena delimitato dal rialzo del terreno, che potrebbe indicare un'antica cinta muraria. Tale spiazzo è visibile in entrambe le figure. Nella figura 7, essendo l'ortomosaico non perfettamente ortogonale al terreno, data la minor efficacia dello stabilizzatore usato per la fotocamera (bottiglia di plastica), rispetto al più evoluto *picavet*, il gioco della luce sul rialzo del terreno evidenzia in modo particolare quest'ultimo (specialmente nella parte superiore dello spiazzo – si consideri a tal riguardo anche l'effetto della bassa altezza del sole sull'orizzonte, visto che la stagione della ripresa era dicembre). Nella figura 8, invece, lo spiazzo si palesa evidente per la differenza della copertura vegetale in loco;

- osservando i due ortomosaici relativi all'indice di vegetazione NDVI (figure 9 e 10), si può notare una situazione vegetazionale sensibilmente diversa (soprattutto per i prati) nei due casi. Nel dicembre 2014 il prato appare decisamente più rigoglioso (è infatti quasi del tutto ricompreso nelle due classi più elevate dell'indice) e tale fatto condiziona fortemente la visibilità del presunto sito archeologico. Nel marzo 2015 la situazione è decisamente diversa e l'intera area dell'ortomosaico è maggiormente precisa per ciò che riguarda le diverse tipologie di vegetazione presenti. Ciò permette di riconoscere abbastanza facilmente l'area circolare sulla zona sommitale del monte, che già nel caso delle immagini a falsi colori era stata notata. Il motivo di questa differente condizione dei prati va ricondotto alla diversa umidità del sito alle due date. L'umidità più bassa di marzo, unita al fatto che l'inverno ha rallentato l'attività vegetativa delle piante (rispetto ad una situazione maggiormente umida in dicembre, alla fine di un autunno generalmente piovoso), molto probabilmente condiziona sensibilmente le condizioni dell'indice di vegetazione in loco.

Sulla base delle considerazioni fatte, si propone infine un'ipotesi per la localizzazione di una delle cinte murarie del castelliere di Monte Trmun. Il file vettoriale di figura 11, in sovrapposizione all'ortomosaico di figura 10 (reso parzialmente trasparente per motivi grafici), presenta la restituzione grafica di tale ipotesi.

Si desidera precisare, in riferimento alla citata scala dell'ortomosaico (1:500, cfr. par. 3), dipendente da fatti tecnici legati alla ripresa (altezza della fotocamera ed lunghezza focale dell'obiettivo), che la posizione del *layer* vettoriale, relativo all'ipotesi formulata, non può essere considerata tanto precisa quanto la scala suggerirebbe. Si è volutamente parlato di restituzione grafica e non cartografica, per non correre il pericolo di fraintendimenti.

5. Conclusioni

In questa nota sono stati presentati i primi risultati delle riprese da pallone aerostatico in alcuni siti ove fonti bibliografiche specializzate suggeriscono l'esistenza di

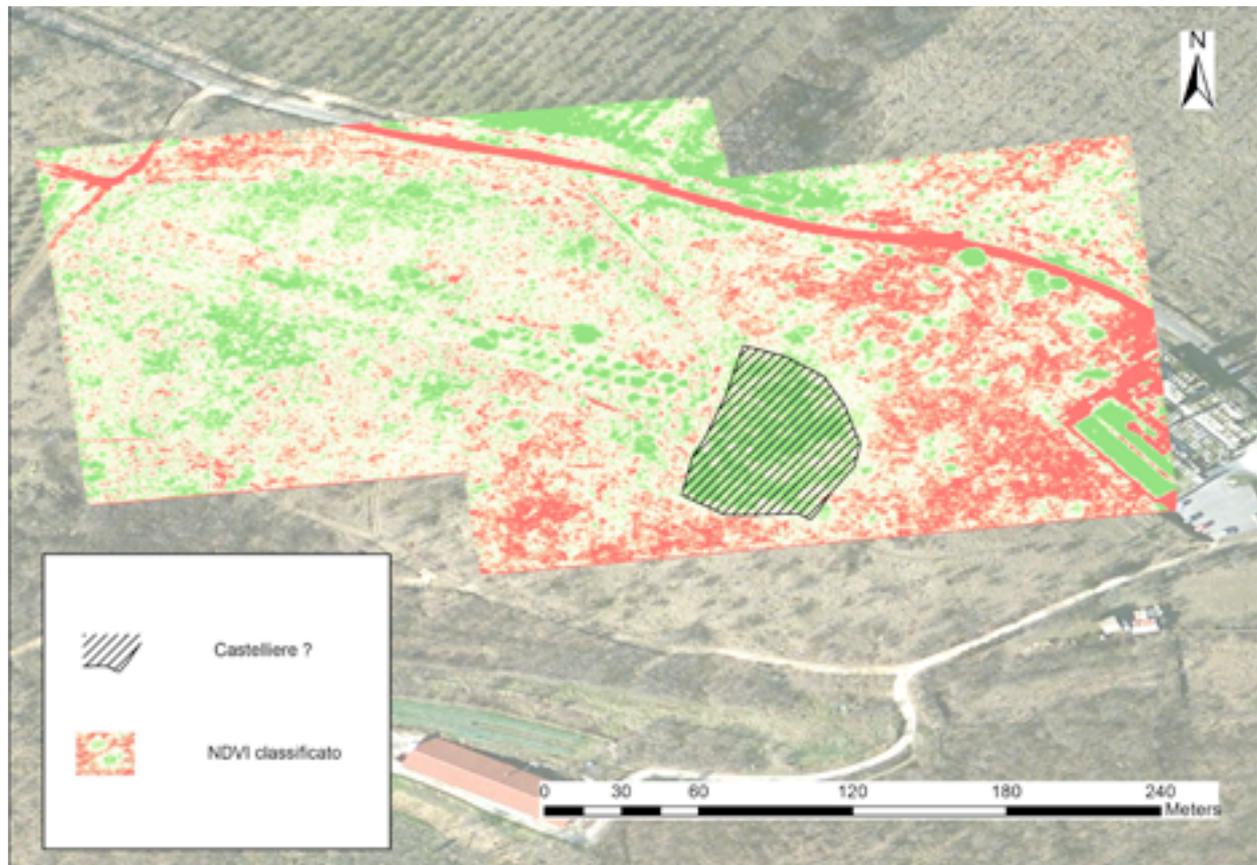


FIGURA 11 – Restituzione grafica dell'ipotesi di localizzazione della cinta muraria in sovrapposizione all'ortomosaico di figura 10 (in trasparenza al 40%)

resti di castellieri nella Provincia di Trieste. Si è voluto riprendere siti già segnalati per poter operare un primo controllo di strumenti software disponibili in rete e facenti capo alla tecnologia cosiddetta BM¹⁵, essendo le riprese aeree una tecnica ampiamente sperimentata in campo archeologico. Il BM, infatti, si è recentemente diffuso (soprattutto nel campo della tutela ambientale), grazie alla sua relativa economicità (almeno per ciò

15 Anche se di primo acchito questa tecnologia può sembrare obsoleta e datata, essa in realtà presenta alcuni vantaggi rispetto all'utilizzo di un drone, i cui costi rimangono significativamente alquanto elevati soprattutto se l'indagine in campo viene eseguita con UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Veicoli a controllo remoto) secondo le direttive della normativa vigente (si veda Mauro, 2015).

che riguarda la struttura), e allo sviluppo dei software liberi, sia in modalità tradizionale (scaricamento ed installazione dalla rete), sia in modalità *cloud computing* (utilizzo di un software residente in remoto tramite applicazioni via Web).

Nel corso di circa diciotto mesi di lavoro i miglioramenti progressivamente adottati sul campo sono stati numerosi e hanno permesso di raggiungere i risultati desiderati. I principali progressi sono stati relativi a: la sicurezza del vettore (scelta di utilizzare almeno due fili molto resistenti per trattenere e guidare il pallone); le modalità di sospensione della fotocamera (dalla staffa rigida al *picavet*); l'altezza di ripresa (da 50m a circa 100m) per avere un minor numero di fotogrammi da georiferire ed accostare; la tipologia di fotocamera (da

una normale digitale ad una camera maggiormente sensibile allo spettro infrarossi), per acquisire dati inerenti lo stato della vegetazione.

Le fotografie ottenute in questo periodo di lavoro sono state selezionate ed elaborate, in modo da ottenere dei mosaici di immagini georiferite. Questi ultimi sono stati ulteriormente elaborati (calcolo di un indice della vegetazione, utilizzando fotografie sensibili all'infrarosso vicino), per ottenere indicazioni su eventuali discontinuità della copertura vegetale (*crop mark*), potenziali segnali di antichi resti ipogei.

I risultati ottenuti, in special modo per il sito di Monte Trmun presso Caresana, in Provincia di Trieste, sono stati incoraggianti. Malgrado tutti i limiti della tecnologia BM, da considerarsi comunque sperimentale, la possibilità di utilizzarla nelle condizioni meteo che si ritengono migliori (con costi comunque abbastanza contenuti), ha permesso di acquisire immagini in un momento vegetativo alquanto propizio. Nel caso specifico è stata evidenziata la possibile presenza di un *crop mark* positivo in un sito già segnalato in bibliografia.

Ovviamente, l'analisi dei risultati non può prescindere da una contemporanea analisi delle condizioni meteo vigenti (nel caso specifico il mese precedente all'uscita in campo) e, ovviamente, della geologia del sito prescelto (nel caso del sito di Caresana, suoli poco profondi su un substrato prevalentemente calcareo, tipico del paesaggio carsico).

L'esito positivo della ricerca condotta incoraggia a proseguire con la sperimentazione in atto, sia nel sito stesso (magari in condizioni di diversa umidità del suolo, della luce o del piano della fotografia rispetto al piano del terreno), sia in altri siti (segnalati e non).

Per quanto riguarda infine il sito del Monte Trmun, si pensa che un'indagine di campo condotta con moderni criteri stratigrafici potrebbe dare una risposta definitiva alle ipotesi fatte (e alle eventuali ipotesi future, frutto di ulteriori riprese dall'alto). Tuttavia, non potendo procedere, almeno per ora, con scavi sistematici in proprietà privata, l'ipotesi che sembrerebbe più attuabile sarebbe quella di procedere con indagini georadar (Boschi, 2009) alquanto puntuali.

Bibliografia

- BENNET J. (2010), *OpenStreetMap. Be your own Cartographer*, Packt Publishing, Birmingham.
- BERNARDINI F., SGAMBATI A., MONTAGNARI KOKELJ M., ZACCARIA C., MICHELI R., FRAGIACOMO A., TIUSSI C., DREOSSI D., TUNIZ C., DE MIN A. (2013), "Airborne LiDAR application to karstic areas: the example of Trieste province (north-eastern Italy) from prehistoric sites to Roman forts", *Journal of Archaeological Science*, 40 (2013), pp. 2152-2160 [<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440312005547>].
- BERNARDINI F., VINCI G., HORVAT J., DE MIN A., FORTE E., FURLANI S., LENAZ D., PIPAN M., ZHAO W., SGAMBATI A., POTLECA M., MICHELI R., FRAGIACOMO A., TUNIZ C. (2015), "Early Roman military fortifications and the origin of Trieste, Italy", *PNAS*, March 31, 2015 vol. 112 no. 13 [<http://www.pnas.org/content/112/13/E1520>].
- BERTANI M. (2004), *Guida alle licenze di software libero e open source*, Nyberg, Milano.
- BETIC A., BERNARDINI F., MONTAGNARI KOKELJ E. (2008), *I castellieri di Trieste fra Carso e mare*, in: AURIEMMA R., KARINJA S. (a cura di), *Terre di mare, Progetto Interreg IIIA Italia-Slovenia Alto Adriatico*, Trieste.
- BOSCHI F. (2009), *Introduzione alla geofisica per l'archeologia*, in E. GIORGI (ed.): *Groma 2. In profondità senza scavare. Metodologie di indagine non invasiva e diagnostica per l'archeologia*, Groma, 2, Bologna, pp. 291-315.
- BRIVIO P.A., LECHI G., ZILIOLO E. (2006), *Principi e metodi del Telerilevamento*, Città Studi Ed., Torino.
- CERAUDO G. (2004), *Un secolo e un lustro di fotografia aerea archeologica in Italia (1899-2004)*, in CERAUDO G. e PICCARRETA F. (a cura di), *Archeologia Aerea. Studi di Aerotopografia archeologica*, Libreria dello Stato. Istituto poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, pp. 47-68.
- CHAPMAN H. (2006), *Landscape Archaeology and GIS*, The History Press Ltd, Stroud.
- CONOLLY J., LAKE M. (2006), *Geographical Information Systems in Archaeology*, Cambridge University Press, Cambridge.
- CORRIE R. K. (2011), *Detection of ancient Egyptian archaeological sites using satellite remote sensing and digital image processing*, *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications II*, edited by ULRICH MICHEL, DANIEL L. CIVCO, Proc. of SPIE Vol. 8181, 81811B-1.
- FAVRETTO A., (2009), *I mappamondi virtuali. Uno strumento per la didattica della Geografia e della Cartografia*, Patron, Bologna.
- FAVRETTO A., MAURO G. (2015), Analisi esplorative delle preferenze dei visitatori di una manifestazione culturale in uno spazio urbano utilizzando il Balloon mapping e la statistica spaziale. Il caso di Trieste Next, "Bollettino dell'Associazione Italiana di Cartografia", 155, pp. 7-19, <http://hdl.handle.net/10077/11652>.
- FLEGO S., RUPEL L. (1993), *I Castellieri della Provincia di Trieste*, Editoriale Stampa Triestina, Trieste.
- GOODCHILD M. (2007), "Citizens as Sensors: the World of Volunteered Geography", *GeoJournal* 69.
- GOODCHILD, M.F. (2008), "The use cases of digital earth", *International Journal of Digital Earth*, 1: 1, 31-42.
- MARCHESETTI C. (1903), *I Castellieri preistorici di Trieste e della regione Giulia*, Trieste, Editore il Museo civico di Storia naturale.
- MASTROIANNI D. (2014), "Bing Maps, aerofotointerpretazione archeologica online. La visione panoramica 'made in Microsoft'", *Archomatica*, Anno V. n. 4, pp 10-15.
- MAURO G. (2014), "Strumenti per una cartografia 'attiva': il balloon mapping. Limiti e potenzialità in un progetto di ricerca a Trieste", *Bollettino dell'Associazione Italiana di Cartografia*, Trieste, 151, pp. 4-16, <http://hdl.handle.net/10077/10371>.
- MAURO G. (2015), "Balloon Mapping come metodologia low-cost per ricerche geografiche e archeologiche",

Bollettino dell'Associazione Italiana di Cartografia, 155, pp. 20-35, <http://hdl.handle.net/10077/11790>.

MELL P., GRANCE T. (2011), *The NIST Definition of Cloud Computing*. NIST – National Institute of Standards and Technology, US Department of Commerce.

MONTAGNARI KOKELJ E. (1989), *Il Carso goriziano tra Protostoria e Storia. Da Castellazzo a San Polo*, Gorizia (Provincia di Gorizia).

MONTAGNARI KOKELJ E. (2001), "Gorizia e la valle dell'Isonzo: dalla preistoria al medioevo", *Monografie Goriziane*, 1. [CD allegato], Gorizia (Provincia di Gorizia).

MONTAGNARI KOKELJ E. (2005), *Carlo Marchesetti e i castellieri 1903-2003*, Editreg, Trieste.

MUSSON C. (2005), *In volo nel passato*, in MUSSON C., PALMER R., CAMPANA S., *In volo nel passato. Aerofotografia e Cartografia archeologica*, All'Insegna del Giglio, Firenze.

MUSSON C., PALMER R., CAMPANA S. (2005), *In volo nel passato, Aerofotografia e cartografia archeologica*, All'Insegna del Giglio, Firenze, pp. 146-150.

PARCAK S.H. (2009), *Satellite Remote Sensing for Archaeology*, Routledge, New York, pp. 92-94.

RAMM F., TOPF J., CHILTON S. (2011), *Open Street Map. Using and Enhancing the Free Map of the World*, UIT, Cambridge.

SUI D., GOODCHILD M., ELWOOD S. (2013), "Volunteered Geographic Information, the Exaflood, and the Growing Digital Divide", in *Crowdsourcing Geographic Knowledge Volunteered Geographic Information (VGI) in Theory and Practice*, a cura di SUI D., ELWOOD S., GOODCHILD M., Springer.

WHEATLEY D. (2002). *Spatial Technology and Archaeology: The Archaeological Applications of GIS*, Taylor & Francis, London.