POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Mappatura speditiva tridimensionale e multi-temporale mediante UAV. I casi di Pescara del Tronto e Accumoli

Original
Mappatura speditiva tridimensionale e multi-temporale mediante UAV. I casi di Pescara del Tronto e Accumoli / TEPPATI LOSE', L., Sammartano, G., Battino, A., DI PIETRA, V., Calantropio, A., Patrucco, G., Maschio, P.F., Colucci, E., Aicardi, I., Angeli, S., Lingua, A.M., Chiabrando, F., Antonia, S.. - In: ATTI E RASSEGNA TECNICA. - ISSN 0004-7287. - STAMPA. - LXXIII, N.3(2019), pp. 54-67.

Availability:
This version is available at: 11583/2846192 since: 2020-09-21T10:15:54Z

Publisher:
Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

12 October 2026

Mappatura speditiva tridimensionale e multi-temporale mediante UAV. I casi di Pescara del Tronto e Accumoli

Rapid three-dimensional and multi-temporal mapping by UAV. The cases of Pescara del Tronto and Accumoli

LORENZO TEPPATI LOSÈ, GIULIA SAMMARTANO, ALESSANDRO BATTINO, VINCENZO DI PIETRA, ALESSIO CALANTROPIO, GIACOMO PATRUCCO, PAOLO MASCHIO, ELISABETTA COLUCCI, IRENE AICARDI, STEFANO ANGELI, ANDREA LINGUA, FILIBERTO CHIABRANDO, NANNINA SPANÒ

Lorenzo Teppati Losè, dottore di ricerca in Beni architettonici e paesaggistici, assegnista in Geomatica presso il Politecnico di Torino, DAD
lorenzo.teppati@polito.it

Giulia Sammartano, dottore di ricerca in Beni architettonici e paesaggistici, assegnista in Geomatica presso il Politecnico di Torino, DAD
giulia.sammartano@polito.it

Alessandro Battino, laureato magistrale in Ingegneria Edile, Politecnico di Torino
alessandro.battino6592@gmail.com

Vincenzo Di Pietra, dottore di ricerca in Urban and regional development, assegnista in Geomatica presso il Politecnico di Torino, DIATI
vincenzo.dipietra@polito.it

Alessio Calantropio, dottorando in Beni architettonici e paesaggistici, Politecnico di Torino
alessio.calantropio@polito.it

Giacomo Patrucco, dottorando in Beni architettonici e paesaggistici, Politecnico di Torino
giacomo.patrucco@polito.it

Paolo Maschio, laboratorio di Fotogrammetria, Geomatica e GIS, DIATI
paolo.maschio@polito.it

Elisabetta Colucci, dottoranda in Urban and regional development, Politecnico e Università di Torino
elisabetta.colucci@polito.it

Irene Aicardi, ricercatore in Geomatica, Politecnico di Torino, DIATI
irene.aicardi@polito.it

Stefano Angeli, in Architettura per il progetto sostenibile, assegnista in Geomatica presso il Politecnico di Torino, DIATI
stefano.angeli@polito.it

Nannina Spanò, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
antonia.spano@polito.it

Filiberto Chiabrando, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
filiberto.chiabrando@polito.it

Andrea Lingua, professore ordinario di Geomatica, Politecnico di Torino, DIATI
andrea.lingua@polito.it

Abstract
L'utilizzo dei Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR), definiti anche come Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), ha sicuramente ricoperto un ruolo centrale durante le diverse fasi di gestione dell'emergenza in Centro Italia a seguito del sisma del 2016. Per la prima volta questi sistemi sono stati utilizzati in maniera estensiva e continuativa durante le operazioni sul campo, grazie soprattutto alla presenza del Nucleo SAPR del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco con il quale i diversi ricercatori del Politecnico di Torino hanno strettamente collaborato. Tali esperienze congiunte sono state fondamentali per definire le esigenze degli operatori sul campo e per mettere a punto delle strategie operative per la georeferenziazione dei blocchi fotogrammetrici, anche con strategia multi-temporale, atte a massimizzare il contributo derivante dall'impiego dei SAPR. In particolare, i prodotti fotogrammetrici derivati dalle acquisizioni effettuate con tali sensori sono stati analizzati per valutarne il contributo nelle fasi di *damage assessment*.

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) played a central role in all the different phases after the emergency in Central Italy following the 2016 earthquake. For the first time, these systems have been widely used in the field operations, especially thanks to the presence of the SAPR operational core of the Italian Firefighters. Different research groups of the Politecnico di Torino successfully cooperate with this operative unit, specialised in the use of UAVs in emergency scenarios. These experiences were fundamentals to define the needs of the experts operating in the field and to determinate operative strategies for the georeferencing of the photogrammetric blocks, also with a multi-temporal approach, that were projected in order to maximize the contribute of UAVs in these scenarios. Furthermore, the photogrammetric products derived from the acquisitions performed with these systems were deeply analysed in order to evaluate their contribute in the damage assessment phases.

1. Strategie e buone pratiche per l'acquisizione dei dati: il caso di Pescara del Tronto

Durante le operazioni che sono state condotte all'interno dell'area del cratere principale nelle zone colpite dal sisma che ha interessato il Centro Italia molteplici sono state le possibilità d'impiego sul campo dei sistemi UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*). La possibilità di impiegare e testare questi sistemi

è stata particolarmente favorita dalla stretta collaborazione instauratasi con gli organi della Protezione Civile e il gruppo SAPR del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, attivi durante tutte le fasi di gestione post emergenza. Tra i diversi siti che sono stati oggetto di campagne di acquisizione sul campo mediante sistemi UAVs verranno riportati con maggior dettaglio in questo contributo i casi di Pescara del Tronto e di Accumoli, mentre una panoramica su alcuni prodotti standard derivati per questi siti e per i siti di Norcia e Amatrice sarà riportata in un contributo della sezione finale dei report brevi[1].

Come ben noto, i fenomeni che hanno interessato la zona del Centro Italia a partire dall'agosto del 2016 si sono configurati come una serie di eventi sismici che hanno colpito a più riprese diverse aree comprese tra regioni di Lazio, Umbria, Marche e Abruzzo. Dei quattro principali eventi sismici verificatesi (24 agosto 2016, 26 ottobre e 30 ottobre 2016 e 18 gennaio 2017) i primi tre sono stati particolarmente rilevanti per il sito di Pescara del Tronto (Figura 1) e quindi oggetto di campagne di misure effettuate nel corso degli ultimi mesi del 2016.

In particolare, il team DIRECT[2] (*DIsaster RECovery Team*) del Politecnico di Torino, in collaborazione con il gruppo SAPR del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco e con il GEER[3] (*Geotechnical Extreme Events Reconnaissance*) team, ha preso parte a tre missioni di rilievo speditivo in quest'area del cratere (settembre, ottobre, e dicembre 2016). L'obiettivo di queste tre campagne di rilievo era legato alla documentazione multi-scala e multi-sensore tramite tecniche speditive delle aree urbane danneggiate a seguito dei ripetuti eventi sismici. Durante tutte le campagne effettuate parte del lavoro sul campo è stato dedicato all'acquisizione di dati tramite piattaforme UAVs e alla sperimentazione di diversi approcci per l'ottimizzazione delle fasi di lavoro e delle successive fasi di elaborazione dei dati.

La pianificazione delle diverse campagne che sono state completate presso Pescara del Tronto ha sicuramente costituito un elemento di complessità notevole, soprattutto a causa del mutare delle condizioni di accessibilità del sito in seguito al susseguirsi degli eventi sismici. Nel corso delle diverse campagne di acquisizione dati realizzate nei mesi finali del 2016 due sono state le piattaforme UAVs impiegate sul campo, una piattaforma ad ala fissa e una piattaforma multi-rotore. Le diverse specifiche generali di queste due tipologie di piattaforme e le diverse caratteristiche d'impiego sul campo sono state già riportate nel contributo a p. 41 in questo volume. In questo contributo verranno invece riportate più nel dettaglio le caratteristiche tecniche delle due piattaforme utilizzate: l'eBee e l'Inspire 1.

Il sistema eBee è prodotto dalla Sensefly e costituisce una soluzione ad ala fissa leggera e maneggevole, molto utilizzata in contesti di emergenza grazie alle sue caratteristiche. La piattaforma utilizzata a Pescara del Tronto è un eBee Classic dal peso di circa 0,7 kg, apertura alare di 96 cm e autonomia di volo compresa tra i 30 e i 40 minuti. La piattaforma è inoltre dotata di tutti i componenti (ad es. sistemi inerziali e sistemi di posizionamento GPS/GNSS) volti a garantire la possibilità di una quasi completa automatizzazione delle fasi di volo tramite il software proprietario dedicato Emotion. L'eBee Classic può essere equipaggiato con diversi sensori, per questa esperienza il sistema è stato equipaggiato con una Canon IXUS 127 HS con sensore CMOS da 1/2.3" da 16.1 MP nel caso dei voli effettuati dal Gruppo SAPR dei Vigili del Fuoco e con una Canon Power Shot S110 che monta un sensore CMOS da 1/1.7" con 12 MP di risoluzione per i voli effettuati dal team DIRECT. I principali vantaggi nell'utilizzo di questo sistema risiedono quindi nella possibilità di mappare ampie porzioni di territorio in tempi ridotti, mentre gli svantaggi sono collegati alla necessità di un'area di decollo e atterraggio piuttosto ampia, pianeggiante e libera da ostruzioni. La piattaforma è inoltre molto più soggetta alle condizioni atmosferiche (come ad esempio il vento) rispetto ad un sistema multi-rotore.

L'Inspire 1 è invece una piattaforma multi-rotore, quadricottero, prodotta da DJI (Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co., Ltd Technologies) dal peso di circa 3,5 kg e

Figura 1. Il sito di Pescara del Tronto tra settembre (a sinistra) e dicembre (a destra) 2016.

un'autonomia di volo di circa 20 minuti. Anche questa piattaforma garantisce la possibilità di montare diversi sensori, per i voli realizzati presso Pescara del Tronto è stata equipaggiata con una camera ZENMUSE X5, dotata di sensore 4/3 CMOS con risoluzione di 16 MP.
Rispetto ad una piattaforma ad ala fissa il sistema multi-rotore garantisce una maggiore manovrabilità e la possibilità di utilizzare un'area di decollo e atterraggio di dimensioni ridotte. Inoltre, la possibilità di orientare la camera grazie ad una *gimbal* a tre assi assicura la possibilità di acquisire immagini con diversi angoli d'inclinazione dell'asse ottico, con tutti i vantaggi connessi all'utilizzo di questo tipo di dati negli approcci fotogrammetrici in contesti d'emergenza[4]. Tuttavia, sono ridotte anche l'autonomia di volo e le dimensioni dell'area che può essere ricoperta da ogni singola acquisizione.

2. Le campagne di acquisizione

Complessivamente quattro sono state le principali campagne di acquisizione dati realizzate negli ultimi mesi del 2016, maggiormente dettagliate in Tabella 1.
La prima acquisizione (T1) è stata realizzata dal gruppo SAPR dei Vigili del Fuoco dopo la prima scossa del 24 agosto 2016, tramite l'eBee (Figura 2), con camera Canon IXUS 127 HS con sensore CMOS da 1/2.3" da 16.1 MP. Data la condizione d'emergenza l'acquisizione non ha previsto il posizionamento e la misura di punti di controllo a terra.

Operatore	Tempo	UAV	Immagini	Area [km^2]	GSD [cm/pix]
VVF	agosto	eBee	138	0.60	6.3
Polito	settembre	eBee	125	0.38	5.7
Polito+VVF	ottobre	eBee	345	0.67	7.3
Polito+VVF	dicembre	Inspire	409	0.34	2.9

Tabella 1. Alcune caratteristiche delle acquisizioni UAVs realizzate durante le diverse campagne a Pescara del Tronto (quota di volo ≈150 m).

La seconda acquisizione presso Pescara del Tronto è stata realizzata dal team DIRECT nel mese di settembre 2016 (T2), sempre con piattaforma eBee, ma equipaggiata questa volta con camera Canon Power Shot S110, sensore CMOS da 1/1.7" da 12 MP (Figura 3). A differenza della prima acquisizione, in questa campagna è stato possibile materializzare e misurare 23 punti di controllo. Le coordinate di questi punti di controllo sono state misurate tramite sistema GNSS in modalità RTK (Real Time Kinematic), raggiungendo accuratezze centimetriche.
La terza acquisizione (T3) è stata realizzata a ottobre 2016 dal team DIRECT del Politecnico di Torino in collaborazione con il Gruppo SAPR dei Vigili del Fuoco. In questo

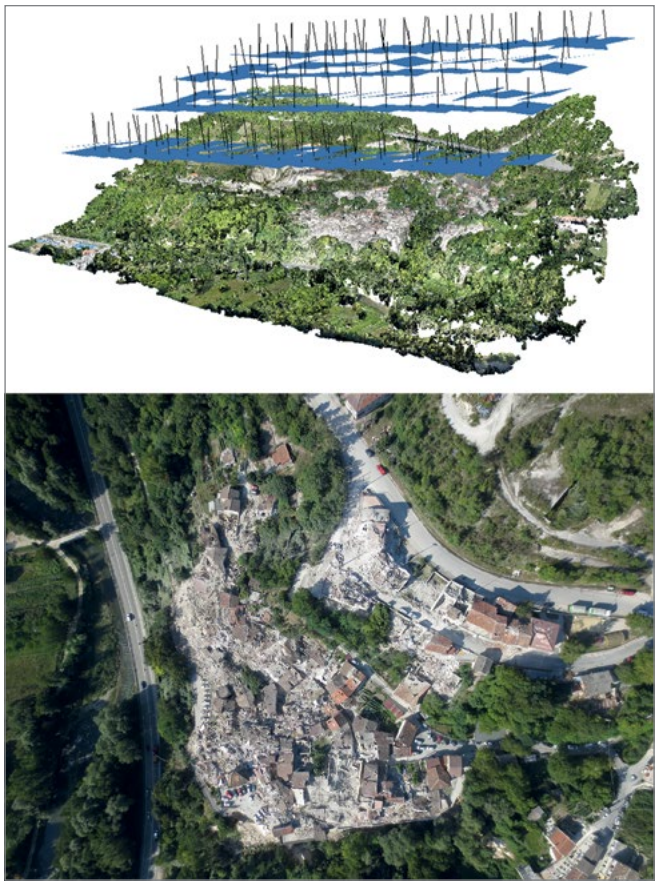

Figura 2. Lo schema del volo del T1 a Pescara del Tronto (alto) e un esempio delle immagini acquisite (basso).

Figura 3. Lo schema del volo del T2 a Pescara del Tronto (alto) e un esempio delle immagini acquisite (basso).

caso le strategie di acquisizione utilizzate sul campo sono state leggermente diverse, con l'utilizzo di schemi di volo più complessi e articolati rispetto alle due precedenti acquisizioni. La piattaforma utilizzata è stata l'eBee Classic equipaggiato con la Canon Power Shot S110, sensore CMOS da 1/1.7" da 12 MP. Anche le fasi di materializzazione e di misura dei punti di controllo sono state completate con modalità diverse rispetto alla campagna di settembre, in questo caso i 38 punti materializzati sono stati misurati sia con sistema GNSS RTK, sia tramite l'utilizzo di un palmare GNSS in dotazione ai Vigili del Fuoco. L'utilizzo di questi diversi approcci nella misura dei punti di controllo è stato pianificato con il preciso obiettivo di analizzare e testare operativamente le ricadute sulla fase di georeferenziazione del blocco fotogrammetrico, come verrà riportato in seguito. Uno schema dei voli realizzati per la documentazione del T3 è riportato in Figura 4, insieme ad un esempio delle immagini acquisite.
Infine, a seguito dei nuovi eventi sismici verificatisi il 26 e 30 ottobre, è stata pianificata e completata una nuova campagna di acquisizione presso Pescara del Tronto a dicembre 2016 (T4). Tale campagna è stata realizzata nuovamente insieme al Gruppo SAPR dei Vigili del Fuoco e, a differenza delle campagne precedenti, la piattaforma utilizzata è stata il DJI Inspire 1 equipaggiato con camera ZENMUSE X5, dotata di sensore 4/3 CMOS con risoluzione di 16 MP. In questo caso gli schemi di volo hanno previsto l'acquisizione sia di prese nadirali che oblique, sfruttando al massimo le possibilità di controllo della camera garantite dal sistema di controllo meccanico a tre assi (Figura 5). Durante questa campagna sono stati materializzati e misurati 17 punti di controllo tramite ricevitore GNSS in modalità RTK.
Durante le varie campagne condotte nei siti oggetto di questo contributo sono inoltre state realizzate diverse altre acquisizioni, anche utilizzando piattaforme diverse e modalità diversificate, che non saranno però oggetto di questo contributo.

3. Strategie per la georeferenziazione del blocco fotogrammetrico

Come riportato nel paragrafo precedente e come da consuete pratiche operative, le fasi di materializzazione e di misura dei punti di controllo si configurano come uno step fondamentale dell'intero processo di documentazione (Figura 6). Questa fase richiede inoltre un grosso contributo in termini di tempo e di risorse impiegate durante le fasi di lavoro[5] e si configura come un'operazione che può risultare molto complessa in contesti d'emergenza, per la scarsa accessibilità dei luoghi interessati dal rilievo e garantire quindi la sicurezza degli operatori durante le fasi di lavoro.
Parte del presente studio è stato quindi dedicato alla definizione di strategie operative per ottimizzare questa fase di

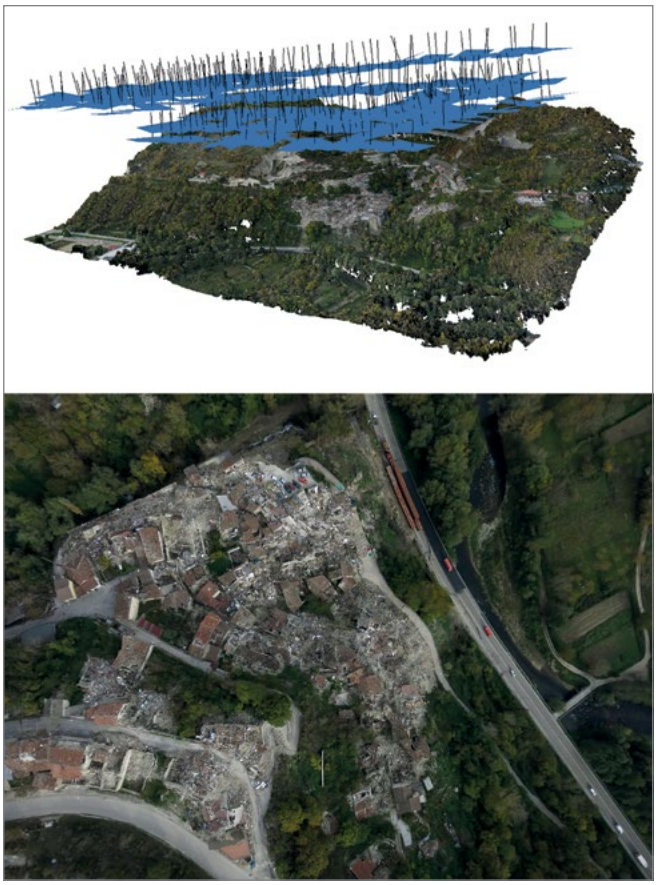

Fig. 4. Lo schema del volo del T3 a Pescara del Tronto (alto) e un esempio delle immagini acquisite (basso).

Figura 5. Lo schema del volo del T4 a Pescara del Tronto (alto) e un esempio delle immagini acquisite (basso).

Figura 6. Alcune delle operazioni di misura sul campo dei punti di controllo tramite sistema GNSS in RTK mode (sinistra) e tramite palmare GNSS (destra).

attività e minimizzare il suo impatto sulle diverse fasi di lavoro[6]. I dati di partenza per effettuare alcuni test e riflessioni su questo aspetto sono quindi stati di tre tipi diversi, in base al sistema di posizionamento adottato:

- punti di controllo acquisiti tramite GNSS in RTK mode. Ricevitore differenziale Geomax Zenith 35; GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU. Precisione 5-10 mm statico; 10-20 mm dinamico;
- punti di controllo acquisiti tramite palmare GNSS. Antenna palmare Garmin GPSMAP 64s; satelliti GPS, GLONASS. Precisione 3-5 m;
- Geotag associato al centro di presa del sensore ottico equipaggiato sulla piattaforma UAV grazie al ricevitore GPS/GNSS integrato. Precisione 1-5 m verticale/orizzontale per l'eBee e 0,5 m orizzontale e 2,5 m verticale per l'Inspire 1.

Le misure effettuate a terra tramite ricevitori GPS/GNSS sono state riferite al sistema di riferimento UTM-WGS 84 Fuso 33N, ETRF 2000, utilizzando le informazioni derivanti dalla Rete delle stazioni GNSS permanenti. È necessario riportare che la qualità del set di punti di dicembre non rispetta purtroppo le precisioni richieste di norma da un rilievo di questo tipo a causa da un lato della cattiva ricezione del segnale in relazione alla conformazione degli spazi rilevati e dall'altro a causa dei danni subiti dalla rete di stazioni permanenti nelle zone colpite dal sisma, utilizzate per il calcolo dei punti misurati sul campo.

3.1 Test e validazione di un processo sperimentale: la co-registrazione multi-temporale

A seguito delle considerazioni riportate nei paragrafi precedenti, si è deciso di dedicare una parte del lavoro condotto durante e a monte delle acquisizioni realizzate presso il sito di Pescara del Tronto all'ottimizzazione del processo di registrazione dei diversi blocchi fotogrammetrici a disposizione. Tale procedura ha previsto la progettazione di un workflow sperimentale volto alla realizzazione di un approccio speditivo che massimizzasse l'efficienza delle fasi di elaborazione dei dati acquisiti, con un occhio di riguardo per le precisioni attese dal rilievo, minimizzando allo stesso tempo l'esposizione degli operatori durante le fasi di misura dei punti di controllo a terra ed aumentando così la sicurezza delle fasi di lavoro sul campo.

Il workflow proposto[7] è rappresentato in Figura 7 e come è possibile vedere in tale rappresentazione esso prevede l'utilizzo dei GCPs (*Ground Control Points* – Punti di Controllo) misurati durante la campagna sul terreno che si è svolta in concomitanza con il precedentemente definito T2. La distribuzione di tali punti sul territorio del Comune di Pescara del Tronto è riportata in Figura 8 mentre la differenziazione tra i punti utilizzati come GCP e quelli utilizzati come CPs (*Control Points* – Punti di Controllo) è riportata in legenda nella stessa immagine. La differenza sostanziale tra queste due categorie di punti risiede nel fatto che i GCPs rappresentano quei punti che sono a tutti gli effetti utilizzati per risolvere l'orientamento del blocco fotogrammetrico mentre i CPs sono utilizzati come punti atti a verificare l'accuratezza metrica di tale processo, essendo esclusi dalle fasi di calcolo.

Il processo fotogrammetrico, in termini generali, prevede che la ricostruzione della posizione dei punti nello spazio avvenga tramite il cosiddetto orientamento del blocco di immagini che stima la posizione e l'assetto della camera al momento dell'acquisizione; ciò è possibile grazie al riconoscimento automatico (*image matching*) di punti omologhi su immagini stereoscopiche, che oltre a consentire anche la stima dei parametri interni della camera, genera una nuvola sparsa, dei cosiddetti *Tie points*, dalla quale è possibile derivare una nuvola densa per intersezione automatica dei raggi omologhi orientati nello spazio. L'automazione di quest'ultima fase si deve all'uso della tecnica *Structure from Motion* (SfM) derivata dalla *Computer Vision*.

L'idea alla base del procedimento proposto consiste nella possibilità di completare il processo fotogrammetrico

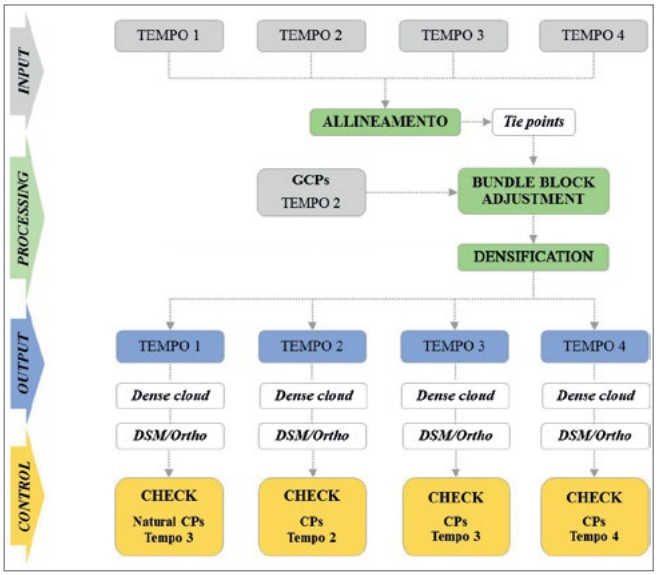

Figura 7. Rappresentazione schematica del workflow proposto e sperimentato.

Figura 8. Distribuzione dei punti di controllo sul territorio di Pescara Del Tronto e differenziazione tra i punti utilizzati come GCPs e quelli utilizzati come CPs.

utilizzando tutte le immagini acquisite a Pescara del Tronto da UAVs nei quattro tempi, in modo da validare l'effettiva applicabilità del workflow proposto e definirne i limiti operativi. Risulta chiaro fin da subito che le maggiori criticità di tale processo risiedono da un lato nei contenuti radiometrici sensibilmente differenti all'interno dei diversi dataset acquisiti e nelle profonde modifiche subite da questo territorio con il susseguirsi dei diversi eventi sismici.
Per completare tale procedura sono state quindi elaborate in un'unica soluzione tutte le 952 immagini acquisite durante le quattro campagne e utilizzando, come già riportato, il set di punti di controllo misurati durante la campagna di acquisizioni denominata T2. I dettagli di questa fase del processo e gli errori sui GCPs e su CPs (l'indice con il quale questi errori sono misurati è l'RMSe – *Root Mean Square error*) sono riportati nella Tabella 2.
Obiettivo di una seconda fase è quindi stato quello di verificare l'accuratezza dei modelli fotogrammetrici generati a partire dai set di dati acquisiti ad agosto, ottobre e dicembre. Il dataset di settembre (T2) è stato escluso da tale procedura in quanto utilizzato come set di riferimento per l'elaborazione degli altri tre tempi. Per controllare metricamente i prodotti del T1, T3 e T4 sono stati utilizzati punti di controllo misurati contestualmente alle missioni successive. In Figura 9 sono riportati alcuni estratti delle ortofoto prodotte, seguendo il workflow sperimentale proposto, mentre nella Tabella 3 sono riportati gli errori sui punti di controllo utilizzati per validare tale approccio.
Considerando i dati riportati nelle Tabelle 2 e 3 è possibile affermare che la fase di estrazione di TPs e la conseguente stima dei parametri di orientamento delle camere possono essere ritenuti idonei a livello metrico per le accuratezze richieste e la relativa scala di rappresentazione, che è quella urbana (1:500

Figura 9. Alcuni estratti delle ortofoto generate seguendo il workflow sperimentale.

n° immagini				n° TPs			
952				1.074.753			
18 GCPs-T2, RMSe [cm]				5 CPs-T2, RMSe [cm]			
X	Y	Z	TOT	X	Y	Z	TOT
3.6	3.1	4.7	3.8	0.8	2.5	10.4	4.6

Tabella 2. Controllo dell'accuratezza del processo fotogrammetrico comprendente tutti i voli mediante l'uso dei GCPs e CPs della campagna T2.

DATASET		Controllo		RMSe [cm]			
		n° CPs	Dataset	X	Y	Z	TOT
T1	agosto	12	T3	3.9	4.4	26.4	11.6
T2	ottobre	31	T3	2.7	3.8	24.3	10.3
T3	dicembre	11	T4	7.9	28.3	51.1	29.1

Tabella 3. Controllo metrico dei modelli dei diversi tempi elaborati secondo il workflow sperimentale. A causa dell'assenza dei punti di controllo nel T1 sono stati utilizzati 12 punti naturali estratti dal T3.

– 1:1000). Gli scarti sull'RMSe dei CPs hanno valori accettabili, eccezion fatta per il set di dicembre che presenta valori maggiori a causa dei problemi relativi alla misura dei punti di controllo sul campo precedentemente riportati (cambiamento sensibile dello scenario per via dei cospicui crolli). In tutti e tre i set di dati la componente della z è quella che presenta valori più alti: tale fattore è imputabile in primo luogo alla precisione della misura dei punti di controllo tramite sistemi GPS/GNSS in modalità RTK che è meno precisa per sua natura sulla componente altimetrica. In secondo luogo, tale componente altimetrica è anche quella che ha subito i maggiori stravolgimenti sui territori interessati dai diversi eventi sismici, creando sicuramente errori non indifferenti nella fase di orientamento congiunto dei quattro datasets; si tratta cioè di un fattore che necessita ulteriori ricerche e approfondimenti.

3.2 Ulteriori strategie per velocizzare la georeferenziazione del blocco fotogrammetrico

Oltre ai test realizzati sul workflow di co-registrazione precedentemente descritto, altre due strategie sono state proposte e validate sui dati acquisiti presso Pescara del Tronto e verranno brevemente riportate nei paragrafi successivi.

Massimizzare l'influenza dei piani di volo per ridurre il numero dei GCPs da misurare a terra è la prima delle altre due strategie implementate e testate. Il primo di questi test ha previsto la realizzazione di un tradizionale piano di volo con la conseguente misura a terra di un alto numero di punti controllo, ma con una strategia leggermente diversa da quelle tradizionali. La strategia proposta mira infatti a diminuire al minimo i punti controllo necessari per controllare al meglio il processo fotogrammetrico grazie all'utilizzo di piani di volo incrociati. In Figura 10 sono riportati i tre diversi schemi di volo che sono stati completati, con i relativi punti di controllo utilizzati durante l'elaborazione fotogrammetrica, e la distribuzione dei GCPs e CPs sul territorio di Pescara del Tronto.
Le caratteristiche dei diversi voli e gli errori sui punti di controllo sono riportati invece nella Tabella 4.
I test effettuati per la validazione di questo workflow permettono di affermare che in contesti d'emergenza è possibile ridurre al minimo il numero dei punti di controllo da misurare sul campo a fronte dell'applicazione di schemi di volo maggiormente complessi rispetto a quelli convenzionali. Tale soluzione è resa possibile grazie all'aumento del numero di fotogrammi acquisiti e all'applicazione di una maggior rigidità del blocco fotogrammetrico. È inoltre interessante notare come le accuratezze sia sui GCPs, sia sui CPs siano assolutamente comparabili con quelle di un approccio più tradizionale e in alcuni casi addirittura migliori.

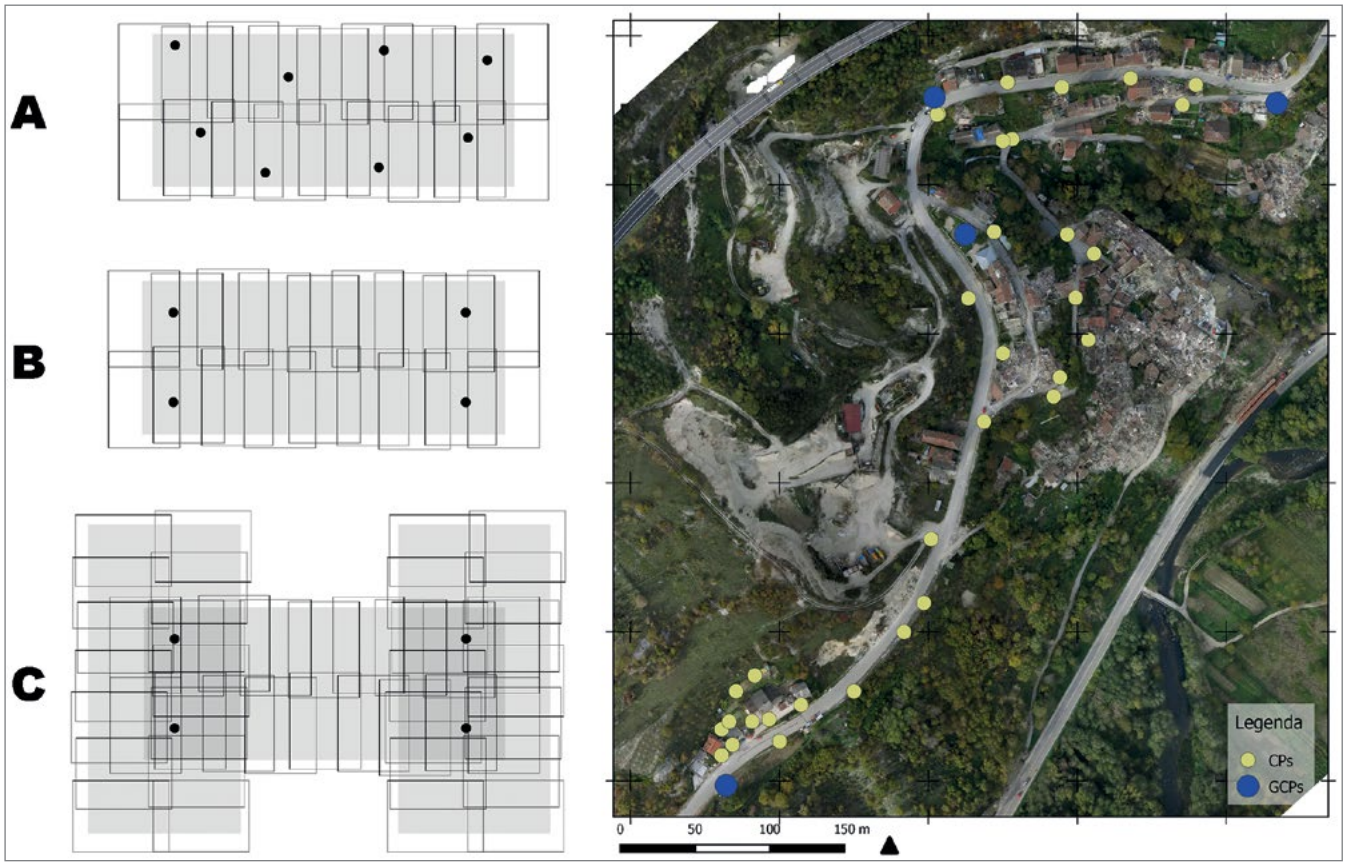

Figura 10. Le tre diverse configurazioni dei piani di volo realizzati a Pescara del Tronto: A) Singola strisciata con numerosi GCPs; B) Singola strisciata con pochi GCPs; C) Integrazione di due strisciate laterali con pochi GCPs. Nell'ortofoto di destra sono visibili i 4 GCPs utilizzati per i diversi test.

	n° Immagini	n° GCPs	n° CPs
A	180	18	8
B	180	4	22
C	343	4	22

	GCPS RMS [cm]				CPS RMS [cm]			
	X	Y	Z	TOT	X	Y	Z	TOT
A	1.8	1.5	1.9	1.7	3.4	1.3	1.9	2.2
B	0.5	1.0	0.5	0.7	2.6	1.6	2.8	2.3
C	0.7	1.1	0.7	0.8	2.5	1.7	1.7	2.0

Tabella 4. I tre diversi dataset con relativo numero di punti di controllo e gli errori sui punti di controllo.

Diverse tecniche per l'acquisizione del dato GPS/GNSS è invece il secondo approccio testato per valutare la possibilità di comparare diverse strategie di georeferenziazione.
Le tre strategie utilizzate per la misura dei punti di controllo sono state già descritte all'inizio del Paragrafo 3 e verranno maggiormente dettagliate di seguito. I dati acquisiti tramite GPS/GNSS in RTK *mode* saranno quelli che verranno utilizzati come misura di riferimento, data la loro intrinseca maggior precisione rispetto agli altri due approcci testati che hanno previsto da un lato l'utilizzo del ricevitore palmare Garmin GPSMAP® 64s e dall'altro l'informazione del geotag delle immagini ottenute dal ricevitore integrato nella piattaforma UAV. Tali strategie saranno analizzate dal punto di vista del rapporto tempo di acquisizione-accuratezza e di conseguenza si valuteranno le ricadute sui prodotti del processo fotogrammetrico.
In Figura 11 è possibile notare lo scostamento di alcune delle misure effettuate sul campo con il palmare GPS rispetto ai ricevitori in modalità RTK.
Ulteriori confronti quantitativi e qualitativi su tale metodo sono stati effettuati su di una serie di check point, come riporta la Tabella 5.
Lo stesso approccio è stato poi replicato utilizzando i dati disponibili dal geotag delle immagini per la georeferenziazione del modello fotogrammetrico. In Figura 12 è riportato un confronto qualitativo sulla posizione dei CPs derivata da tale approccio rispetto a quella misurata con ricevitore in RTK *mode*, mentre un'analisi più approfondita è riportata in Tabella 6.
Risulta interessante notare come entrambe le soluzioni proposte non rispondano alle accuratezze richieste dalla scala di rappresentazione architettonica e urbana. Tuttavia, rientrano invece perfettamente nelle tolleranze richieste dalle scale comprese tra 1:2000 e 1:5000, costituendo quindi un buon compromesso tra i tempi e le modalità di acquisizione dei punti di controllo sul campo e le accuratezze necessarie per i prodotti utili in tali contesti d'emergenza.

Figura 11. Estratti dell'ortofoto con indicato lo scostamento tra i punti misurati con ricevitori GNSS in RTK mode e i CPs del progetto elaborato con i dati del palmare GPS.

Confronto ricevitore RTK e Palmare GPS				
	10 CPs			
	X	Y	Z	TOT
media [m]	2.264	1.488	9.608	4.453
RMS [m]	2.646	1.941	4.155	2.914

Tabella 5. Controllo metrico sui CPs del modello fotogrammetrico generato utilizzando i punti misurati dal palmare GPS.

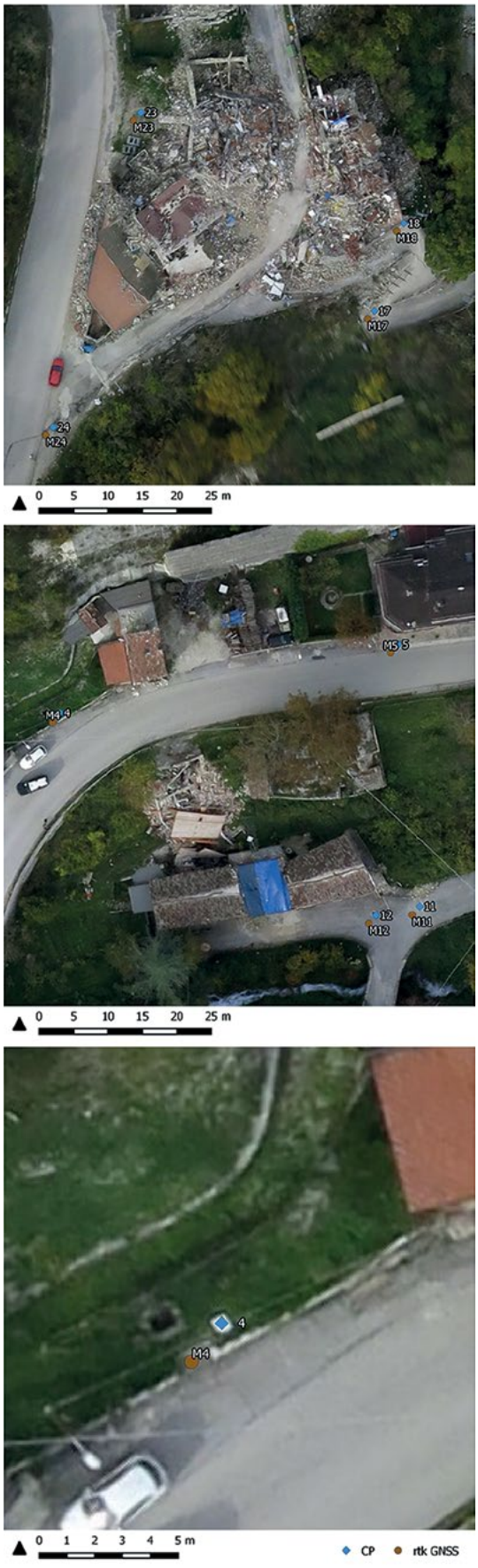

Figura 12. Estratti delle ortofoto con indicato lo scostamento tra i punti misurati con ricevitori GNSS in RTK mode e i CPs del progetto elaborato con i dati del geotag.

Confronto ricevitore RTK e Geotag				
	34 CPs			
	X	Y	Z	TOT
media [m]	1.124	1.173	3.148	1.815
RMS [m]	0.086	0.121	0.398	0.202

Tabella 6. Controllo dell'accuratezza metrica sui CPs del modello fotogrammetrico generato utilizzando le informazioni estratte dal geotag delle immagini aeree.

Il metodo che ha adottato i *geotag* si presenta con un RMSe sui punti di controllo molto uniforme, ad indicare probabilmente la presenza di alcuni errori sistematici dati dalla tecnica stessa di acquisizione dei dati che, se trattati con le dovute accortezze, potrebbero portare a risultati migliori in termini di accuratezza generale della georeferenziazione del modello.

4. L'elaborazione dei dati e l'utilizzo dei prodotti fotogrammetrici

Dopo aver affrontato la questione della georeferenziazione del blocco fotogrammetrico, che si configura ancora oggi come una delle fasi meno automatizzate dell'intero workflow proposto, è possibile riportare brevemente qualche informazione sulle successive fasi del processo, per poi arrivare alla generazione dei prodotti standard della fotogrammetria e al loro successivo utilizzo.

Nel corso degli anni, con l'introduzione degli algoritmi di SfM (*Structure from Motion*) all'interno dei tradizionali processi fotogrammetrici, si è assistito come detto a una sempre maggiore automazione dell'intero processo e a una conseguente riduzione dei tempi di elaborazione. Maggiori dettagli su tale argomento si possono trovare facilmente nella bibliografia di riferimento[8] e non saranno oggetto di questo contributo, dove verranno riportate brevemente le diverse fasi connesse all'elaborazione di tali dati.

La fase di acquisizione delle immagini è seguita come abbiamo visto in precedenza da una prima fase di elaborazione che prevede l'individuazione di *features* comuni tra le immagini e l'estrazione di TPs che andranno a formare una prima nuvola di punti sparsa. Nella successiva fase di BBA (*Bundle Block Adjustment*), vengono risolti sia l'orientamento interno delle camere (tutti quei parametri volti a modellare le distorsioni presenti nel sistema camera utilizzato) che l'orientamento esterno (che permette di riferire il nostro modello fotogrammetrico ad un sistema di riferimento noto).

La successiva fase, a seguito del controllo del raggiungimento delle accuratezze metriche richieste, è quella della generazione di una nuvola di punti densa, detta appunto densificazione.

Le fasi successive del processo fotogrammetrico prevedono infine la generazione di altri prodotti metrici, utili per ulteriori analisi e rappresentazioni 3D; tali prodotti sono: il modello triangolato, il DSM (*Digital Surface Model*) e l'ortofoto.

4.1 Utilizzo dei prodotti fotogrammetrici da dataset UAVs nei processi di Bulding Damage Assessment *(BDA)*

Una delle integrazioni più efficaci e auspicabili dell'utilizzo delle piattaforme UAVs e dei prodotti derivabili dall'approccio fotogrammetrico è quella connessa alle fasi di BDA. L'assenza d'informazioni sullo stato di danneggiamento degli alzati degli edifici è infatti uno dei fattori cruciali che può portare a errori d'interpretazione, specialmente nel caso delle analisi condotte sui danni di un evento sismico. Proprio per tale motivo diverse strategie sono state messe a punto per minimizzare questo tipo di errori, come l'utilizzo di dati acquisiti da operatori sul terreno (ad es. tecniche terrestri di mapping mobile indicate nel contributo precedente) o dati derivati da acquisizioni UAVs. Diversi sono stati i test condotti sui dati UAVs acquisiti sulle aree colpite dal sisma ed in particolare sulle città di Pescara del Tronto e Accumoli.
L'idea alla base di questi test era quella di verificare in che modo e con quale grado di affidabilità i dati acquisiti da piattaforme UAV potessero coadiuvare le analisi fornite dal sistema EMS Copernicus, grazie ai prodotti fotogrammetrici e in particolare alla loro componente 3D[9]. Questo approccio è stato reso possibile dalla disponibilità di dati multi-temporali su entrambi i siti considerati, grazie alle diverse campagne di acquisizione condotte nel corso del tempo.

Figura 13. Estratti delle ortofoto (non in scala) di Accumoli (alto) e Pescara del Tronto (basso). Sono riportate le classi di danno determinate dal servizio EMS di Copernicus e le integrazioni date dal contributo UAVs (esagoni blu).

In un primo test condotto si è deciso di simulare un vero approccio operativo, dividendo il lavoro tra due operatori. Un primo operatore ha lavorato in ambiente GIS (*Geographic Information System*) sovrapponendo le osservazioni delle *grading maps* fornite da Copernicus, sulle ortofoto generate da UAVs. Il secondo operatore era invece impegnato a effettuare un'ispezione visuale sui dati raccolti durante la campagna di acquisizione UAV e in particolare sul modello 3D generato dall'approccio fotogrammetrico. Tale simulazione è stata effettuata sui dataset di Pescara del Tronto e di Accumoli relativi alle campagne di agosto e settembre 2016. Tutti gli edifici dei due siti sono stati ispezionati seguendo la metodologia proposta e la classificazione dei danni proposta da Copernicus è stata integrata con le informazioni derivabili dai prodotti UAVs. Tali analisi sono maggiormente descritte nel prossimo paragrafo; una vista generale degli edifici la cui classificazione necessitava di ulteriori verifiche è riportata per entrambi i siti in Figura 13.

4.2 BDA a Pescara del Tronto

Tra i due siti considerati, quello che si è rivelato più complesso in termini di valutazione del BDA è stato quello di Pescara del Tronto. La città infatti presenta un'estensione maggiore rispetto ad Accumoli e una più complessa conformazione topografica; inoltre ha subito maggiori danni a seguito del primo evento sismico di agosto.
La fase di BDA è stata inoltre resa ancora più complessa dal fatto che un'intera porzione dell'insediamento, quella est, è stata soggetta a ingenti danni e la maggior parte degli edifici sono stati distrutti o severamente danneggiati, anche a causa dell'imponente frana. La presenza quindi di grandi quantitativi di macerie ha reso ancora più complessa la fase d'identificazione dei livelli di danno subiti dagli edifici, dando luogo a diversi *mismatches*.
Un esempio evidente di tali problematiche è riportato in Figura 14: a causa infatti del gran numero di edifici danneggiati nell'intorno dell'edificio analizzato, e di conseguenza degli imponenti accumuli di macerie, era praticamente impossibile identificare con un alto livello di confidenza il livello di danno di tale edificio, considerato infatti "*Moderately damaged*".
In questo caso il contributo del modello 3D derivato dai dati acquisti tramite piattaforma UAV si è rivelato fondamentale per identificare gravi danni sui fronti dell'edificio, invisibili da soli dati nadirali, permettendo di meglio definire la classe di danno.

4.3 BDA ad Accumoli

Altri chiari esempi di come i sistemi UAVs e di conseguenza i modelli 3D derivabili dai dati acquisiti possano rivelarsi fondamentali nelle fasi di BDA sono stati individuati anche per il sito di Accumoli. Esempio lampante è uno dei principali edifici della città, che non riportava danni significativi a livello di coperture, come mostrato in Figura 15, e che era

Figura 14. Integrazione dei dati UAVs per il BDA. L'edificio selezionato (indicato nell'immagine a sinistra con freccia bianca) non presentava danni evidenti nella sola ortofoto mentre si è rivelato essere gravemente danneggiato a seguito di un'ispezione del modello 3D (a destra).

Figura 15. Accumoli, BDA di un edifico campione. In alto a sinistra la grading map di Copernicus, a destra la stessa mappa sovrapposta all'ortofoto da UAVs. In basso una vista dei danni ai fronti dell'edificio individuati sul modello 3D derivato da UAVs.

stato inserito nella classe di danno "*Negligible to slight damage*" dal servizio EMS di Copernicus.
Anche in questo caso il contributo dei dati UAVs si è rivelato fondamentale per meglio definire il livello di danno dell'edificio, permettendo di localizzare degli indicatori di danno non visibili dai dati a disposizione del servizio EMS di Copernicus. In primo luogo, l'ortofoto generata da dati UAVs, grazie al suo alto livello di dettaglio, ha permesso di identificare delle macerie in prossimità dell'edificio. In secondo luogo, il modello 3D, grazie all'integrazione delle immagini oblique, ha permesso di effettuare una più approfondita ispezione dei fronti principali dell'edifico, individuando gravi lesioni altrimenti non visibili.

4.4 Ridurre ulteriormente i tempi di acquisizione per coadiuvare il BDA: estrarre informazioni dai video

Ulteriori test[10] per ridurre la permanenza degli operatori sul campo durante le fasi di acquisizione dei dati e validare contestualmente l'efficacia dei prodotti ottenibili ai fini del BDA sono stati effettuati durante le campagne svolte a Pescara del Tronto.
L'approccio scelto in questo caso ha previsto l'acquisizione dei dati necessari a completare il processo fotogrammetrico a partire da dati video anziché singole immagini. Tale modalità di acquisizione permette infatti di ridurre ulteriormente i tempi di permanenza sul campo grazie alla possibilità di acquisire i dati necessari al processo fotogrammetrico in maniera più rapida: a differenza dell'acquisizione d'immagini è infatti possibile registrare video senza interrompere il volo della piattaforma al fine di stabilizzare la camera. Tale possibilità è favorita da un lato dalla stabilizzazione meccanica della camera, dall'altro dagli algoritmi software per la stabilizzazione dei contenuti video. Ovviamente la registrazione di video comporta una riduzione della risoluzione massima del dato acquisito rispetto alle possibilità fornite dalle immagini singole. Tale perdita di risoluzione presenta ripercussioni anche sul processo fotogrammetrico e sulle accuratezze raggiungibili. I test condotti con una serie di filmati registrati presso Pescara del Tronto si erano posti come obiettivo la conformità ad una tolleranza al di sotto dei 10 cm, valida per la realizzazione di prodotti metrici in scala 1:500.
L'elaborazione dei dati ottenuti tramite questa modalità è stata quindi approfondita in tutte le sue componenti

portando all'ottenimento di un RMS di 0,057 m sui punti di controllo e ad una risoluzione del modello a terra (GSD) di 0,035 m, ben al di sotto del valore di 0,05 m atteso (equivalente a metà della precisione).
Il modello realizzato presenta inoltre un buon livello di dettaglio in quanto a ricostruzione degli elevati dei singoli edifici (Figura 16), nuovamente grazie all'integrazione delle immagini oblique.
Una volta validato a livello metodologico e metrico il workflow proposto si è deciso anche in questo caso di effettuare ulteriori analisi sui prodotti ottenibili dal processo fotogrammetrico e sulle possibilità di utilizzarli nelle fasi di BDA.
Un primo approccio ha previsto la realizzazione di una cosiddetta ortofoto solida di precisione[11]. Tale prodotto ha un valore aggiunto rispetto ad una tradizionale ortofoto in quanto permette di associare alle informazioni bidimensionali normalmente derivabili anche quella legata alla componente altimetrica.
Anche ad Accumoli, una parte della ricerca è stata dedicata all'analisi di una possibile integrazione dei dati e dei prodotti UAVs con le *grading maps* prodotte dal servizio EMS di Copernicus. La metodologia adottata è simile a quella presentata nel Paragrafo 4.2 con l'aggiunta di un'analisi statistica del confronto effettuato grazie alla creazione di una matrice di confusione[12].
In tale matrice vengono considerati tre parametri di *accuracy*:

- *Producer Accuracy* (PA): rapporto tra il numero di edifici *correttamente classificati* come classe X e il numero di edifici appartenenti alla classe X;
- *User Accuracy* (UA): rapporto tra il numero di edifici *correttamente classificati* come classe X e il numero di edifici classificati come classe X;
- *Overal Accuracy* (OA): percentuale di edifici *correttamente classificati* sull'intero blocco.

Tutti gli edifici presenti a Pescara del Tronto sono stati considerati e analizzati e i risultati di tale confronto sono riportati nella Tabella 7. Anche in questo caso il confronto dei dati derivabili tramite sistemi UAV e quelli del servizio EMS di Copernicus ha portato alla luce alcune discrepanze. Le cause di tali discrepanze sono state ulteriormente approfondite e le cause di disaccordo tra le due metodologie analizzate sono presentate in Figura 17.

Figura 16. Vista del modello 3D ricostruito con approccio fotogrammetrico a partire dai video acquisiti presso Pescara del Tronto.

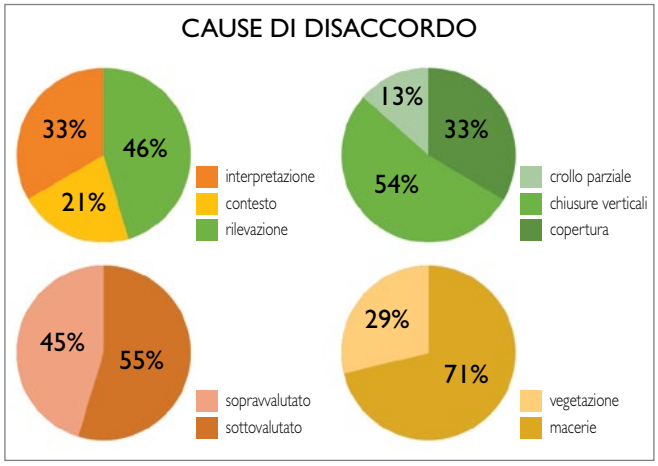

Figura 17. Rappresentazione delle cause di disaccordo tra le interpretazioni di Copernicus e quelle derivate da UAVs.

PESCARA DEL TRONTO		215 EDIFICI					ACCURATEZZA OA: 84%			
		UAV								
COPERNICUS	CLASSE DANNI	ASSENTI	TRASCURABILI	MODERATI	RILEVANTI	TOTALI	SOMMA		UA	PA
	ASSENTI	28	7	5		2	42	20%	67%	97%
	TRASCURABILI	1	7	1	1		10	5%	70%	41%
	MODERATI		2	9	5		16	7%	56%	47%
	RILEVANTI		1	2	13	3	19	9%	68%	62%
	TOTALI			2	2	124	128	60%	97%	96%
	SOMMA	29	17	19	21	129	215			
		13%	8%	9%	10%	60%				

Tabella 7. Matrice di confusione per il BDA presso Pescara del Tronto.

In generale è possibile affermare che l'integrazione dei dati UAVs permette di classificare meglio le forme intermedie di danno, garantendo un miglioramento della risposta all'emergenza.

4.5 Analisi ed altri possibili utilizzi dei dati

Infine, anche altri due prodotti fotogrammetrici, la nuvola di punti e il DSM, sono stati ulteriormente analizzati al fine di valutare la loro utilità nelle fasi di risposta all'emergenza.
Oggetto di queste analisi sono state due aree campione di Pescara del Tronto, grazie alla disponibilità di dati multitemporali.
Non avendo purtroppo a disposizione dati 3D inerenti la fase precedente il sisma, si è deciso di utilizzate il T1 (agosto) come tempo di riferimento e confrontarlo con gli altri tre tempi (settembre, ottobre e dicembre).
L'algoritmo *Cloud to Cloud* (*C2C distance*) permette di analizzare la distanza di una nuvola di punti da un'altra nuvola utilizzata come riferimento; il risultato di questa operazione è una nuvola tematizzata tramite una scala di falsi colori che indica i valori di scostamento tra le due nuvole, forniti secondo intervalli opportunamente dimensionati. Un esempio delle analisi effettuate per l'area campione di Pescara del Tronto è riportato nella Figura 18, dove sono rappresentati i cambiamenti intercorsi tra i tempi T1 e T3 e T1 e T4.
Le analisi effettuati sul DSM hanno seguito una procedura simile a quelle effettuate sulla nuvola di punti, utilizzando questa volta algoritmi di *change detection* implementati in ambiente GIS.
Nuovamente, il dataset di riferimento è stato quello di agosto che, confrontato con gli altri tre, ha permesso di individuare le aree che hanno subito i maggiori stravolgimenti a seguito dei diversi eventi sismici, come riportato in Figura 19. Anche in questo caso tramite una scala di falsi colori è possibile visualizzare e quantificare i maggiori cambiamenti intercorsi tra i diversi tempi.
Questi primi test effettuati hanno quindi permesso di valutare l'impatto dell'utilizzo dei sistemi UAVs sulle fasi di acquisizione sul campo e dei relativi prodotti nelle fasi di BDA. Per quanto si tratti di risultati preliminari, risulta evidente come l'integrazione di tali sistemi nelle pratiche già consolidate di BDA possa costituire un elemento integrativo molto importante al fine di gestire al meglio le diverse fasi di un'emergenza di questo e di altri tipi.

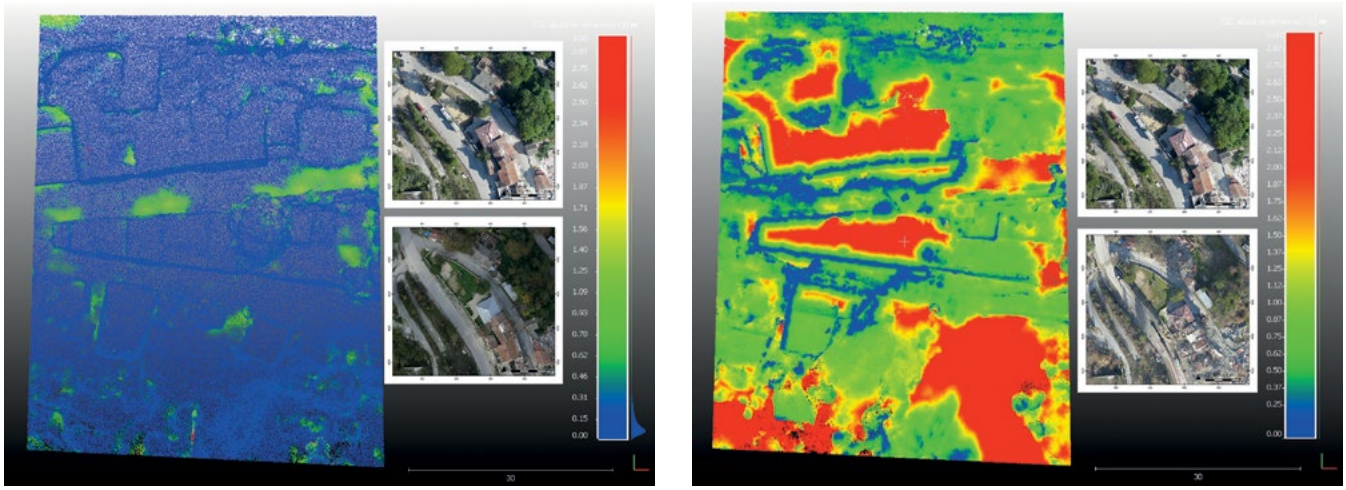

Figura 18. Analisi di scostamento tra nuvole tramite analisi C2C. Differenza tra le nuvole T1-T3 (sinistra) e T1-T4 (destra) in un'area campione di Pescara del Tronto.

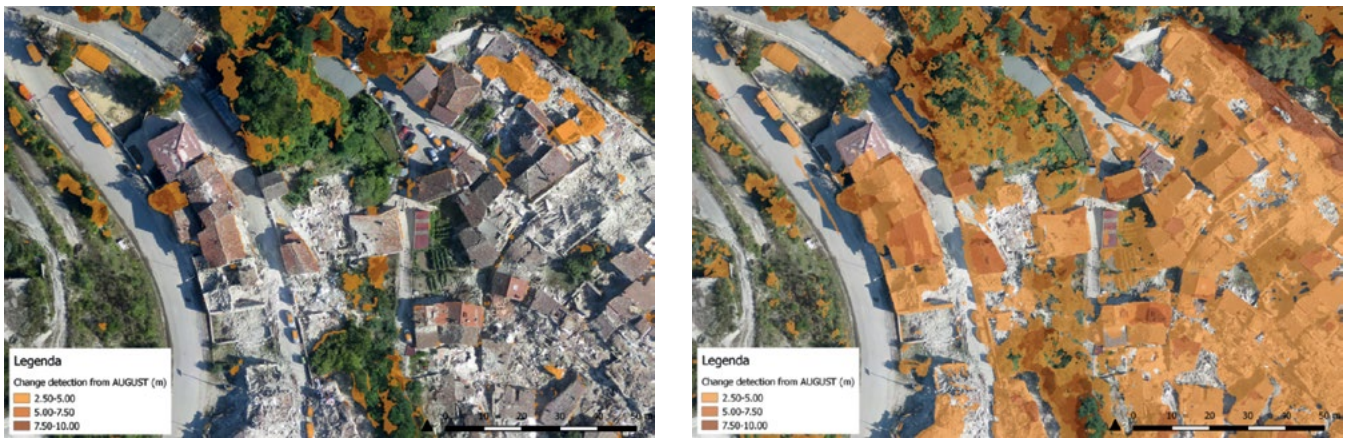

Figura 19. Analisi change detection in ambiente GIS tra i modelli T1-T3 (sinistra) e T1-T4 (destra) in un'area campione di Pescara del Tronto.

5. Conclusioni e sviluppi futuri

L'esperienza sviluppatasi durante l'emergenza che ha colpito il centro Italia a seguito del sisma del 2016 ha permesso di approfondire diversi aspetti della ricerca e del lavoro sul campo legati all'utilizzo delle piattaforme UAVs. In primo luogo, la stretta collaborazione instauratasi con gli enti che più da vicino hanno seguito l'evolversi dell'emergenza ha fatto sì che fosse possibile lavorare su di una grande quantità di dati, di natura diversificata, garantendo molteplici approfondimenti su diversi temi. È stato possibile in prima istanza lavorare per la definizione di strategie ottimizzate per l'acquisizione dei dati sul campo, nell'ottica del raggiungimento di un rapporto bilanciato tra la durata delle fasi di acquisizione, e la conseguente esposizione degli operatori coinvolti, e le necessità di accuratezza dei prodotti metrici richiesti. La quantità di dati raccolti, la condivisione dei dati con la squadra SAPR dei VVF, la loro distribuzione temporale e la possibilità di replicare alcune acquisizioni realizzate nei diversi siti ha poi permesso di sviluppare nuovi approcci in un'ottica multi-temporale. In particolare, per gli eventi che hanno colpito il centro Italia questa possibilità ha permesso di monitorare l'evolversi delle condizioni dei diversi luoghi nel corso del tempo, in seguito al susseguirsi di molteplici eventi sismici. In generale è stato possibile approfondire l'impatto che i sistemi UAVs hanno avuto e potranno avere nel futuro all'interno delle diverse fasi di gestione dell'emergenza ed in particolare nella fase di BDA. Lo studio di una possibile integrazione dei sistemi UAVs all'interno di servizi già esistenti e consolidati, come ad esempio il servizio EMS di Copernicus ha rappresentato un punto cruciale e parte del lavoro è stata dedicata a valutare quale possa essere il contributo effettivo e concreto dei dati acquisti tramite queste piattaforme. Sono stati proposti quindi diversi approcci e diversi flussi di lavoro in modo da poter massimizzare il contributo dei sistemi UAVs in queste fasi della gestione dell'emergenza.

Particolare attenzione è stata poi dedicata alla fase connessa alla georeferenziazione del blocco fotogrammetrico, una delle operazioni che sicuramente richiede i maggiori sforzi sul campo in termini di tempo e risorse. Nel corso dell'esperienza condotta all'interno della task force del Politecnico diverse strategie sono state proposte e validate per ridurre al minimo l'impatto di questa fase sull'intero processo di raccolta ed elaborazione dei dati. A partire dall'ottimizzazione dei piani di volo, sperimentando un miglioramento della distribuzione dei punti di controllo sul campo, l'analisi di diverse strategie di georeferenziazione fino alla sperimentazione di approcci di co-registrazione multi-temporale.

Inoltre, l'esperienza condotta ha condotto a ulteriori approfondimenti nella direzione della georeferenziazione diretta[13].

Infine, a partire dalle esperienze riportate, sono stati innescati nuovi sviluppi legati all'integrazione di diversi sensori sulle piattaforme UAVs. Ad esempio, i primi test realizzati con camere sferiche a Norcia[14] hanno favorito successive sperimentazioni di tali sistemi utilizzati come payload per UAV[15], prefigurando nuovi approfondimenti legati alla possibile ottimizzazione dell'integrazione di questo tipo di sensore in fase di acquisizione.

Note

[1] Cfr. in questo volume il contributo a p. 181.

[2] https://areeweb.polito.it/direct/.

[3] http://www.geerassociation.org/.

[4] Diogo Duarte, Francesco Nex, Norman Kerle, George Vosselman, *Towards a more efficient detection of earthquake induced façade damages using oblique UAV imagery*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», Vol. 42, 2017, pp. 93-100.

[5] Piero Boccardo, Filiberto Chiabrando, Furio Dutto, Fabio Giulio Tonolo, Andrea Lingua, *UAV deployment exercise for mapping purposes: Evaluation of emergency response applications*, in «Sensors», 15 (7), 2015, pp. 15717-15737.

[6] Parte di questo lavoro è stato riportato in maniera più estesa nel contributo: Alessio Calantropio, Filiberto Chiabrando, Giulia Sammartano, Antonia Spanò, Lorenzo Teppati Losè, *UAV strategies validation and remote sensing data for damage assessment in post-disaster scenarios*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 42 (3W4), 2018, pp. 121-128; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-121-2018.

[7] Alessio Calantropio, Filiberto Chiabrando, Giulia Sammartano, Antonia Spanò, Lorenzo Teppati Losè, *UAV strategies*... cit.

[8] Cfr. i riferimenti bibliografici del contributo precedente, note 19, 20, 21.

[9] Maggiori dettagli in: Filiberto Chiabrando, Paolo Maschio, Andrea Lingua, Giacomo Patrucco, Giulia Sammartano, Antonia Spanò, Lorenzo Teppati Losè, Andrea Di Lolli, Franco Feliziani, Firrincelli, Mattia Fiorini, Onofrio Lorusso, *Analisi multi-temporali sulle aree del terremoto del centro Italia. Un approccio image based a Pescara del Tronto*, in Atti del Workshop UAV & SAR, *Using drones in rescue operations*, Roma, 29 marzo 2017.

[10] Alessandro Battino, *Acquisizione speditiva di informazioni 3D post-emergenza mediante UAV: il caso del sisma 2016 nel centro Italia*, tesi di laurea magistrale in Ingegneria Edile, Politecnico di Torino, relatori Andrea Lingua, Filiberto Chiabrando, marzo 2017.

[11] Leonardo Bornaz, Sergio Dequal, Andrea Lingua, *L'ortofoto solida di precisione: un prodotto innovativo per la rappresentazione e la gestione dei dati tridimensionali*, in Atti della Conferenza nazionale SIFET, 2006.

[12] Alessandro Battino, *Acquisizione speditiva*... cit.

[13] Filiberto Chiabrando, Fabio Giulio Tonolo, Andrea Lingua, *UAV direct georeferencing approach in an emergency mapping context. The 2016 Central Italy earthquake case study*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 42, (2W13), 2019, pp. 247-253; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-247-2019.

[14] Cfr. in questo volume il contributo a p. 193.

[15] Alessio Calantropio, Filiberto Chiabrando, Davide Einaudi, Lorenzo Teppati Losè, *360° images for UAV multisensor data fusion: First tests and results*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 42, 2019, pp. 227–234; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-227-2019.

BY-NC-SA