

MONITORAGGIO MULTISPETTRALE DA APR DI ALGHE SOMMERSE IN ACQUE BASSE NELLA SACCA DI GORO

MULTISPECTRAL UAV MONITORING OF SUBMERGED SEAWEED IN SHALLOW WATER IN THE LAGOON OF GORO

Y. Taddia^a, P. Russo^a, S. Lovo^b, A. Pellegrinelli^a

^a Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara, 44122 Ferrara - (yuri.taddia, paolo.russo, alberto.pellegrinelli)@unife.it

^b ARPAE, Struttura Oceanografica Daphne, 44124 Ferrara – slovo@arpae.it

PAROLE CHIAVE: Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR), Camera Multispettrale, Ambiente Costiero Lagunare, Calibrazione Radiometrica, Monitoraggio Algale

KEY WORDS: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), Multispectral Camera, Coastal Lagoon Environment, Radiometric Calibration, Submerged Seaweed Monitoring

Questo articolo è il sunto tradotto in italiano della versione sottomessa allo Special Issue “The Impact of Innovative and Emerging Technologies on the Surveying Activities” della rivista APPLIED GEOMATICS collegato al convegno SIFET 2018.

RIASSUNTO

Per un territorio costiero, la fioritura algale in acque basse costituisce un serio problema sia per l'economia del turismo balneare sia per le attività economiche legate alla coltivazione di molluschi (quali le vongole). Un eccesso di fioritura può, infatti, portare rapidamente a condizioni di anossia con la conseguente morte dei molluschi. Il telerilevamento da satellite o da aeromobile è spesso utilizzato nel monitoraggio delle alghe ma, negli ultimi anni, interessanti sviluppi si sono avuti grazie alla disponibilità di Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR) equipaggiati con camere multispettrali leggere ed a basso costo. Tali sistemi permettono di acquisire informazioni spettrali dettagliate con bande molto strette consentendo un'analisi della fioritura algale ad elevate risoluzioni, sia geometriche che spettrali. In questo lavoro è stato testato l'uso della camera multispettrale MicaSense RedEdge-M montata su un drone DJI Phantom 3 PRO nella mappatura, quantificazione e monitoraggio delle alghe sommerse, analizzando, in particolar modo, l'importanza dei dati di calibrazione radiometrica (non utilizzati o utilizzati solo parzialmente nelle applicazioni di monitoraggio ambientale). Il caso di studio si trova nella Sacca di Goro (Emilia-Romagna, Italia) e rappresenta una zona di grande rilevanza economica per l'allevamento di vongole. Le immagini digitali acquisite in due voli successivi, a distanza di 39 giorni l'uno dall'altro e ad una quota di 70 m, sono state processate sia mediante il software Agisoft PhotoScan Professional che attraverso Pix4D Mapper Pro. I risultati del lavoro confermano che il monitoraggio algale in un ambiente costiero e di laguna, attraverso l'impiego di una camera multispettrale montata su APR, è possibile, ma per raggiungere risultati accurati ed affidabili, risulta fondamentale l'applicazione della calibrazione radiometrica basata sui dati del sensore di irradianza ambientale acquisiti durante il volo e sulle immagini del pannello a riflettanza nota appositamente acquisite prima e dopo ogni volo con APR.

ABSTRACT

The sudden algal bloom in shallow water may be a serious problem for sea coastal economy based on clams farming because it leads quickly to anoxia conditions with the consequent death of the mollusks. In order to detect the rise of algae, normally the satellite remote sensing is used, exploiting the higher response in the near infrared wavelengths. A recent progress in monitoring this phenomenon derives from the availability of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) equipped with lightweight multispectral cameras. Such technique makes it possible to acquire detailed spectral information with narrow bands attaining an assessment of the algal bloom at both high geometric and radiometric resolutions. In this work, we tested the MicaSense RedEdge-M multispectral camera mounted on a DJI Phantom 3 Professional aircraft to map submerged seaweeds and assess their evolution. In fact the spread of seaweeds is very rapid, therefore it is particularly important to predict it in advance, by detecting the seaweeds when they are still submerged. The case study is the lagoon of Goro (Northern Adriatic Sea, Italy), a crucial environment for the clams farming characterized by a balance particularly delicate because of both the freshwater coming from the Po River and the saltwater ingression caused by the tidal cycles of the Adriatic Sea. The digital images acquired in two subsequent flights were processed either with Agisoft PhotoScan PRO and Pix4D Mapper Pro. All the tests performed in this study confirm that the monitoring over time with a multispectral lightweight camera mounted on a UAV is possible, but the solely application of a proper radiometric calibration (using a Downwelling Light Sensor and a known reflectance panel) gives the most accurate and reliable results.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni il fenomeno di eutrofizzazione è aumentato fortemente nel mar Adriatico settentrionale, in particolare nei

pressi del delta del Po. L'acqua dolce proveniente dalle bocche fluviali fornisce infatti un elevato apporto di nutrienti che facilitano la crescita delle alghe. Conseguentemente, un limitato aumento della temperatura dell'acqua durante la stagione estiva

può rapidamente portare ad una fioritura praticamente incontrollata con effetto dannoso, finanche tossico, sulla fauna ittica e, più in generale, sulla vita degli organismi acquatici (Hallegraeff, 2003). Le zone in cui sono presenti allevamenti di molluschi risultano particolarmente vulnerabili alle conseguenti condizioni di anossia che possono instaurarsi qualora la biomassa algale inizi il processo di decomposizione. L'economia della maggior parte dei piccoli paesi situati attorno al delta del fiume Po dipende fortemente dalle attività di pesca e acquacoltura e risulta pertanto seriamente minacciata dai processi di eutrofizzazione. L'Agenzia Regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia dell'Emilia-Romagna (ARPAE) monitora costantemente le aree strategiche allo scopo di prevenire l'insorgere di tali condizioni. Una serie di ricognizioni vengono periodicamente effettuate attraverso l'uso di piccole imbarcazioni alla ricerca delle prime alghe affioranti in superficie. Anche la qualità dell'acqua viene inoltre monitorata mediante l'utilizzo di sonde multiparametriche in grado di fornire informazioni sulla quantità di ossigeno disciolto nell'acqua, nonché sulla temperatura e salinità dell'acqua stessa. Nonostante questi considerevoli sforzi risulta tuttavia arduo effettuare un monitoraggio sin dalle prime fasi di crescita subacquea. La distribuzione spaziale delle zone in cui la crescita è più rapida varia infatti di anno in anno ed è pertanto solamente attraverso un monitoraggio precoce, effettuato quando l'alga risulta essere ancora sommersa, che si potrebbero effettuare interventi di rimozione tempestivi prima dell'insorgere di condizioni potenzialmente dannose alla fauna ittica.

L'uso di immagini satellitari rappresenta ancor oggi la fonte primaria di informazioni per il telerilevamento nel campo della mappatura algale, ma il limitato numero di bande spettrali (meno di dieci) e la frequente ricorrenza di pixel misti dovuta alla scarsa risoluzione geometrica (1÷5 m/pixel) rendono poco accurato il monitoraggio (Hossain et al., 2015; Wicaksono et al., 2017). I recenti sviluppi in campo di tecnologie per Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR), con una sempre maggiore miniaturizzazione dei sensori, hanno aumentato le potenzialità di impiego di questi nuovi sistemi. Inoltre, l'elevata risoluzione geometrica delle immagini combinata ad algoritmi di Structure from Motion (SfM) ha aperto la strada a molteplici applicazioni di ricerca basate sull'acquisizione dati da APR. La ricostruzione di accurati modelli digitali, sia del terreno che di superfici, con conseguente estrazione di curve di livello e creazione di mesh e modelli tridimensionali texturizzati, sono tipici esempi di prodotti finali ottenibili attraverso un approccio di tipo SfM (Nex e Remondino, 2014). L'abbinamento di APR e camere multispettrali a risoluzione centimetrica offre molteplici possibilità di impiego anche all'interno di campi quali l'agricoltura di precisione e la gestione boschiva (Candiago et al., 2015). In ambito costiero, esempi di applicazioni presenti in letteratura riguardano l'identificazione di fasce costiere e linee di erosione (Papakonstantinou et al., 2016), la caratterizzazione bidimensionale e tridimensionale di spiagge e sistemi di dune (Mancini et al., 2013; Taddia et al., 2019), nonché il monitoraggio della proliferazione algale (Kislik et al., 2018; Duffy et al., 2018).

In questo lavoro abbiamo testato l'uso di un sistema multispettrale a basso costo formato da un drone DJI Phantom 3 Professional equipaggiato con una camera multispettrale MicaSense RedEdge-M per il rilevamento delle alghe sommerse. Esso è stato condotto in un ambiente lagunare caratterizzato da acque basse e calme con un'escursione di marea limitata a poche decine di centimetri. In tali condizioni l'uso di APR si rivela essere particolarmente indicato.

Al fine di calcolare valori di effettiva riflettanza a partire dai Digital Number (DN) delle immagini acquisite dalla camera, la calibrazione radiometrica rappresenta un passaggio

indispensabile. Recentemente diversi articoli presenti in letteratura hanno indagato l'importanza della calibrazione radiometrica sia per camere multispettrali che iperspettrali (Hakala et al. 2018; Honkavaara, Khoramshahi 2018, Deng et al. 2018b). La determinazione della radianza rilevata dal sensore rappresenta il primo passaggio per effettuare la conversione da Digital Number a riflettanza. Il calcolo della radianza, che permette di ottenere il reale flusso di energia rilevato dal sensore multispettrale, può essere effettuato considerando variabili quali la sensibilità ISO impostata al tempo dello scatto, il tempo di esposizione, la dark current e il vignetting (von Bueren et al. 2015; Aasen et al. 2018; MicaSense 2018). Mentre, il successivo calcolo della riflettanza, può essere effettuato sia usando le misure di irradianza fatte da un sensore apposito detto Downwelling Light Sensor (DLS), sia utilizzando un pannello a riflettanza nota. Ad esempio, Hakala et al. (2018) hanno proposto un metodo per calcolare direttamente la riflettanza di superficie a terra da piattaforme UAV sfruttando sia le misure di radianza effettuate da un sensore iperspettrale che le misure di irradianza derivanti da uno spettrometro. Tuttavia, all'interno della loro ricerca gli stessi autori evidenziano come una rotazione del sensore di irradianza rispetto al piano orizzontale possa notevolmente influenzare l'accuratezza nella misura della reale irradianza. L'uso di pannelli a riflettanza nota consente invece di risolvere questa tipologia di problematiche.

La ricostruzione di informazioni spettrali a livello del singolo pixel coinvolge necessariamente la registrazione (sovrapposizione) delle immagini acquisite da ciascuna ottica del sensore multispettrale. Per tale ragione Jhan et al. (2016) hanno studiato le problematiche legate ad una accurata registrazione band-to-band di immagini acquisite attraverso sensori multi-ottica, proponendo una procedura di orto-rettifica. Oggigiorno l'approccio certamente più comune e diffuso per gestire dataset di immagini, anche multispettrali consiste nell'utilizzare tecniche di Structure from Motion (SfM) per generare un unico ortomosaico per ogni banda spettrale. Tuttavia, uno stesso oggetto può essere caratterizzato da valori di riflettanza leggermente differenti in immagini diverse. Honkavaara e Khoramshahi (2018) hanno pertanto ricercato un approccio per sopperire alla mancanza di coerenza dei valori di riflettanza che possono talvolta essere calcolati nelle zone di sovrapposizione delle varie immagini, proponendo infine una tecnica di ottimizzazione globale per la correzione radiometrica dell'intero blocco fotogrammetrico.

Deng et al. (2018a) hanno inoltre studiato l'effetto della risoluzione spaziale sul rendimento delle acquisizioni iperspettrali da APR in termini sia geometrici che radiometrici. In particolar modo per quanto riguarda le immagini dei pannelli a riflettanza nota, la zona attorno ad essi può influenzare significativamente la risposta spettrale del pannello stesso. Per questa ragione gli autori hanno proposto dei metodi per scegliere opportunamente la risoluzione spaziale da APR allo scopo di migliorare l'efficienza delle operazioni di rilevamento. Nonostante ciò, nell'ambito della nostra ricerca le immagini del pannello a riflettanza nota non sono mai state acquisite durante i voli aerofotogrammetrici, bensì sempre subito prima e subito dopo la loro esecuzione mantenendo la camera multispettrale ad una distanza mai superiore al metro dal pannello, garantendo dunque un'elevata copertura (in termini di pixel) dell'area del pannello stesso sull'immagine di calibrazione.

Sebbene molteplici approcci per una rigorosa ed avanzata calibrazione radiometrica siano stati recentemente proposti in letteratura, quali quelli illustrati sopra, nell'ambito del nostro lavoro abbiamo utilizzato una procedura semplificata, basata in particolare, su due dei più comuni software di SfM (Agisoft PhotoScan Professional e Pix4D Mapper Pro) attualmente

disponibili. Entrambi, nelle ultime versioni, hanno introdotto la possibilità di applicare correzioni radiometriche direttamente all'interno del flusso di elaborazione utilizzando in modalità più o meno automatica il pannello a riflettanza nota ed i dati del DLS. Conseguentemente, sono state anche sinteticamente valutate le differenze riscontrabili nell'uso dei due diversi software nella creazione degli ortomosaici multispettrali radiometricamente calibrati, come scopo secondario della ricerca. Al termine di questa analisi preliminare si è quindi proceduto all'effettivo rilevamento e quantificazione delle alghe sommerse attraverso due distinte tecniche:

- un semplice calcolo di un indice spettrale rappresentativo della vegetazione (NDVI);
- una classificazione supervisionata condotta con un algoritmo pixel-based standard e ben noto nel settore del telerilevamento basato sul principio di massima verosimiglianza (Richards et al. 2006). Questa procedura è stata svolta in ambiente software ENVI.

Come era prevedibile, la classificazione supervisionata ha fornito risultati più attendibili rispetto alla semplice procedura di rilevamento algale basata sul calcolo di un indice spettrale ed è stato inoltre possibile applicarla a maggiori estensioni all'interno dei siti monitorati, anche con profondità d'acqua variabili.

Infine, un'ultima analisi condotta, è consistita nell'indagare se una procedura di classificazione supervisionata possa essere in grado di sopperire ad un'eventuale mancanza di calibrazione radiometriche del dataset di immagini acquisite.

2. IL CASO DI STUDIO

La Sacca di Goro, sito scelto per il monitoraggio delle alghe, è situata nel mar Adriatico settentrionale nei pressi del delta del fiume Po. Questo particolare ambiente lagunare è caratterizzato da acque basse (fino a 1.5 metri di profondità) e da una elevata idrodinamica che porta ad una continua evoluzione della linea di costa causata dal conseguente trasporto (solido) di sedimento sabbioso (Corbau et al., 2016).

Grazie alle sue caratteristiche tipicamente lagunari, la Sacca di Goro è particolarmente adatta all'allevamento di molluschi. Essa costituisce un'area di grande importanza per la riproduzione delle vongole e, conseguentemente, per il loro allevamento. Questa attività rappresenta un'importante fonte di reddito per la comunità locale (Goro). Durante la calda stagione estiva, ed in particolar modo nelle zone evidenziate (in rosso) in Figura 1, l'improvvisa e pressoché incontrollata crescita delle alghe, facilitata da un'elevata temperatura dell'acqua, può rapidamente portare a condizioni di anossia estremamente dannose ed anche letali per i molluschi.

Allo scopo di prevenire l'insorgere di tale fenomeno, una costante attività di monitoraggio viene condotta mediante ricognizioni a bordo di piccoli motoscafi da parte di Arpa-E Emilia-Romagna. In particolare, essa consiste nella ricerca di alghe affioranti in superficie e viene effettuata ad intervalli di tempo sempre più brevi quanto maggiore è la temperatura dell'acqua rilevata. Ciononostante, la presenza di alghe affioranti rappresenta già un evidente segno di uno stato di fioritura e sviluppo algale particolarmente avanzato. Per evitare l'instaurarsi di condizioni di anossia in tali situazioni, è necessario intraprendere tempestivamente delle contromisure quali la rimozione delle alghe affiorate prima che inizino il processo di decomposizione.

Attualmente, un'attività di prevenzione attraverso un'adeguata tecnica di monitoraggio e l'adozione di misure atte al miglioramento della qualità dell'acqua sembrano rappresentare l'approccio più idoneo. Il rilevamento delle alghe sommerse, in uno stato di crescita ancora del tutto subacqueo, costituisce una

soluzione poco dispendiosa se effettuata attraverso l'uso di APR e consente un più ampio margine temporale per la pianificazione delle azioni atte a mitigare e prevenire l'insorgere di condizioni dannose all'allevamento di molluschi.

3. METODOLOGIA

L'impiego di APR negli ultimi anni ha interessato un sempre maggior numero di applicazioni. Nel campo del telerilevamento, essi si configurano come un efficace strumento di acquisizione in grado di fornire elevate risoluzioni geometriche e ricostruire modelli accurati attraverso tecniche fotogrammetriche digitali. Inoltre, gli APR rappresentano anche una soluzione tecnologica caratterizzata da costi operativi estremamente contenuti.



Figura 1. Aree rilevate all'interno della Sacca di Goro.

La recente disponibilità sul mercato di camere multispettrali leggere ha esteso il campo di applicazione degli APR ad ambiti ancora tradizionalmente legati al telerilevamento satellitare, grazie alla presenza di bande spettrali aggiuntive rispetto a quelle classiche della luce visibile.

Questa capacità di acquisire nuove ed ulteriori informazioni, tra cui quelle nelle lunghezze d'onda del vicino infrarosso (circa 840 nm) e del cosiddetto "red edge" (circa 717 nm), rende possibile la mappatura ad alta risoluzione della copertura vegetale al suolo.

Per queste ragioni il rilevamento delle alghe è stato effettuato attraverso l'uso della camera MicaSense RedEdge-M (costo indicativo di circa 5.000 euro) montata su un drone DJI Phantom 3 PRO (Fig. 2).

La RedEdge-M ha cinque distinte bande spettrali di acquisizione. Essa è in grado di rilevare la radiazione elettromagnetica nelle regioni del blu, verde, rosso, red edge e vicino infrarosso (Tabella 1) grazie a filtri passa-banda interposti tra il sensore di ciascuna ottica e l'obiettivo. La presenza di un global shutter consente inoltre di minimizzare le problematiche relative ad un possibile sfocamento (effetto mosso) delle immagini.

Le correzioni radiometriche sono applicate sia mediante l'uso di un pannello a riflettanza nota sia attraverso i dati registrati da un

senso di irradianza ambientale (DLS). Il primo è un pannello costituito da un materiale con un comportamento quasi-lambertiano le cui caratteristiche di risposta spettrale vengono fornite dalla MicaSense tramite procedure di calibrazione svolte in laboratorio; immagini del pannello devono essere prese manualmente, ad una distanza di circa 1 metro, all'inizio ed alla fine di ogni volo APR (Fig. 3). Il secondo (DLS) misura invece l'effettiva quantità di luce incidente e risulta particolarmente utile per monitorare le variazioni di irradianza durante l'acquisizione, consentendo di riportare ogni volo a condizioni "standard" ed, in tal modo, confrontare i dati in maniera omogenea nel tempo.

I principali vantaggi e svantaggi dei metodi di calibrazione radiometrica basati sull'uso di un singolo dispositivo (DLS, pannello a riflettanza nota) o entrambi, sono brevemente riassunti in Tabella 2.

| MicaSense RedEdge-M | | |
|------------------------------|-----------------------------------|--|
| Peso | 170 g incluso DLS | |
| Dimensioni | 94 mm × 63 mm × 46 mm | |
| Consumo Energetico | 4.2V-15.8V, 4W nominali, 8W picco | |
| Bande Spettrali | Blu | Lunghezza d'onda centrale: 475 nm Larghezza di banda FWHM: 20nm |
| | Verde | Lunghezza d'onda centrale: 560 nm Larghezza di banda FWHM: 20nm |
| | Rosso | Lunghezza d'onda centrale: 668 nm Larghezza di banda FWHM: 10nm |
| | Red Edge | Lunghezza d'onda centrale: 717 nm Bandwith FWHM: 10nm |
| | NIR | Lunghezza d'onda centrale: 840 nm Larghezza di banda FWHM: 40nm |
| Ground Sample Distance (GSD) | 8 cm a 120 m | |

Tabella 1. Specifiche tecniche della camera multispettrale MicaSense RedEdge-M.

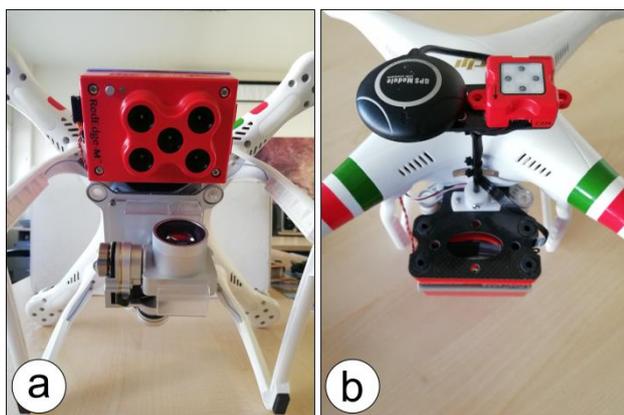


Figura 2. (a): Camera multispettrale MicaSense RedEdge-M montata su DJI Phantom 3 Professional; (b): Dettaglio sul sensore di irradianza ambientale DLS e antenna GNSS.

La combinazione delle misure di irradianza condotte dal DLS con le misure di radianza effettuate dai sensori che compongono la camera multispettrale rende pertanto possibile calcolare valori di riflettanza attraverso l'impiego di immagini acquisite da APR. Il rapporto tra la radiazione riflessa (misurata dalla

camera) e quella incidente (misurata dal DLS) fornisce un dato di riflettanza, anche se è bene far presente che i due sensori hanno angoli di campo sensibilmente diversi in quanto il DLS misura la radiazione proveniente dall'intero emisfero (Hakala et al. 2018) mentre la camera possiede un angolo di campo estremamente limitato (in particolare se si pensa al singolo pixel).



Figura 3. Esempio di immagini del pannello di riflettanza nota, una per ogni banda della RedEdge-M, acquisite manualmente all'inizio ed alla fine di ogni volo APR.

Nonostante dunque sia possibile utilizzare le misurazioni condotte attraverso un DLS per calcolare un dato in riflettanza, è certamente l'impiego di un pannello a riflettanza nota che consente di raggiungere le più elevate accuratèzze e precisioni, soprattutto quando combinato ad un DLS. Ciò è dovuto al fatto che solo con un pannello risulta possibile ricavare direttamente la relazione tra radianza e riflettanza sulla porzione di immagine che ritrae il pannello stesso ed estendere questo legame a tutta la rimanente parte di immagine, finanche all'intero dataset di immagini acquisite. In una tale situazione il DLS può fornire dati utili a monitorare eventuali variazioni di irradianza tra il momento in cui è stata acquisita l'immagine del pannello e l'istante in cui è stata acquisita ogni altra immagine, lavorando così in una sorta di maniera "differenziale" o "relativa".

Riassumendo, si può dunque affermare che il principale vantaggio del solo DLS consiste nel fatto di effettuare misure continue di irradianza che vengono registrate nei metadati Exif di ogni immagine in maniera del tutto automatica. Tuttavia, l'irradianza calcolata attraverso queste sole misure risulta meno accurata rispetto all'uso di un pannello a riflettanza nota.

Qualora nessun DLS sia disponibile, l'uso del solo pannello consente invece di calcolare comunque valori di riflettanza affidabili e precisi, sebbene in questo caso l'operatore ha l'onere aggiuntivo di acquisire almeno un'immagine del pannello stesso. Inoltre in questo caso non è in alcun modo possibile tenere conto di variazioni dell'effettiva irradianza durante il volo. L'uso combinato di DLS e pannello a riflettanza nota combina i vantaggi dei due singoli dispositivi, consentendo il calcolo di un dato in riflettanza accurato in ogni istante del volo aerofotogrammetrico multispettrale, anche nel caso del passaggio di nuvole. Oltre al DLS, la camera multispettrale è inoltre interfacciata con un dispositivo GNSS standard che fornisce informazioni utili ad una grossolana georeferenziazione delle singole immagini. Anche in questo caso le coordinate vengono inseriti all'interno dei metadati Exif dell'immagine.

Per il monitoraggio sono state quindi scelte due distinte zone all'interno della Sacca di Goro, entrambe situate in prossimità del cosiddetto "Scanno di Goro": una lunga e sottile striscia sabbiosa in continua evoluzione. Questa zona è infatti quella che risulta maggiormente affetta dal fenomeno dell'eutrofizzazione nei mesi estivi. Nelle due zone prese in esame sono state individuate due distinte specie di alga: *Ulva* nel primo sito (Fig. 4a) ed *Enteromorpha* nel secondo (Fig. 4b). I rilievi multispettrali sono stati effettuati mediante due ripetizioni in ciascun sito, per un totale di quattro distinti voli. Il primo rilevamento si è svolto il 25 maggio 2018 e ha mostrato la presenza di alghe sommersive in uno stato di crescita iniziale. La successiva ripetizione del rilievo, effettuata il 3 luglio 2018, ha evidenziato un notevole aumento di copertura algale sommersa, ancora non affiorante in superficie eccetto per le alghe spiaggiatesi sulla riva.

| Metodo | Vantaggi | Svantaggi |
|-----------------------------------|--|--|
| DLS | Misure di irradianza nei metadati Exif. | Riflettanza non molto accurata. |
| Pannello a riflettanza nota | Riflettanza molto accurata. | L'operatore deve ricordarsi di acquisire le immagini del pannello all'inizio ed al termine di ogni volo Le variazioni di irradianza non possono essere tenute in considerazione |
| DLS + Pannello a riflettanza nota | Riflettanza molto accurata. Le variazioni di irradianza possono essere tenute in considerazione. | Leggero aumento del costo del sistema dovuto a due diversi dispositivi. |

Tabella 2. Vantaggi e svantaggi dei differenti metodi di calibrazione radiometrica.

Allo scopo di rilevare entrambi i siti sono stati impostati piani di volo ad una quota di 70 metri

In tal modo è stato possibile garantire una risoluzione geometrica (GSD) di circa 5 centimetri per le immagini multispettrali acquisite con la camera MicaSense RedEdge-M.

Inoltre, per garantire un'adeguata sovrapposizione tra le immagini stesse, sono stati impostati ricoprimenti longitudinale e trasversale rispettivamente pari a 80% e 70%. Questi parametri sono calcolati autonomamente dall'applicazione che gestisce il piano di volo con riferimento alla camera RGB nativa montata sul DJI Phantom 3 PRO (non usata in questa ricerca) tuttavia, i rispettivi ricoprimenti effettivi per la RedEdge-M non differiscono significativamente dai valori precedentemente menzionati. I tempi di volo sono stati sempre, per ogni volo, al di sotto dei 15 minuti.

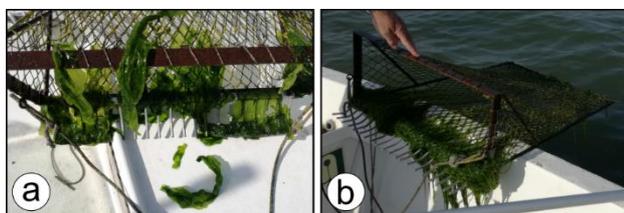


Figura 4. (a): *Ulva* rilevata nel sito 1 tramite rastrellamento; (b): *Enteromorpha* rilevata nel sito 2 tramite rastrellamento.

Un set di punti di appoggio è stato infine utilizzato per la georeferenziazione del blocco fotogrammetrico. I punti sono stati materializzati mediante pannelli in legno ed il loro centro è stato rilevato con ricevitori GNSS geodetici a doppia frequenza in NRTK (Network Real Time Kinematics) nel sistema ETRS89-ETRF2000 (2008.0).

Tutti i dataset di immagini sono stati elaborati sia con il software Agisoft PhotoScan Professional che con Pix4D Mapper Pro. Alcune problematiche sono state riscontrate durante la procedura di allineamento delle immagini, in particolare:

- mancanza di punti omologhi sulle immagini acquisite a mare, a meno delle increspature ondose che però il più delle volte forniscono corrispondenza errate;
- presenza di riflessi situati sempre nella stessa area immagine produce corrispondenze che, ancora una volta, risultano errate.

Le immagini affette da queste problematiche sono evidenziate in Figura 5 e in Figura 6. Gli algoritmi di filtraggio degli outliers, tuttavia, sono generalmente in grado di eliminare le corrispondenze erratee; per contro, l'allineamento delle immagini a mare senza alcun lembo di terra emersa ai bordi è risultato praticamente impossibile. Diversi approcci sono stati seguiti per gestire le prese multispettrali. Quello più semplice è consistito nell'utilizzare le immagini così come direttamente acquisite, senza pertanto applicare alcuna correzione radiometrica, mentre il più rigoroso ha previsto l'uso combinato

delle informazioni fornite dal sensore DLS e dal pannello a riflettanza nota. Il flusso di lavoro secondo le varie opzioni seguite è riassunto nella Figura 7.

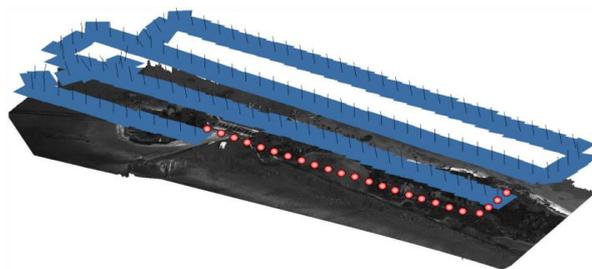


Figura 5. Piano di volo nel sito 1. In rosso le immagini che non è stato possibile allineare.

È importante sottolineare come Agisoft Photoscan Professional non consenta di ottenere alcun valore di riflettanza, ma solamente Digital Numbers radiometricamente corretti. Al contrario, Pix4D Mapper Pro converte i Digital Number in valori di radianza e/o riflettanza ogniqualvolta venga applicata una procedura di correzione del dato acquisito (calibrazione). L'opzione "camera only" consente di calcolare un valore di radianza tenendo conto di parametri quali dark current, tempo di esposizione, vignetting, valore ISO. L'uso dei dati del sensore DLS e/o delle immagini di un pannello a riflettanza nota consentono di convertire tale valore in un dato di riflettanza (dunque compreso tra 0 e 1).

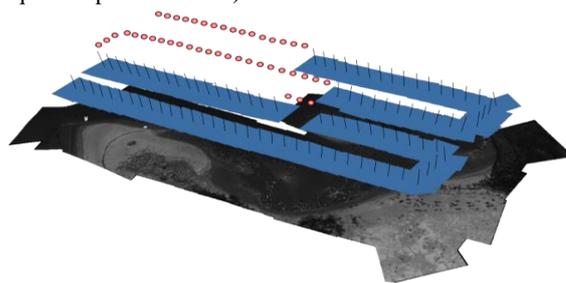


Figura 6. Piano di volo nel sito 2. In rosso le immagini che non è stato possibile allineare.

Come detto, il primo approccio seguito per il rilevamento delle alghe sommerse è consistito nel calcolo dell'indice NDVI. Poiché questo indice è in una forma già normalizzata, nulla di fatto cambia se al posto della formula in riflettanza

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (1)$$

si utilizza la formula in Digital Number

$$NDVI = \frac{DN_{NIR} - DN_{red}}{DN_{NIR} + DN_{red}} \quad (2)$$

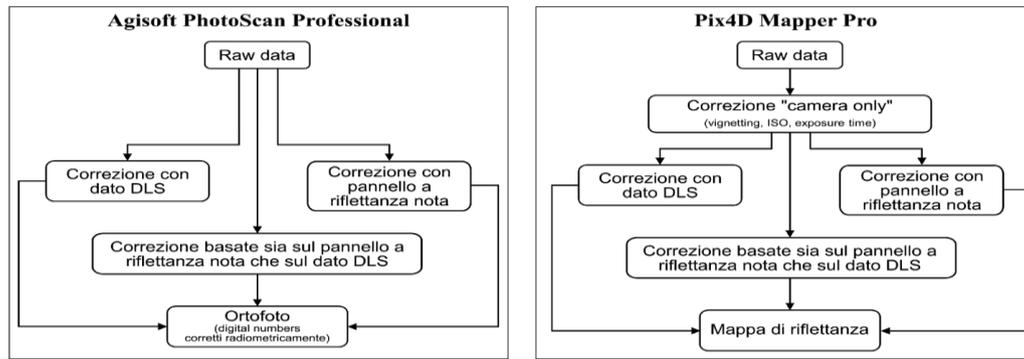


Figura 7. Schematizzazione dei diversi approcci per l'applicazione di correzioni radiometriche all'interno dei due software usati.

Per studiare l'importanza della calibrazione radiometrica sono state identificate quattro distinte aree caratterizzate da una copertura omogenea su ciascuna ortofoto:

1. vegetazione sulla spiaggia;
2. acqua profonda (1÷1.5 m);
3. sabbia asciutta;
4. acqua bassa con alga sommersa.

Si noti come in questo contesto la terminologia "acqua profonda" vada intesa in termini relativi rispetto alle regioni in cui l'acqua era significativamente più bassa, ed in cui era presente anche una certa copertura algale subacquea. L'esatta collocazione ed estensione delle varie aree è mostrata in Figura 8. Ciascuna area, individuata attraverso appositi poligoni, è stata usata come maschera per l'estrazione delle informazioni nelle varie singole bande spettrali e per calcolare conseguentemente l'indice NDVI.

Questa operazione è stata eseguita per entrambi i rilevamenti (maggio e luglio), su entrambi i siti, per ciascun software usato (Agisoft PhotoScan Professional e Pix4D Mapper Pro) e per tutti gli approcci illustrati in Figura 7. Un totale di 36 distinti progetti è stato quindi creato per questo tipo di analisi.

I dati estratti dalle ortofoto e/o dalle mappe di riflettanza in corrispondenza delle varie aree sono stati analizzati in termini

di istogrammi di frequenza per comprenderne la distribuzione dei valori. Questa operazione è stata effettuata in ambiente MATLAB®, con particolare riguardo alle bande spettrali del rosso e del vicino infrarosso e conseguentemente sul valore di NDVI da queste calcolato.

Lo scopo è stato quello di analizzare l'influenza della calibrazione radiometrica sulla caratterizzazione delle varie coperture individuate.

La successiva quantificazione delle alghe sommerse, invece, è stata fatta solamente utilizzando i risultati ottenuti applicando la procedura di calibrazione radiometrica basata sul duplice utilizzo delle immagini di un pannello a riflettanza nota e del sensore DLS.

Infine, l'ultima analisi ha riguardato l'uso di una procedura di classificazione supervisionata al posto di un semplice calcolo di un indice spettrale. Anche in questo caso la classificazione è stata effettuata sia sull'ortofoto ottenuta dalle immagini grezze, sia utilizzando lo stesso dataset dopo l'applicazione delle correzioni radiometriche di cui sopra, e sempre con l'obiettivo di valutare se la definizione di un opportuno numero di regioni di interesse usate per l'apprendimento del classificatore possa eventualmente sopperire alla mancanza di una calibrazione radiometrica.

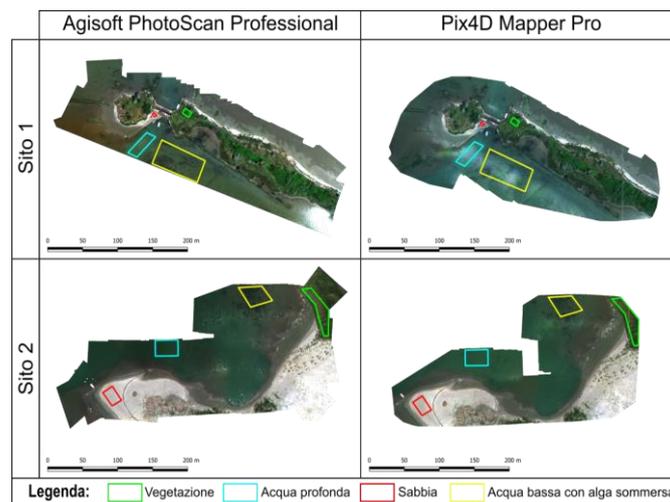


Figura 8. Individuazione delle aree omogenee utilizzate per le prime analisi relative alla distribuzione dei valori nelle bande spettrali del rosso e del vicino infrarosso, nonché dell'indice NDVI, al variare della tipologia di calibrazione radiometrica.

4. RISULTATI OTTENUTI

Con l'obiettivo di valutare la procedura di calibrazione radiometrica è stata analizzata la distribuzione dei valori in Digital Number e/o riflettanza (dove disponibile come output del software di SfM). L'analisi è stata focalizzata, in particolare,

sulle bande del rosso e del vicino infrarosso (Fig. 9), nonché sulla loro combinazione in termini di indice NDVI (Fig. 10). Ciascun istogramma di frequenza contiene il numero di pixel appartenenti alla specifica classe (intervallo di valori). Le frequenze sono state normalizzate al fine di effettuare un confronto omogeneo tra le diverse coperture individuate che

fosse indipendente dal numero effettivo di pixel di ognuna di esse.

Come prime osservazioni si può notare che l'applicazione di correzioni radiometriche porta ad una generale diminuzione dei valori di Digital Number. Questo è dovuto al fatto che i valori vengono riportati ad una radianza, in funzione del tempo di esposizione e dalla sensibilità ISO memorizzati nell'Exif di ogni immagine.

Inoltre, dal confronto degli istogrammi per le coperture prive di vegetazione, si osserva che solamente attraverso l'introduzione di correzioni radiometriche è possibile distinguere le varie coperture in termini di NDVI. Infatti, gli istogrammi di frequenza sulla base dei dati grezzi (Raw data) mostrano una grande sovrapposizione tra sabbia, acqua profonda e acqua con alghe in termini di indice spettrale. La distinzione si ottiene invece con le immagini radiometricamente corrette, con una netta separazione degli istogrammi stessi.

Differenze del tutto trascurabili sono state invece riscontrate nell'uso dei due software e pertanto le considerazioni che verranno fatte nel seguito sono basate sull'output del solo Agisoft PhotoScan Professional.

Come detto, il primo approccio di rilevamento e quantificazione delle alghe sommerse è stato effettuato sulla base dell'indice spettrale NDVI, poiché esso è comunemente impiegato per distinguere coperture con vegetazione da altre che ne siano invece prive.

Questa identificazione è stata inizialmente condotta sulla sola regione identificata come "acqua bassa con alga sommersa". Il rilevamento, in questo caso, dipende fortemente dalla distribuzione dei valori di NDVI all'interno della zona considerata. In altre parole, è solamente attraverso una comparazione in termini relativi che risulta possibile distinguere tra zone con e senza alga sommersa. Ciò si traduce in una grande soggettività nell'adozione di un valore di soglia per l'indice spettrale: oltre tale valore si considera il pixel come "alga", in caso contrario come "acqua".

Questo procedimento applicato alle immagini di maggio (Fig.11) e luglio per il sito 1 ha mostrato che i valori con frequenza massima si attestavano rispettivamente a -0.22 e -0.15. In base anche ad un riscontro visivo sull'ortofoto RGB, il valore di soglia è stato quindi assunto pari a -0.16.

La quantificazione delle due diverse coperture ha fornito rispettivamente un valore di 498.2 m² per il mese di maggio e 1179.6 m² per il mese di luglio, con un incremento percentuale pari a +137% nell'arco di 39 giorni (Fig. 12).

Data l'elevata soggettività nell'adozione del valore di soglia in un approccio NDVI, nella stessa regione è stata anche eseguita una procedura di classificazione supervisionata utilizzando la tecnica di massima verosimiglianza (maximum likelihood). In questo caso tutte e cinque le bande spettrali (blu, verde, rosso, red edge e vicino infrarosso) sono state considerate. Anche l'indice NDVI è stato aggiunto come ulteriore sesta banda "sintetica". Ovviamente questa nuova banda aggiuntiva è correlata alle informazioni nelle bande del rosso e del vicino infrarosso, tuttavia l'indice NDVI è in grado di fornire direttamente un'informazione sulla maggiore o minore probabilità che la copertura sia o no legata alla presenza di vegetazione, alghe incluse.

Più correttamente, la classificazione è stata effettuata sull'intera ortofoto, sulla quale sono state identificate tutte le tipologie di copertura al suolo presenti attraverso l'introduzione di 11 Regioni di Interesse (RoI), e solamente alla fine è stata estratta l'informazione all'interno della regione precedentemente menzionata. In tal modo è stato possibile confrontare l'approccio NDVI con quello basato sulla classificazione supervisionata. Le RoI, ciascuna con almeno un centinaio di pixel, sono state omogeneamente distribuite sull'intera ortofoto.

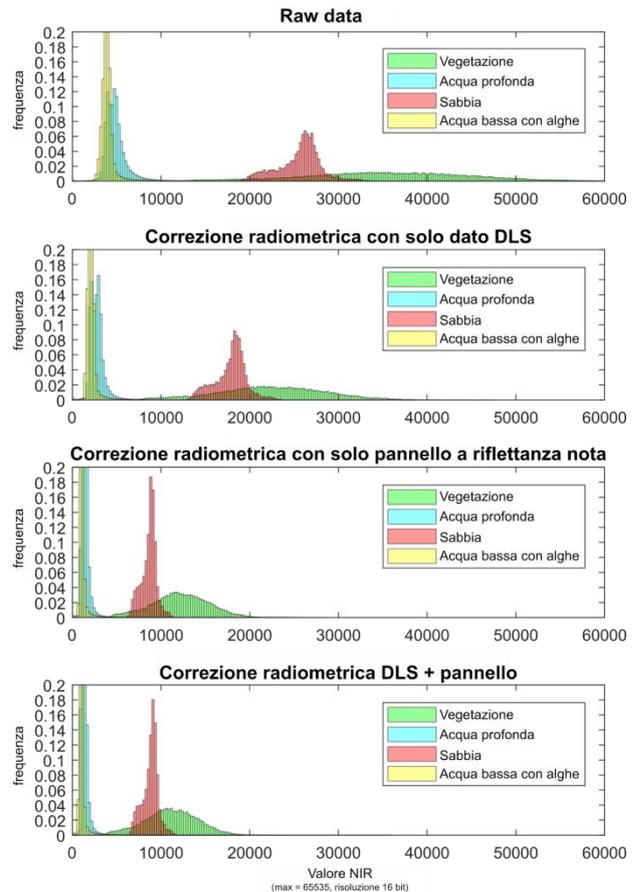


Figura 9. Distribuzione dei valori nella banda del vicino infrarosso (NIR) all'interno delle quattro aree con copertura omogenea individuate sulle ortofoto.

Al fine di validare i risultati della classificazione, sono state introdotte anche 11 equivalenti RoI truth (spazialmente non correlate rispetto alle RoI), grazie alle quali sono state realizzate le analisi standard di post-classificazione (Richards et al. 2006) basate sulla *Confusion Matrix*, sui valori di *Overall Accuracy (OA)* e di *K-coefficient*. I valori di OA e di *K-coefficient* sono sempre risultati superiori rispettivamente al 90% ed a 0.90.

Anche la comparazione con l'ortofoto a colori naturali RGB è servita come ulteriore riscontro circa la corretta classificazione.

I risultati ottenuti con l'approccio di classificazione supervisionata hanno mostrato come la copertura all'interno della regione preselezionata sia aumentata da 809.2 m² in maggio a 1746.1 m² in luglio, con un conseguente aumento percentuale pari a +116% (Fig. 13). Confrontando questi valori con quelli della tecnica basata sul semplice calcolo dell'indice NDVI si può notare come le estensioni, in termini di aree, siano sensibilmente diverse, mentre il tasso percentuale di incremento non sia comunque troppo diverso. Quasi certamente queste differenze sono dovute proprio alla soggettività nella scelta del valore di soglia di NDVI.

Il passo successivo è stato quello di estendere la quantificazione all'intera area di interesse, visibile in ogni ortofoto. In questo caso il rilevamento sulla base dell'indice NDVI è stato sin da subito poco efficace. La variazione di colonna d'acqua presente nei vari punti in laguna, dovuta alla diversa profondità del fondale, causa infatti assorbimenti differenti nelle varie lunghezze d'onda, in particolare nel rosso e nell'infrarosso. Per queste ragioni, risulta impossibile trovare un valore di soglia unico per classificare le zone con la presenza di alghe sommerse, a meno di non suddividere l'immagine in zone

differenziate a seconda della profondità dell'acqua. Un tale modo di procedere risulta tuttavia essere eccessivamente oneroso. Al contrario, la classificazione supervisionata è stata sin da subito condotta sull'intera ortofoto e pertanto non risulta affetta da questa problematica.

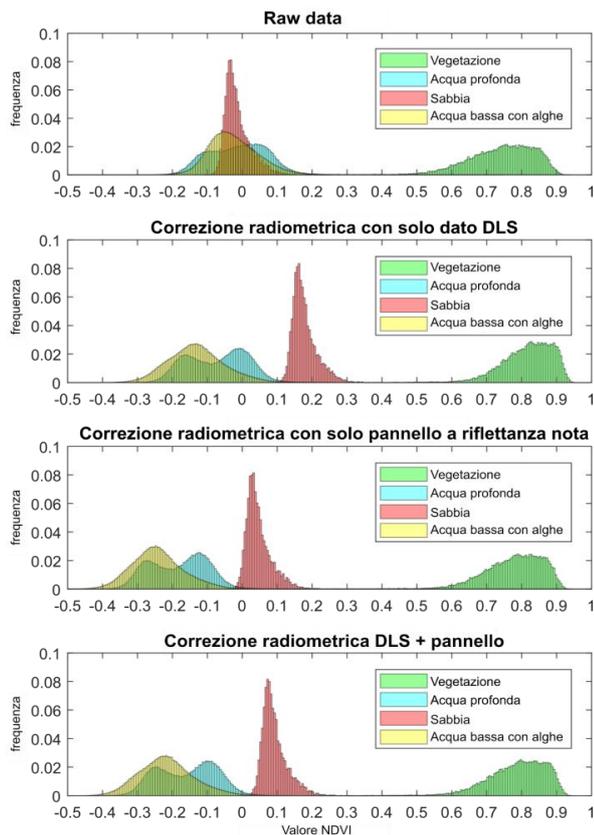


Figura 10. Distribuzione dei valori dell'indice NDVI al variare della tipologia di correzione radiometrica adottata per le aree omogenee identificate. Risultati ottenuti con il software Agisoft PhotoScan Professional.

I risultati della quantificazione, supportati sia da elevati valori di OA che mediante un riscontro sull'ortofoto RGB, mostrano un'estensione della copertura algale pari a 2323.0 m² in maggio e 4908.6 m² in luglio, con un aumento percentuale pari a +111% (Fig. 14). Tale valore è peraltro in linea con i tassi riscontrati nella sottoregione presa in esame in precedenza.

Visti i risultati per il sito 1, per il sito 2 è stata effettuata solamente una rilevazione e quantificazione della copertura algale subacquea utilizzando la procedura di classificazione supervisionata. Ancora una volta la validazione è stata effettuata sia grazie ai valori di OA ottenuti introducendo le RoI truth sia attraverso un riscontro visivo sull'ortofoto RGB.

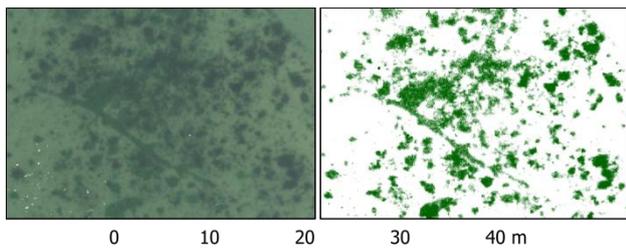


Figura 11. Copertura algale subacquea per il sito 1 durante le analisi basate sull'indice NDVI come classificatore.

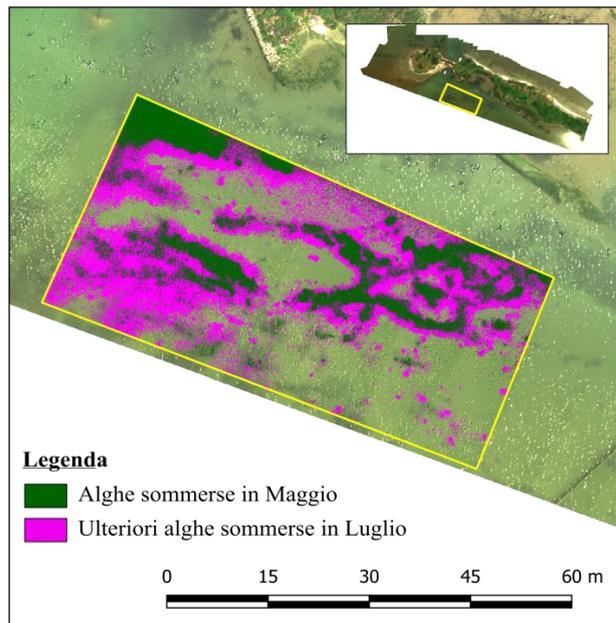


Figura 12. Copertura algale in maggio e luglio con approccio basato su soglia NDVI, all'interno della regione analizzata con gli istogrammi di frequenza.

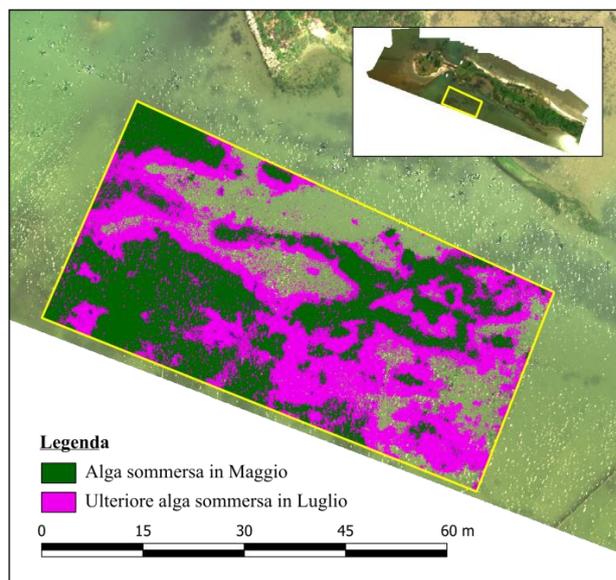


Figura 13. Copertura algale in maggio e luglio tramite classificazione supervisionata, all'interno della regione analizzata con gli istogrammi di frequenza.

Le estensioni di alga sommersa nell'area di monitoraggio individuata nel sito 2 sono state quantificate in 1049.7 m² per il mese di maggio e 3558.1 m² per il mese di luglio (Fig. 15). In questo secondo sito il tasso d'incremento è risultato pari a +239%, ovvero la copertura algale è più che triplicata, sebbene ancora non affiorante in superficie. Infine, un'ultima analisi effettuata ha riguardato la comparazione dei risultati ottenibili sempre attraverso una classificazione supervisionata, ma utilizzando immagini prive di qualsiasi correzione radiometrica, a differenza di quelle impiegate per le quantificazioni precedenti. Ancora una volta, questo confronto è stato limitato al solo sito 1.

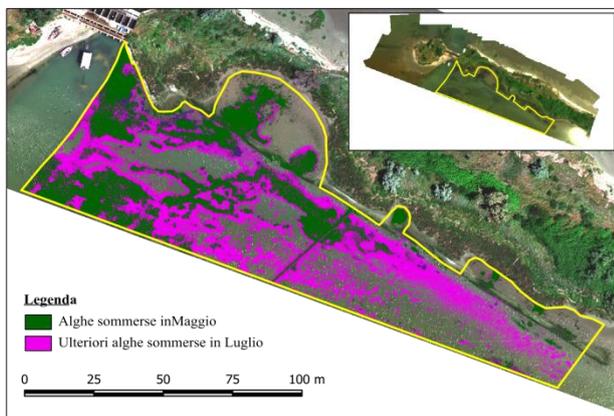


Figura 14. Quantificazione della copertura algale subacquea nel sito 1. L'ortofoto di sfondo è riferita al mese di maggio.

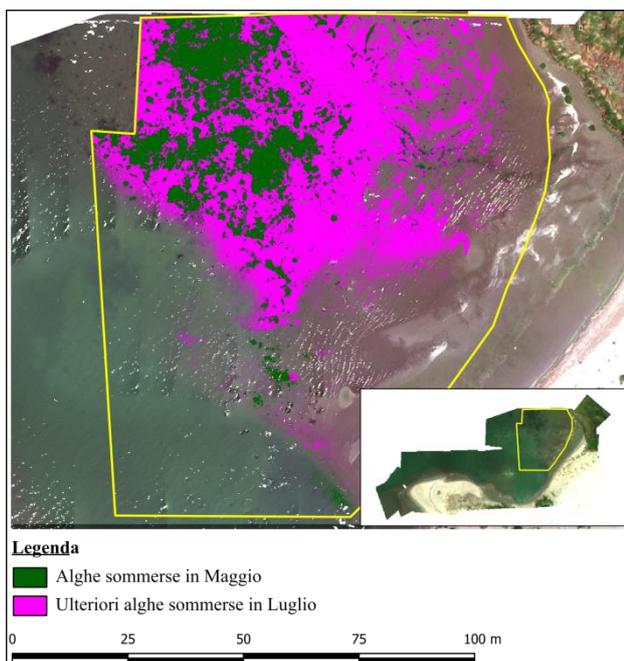


Figura 15. Quantificazione della copertura algale subacquea nel sito 2. L'ortofoto di sfondo è riferita al mese di maggio.

La procedura adottata si è quindi basata sull'individuazione delle RoI per ogni tipo di copertura anche per l'ortofoto ricostruita sulla base delle immagini grezze. La classificazione non è tuttavia risultata altrettanto accurata, come riscontrabile in Figura 16. Solamente una limitata porzione di alghes sommerse riscontrate sulla base di immagini non radiometricamente corrette è risultato essere effettivamente alga sommersa. I risultati sono riassunti in Tabella 3: appare evidente come l'accuratezza della classificazione senza una calibrazione radiometrica sia del tutto insufficiente.

| | Sito 1 Mag 2018 | Sito 1 Lug 2018 | Sito 2 Mag 2018 | Sito 2 Lug 2018 |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <i>Alga sommersa</i> | 38.7 % | 55.3 % | 42.6 % | 34.0 % |
| <i>Acqua</i> | 39.6 % | 11.0 % | 50.6 % | 40.7 % |
| <i>Altro</i> | 21.7 % | 33.7 % | 6.9 % | 25.4 % |

Tabella 3. Riscontri dei pixel classificati come alga sommersa sulla base delle immagini non radiometricamente corrette.

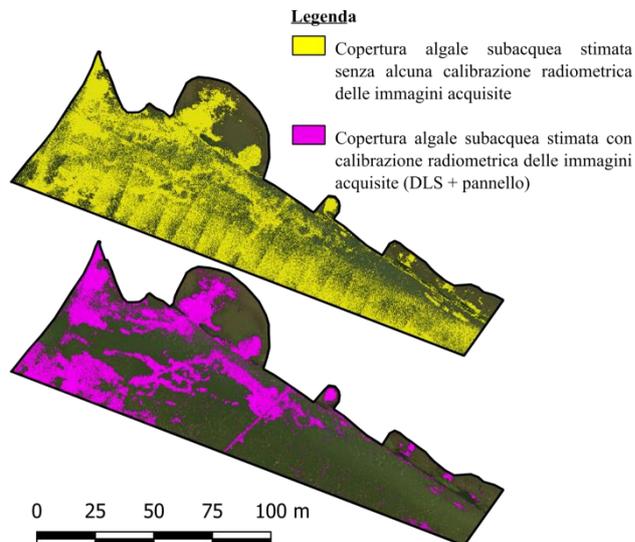


Figura 16. Risultati ottenuti tramite classificazione supervisionata con e senza calibrazione radiometrica.

5. CONCLUSIONI

Lo scopo principale di questo lavoro è stato lo studio di un sistema costituito da un Aeromobile a Pilotaggio Remoto equipaggiato con una camera multispettrale nell'individuazione, quantificazione e monitoraggio di alghes sommerse. Per questo scopo sono stati scelti due differenti siti all'interno della Sacca di Goro, una zona nel delta del Po particolarmente soggetta ad eutrofizzazione nella stagione estiva. Per ogni sito sono stati effettuati due distinti rilevamenti a distanza di 39 giorni l'uno dall'altro, volando ad una quota di 70 m per garantire una risoluzione geometrica pari a 5 centimetri. Le immagini sono state elaborate sia con Agisoft PhotoScan Professional sia con Pix4D Mapper Pro. Inoltre sono state testate diverse procedure di elaborazione, dalla totale mancanza di calibrations radiometriche, all'introduzione di correzioni basate sia sui dati rilevati da un sensore di irradianza ambientale sia tramite immagini di un pannello a riflettanza nota. Prima di procedere alla rilevazione della copertura algale subacquea sono stati effettuati dei test volti ad indagare la distribuzione dei valori, in particolari per l'indice NDVI, per alcune tipologie di copertura al suolo riscontrate nella zona rilevata e variando la tipologia di correzione radiometrica applicata. I risultati hanno chiaramente mostrato come, solamente attraverso una procedura di calibrazione radiometrica, sia possibile distinguere le diverse coperture al suolo in termini di indice spettrale. Un secondo limite evidenziato riguarda invece la soggettività del valore di soglia di NDVI da adottare in un simile approccio che, nel caso di colonne d'acqua di spessore variabile, può risultare difficile da individuare e comunque non affidabile. La procedura di classificazione supervisionata ha invece conseguito buoni risultati. La validazione, pur non essendo stata effettuata attraverso campionamenti puntuali in mare, ha comunque ottenuto valori di accuratezza globale (*Overall Accuracy, OA*) e di *K-coefficient*, calcolati grazie a regioni di interesse di riscontro (RoI truth), molto elevati. Essa è stata applicata con successo ad entrambi i siti oggetto del monitoraggio.

Infine, l'applicazione di una procedura di classificazione supervisionata ad un'ortofoto multispettrale ottenuta senza alcuna calibrazione radiometrica ha evidenziato risultati del tutto inattendibili se confrontata con i risultati ottenuti al punto precedente. Riassumendo, i risultati ottenuti in questo lavoro confermano come sia sostanzialmente possibile utilizzare un

sistema APR multispettrale, dal costo piuttosto contenuto, nel campo del monitoraggio di alghe in acque basse. Tuttavia la calibrazione radiometrica è una procedura pressoché imprescindibile se si vogliono ottenere risultati quanto più accurati ed oggettivamente quantificabili. L'elevato grado di automazione fornito da software quali Agisoft PhotoScan Professional e Pix4D Mapper Pro consente di applicare agevolmente le informazioni acquisite da sensori di irradianza ambientale durante il volo e/o di tenere conto di immagini di pannelli a riflettanza nota appositamente acquisite prima e dopo ogni volo fotogrammetrico. I benefici in termini di efficacia del monitoraggio dello stato di crescita e fioritura algale, nonché di tempistiche per l'adozione di misure atte a mitigare il proliferare delle alghe stesse, sono una diretta conseguenza delle mappature accurate che sono state presentate all'interno di questo lavoro.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il personale ARPAE della Struttura Oceanografica Daphne per il supporto fornito durante le attività di rilievo e per alcuni dati aggiuntivi riguardanti la Sacca di Goro. Un ringraziamento va anche al dott. Marco Miotto che ha contribuito alle elaborazioni presentate in questo articolo durante la preparazione della propria tesi magistrale.

BIBLIOGRAFIA

Aasen H, Honkavaara E, Lucieer A, Zarco-Tejada PJ (2018), Quantitative Remote Sensing at Ultra-High Resolution with UAV Spectroscopy: A Review of Sensor Technology, Measurement Procedures, and Data Correction Workflows, *Remote Sensing*, Vol. 10, No. 7.

Candiago S, Remondino F, De Giglio M, Dubbini M, Gattelli M (2015) Evaluation Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sens.*, 7:4026-4047; doi:10.3390/rs70404026.

Corbau C, Munari C, Mistri M, Lovo S, Simeoni U (2016) Application of the Principles of ICZM for Restoring the Goro Lagoon. *Coastal Management*, Vol. 44, No. 4: 350-365.

Deng L, Yan Y, Gong H, Duan F, Zhong R (2018a) The effect of spatial resolution on radiometric and geometric performances of a UAV-mounted hyperspectral 2D imager, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 144, pp. 298-314.

Deng L, Mao Z, Li X, Hu Z, Duan F, Yan Y (2018b) UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 146, pp. 124-136.

Duffy JP, Pratt L, Anderson K, Land PE, Shutler JD (2018) Spatial assessment of intertidal seagrass meadows using optical imaging systems and a lightweight drone. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 200:169-180.

Hakala T, Markelin L, Honkavaara E, Scott B, Theocharous T, Nevalainen O, Näsi R, Suomalainen J, Viljanen N, Greenwell C., Fox N. (2018), Direct Reflectance Measurements from Drones: Sensor Absolute Radiometric Calibration and System Tests for Forest Reflectance Characterization, *Sensors*, Vol. 18, No. 5.

Hallegraeff GM (2003) Harmful algal blooms: A global review. In *Manual on Harmful Marine Microalgae; Monographs on Oceanographic Methodology Series*. UNESCO Publishing:

Paris, France 11:25-49.

Honkavaara E, Khoramshahi E (2018), Radiometric Correction of Close-Range Spectral Image Blocks Captured Using an Unmanned Aerial Vehicle with a Radiometric Block Adjustment, *Remote Sensing*, Vol. 10, No. 2.

Hossain MS, Bujang JS, Zakaria MH, Hascim M (2015) The application of remote sensing to seagrass ecosystems: an overview and future research prospects. *Int. J. of Remote Sensing* 36(1): 61-113.

Jhan JP, Rau JY, Huang CY (2016), Band-to-band registration and ortho-rectification of multilens/multispectral imagery: A case study of MiniMCA-12 acquired by a fixed-wing UAS, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 114, pp 66-77.

Kislik C, Dronova I, Kelly M (2018) UAVs in Support of Algal Bloom Research: a review of current applications and future opportunities. *Drones* 2,35; doi:10.3390/drones2040035.

Mancini F, Dubbini M, Gattelli M, Stecchi F, Fabbri S, Gabbianelli G (2013) Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. *Remote Sensing* 5: 6880-6898; doi: 10.3390/rs5126880.

MicaSense (2018), MicaSense RedEdge Image Processing Tutorial 1, [https://github.com/micasense/imageprocessing/blob/master/MicaSense Image Processing Tutorial 1](https://github.com/micasense/imageprocessing/blob/master/MicaSense%20Image%20Processing%20Tutorial%201), accessed 8 April 2019.

Nex F, Remondino F (2014) UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics* 6, 1: 1-15; doi:10.1007/s12518-013-0120-x.

Papakonstantinou A, Topouzelis K, Pavlogeorgatos G (2016) Coastline Zones Identification and 3D Coastal Mapping Using UAV Spatial Data. *International Journal of Geo-Information* 5,75; doi:10.3390/ijgi5060075.

Richards JA, Xiuping J (2006) *Remote Sensing Digital Image Analysis: an introduction*. Fourth ed. Springer-Verlag, Berlin, pp 439.

Taddia Y, Corbau C, Zambello E, Pellegrinelli A (2019) UAVs for Structure-From-Motion Coastal Monitoring: A Case Study to Assess the Evolution of Embryo Dunes over a Two-Year Time Frame in the Po River Delta, Italy, *Sensors*, Vol. 19, No. 4:1717, doi:10.3390/s19071717.

von Bueren SK, Burkart A, Hueni A, Rascher U, Tuohy MP, Yule IJ (2015) Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations, *Biogeosciences*, 12, pp 163-175.

Wicaksono P, Kumara ISW, Kamal M, Fauzan MA, Zhafarina Z, Nurswantoro DA, Yogyantoro RN (2017) Multispectral Resampling of Seagrass Species Spectra: WorldView-2, Quickbird, Sentinel-2A, ASTER VNIR and Landsat 8 OLI. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 98 doi:10.1088/1755-1315/98/1/012039.

**ALLARGARE I CONFINI DELLE APPLICAZIONI GEOMATICHE:
UN SISTEMA INFORMATIVO TEMATICO (MITOLOGICO)
DI LE METAMORFOSI DI OVIDIO**

**ENLARGE THE BOUNDARIES OF GEOMATIC APPLICATIONS:
A THEMATIC (MYTHOLOGICAL) INFORMATION SYSTEM
OF THE METAMORPHOSIS OF OVID**

S. Ferrarelli ^a, L. Mussio^b

^a Istituto Comprensivo Statale Cuoco Sassi – Via Corridoni 34/36 – 20122 Milano Tel. 02-88440320 – Fax 02-88440328 –
serafina.ferrarelli@istruzione.it

^b Politecnico di Milano – DIIAR – Piazza Leonardo da Vinci, 32 – 20133 Milano Tel. 02-2399-6501 – Fax 02-2399-6602 –
luigi.mussio@polimi.it

PAROLE CHIAVE: Applicazioni Geomatiche, GIS, letteratura latina

KEY WORDS: Geomatics Applications, GIS, Latin Literature

RIASSUNTO

Il Sistema Informativo Tematico (Mitologico) di Le Metamorfosi di Ovidio è presentato, con l'intento di allargare i confini delle Applicazioni Geomatiche, riconoscendo come queste ultime operino fuori dai tradizionali contesti della Geomatica Applicata. D'altra parte, Le Metamorfosi di Ovidio contengono una lunghissima raccolta di miti, noti o meno, dell'antichità classica, greca e romana, e ben si prestano ad un'operazione di clusterizzazione, di elementi (cioè miti) omogenei, senza dimostrarla banale, ma suggerendo/invitando ad altri nuovi tentativi. Il lavoro si avvia presentando il poeta latino Ovidio, la sua opera e la sua modernità, e continua con la costruzione del suddetto Sistema Informativo Tematico (Mitologico), con l'elenco dei miti, contenuti nei 15 libri di Le Metamorfosi. A riguardo, dall'elenco numerato dei personaggi è possibile numerare tutti i nomi presenti nei dati originari, a loro volta, riorganizzati in base ad un'opportuna clusterizzazione, dalla figura di Giove, con le sue parentele, spesso frutto d'intemperanze, per tutta la storia greca e romana dalla creazione dell'uomo, fino alla tarda Repubblica romana di Giulio Cesare ed al primo Impero di Ottaviano Augusto cui contrapporre, per immortale grandezza, la figura dello stesso poeta Ovidio.

ABSTRACT

The Mythological/Thematic Information System of Ovid's Metamorphoses is shown, with the aim to enlarge the frame of Geomatics Applications, recognizing that these are outside the traditional contexts of Applied Geomatics. On the other hand, Ovid's Metamorphoses contain a long collection of myths of classical, Greek and Roman antiquity, and are very well apt to cluster homogeneous elements (i.e. myths), suggesting and hopefully inviting to different new approaches. The work starts presenting the Latin poet Ovid, his work and his modernity, and continues with the construction of the above mentioned Mythological /Thematic Information System, with the list of myths, contained in the 15 books of the Metamorphoses. Therefore, from the numbered list of people, it is possible to number all the names present in the original data, in turn, reorganized on the basis of an appropriate clustering, from the figure of Jupiter, with its relatives, often the result of intemperance, to all the Greek and Roman history from the creation of man, up to the late Roman Republic of Julius Caesar and the first Empire of Octavian Augustus to whom the figure of the same poet Ovid contrasted for immortal greatness.

1. INTRODUZIONE

Negli anni Ottanta del '900, il compianto prof. Mariano Cunietti scriveva autorevolmente, in alcune sue note informali, che la Topografia Generale (allora il nome Geomatica non era ancora in uso) sembrava finita, di fronte alla perfezione degli strumenti analogici, dagli anni '60 e '70 dello stesso secolo. Per contro, lo stesso rilevava il prorompere della Geomatica, grazie alla conquista dello spazio ed alla rivoluzione informatica, avvenute negli stessi decenni. In questo modo, i passaggi prima dall'analogico all'analitico e poi dall'analitico al digitale (nei decenni successivi) hanno imposto la Geomatica all'attenzione del mondo, facendo sì che la Geomatica Applicata diventasse patrimonio universale di una vasta gamma di utilizzatori.

Tutto questo è diventato maggiormente vero, in questo ultimo decennio, dove la miniaturizzazione di questi strumenti e talvolta la loro "unificazione" hanno reso gli stessi, così user-friendly, da metterli praticamente nelle mani di tutti. È vero il loro uso dovrebbe richiedere determinate precauzioni, ad esempio, precisioni pari a 10⁻⁵ / 10⁻⁶, nel posizionamento, ed a 10⁻⁴ / 10⁻⁵, nella rappresentazione, con livelli di affidabilità verso l'80% e comunque non inferiori al 60%. Tuttavia spesso il "bello" ha vantaggio sul "vero" e così, gli utenti comuni "fanno da soli", trascurando i rischi possibili e nemmeno preoccupandosi di segnalare le condizioni degradate cui sono incorsi.

Di conseguenza, la situazione presente potrebbe costituire la fine dei geomatici, nonostante la loro nobile storia, dall'Agrimensura (forse addirittura neolitica), all'Astronomia/geodesia (fondatesi nel mondo antico, insieme alla Geometria ed alla Filosofia), per

arrivare alla Topografia Generale (a partire dal Rinascimento e maggiormente nel Secolo d'oro e nell'Età dei lumi, insieme alla Matematica ed alla Fisica). Invece proprio la menzione dei rischi e delle conseguenze dovrebbe rendere i geomatici indispensabili e fondamentali, per tenere la Geomatica e la Geomatica Applicata “sulla retta via” ... ma, sempre nelle presenti condizioni, molto di più si offre proprio ai geomatici di oggi.

Infatti mentre è sempre necessario ricordare e raccomandare ai geomatici, la conoscenza di tutto il nucleo centrale della Geodesia, della Topografia Generale e della Geomatica (compreso ovviamente il Trattamento delle Osservazioni), la presenza degli stessi nel campo della Geomatica Applicata, al fine di presentare e sostenere prassi corrette, può estendersi a nuovi campi delle cosiddette Applicazioni Geomatiche¹. Del resto, queste ultime sono l'applicazione di tecniche proprie del rilevamento, trattamento e rappresentazione, in altri ambiti cui sono generalmente estranei (un bell'esempio autorevole è stato, negli anni Novanta del '900, il contributo della fotogrammetria alla mappatura del genoma²).

Infine arrivando più vicino al campo di questa Applicazione Geomatica, ovvero all'impiego di tecniche proprie del rilevamento, trattamento e rappresentazione in ambito delle Scienze umane, le statistiche sui personaggi e le loro caratteristiche del Decameron del Boccaccio (Bellone et al., 2014), nonché la mappa anamorfica dei paesi di questi personaggi e la matrice origine-destinazione dei loro viaggi sono altri esempi. In questo contesto, anche un lungo elenco di miti (quali quelli presenti in *Le Metamorfosi* di Ovidio) è un invito a provare a dare agli stessi la forma relazionale di una mappa cronologica, inizialmente mitologica e poi storica, così come le coordinate (od altri dati geografici) permettono di costruire una mappa.

Le Metamorfosi di Ovidio sono innanzitutto una lunghissima raccolta di miti dell'antichità classica, greca e romana, che spaziano dagli dei pre-olimpici, fino alla tarda Repubblica romana di Giulio Cesare ed al primo Impero di Ottaviano Augusto. In questo grandissimo spazio temporale, Ovidio narra di innumerevoli miti, alcuni molto noti e famosi, altri invece pressoché sconosciuti, con l'intento insieme di istruire e dissacrare, proponendo un amore libero e liberato, veti e paure, con intenti essenzialmente blasfemi. Infatti Ovidio vuole qui irridere soprattutto il potere ed una religione logora, asservita al potere, anticipando così la caduta in disuso di tutti gli dei pagani, tuttavia senza cercare alcun altro Dio.

La vastità della narrazione invita a leggere l'elenco dei miti, compresi nei quindici libri di *Le Metamorfosi*, ma suggerisce anche, andando oltre il semplice riassunto, di riorganizzare gli stessi miti, in un “GIS” (cioè in un Sistema Informativo Tematico/Mitologico), dove l'attenzione geografica è sostituita da un'altra attenzione. In tal modo, la comunanza dei personaggi principali, come pure alcune altre relazioni importanti, ed una supposta dipendenza temporale permettono la costruzione di un certo numero di raggruppamenti o clusterizzazioni, dei miti, in cluster omogenei, dove rapporti e/o legami di dipendenza e/o di colleganza raggruppano gli elementi, senza alcuna relazione funzionale, trattandosi oltretutto di cluster qualitativi.

¹ Un altro esempio, forse minore, è il contributo della Cartografia e Topografia, per una didattica innovativa nella scuola primaria, come le statistiche sui luoghi descritti nelle favole di Esopo e Fedro (Ferrarelli, Mussio, 2017a), e le mappe dei viaggi di Gulliver (Ferrarelli, Mussio, 2017b).

² Rizzi et al., 2001a; Rizzi et al., 2001b e Rizzi et al., 2002.

L'interesse in un questo lavoro, oltre ad un possibile contributo alla leggibilità di un testo lunghissimo della letteratura antica, certamente un classico della latinità (anche se qui il giudizio spetta solo ai latinisti e, più in generale, agli studiosi del mondo antico), è nel tentativo di allargare i confini delle Applicazioni Geomatiche. Infatti queste ultime vanno oltre la Geomatica Applicata, perché non sono il passaggio dalla definizione e lo studio delle tecniche della Geomatica alla loro applicazione concreta, nei vari casi ove siano richieste, ma sono invece applicazioni delle stesse tecniche, fuori dai tradizionali contesti³ (in questo specifico caso, un testo antico e la rete di relazioni, ivi descritta).

A riguardo, si noti, come nessuna relazione geografica sia presente, anche a prescindere dalla mancanza di coordinate – del resto, i LIS (cioè i Sistemi Informativi Territoriali) sono descritti da altri elementi geografici, in mancanza di coordinate – ma proprio la rete di relazioni presenti offre l'occasione per rileggere l'elenco dei miti, così da costituire una specie di mappa. In questo caso centrale è la figura di Giove, re dell'Olimpo, per le sue parentele, spesso frutto delle sue intemperanze, mentre poi la struttura prosegue con la storia greca e romana dalla creazione dell'uomo, fino alla tarda Repubblica romana di Giulio Cesare ed al primo Impero di Ottaviano Augusto cui contrapporre, per immortale grandezza, la figura dello stesso poeta Ovidio.

Le regole di clusterizzazione sono liberamente scelte dagli autori, ma certamente non in modo arbitrario, in quanto rifacendosi prima alle parentele divine e poi alla cronologia storica. Una diversa clusterizzazione, ad esempio, alfabetica (in italiano, in latino od in greco) assumerebbe la forma di un vocabolario, ma renderebbe inutile, in questo caso, la mappa tabellare. A tale, proposito, questo lavoro si ferma alla sua stesura, senza arrivare alla sua implementazione informatica. A riguardo, quest'ultima operazione, di sicuro interesse, potrebbe prendere in considerazione tutti i personaggi citati (e non solo quelli cui fanno capo i miti), ma la vastità del lavoro, si pone oltre gli scopi dell'esempio ed i suoi limiti.

2. LA MODERNITÀ DI UN ANTICO

Publio Ovidio Nasone⁴, poeta e scrittore dell'età augustea, si presenta forse come il più moderno dei classici antichi, perché capace di trattare del rapporto tra natura, arte e società, facendo pieno uso della libertà di invenzione, della resistenza al potere ed al conformismo, e del rispetto di ogni forma vivente. In questo contesto, il letterato, vero erudito ed insieme persona ricca di sentimenti, sa passare dal racconto mitologico e dalla fantasia antiquaria, al libero canto d'amore.

Fondamentale è lo stile ironico, critico ed erotico che Ovidio profonde nelle sue opere, per prendere in considerazioni dettagli piccolissimi, così come dimensioni grandissime, unitamente alle cose normali della vita comune e/o delle meraviglie della natura. In questo modo, pur essendo e restando un uomo della sua epoca, Ovidio è capace di suscitare pensieri, sensazioni ed immagini che sono proprie anche di tempi ben più prossimi ed addirittura contemporanei.

*Le Metamorfosi*⁵ che in 11.995 versi raccolgono e rielaborano più di 250 miti greci, sono state definite più volte un'enciclopedia

³ Del resto, un'attenzione allargata, a partire dall'ambito delle Scienze umane e ben aperta alla vastità della cultura, ad esempio, si trova in: Benjamin, 2010 e Pasolini, 1977.

⁴ Liberamente ripreso e riassunto da: Con Ovidio – La felicità di leggere un classico, di Nicola Gardini (Gardini, 2017) e, per una maggiore completezza, si veda anche: Gardini, 2018, come pure: Zamboni, 1976.

⁵ Integralmente ripreso da:

della mitologia classica. La narrazione copre un arco temporale che inizia con il Chaos: stato primordiale di esistenza da cui emersero gli dei, e che culmina con la morte di Gaio Giulio Cesare, la sua divinizzazione e l'impero di Ottaviano Augusto (Tab. 1). La fortuna delle Metamorfosi di Ovidio⁶, dopo una censura dovuta al passaggio dal mondo pagano al mondo cristiano, si ritrova in un primo gruppo di codici manoscritti frammentari, del IX secolo, e nel cosiddetto "gruppo di Lattanzio", fra l'XI ed il XIII secolo, tutti provenienti da un unico esemplare antico (andato perduto) ed un secondo gruppo, piuttosto vasto, composto da una massa di codici interpolati, fra l'XI ed il XII secolo, mancando così ancora la possibilità di una scelta univoca, per l'edizione unitaria dell'opera.

| LIBRO I | |
|--|---------|
| Mito | Versi |
| Caos primigenio – Origine del mondo | 5-75 |
| Prometeo crea l'uomo | 76-88 |
| LIBRI II – XIV | |
| ... | |
| LIBRO XV | |
| Mito | Versi |
| ... | ... |
| Apoteosi di Cesare | 729-842 |
| Glorificazione di Augusto | 843-870 |
| L'immortalità del poeta | 871-879 |

Tabella 1. Arco temporale della narrazione nelle Metamorfosi

Un breve cenno alla vita ed alle opere di Ovidio, ricorda l'origine abruzzese, di Sulmona, la lunga residenza a Roma ed il tragico esilio a Tomis (l'odierna Costanza), in Romania, sulle sponde del Mar Nero, accusato di immoralità e forse dell'inopportuna avvenuta conoscenza di qualche segreto. Le opere, tramandate ad oggi, in ordine cronologico, sono i poemi: Amori, L'arte dell'amore, Eroidi, Rimedi contro l'amore, Metamorfosi, Fasti e Tristia (quest'ultimo scritto dall'esilio, insieme a lettere e suppliche).

Con specifico riferimento all'esilio di Ovidio, in più punti, nelle sue opere e nelle Metamorfosi, in modo più ampio, centrale è la figura di Medea, nella mitologia greca, principessa e maga, che dapprima aiuta Giasone a rubare il vello d'oro (con l'impresa marinara degli argonauti), seguendolo poi nel ritorno in Grecia: ivi sposa e madre di due figli, e successivamente tuttavia, dopo il ripudio da parte di Giasone, per vendicarsi di costui, uccide i suoi due figli e la sua nuova giovane moglie.

In questo contesto, il mito e l'esilio bene si legano, fra loro, nella città costiera rumena, posta sul delta del Danubio (fiume senza uguali, in Europa), zona amplissima e tuttora piuttosto selvaggia (diventa patrimonio dell'umanità, proprio per questa ragione): allora di certo più di oggi, una località sperduta (prima scita e greca e poi romana e bizantina). Così ambienti miseri, completamente diversi dai fasti romani ed italici, così come dalla cultura ateniese e greca, fanno sentire tutto il peso dell'essere straniero, tra genti straniere.

[https://it.wikipedia.org/wiki/Le_metamorfosi_\(Ovidio\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Le_metamorfosi_(Ovidio)).

Un difficile confronto con l'oggi fa sentire tutto il peso, sicuramente sopportato da persone straniere, presso popoli (e nazioni), per loro stranieri. Senza arrivare a deprecare tesi assurde, quali le razze di uomini (per quanto spudoratamente circolanti e talvolta credute), occorre rilevare che tanto il monoculturalismo francese quanto la ghettizzazione inglese sono miseramente falliti, per cui quello che serve veramente è costruire un multiculturalismo, a partire dal meticcio dei popoli e dal loro politeismo culturale.

Notevole è poi il confronto, di paesaggi e panorami, fra la campagna di un'Italia, ferma all'Appennino ed alla Romagna del Riminese e la pianura della Romania (allora chiamata Dacia), per la differenza di clima, là caratterizzato da lunghi inverni, la diversità delle coltivazioni ed il prevalere, sempre là, della pastorizia sull'allevamento e soprattutto la miseria dell'agricoltura locale. Dopodiché i due mari, rispettivamente il Mar Mediterraneo ed il Mar Nero, sono abbastanza simili, soprattutto durante le estati.

Inoltre imponente è il Danubio, dalle Porte di Ferro, fino al delta; per contro, certamente minore è il Po (allora detto Eridano) che testimonia la tragica fine di Fetonte, figlio di Elio (dio del Sole), con le Eliadi, sue sorelle, trasformate in alberi fluviali. Infatti Fetonte, sottratto al padre il carro del sole, lo conduce malamente, fino a farlo derivare, della retta via, ed incendiare la volta celeste. Il precipitare, morto sulla terra, come un Icaro umano qualsiasi, anticipa così la caduta in disuso di tutti gli dei, senza cercare alcun altro Dio.

Ripartendo dall'inizio della vita di Ovidio, la sua famiglia d'origine è relativamente abbiente; appartenente alla classe dei cavalieri, è dedita alle professioni liberali ed alla politica. Il fratello maggiore di Ovidio, purtroppo morto prematuramente, era destinato al foro romano, ma Ovidio, in ciò ribelle, fin dalla gioventù, si oppone ai desideri paterni, preferendo la letteratura alla politica ed oltretutto la poesia alla prosa, perché come poi il Petrarca, secoli dopo, scrive per i posteri e non per l'imperatore di turno.

Il ribellismo continua poi anche nell'attività di poeta, non solo nella scelta dei temi, spesso erotici, anche per quanto riguarda le antichità ed i miti, ma pure nel rifiuto dei confronti stilistici: con Virgilio, per Ovidio, così come con Dante, per il Petrarca. Riferimenti lontani sono fatti, da Ovidio, nei confronti di alcuni poeti elegiaci: i più noti sono Tibullo e Propertio (di cui si sente libero erede). Inoltre la ribellione, contro Ottaviano Augusto, durante l'esilio, è evidente nelle aggiunte alle Metamorfosi ed ai Fasti.

Il riferimento ai temi ed ai versi erotici è fondamentale, in Ovidio, come in Catullo, prima di lui, ma un altro ascendente si ritrova in Lucrezio. A sua volta, questi è considerato, perverso e scellerato, da tutta la critica perbenista e bacchettona, non solo per l'erotismo amoroso, ma anche per la gioia amicale ed il gran piacere intellettuale, perché fra lettura e scrittura si scambiano sensazioni e sentimenti, come il connubio fra due cari teneri amanti.

Per contro, nel suo privato, è persona affabile, attenta ed amorosa, sposato tre volte: i primi due brevi, ma dal secondo ha una figlia che lo rende nonno, due volte; il terzo matrimonio sopravvive fedelissimo all'esilio, con una serie di lettere, e l'incoraggiamento alla figlia della terza moglie (a sua volta, avuta da un precedente matrimonio), a dedicarsi alla poesia, perché dona ricchezza, nonostante le ristrettezze, ed apre ad un mondo diverso, con un tempo e degli spazi propri, che solo i poeti possono abitare.

Significativo per illustrare la modernità di un antico, è la scelta di un quadro ed una litografia (Figg. 1 e 2) di Paul Klee, artista e

⁶ Liberamente ripreso dall'introduzione a Le Metamorfosi, di Ovidio (Ovidio (1997)).

violinista svizzero, esponente dell'astrattismo ed istanza morale del Bauhaus, nella definizione di Walter Gropius (fondatore/direttore della Scuola di architettura, arte e design, fra Weimar, Dessau e Berlino – anni '20 del '900). Entrambi condannati dal nazismo, come rappresentanti dell'arte degenerata e partecipi di un movimento culturale, più ampio, a favore della libertà, contro l'oscurantismo e per la pace.

A riguardo, evidenti sono le ragioni di tale scelta: *Distruzione e speranza* (1916), costituisce una denuncia ed un'esortazione, di fronte al dramma della prima guerra mondiale, da riprendere per tragedie maggiori delle successive età dei totalitarismi e seconda guerra mondiale, mentre *Città araba* (1922), esprime graficamente pensieri ed idee, dopo un viaggio in Tunisia (1914), con l'importantissimo riconoscimento della pluralità delle culture, della loro pari dignità e comunque della necessità del dovuto rispetto, per tutti.



Figura 1. Paul Klee, *Distruzione e speranza* (National Gallery of Art di Washington DC) (Original color lithograph)



Figura 2. Paul Klee, *Città araba* (National Gallery of Art di Washington DC) (Original color lithograph)

Una nota stilistica rilevante è poi presente nella figura di Corinna cui Ovidio si rivolge nelle sue opere. Infatti Corinna non è una delle mogli, né sua figlia o la figlia della sua terza moglie, a fortiori, ma la figura ideale di una donna-amante, quasi una musa ispiratrice, come Beatrice per Dante, Laura per il Petrarca (per quanto Laura sia realmente esistita; del resto, anche Beatrice è esistita, ma è morta ancora giovane), Fiammetta per Boccaccio, ecc., con la quale vivere in un mondo proprio.

Una caratteristica generale, delle opere di Ovidio, è la trasposizione dalla geografia dei luoghi civili e dalla natura politica delle istituzioni (già repubblicane e proprio allora divenute imperiali), ai luoghi destinati all'amore ed alla topografia dei corpi dei soggetti partecipanti agli amori. Tuttavia il passaggio dall'eroismo all'eroticismo, non ha lo scopo di scrivere un manuale, per un sesso libero e liberato, dai veti e dalle paure, ma ha qui essenzialmente intenti blasfemi, per irridere il potere ed una religione, asservita al potere.

Così il mito di Cerere va oltre la celebrazione della dea delle messi e la descrive invece come una donna, innamorata e libera, mentre il ratto di Proserpina, figlia di Cerere, da parte di Plutone, signore dell'Ade, non prende in considerazione tanto il dramma del rapimento, quanto piuttosto l'ignominia di uno stupro che bene svilisce la figura del dio, relegandolo al rango del malfattore. Del resto, in altri passi, anche la figura di Apollo è completamente smitizzata e posta su un piano di paragone identico a quello del poeta.

Anche Giove è degradato a ruoli umani e l'imperatore Ottaviano Augusto non è innalzato al rango divino, diversamente da altre produzioni letterarie latine. In questo modo, i miti di Leda ed il cigno, e di Europa ed il toro, entrambi personificazioni di Giove, non hanno nulla di nobile, con la nascita rispettivamente dei Dioscuri ed Elena di Troia, e di Minosse, ma si riducono ad un giochetto amoroso. Pertanto metamorfosi, versatilità e mimetismo sono addirittura l'occasione per sfatare la sacralità dei giuramenti.

Accanto a Giove ed altri, l'esempio principe è Proteo, dio marino cangiante. Tuttavia il rimarcare la denuncia, irriverente di religione e potere, è una caratteristica propria di Ovidio che va oltre l'epicureismo compassato di Lucrezio e lo scetticismo eclettico di Cicerone (che oltretutto scrive in prosa) e forse è la vera ragione della sua condanna. Infatti Lucrezio è solo un emarginato e l'assassinio di Cicerone, da parte dei sicari di Marco Antonio, è una vendetta politica, mentre nessun torto è fatto a Catullo, nobile ed appartato.

D'altra parte, Catullo è per il matrimonio, gioisce per un amore ricambiato ed invece per un amore tradito e l'abbandono, mentre Ovidio è per gli amori, anche omosessuali (forse dati i costumi dell'epoca addirittura per la pederastia), quasi un antesignano del tema di Don Giovanni, di Lorenzo Da Ponte e Wolfgang Amadeus Mozart. Alla fine, cancellata ogni memoria storica, scompaiono molte distinzioni, come quelle fra pubblico e privato, fra sacro e profano, e fra vita e morte.

Da queste considerazioni, si comprende come l'esilio, senza possibilità di ritorno, sia vissuto da Ovidio, con sentimenti simili all'attesa della morte. D'altronde, nonostante le Lettere dal Ponto, Ovidio non ottiene, per il tramite della moglie e dei suoi amici, alcuna clemenza da parte di Ottaviano Augusto e la sentenza non è revocata da Tiberio, suo nipote, succedutogli sul trono (del resto, questi non grazia anche il liberto Fedro che, consideratosi ingiustamente condannato, lo supplica per il tramite di altri potenti liberti).

L'argomentare di Ovidio, contro l'esilio imposto, prende in considerazione la sua colpa, ma colpisce anche il cardine del trionfo simbolico di Ottaviano Augusto, cioè l'Eneide di

Virgilio⁷. Infatti Ovidio ironizza sull'esito della contesa, per le armi di Achille, fra Ulisse ed Aiace, vinta con l'astuzia dal primo, ai danni della forza, del secondo, nonché su un certo trascorso concubino di Enea, troiano sì, ma anche padre leggendario dei romani, con Didone, regina di Cartagine, tenuto conto che sia Aiace, sia Didone moriranno suicidi.

Circa la colpa, per i comportamenti e componimenti, lascivi e licenziosi, e forse per qualcosa di sconveniente di cui ha notizia od addirittura preso parte, Ovidio non dice, ma accenna di continuo. A riguardo, la citazione del mito di Atteone, nobile allevato ed istruito dal centauro Chirone, da Diana, condannato e trasformato in cervo, avendola vista nuda, al bagno, con le compagne, in una battuta di caccia (del primo) è significativo (ed una conferma è data da un altro centauro, il bellissimo Cillaro, morto nobilmente in battaglia).

Circa infine la ragione degli scandali, di sicuro, Ovidio abbonda nelle sue storie, per contenuto e particolari, quale il corteggiamento di Fedra per il figliastro Ippolito (figlio solo di suo marito Teseo) che, di fronte al suo rifiuto, lo denuncia per una violenza non avvenuta, come pure l'incesto fra Mirra e Cinira (suo padre), con la trasformazione della prima, incinta del padre, in un albero, da cui nascerà il bellissimo Adone, al compimento del nono mese.

Ancora continuando a dare scandalo, Ovidio narra miti sconci, come un Apollo bramoso che insegue invano, come un cane una volpe (furbissima), la ninfa Dafne, anch'ella trasformata in un albero, oppure Filomena, senza lingua e pertanto muta, che riesce a raccontare alla sorella Procne la violenza subita da Tereo, marito di questa. Qui oltre alla denuncia, importante è anche l'enfasi della parola che va oltre la scrittura, con la penna e l'inchiostro, su carta, o con lo Stilo, sulle tavolette di cera⁸, pur di riuscire a comunicare.

D'altra parte, la comunicazione non è solo motivo di scandalo, ma è anche strumento di denuncia, come per Ovidio stesso, dall'esilio, senza ritorno, e poi nelle storie di Briseide, dove ogni lacrima è una parola, contro Achille che l'ha fatta sua schiava, avendole ucciso il marito Milete, e di Canace, contro Poseidone, dove ogni goccia di sangue è una parola, perché follemente innamorata del fratello Macareo e, per questa ragione, costretta dal padre Eolo al suicidio.

Parola negata sono invece i miti di Eco, ninfa ciarlieria, messa da Giove a distrarre Giunone, durante le sue scappatelle, e da questa punita togliendole la parola, tranne l'ultima sillaba, e di Biblide, principessa greca, innamorata di suo fratello Cauno, ma incapace di fargli comprendere il suo amore: lo insegue, fino a cadere sfinita, prorompendo in un pianto dirotto. Parola negata di Ovidio sono le inutili Lettere dal Ponto, alla cerchia di Ottaviano Augusto, come una poesia, nella lingua dei Geti, letta ed applaudita, solo in loco.

Accanto alla/e parola/e, anche le immagini e soprattutto i corpi che, insieme ed oltre alle/le parole, sono la materializzazione dell'amore, sono altrettanto centrali nella poesia di Ovidio. Ancora due miti intervengono in questa rappresentazione, come il re cipriota Pigmaliione che s'innamora di una bellissima statua

di Venere e la principessa greca Laodamia che, lasciata del marito Protesilao, membro della spedizione per la guerra di Troia, si fa fare una statua, copia perfetta, così da poterla abbracciare, a piacimento.

Bellissimo è poi il mito degli sposi Ceice ed Alcione, rispettivamente figli di Espero (dio della luce) e di Eolo (dio del vento), che dapprima puniti dagli dei invidiosi, per il loro grandissimo amore, con la morte di Ceice, in un naufragio. Tuttavia successivamente, poiché Alcione, avvertita di questa tragica fine, in sogno, da Iride e Morfeo, a sua volta, vuole annegarsi, per raggiungere il suo amore, gli stessi dei commossi li trasformano in due uccelli marini, affinché possano continuare a stare insieme.

Un'altra caratteristica importante, di Ovidio, è l'incertezza che vuole insegnare a conoscere ed accettare la variabilità del mondo delle cose e delle persone, al variare dei tempi e dei luoghi, delle condizioni e dei modi. È una grande lezione di libertà dei costumi sociali e del modo di pensare. È una bella lezione di libertà, per il suo tempo, ormai del tutto passato, ma soprattutto per ogni oggi e per il futuro a venire. È un'universale lezione di libertà, contro le pigrizie, le paure ed i pregiudizi, per poter vivere liberi.

Ovviamente non si deve leggere Ovidio come un antesignano della statistica moderna, come si svilupperà nel seicento, con la scienza nuova, definendo la probabilità, a partire dalla teoria dei giochi e/o dalla teoria degli errori, perché l'incertezza antica significa piuttosto ambiguità, come è mostrato dalle figure mitologiche di Ermafrodito, insieme uomo e donna, e dei centauri, mezzi uomini e mezzi cavalli. A riguardo, in latino, un gioco linguistico lega i verbi: plasmare, modellare e fingere (essendo *figulus* è il vasaio).

Metamorfosi è trasformazione⁹, ed una serie di miti servono da esempio, ad Ovidio: la ninfa Callista, non più vergine e colpevolmente incinta, è trasformata in orsa; Ociroe in cavalla, perché divulga, con imprudenza, i segreti del centauro Chirone, suo padre; Ciane in acqua, pensa la lotta con Ade (ed Anapo, suo innamorato in fiume, per restarle vicino); la fanciulla Aracne in ragno, per la vendetta di Atena, sconfitta in una sfida sulla qualità della tessitura; e la principessa Niobe in roccia, avendo sfidato Latona, sulla fertilità¹⁰.

Il divenire, di Eraclito, e la/e trasformazione/metamorfosi, di Pitagora, sono alla base della filosofia epicurea, di Ovidio, dove questa non è mai un sistema filosofico, come in Lucrezio, né una dottrina politica, come in Cicerone, ma è assunta, da Ovidio, come il *modus vivendi* relativo (lontanissimo dal teleologismo di Virgilio), alla stregua dei libertini del Rinascimento, nelle corti italiane del quattrocento. Allora il lunghissimo discorso di Pitagora¹¹, da *Le Metamorfosi* (per ragioni di brevità, qui solo accennato), illustra bene, a riguardo.

Qui viveva in volontario esilio, per odio verso la tirannide,¹² un uomo nativo di Samo, ma che era fuggito da quest'isola e dai suoi despoti. Costui si alzò con la mente sino agli dei, pur così remoti negli spazi celesti, e ciò che la natura nega alla vista umana, lo comprese con l'occhio dell'intelletto.

⁷ Prima dell'Eneide, poema celebrativo, Virgilio scrive le Bucoliche e le Georgiche, con intenti filosofici e didascalici, oltreché poetici.

⁸ Anche la cera è importante, come nei miti tragici delle ali di Icaro, caduto in mare, e del viso di Narciso, annegato in un lago/specchio.

⁹ Metamorfosi sono anche i cambi di sesso uomo-donna e/o viceversa, come per l'indovino Tiresia, il re Sitone, le principesse Mestra ed Ifide, e la divinità femminile fluviale Ceneo.

¹⁰ Per indegnità, è invece la punizione delle figlie del re Minia, trasformate in pipistrelli, avendo partecipato alle orge dei

baccanali, mentre tre ragazzini, con lo stesso nome (uno figlio di Nettuno, il secondo figlio di un re dei Liguri ed il terzo uno qualsiasi), sono trasformati in cigno, perché si bagnano nel laghetto dove si è bagnato (trasformandosi) Ermafrodito.

¹¹ Ovidio suppone che Numa Pompilio sia andato ad interrogare Pitagora, per capire come governare ed indirizzare, al meglio, i romani.

¹² Ovidio, *Le Metamorfosi*, libro XV, versi 60-278: <http://www.miti3000.it/mito/biblio/ovidio/metamorfosi/quindicesimo.htm>.

...
 Difendiamo e rispettiamo quei corpi che potrebbero ospitare
 l'anima di genitori e fratelli, di persone
 unite a noi da qualche vincolo, o in ogni caso d'esseri umani;
 ...

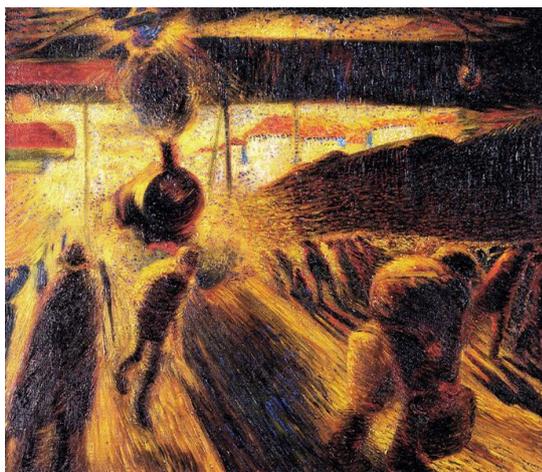


Figura 3. Carlo Carrà, La stazione di Milano
 (collezione privata)

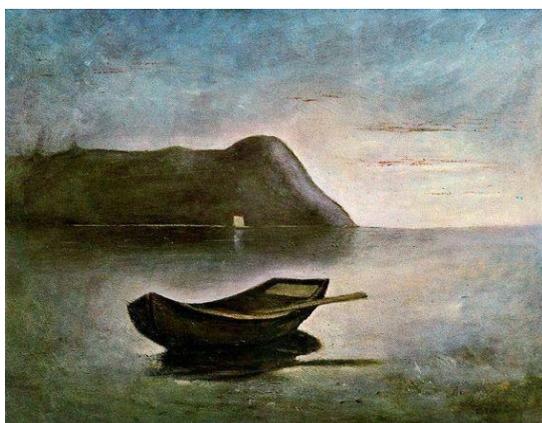


Figura 4. Carlo Carrà, Sera sul lago – Barca solitaria
 (collezione privata)



Figura 5. Luis Buñuel Portolés, Il fascino discreto
 della borghesia

Ancora segni dalla modernità, per illustrare la modernità di un
 antico. Pertanto fra due quadri (Figg. 3 e 4) di un pittore, prima
 divisionista e futurista e poi surrealista e naturalista, capace di
 alternare la rappresentazione del movimento con quello di una

stasi (preludio possibile anche di una tempesta di vento), una
 scena ripetuta, in un film (Fig. 5) di uno sceneggiatore e regista
 surrealista, mostra l'incertezza del futuro, l'ampiezza del
 possibile e le metamorfosi di un divenire, non teleologico, da
 affrontare, in libertà, senza pigri, paure e pregiudizi.

3. UN SISTEMA INFORMATIVO TEMATICO (MITOLOGICO)

Nel prosieguo, si forniscono le chiavi di lettura di una
 elaborazione dei miti, narrati in Le Metamorfosi di Ovidio, volta
 a costruire un particolare Sistema Informativo
 Tematico/Mitologico, a partire da quanto noto ed in uso per i
 Sistemi Informativi Geografici (nell'acronimo in inglese: GIS),
 ed insieme ad allargare i confini delle Applicazioni Geomatiche
 che si avvalorano di questo mezzo, tra altri in loro possesso. Di
 conseguenza, la prima lista contiene un elenco dei personaggi,
 qualche luogo e qualche altro elemento, affiancato ad una
 numerazione che segue l'ordine alfabetico di questo elenco.
 Invece la seconda tabella riporta questa numerazione,
 giustapposta all'elenco originale dei miti, narrati in Le
 Metamorfosi.

Un'interessante elaborazione (Caselli, 2005 e Togliatti, 1976)
 ripresenta la stessa tabella così riordinata, in modo da poter
 clusterizzare l'elenco dei miti presenti, in base alla comunanza
 dei personaggi principali, ovvero ad altre relazioni importanti ed
 una supposta dipendenza temporale. A riguardo, si precisa che
 clusterizzare significa formare insiemi omogenei fra loro in cui i
 rapporti e/o i legami di dipendenza e/o di colleganza raggruppano
 gli elementi del cluster, senza che altre qualsiasi relazioni
 funzionali debbano qui necessariamente valere, come avviene
 proprio in questo caso specifico, trattandosi oltretutto di cluster
 qualitativi, dove nessuna relazione funzionale interviene, tra i
 cluster e tra i loro elementi.

Data la relativa esiguità dei dati, tutte queste operazioni sono
 eseguite a mano, al più, facendo uso di un foglio elettronico (ad
 esempio, come Excel), ma in un contesto più ampio, avrebbero
 richiesto codici dedicati (o quantomeno delle macro apposite,
 come possibile anche nei fogli elettronici). Infatti messi tutti
 nomi in ordine alfabetico (Tab. 2), è necessario riportare gli stessi
 nella tabella dei dati originari (Tab. 3) e poi, avendo ricercato e
 costruito la più opportuna clusterizzazione (Tab. 4), "trasporre"
 le numerazioni, in modo che sia possibile risalire
 immediatamente dalla seconda tabella (elaborata) alla prima
 (originaria), evitando così lunghe ricerche.

| | |
|------|---------|
| 1. | Acete |
| 2. | Acheloo |
| ... | |
| 219. | Vulcano |
| 220. | Zete |

Tabella 2. Elenco numerato dei personaggi, di qualche luogo e di
 altri elementi, presenti nei miti di Le Metamorfosi

| | | | |
|------|-----|-----|-------------------------------------|
| 1. | 44 | 150 | Caos primigenio – Origine del mondo |
| 2. | 191 | 215 | Prometeo crea l'uomo |
| ... | | | |
| 181. | 55 | | Apoteosi di Cesare |
| 182. | 33 | | Glorificazione di Augusto |
| 183. | 164 | | L'immortalità del poeta |

Tabella 3. Tabella numerata dei personaggi, di qualche luogo e
 di altri elementi, presenti nei miti in Le Metamorfosi

| | | |
|------|-------------|---------------------------|
| 1. | (75) 197;57 | Saturno e Chirone |
| 2. | (21) 91;57 | Esculapio e Chirone |
| ... | | |
| 181. | (181) 55 | Apoteosi di Cesare |
| 182. | (182) 33 | Glorificazione di Augusto |
| 183. | (183) 164 | L'immortalità del poeta |

Tabella 4. Tabella clusterizzata dei personaggi, di qualche luogo ed altri elementi, presenti nei miti in *Le Metamorfosi*

Una lettura della clusterizzazione effettuata, a partire dai quindici libri di *Le Metamorfosi*, conta ben venticinque raggruppamenti (Tab. 5) che descrivono:

1. storie di dei, prima dell'Olimpo di Giove, come suo padre Saturno, nonché di mostri ed altri personaggi;
2. la creazione, ad opera di Prometeo, dell'universo, il mondo e l'uomo: "genesì", fin al diluvio universale;
3. l'Olimpo di Giove, con il suo regno e le sue intemperanze;
4. Giunone, moglie di Giove;
5. Minerva, figlia del solo Giove;
6. Marte e Venere, figli di Giove, mentre Vulcano è figlio della sola Giunone;
7. Mercurio figlio di Giove;
8. Apollo, figlio di Giove e le sue intemperanze¹³;
9. Diana, figlia di Giove;
10. Ercole figlio mortale di Giove, le sue fatiche, le sue gesta eroiche e la sua assunzione divina;
11. Perseo figlio mortale di Giove, le sue gesta eroiche e la sua assunzione nel firmamento del cielo;
12. Nettuno, fratello di Giove;
13. Cerere, sorella di Giove;
14. Bacco, figlio mortale di Giove, con la sua assunzione divina, avendo inventato il vino;
15. storie minoiche di Creta, con Minosse, figlio mortale di Giove, il Minotauro ed il labirinto;
16. storie della Grecia micenea, con l'impresa degli Argonauti;
17. storie tebane, dalla fondazione di Tebe, fin alle vicende di Edipo ed Antigone;
18. storie della Grecia micenea, prima della guerra di Troia;
19. la guerra di Troia;
20. l'Odissea di Ulisse,
21. Orfeo ed Euridice: la poesia ed il canto;
22. il viaggio in Italia di Enea;
23. l'Italia pre-romana;
24. Roma da Romolo, fino a Giulio Cesare ed Ottaviano Augusto, nonché la celebrazione di Ovidio;
25. alcuni comuni mortali, variamente insigni e ricordati, per questo.

Tabella 5. I venticinque raggruppamenti della rasterizzazione

A riguardo, si precisa, come ogni classificazione sia sempre arbitraria e, soprattutto con cluster qualitativi (come questi), possibili sovrapposizioni (omesse per semplicità) siano inevitabili.

¹³ Le intemperanze di Apollo, come forse maggiormente quelle di Giove, non sono certamente le uniche, narrate in *Le Metamorfosi*, ma occorre qui sottolineare, come le intemperanze di uomini di potere (o comunque in posizione dominante), rispetto a donne, di qualsiasi età o condizione sociale, di fatto, rese loro succubi, siamo particolarmente disdicevoli ed odiose, e come, già passati oltre duemila anni,

Interessante è invece riconoscere il filo conduttore della classificazione: con la famiglia, parecchio allargata, di Giove cui possono collegarsi, per parentela e figliazione, tutti gli dei, come pure i primi re ed eroi mortali, cretesi e greci, come Minosse ed Ercole; nonché con una storia, quasi lineare (e secondo una visione religiosa, ormai superata, addirittura provvidenziale) che origina a Creta e nella Grecia, più antica, per spostarsi, dopo la guerra di Troia, in Italia, arrivando alla fondazione di Roma ed alla Repubblica senatoriale ed oligarchica, fin alla fondazione dell'impero. A tutto ciò, si aggiunge, oltre ad alcune storie esemplari di personaggi umani, la celebrazione di Ovidio.

Proprio la celebrazione di Ovidio dà motivi per mostrare alcune classificazioni alternative, ugualmente valide. Infatti Ovidio, qui posto al termine della storia di Roma, come superiore a Giulio Cesare ed Ottaviano Augusto, perché poeta che scrive per i posteri (e non per l'imperatore di turno), potrebbe essere messo insieme ad Orfeo, perché punto d'arrivo di una poesia, nata allora e passata poi per Omero, Esiodo e tanti altri, fino ai suoi contemporanei latini (rispetto ai quali Ovidio si sente superiore, di gran lunga), oppure potrebbe essere uno dei comuni mortali, esemplari ed insigni, perché non asservito ad alcun potere, né succube di alcuna tradizione, ma ribelle e libero.

Il grafo tabellare (Tab. 6) è intricato e, di certo, potrebbe essere ulteriormente intricato, ricercando altre storie mitologiche, parentele lontane e fatterelli spiccioli. Tuttavia preferendo questo schema, principalmente per la facilità di lettura, si possono evidenziare alcuni anelli e linee di sviluppo. Un primo anello coinvolge le storie degli dei prima dell'Olimpo di Giove, con i tanti figli di Saturno (Giove compreso) ed il nipote Prometeo, creatore di tutti i mortali. Una seconda linea di sviluppo elenca alcuni dei molti figli di Giove, con le sue note intemperanze, ed un terzo anello collega Apollo (figlio di Giove), a sua volta, attraverso un'intemperanza, con la Creta minoica.

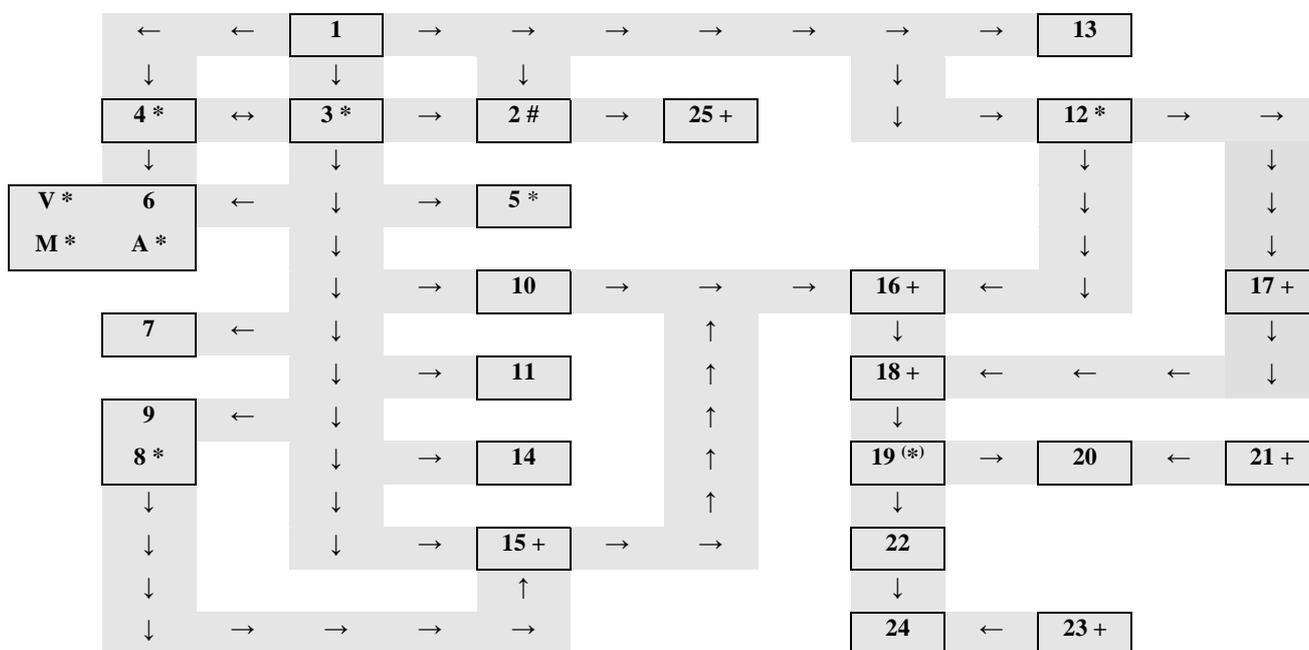
Dopodiché altri quattro anelli si chiudono, a partire dalla Creta minoica e dalla figura di Ercole, con l'impresa degli argonauti il cui capo spedizione (Giasone) ha invece legami trasversali con la discendenza di Nettuno, e con le storie tebane, a loro volta, ben collegate con la discendenza di Nettuno, tramite il fondatore di Tebe (Cadmò). Le successive linee di sviluppo si situano nella Grecia micenea, dove eventi famosi sono la guerra di Troia (con molti dei dell'Olimpo schierati sui due fronti), il viaggio di ritorno di Ulisse e la fuga da Troia di Enea, finché questi giunto in Italia, si inserisce in un diverso contesto che porta alla fondazione di Roma, fino alla dittatura di Giulio Cesare, all'impero di Ottaviano Augusto e soprattutto alla poesia di Ovidio¹⁴.



Figura 6. Camera di Ovidio – Fregio delle Metamorfosi (Palazzo Te, Mantova)

queste drammatiche, tristi condizioni e vicissitudini di sopraffazione e di violenza siano purtroppo, ancora tragicamente, molto attuali.

¹⁴ Un'ulteriore conferma dell'immortalità di Ovidio e dei miti da lui narrati in *Le Metamorfosi* è data dalla "riscoperta", in età rinascimentale, ad esempio, con il Fregio delle Metamorfosi, in Palazzo Te, a Mantova (Fig. 6).



Legenda:

#: Prometeo, creatore dei mortali
 +: mortali, creature di Prometeo

V: Vulcano (solo da Giunone)
 M: Marte (da Giove e Giunone)
 A: Afrodite (Venere, solo da Giove)

: Divinità partecipi alla guerra di Troia ()

Tabella 6. Grafo tabellare del Sistema Informativo Mitologico di Le Metamorfosi di Ovidio

4. CONCLUSIONE

Al termine di un lavoro, sperabilmente originale ed innovativo, è possibile trarre alcune considerazioni conclusive. In primo luogo, si riscontra l'estensione di metodologie e tecniche, proprie della Geomatica, nel campo delle Scienze Umane, così come altre estensioni possono essere rivolte in altri campi di interesse. A riguardo, questi campi sono talvolta ben acquisiti, come nei vari casi della Geomatica Applicata, mentre altre volte si presentano quali vere e proprie novità cui si dà il nome di Applicazioni Geomatiche. Ovviamente l'originalità e l'estensione delle innovazioni dipendono dai casi in esame, dal loro interesse "assoluto" e dalla loro contingenza temporale.

Nel contesto specifico delle Scienze Umane, come già detto in precedenza, sono noti altri esempi, affrontati nel passato recente, come le statistiche sui personaggi e le loro caratteristiche del Decameron del Boccaccio, e la mappa anamorfica dei paesi di questi personaggi, con la matrice origine-destinazione dei loro viaggi. Un altro esempio, forse minore, è stato poi il contributo della Cartografia e Topografia, per una didattica innovativa nella scuola primaria, come le statistiche sui luoghi descritti nelle favole di Esopo e Fedro, e le mappe dei viaggi di Gulliver. Del resto, gli esempi possono spaziare in altri campi lontani, come negli anni Novanta del '900, il contributo della fotogrammetria alla mappatura del genoma.

Proprio nel contesto specifico delle Scienze Umane, il presente lavoro prende in considerazione tutti i miti contenuti in Le Metamorfosi di Ovidio, un famoso poeta latino della classicità, ribelle e libero, partendo dall'elenco numerato dei loro personaggi, per arrivare a numerare tutti i nomi presenti nei dati originari, a loro volta, riorganizzati in base ad un'opportuna clusterizzazione. A riguardo, si noti, come nessuna relazione

geografica sia presente, anche a prescindere dalla mancanza di coordinate, ma proprio la rete di relazioni presenti offre l'occasione per rileggere l'elenco dei miti, così da costituire una specie di mappa tematico/mitologica.

Già nell'introduzione di questo lavoro, si è osservato che la miniaturizzazione degli strumenti geo-topografici, digitali e spesso automatici, e talvolta la loro "unificazione" hanno reso gli stessi, così user-friendly, da metterli praticamente nelle mani di tutti. Dopodiché poiché spesso il "bello" ha vantaggio sul "vero", gli utenti comuni "fanno da soli", trascurando i rischi possibili e nemmeno preoccupandosi di segnalare le condizioni degradate cui sono incorsi. Allora proprio la menzione dei rischi e delle conseguenze dovrebbe rendere i geomatici indispensabili e fondamentali, per tenere la Geomatica e la Geomatica Applicata "sulla retta via", tenendo conto che molto di più si offre ai geomatici di oggi.

Pertanto è sempre necessario che i geomatici abbiano la conoscenza di tutto il nucleo centrale della Geodesia, della Topografia Generale e della Geomatica (compreso ovviamente il Trattamento delle Osservazioni), "curiosando" tutti i diverticoli del complesso labirinto delle discipline del rilevamento e della rappresentazione, dal '700 e fin all'oggi.

In questo modo, la Geomatica Applicata, ora patrimonio di tutti, può ancora essere insegnata ed usata seguendo prassi geomaticamente corrette; così in aggiunta, un'ampia offerta di Applicazioni Geomatiche diffonde conoscenza, presenta metodologie e tecniche, e permette di affrontare/risolvere problemi di vario genere, evitando pericolosi bricolage.

BIBLIOGRAFIA

Bellone T., Mussio L., 2010, La nascita della scienza nel mondo antico occidentale. *Rivista dell'agenzia del Territorio*, anno X, n.1, 2010.

Bellone T., Mussio L., Porporato C., 2014, Il trattamento delle osservazioni di Il Decameron di Giovanni Boccaccio – nel 700° della sua nascita. *Newton's Bulletin, Il Prof. Sansò e lo sviluppo della geodesia in Italia*, Milano, p. VI/1-100.

Benjamin W., 2010, *Angelus Novus – Saggi e frammenti*. ET Saggi – Einaudi, Torino.

Caselli M., 2005, Indagare col questionario – Introduzione alla ricerca sociale di tipo standard. Vita e Pensiero, Milano.

Ferrarelli S., Mussio L., 2017a, La cartografia (e la topografia) dei viaggi di Gulliver. *Conferenza Nazionale dell'ASITA*, Salerno, p. 519-533.

Ferrarelli S., Mussio L., 2017b, Cenni di Geomatica nelle favole di Fedro (ed Esopo). *Conferenza Nazionale dell'ASITA*, Salerno, p. 535-562.

Gardini N., 2017, *Con Ovidio – La felicità di leggere un classico*. Garzanti, Milano.

Gardini N., 2018, *Le 10 parole latine – che raccontano il nostro mondo*. Garzanti / La Repubblica, Milano / Roma.

Ovidio, 1997, *Le Metamorfosi*. BUR/RCS, Milano, 1997.

Pasolini P.P., 1977, *Empirismo eretico*. Garzanti, Milano.

Rizzi R., Milanese L., Mussio L., 2001a, Un tool per la lettura delle immagini di espressione da microarray. *Atti della Conferenza La qualità nell'Informazione Geografica – 5° Conferenza Nazionale dell'ASITA*, vol. 2. Rimini.

Rizzi R., Milanese L., Mussio L., 2001b, Pre-processamento di dati di espressione da microarray. *Atti della Conferenza La qualità nell'Informazione Geografica - 5° Conferenza Nazionale dell'ASITA*, vol. 2. Rimini.

Rizzi R., Milanese L., Mussio L., 2002, L'integrazione di banche dati genomiche proteiche. *Atti della Conferenza Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale – 6° Conferenza Nazionale dell'ASITA*, vol. 2. Perugia.

Togliatti G., 1976, *Fondamenti di statistica*. Hoepli, Milano.

Zamboni A., 1976, *L'etimologia*. Zanichelli, Bologna.

APPENDICE: LASCITI DIRETTI DEL MONDO ANTICO

La modernità di un antico, studiata con metodi moderni, invita a riconoscere l'eredità scientifica (anche geodetica e “geomatica”, ante litteram¹⁵) proprio del mondo antico. Infatti parecchi sono i lasciti diretti di questo mondo che la scienza “nuova” riprende e sviluppa. Andandoli a citare, seguendo all'incirca l'ordine cronologico della scienza/filosofia antica, occorre innanzitutto fare riferimento ad Anassimandro, alla sua teoria sulla natura infinita e l'esistenza relativa delle cose, ed ai suoi studi astronomici, geografici, geologici e naturalistici sull'evoluzione dei mondi e sull'evoluzione della vita. Durante il Rinascimento, questi approcci sono ripresi da Leonardo e Fracastoro¹⁶.

La seconda scuola ionica (successiva alla prima fondata da Talete e, oltre al sopraccitato Anassimandro, continuata poi da Anassimene) ha, in Eraclito, il suo esponente principale. Il fuoco di Eraclito (contrapposto all'acqua di Talete ed all'aria di Anassimene) è l'elemento primordiale, perché fonte di vita, ma anche potenza distruttrice e causa del divenire¹⁷. La scuola pitagorica (da Pitagora, suo fondatore, a Filolao, un insigne esponente della stessa scuola) considera numeri le cose, collega l'aritmetica di questi alla geometria, all'astronomia ed alla musica, e si pone l'obiettivo di trasformare le qualità più semplici in quantità, cioè numeri, considerati monadi¹⁸.

Successivamente la scuola eleatica concepisce la materia primitiva come uno spazio pieno (o materia estesa): un concetto ripreso da Cartesio. La stessa scuola cerca di superare validamente, tramite una serie di paradossi, la mancanza della conoscenza dell'infinito matematico (e dello zero). Parmenide, il fondatore della scuola, in modo quasi assurdo, nega la possibilità del moto, mentre successivamente Zenone d'Elea attribuisce al moto solo un senso relativo, aprendo a concetti di relatività, tuttora attuali¹⁹. Una prima risposta pluralista è data al monismo (della scuola eleatica) da Empedocle che elenca quattro elementi e due forze, cosicché i corpi pesanti cadono verso il basso e quelli leggeri salgono verso l'alto²⁰.

Una seconda risposta è data dalla dottrina atomistica. Democrito²¹, il maggiore esponente di questa scuola, concepisce materia ed energia come composte da atomi piccolissimi (più piccoli quelli dell'energia). Questa teoria influenza notevolmente Platone, arriva al razionalismo sperimentale di Galileo ed all'empirismo inglese di Locke e, da qui, alla termodinamica di Lord Kelvin ed all'elettromagnetismo di Maxwell. Una terza risposta è data dalla critica empirista della conoscenza dei sofisti (principalmente

¹⁵ Bellone et al., 2010.

¹⁶ L'italiano Girolamo Fracastoro, amico di Copernico, è un medico, ma anche astronomo, geografo, filosofo, teologo e letterato.

¹⁷ Questo aspetto del pensiero di Eraclito è ripreso da Goethe e dalla filosofia romantica tedesca.

¹⁸ Questo modo di procedere “pitagorico” è alla base della fisica matematica ed è ripreso da Leibniz. Nella scuola pitagorica, un legame non secondario è stabilito anche tra razionalismo e misticismo.

¹⁹ L'interazione tra il pitagorismo di Filolao e l'eleatismo di Zenone d'Elea porta alla formulazione dell'ipotesi eliocentrica, da parte di Aristarco di Samo. Questa ipotesi, nel mondo antico, sostenuta solo da Archimede (contro la teoria geocentrica o tolemaica, allora maggioritaria), dopo Copernico, Galileo, Keplero e Newton, diventa la teoria eliocentrica o copernicana.

²⁰ I quattro elementi sono: terra, acqua, aria e fuoco, e le due forze: amore ed odio. La gravità ed il galleggiamento od il volo sono le spiegazioni meccaniche, idrodinamiche ed aerodinamiche della fisica moderna. Dopodiché Anassagora descrive un moto rotatorio di un'unità primordiale, capace di generare tutta la realtà nella sua varietà. Una spiegazione simile è proposta nella gravitazione di Huygens la cui teoria della gravitazione è poi superata da quella universale di Newton.

²¹ Democrito studia musica, astronomia, geografia, biologia e medicina, e si occupa anche di analisi infinitesimale, ante litteram, formulando una teoria cinetica del mondo, in base alla quale gli atomi si muovono, a velocità diverse, di moto rettilineo uniforme, secondo la legge galileiana d'inerzia (cioè senza bisogno di alcuna forza) e deviano dalla loro direzione di moto solo in seguito ad urti.

Protagora e Gorgia), contro un'astratta natura delle cose, perché tutto è relativo e la scienza stessa è una sensazione dell'uomo senziente²², cui segue la Grecia classica di Socrate²³, Platone ed Aristotele²⁴.

Platone, dopo i dialoghi socratici, si affida alla logica del razionalismo matematico, con i dialoghi successivi²⁵. In questi dialoghi, Platone sviluppa argomenti vari dal valore delle relazioni sociali alla politica degli stati, come pure dalla filosofia della natura al lato estetico e poetico della matematica. Pur confutando l'empirismo democriteo, Platone supera l'antico contrasto essere/divenire, proponendo una concezione del tempo ed un'estensione della geometria che dà vita alla meccanica. Platone contribuisce a dare un posto d'eccellenza alla matematica, composta dall'aritmetica e dalla geometria, e collocata accanto alla musica ed all'astronomia, formando quella unità disciplinare che, nel medioevo, è detta quadrivio²⁶.

Aristotele fonda il liceo e la biblioteca, dove avvia anche studi di storia naturale, biologia e medicina. In questo ambito, è redatto anche il trattato sull'anima. Il liceo, altrimenti detto peripato, per l'uso frequente della deambulazione nell'insegnamento, poco dopo la scomparsa di Aristotele, si sdoppia tra Atene ed Alessandria differenziandosi. Liceo, museo (una fondazione originale alessandrina) e biblioteca operano fino all'alto-medioevo, e contribuiscono alla rinascita europea. L'insieme vasto dei libri di Aristotele (seppure incompleto, rispetto alle testimonianze antiche) comprende, tra l'altro, la Metafisica, le Fisiche, l'Estetica (composta dalla Retorica e dalla Poetica), le Etiche e la Politica.

Aristotele compie una sintesi tra il razionalismo astratto di Platone e l'empirismo concreto di Democrito. Tuttavia la sua sintesi è solo descrittiva, classificatoria, logica e dialettica²⁷, mentre evita di addentrarsi nei problemi tipici della fisica matematica. L'ulteriore passo, capace di comprendere bene anche i problemi della fisica matematica, è computo solo da Galileo (un aristotelico averroista, in feroce contrasto con gli

accademici²⁸ patavini, aristotelici tardo-scolastici). Un'identica classificazione (fatta di definizioni, supposizioni d'esistenza, assiomi e postulati) è adottata negli Elementi di Euclide; tuttavia la scienza moderna si discosta notevolmente da questo modo di procedere.

L'eredità culturale di Euclide travalica enormemente il mondo antico (ellenistico e poi romano) e supera anche il medioevo (arabo e poi europeo), per dominare anche il Rinascimento, l'età moderna e quella contemporanea. Infatti il testo degli Elementi è tramandato grazie alla prima ricostruzione che ne fa Teone di Alessandria, circa 700 anni dopo Euclide, e alle traduzioni arabe (ad esempio, quelle di Alhazen, ossia Ibn al-Haytham, nato nel 965). Intorno al 1120, una copia del testo arabo (od una copia di una copia) è tradotta in latino da Adelardo di Bath. Nel 1270, la traduzione di Adelardo è riveduta, anche alla luce di altre fonti arabe (derivate da altre versioni greche del manoscritto di Teone) da Campano di Novara²⁹.

Rilevanti sono poi gli sviluppi delle matematiche, anche per l'astronomia e la medicina. Tra i matematici³⁰ meritano menzione: Ippocrate di Chio con la duplicazione del cubo, Euclide con gli Elementi (della geometria), Apollonio di Perga con lo studio delle coniche (ellisse, parabola ed iperbole), Archimede con rapporto tra la circonferenza ed il diametro, il calcolo del volume e della superficie della sfera, ed il principio d'Archimede³¹. Erone e, più tardi, Pappo e Diofanto continuano la tradizione matematica. In astronomia, Filolao ed Eudosso di Cnido formulano la prima teoria geocentrica e le correzioni necessarie alle orbite, apportate dalle sfere omocentriche³².

Una teoria fisica più complessa è formulata da Eraclide Pontico d'Eraclea che descrive le orbite di Mercurio, Venere e Marte, attorno al sole, a sua volta, in orbita attorno alla terra. In particolare, l'orbita di Marte chiede anche la definizione di un eccentrico, deferenti ed un epiciclo³³. Una teoria fisica più

²² Prescindendo dalla polemica platonico-aristotelica contro di essi, i sofisti sono maestri e filosofi, attivi nella Grecia democratica, e legati alla diffusione borghese dei mestieri, come gli illuministi francesi, ma soprattutto gli empiristi ed i positivisti inglesi (da Berkeley, attraverso Hume, fino a Stuart Mill).

²³ L'opposizione di Socrate ai sofisti consiste nel loro scavalcamento, dovuto alle origini popolane, all'attività artigianale ed alla maggiore libertà di pensiero che lo porta all'accusa d'empietà ed alla condanna a morte. Un allievo di Socrate, Diogene di Sinope (detto il cinico) porta alle estreme conseguenze le aspirazioni egualitarie della filosofia socratica, con una predicazione comunista.

²⁴ La Grecia democratica succede a quella aristocratica, dopo la conclusione vittoriosa delle guerre persiane, ma la sua vittoria è controversa. Pertanto i grandi filosofi della Grecia classica si pongono su diversi versanti: Socrate con la Grecia democratica, Platone invece con quella aristocratica ed Aristotele nuovamente con la Grecia democratica, seppure al servizio della corte macedone che sovrappone, alla sovranità delle città stato (relativamente autonome), l'autorità superiore di un regno, divenuto poi un impero.

²⁵ Il Fedro, il Convivio, la Repubblica, le Leggi ed il Timeo sono i più importanti tra questi dialoghi.

²⁶ Lasciti diretti platonici, prescindendo dalla patristica (coeva all'ultima fase dell'accademia che esercita la sua opera per nove secoli, fin quando Giustiniano la chiude, perché incompatibile con l'ortodossia cristiana, ma estranea ai problemi scientifici, propri di questa), si ritrovano nella grande apertura culturale del neoplatonismo rinascimentale, fino a Leibniz (all'inizio del '700).

²⁷ La logica aristotelica parte dalle distinzioni forma-materia ed atto-potenza, e sviluppa il sillogismo, come metodo di scomposizione a problemi semplici, fissando i suoi elementi base: definizioni (ovvero termini dei problemi logici), supposizioni d'esistenza, assiomi (cioè preposizioni immediate) e postulati (cioè ipotesi in base alle quali dimostrare tesi contenute nelle supposizioni, ovvero i teoremi).

²⁸ Dall'epoca medioevale in poi, accademico è sinonimo di universitario e non ha necessariamente un legame con la lunga tradizione platonica e neoplatonica.

²⁹ Questa ultima versione (od una copia di una copia) è stampata a Venezia nel 1482, circa 1.800 anni dopo. A partire da quell'epoca, è interessante rilevare un primo distacco dalla logica aristotelica/ euclidea è dato dalla formulazione del metodo sperimentale galileiano ed un secondo distacco dal teorema di indecidibilità godeliano (ormai in pieno '900).

³⁰ L'aritmetica nasce in Mesopotamia, per regolare la produzione agricolo/pastorale ed i commerci, mentre la geometria e l'astronomia nascono in Egitto, per la determinazione delle piene del Nilo ed il ri-accastamento delle terre sommerse. Tuttavia solo in Grecia, queste discipline assurgono al ruolo di scienze matematiche e di matematiche applicate.

³¹ Il principio d'Archimede va oltre la geometria e fonda l'idrostatica (insieme alla statica, una branca della fisica).

³² Aristotele trasforma questa teoria fisica, in una teoria cosmologica, dotandola di un motore esterno: il primo mobile.

³³ Nel '500, una configurazione simile è proposta da Tycho Brahe.

semplice (eliocentrica ³⁴) è formulata da Aristarco di Samo e sostenuta da Archimede. Tuttavia osservazioni discordanti, con le orbite circolari ³⁵, fanno presto cadere questa teoria. La seconda teoria geocentrica (successivamente detta tolemaica) è formulata da Ipparco e Claudio Tolomeo ³⁶ che scrive l'Almagesto ed introduce l'equante, come un nuovo termine correttivo delle orbite ³⁷.

In stretto parallelo all'astronomia, la geodesia e la geografia matematica si occupano della misura del raggio terrestre (avendo supposto sferica la terra ³⁸). Una misura veramente precisa è di Eratostene (di Cirene, bibliotecario ad Alessandria), ma quella adottata è di Strabone che porta alla determinazione di una terra più piccola ³⁹. Anche la medicina greca è in un rapporto strettissimo con la matematica e, in particolare, con la geometria ⁴⁰. Medici illustri sono: il pitagorico Alcmeone (di Crotona), il pluralista (alla maniera di Empedocle) Ippocrate di Coa, i razionalisti aristotelici alessandrini Erofilo ed Erasistrato, e più tardi l'enciclopedista aristotelico Galeno (di Pergamo).

La conquista macedone della Grecia e poi la vittoria dell'impero macedone sull'impero persiano ⁴¹ cambiano la geografia della cultura greca e fanno nascere il mondo ellenistico, dove l'incontro con la Persia, la Mesopotamia e l'Egitto apporta contributi ben diversi da quelli trovati nelle colonie greche dell'Asia minore (mentre scarsi contributi locali originano dalle colonie greche della Sicilia e della Magna Grecia) o dai viaggi in Egitto dei mercanti greci. La filosofia ellenistica si sviluppa per scuole parallele che, a fianco dell'accademia, del peripato e delle correnti ciniche, presentano la scuola epicurea (fondata da Epicuro) e la scuola stoica (istituita da Zenone di Cizio e continuata da Cleante e Crisippo).

Democrito ed Eraclito sono considerati gli antesignani rispettivamente degli epicurei e degli stoici. Come i cinici, non sono una scuola gli scettici (a volte, raccolti informalmente in una nuova accademia), come Sesto Empirico e Carneade (che rilevando il regresso all'infinito delle dimostrazioni filosofiche, introduce il concetto di valore probabile delle conoscenze, in particolare, scientifiche, con un approccio caratteristico della scienza statistica moderna, a partire da Fermat e Pascal). Epicuro apprezza il valore della scienza e fa uso della mentalità scientifica, ma attenua il razionalismo rigoroso di Democrito, a vantaggio dell'empirismo e cedendo ad alcune discutibili concezioni aristoteliche ⁴².

³⁴ Tra il '500 e la prima metà del '600, la teoria eliocentrica (chiamata poi copernicana) è proposta da Copernico e sostenuta da Galileo.

³⁵ Le orbite ellittiche sono proposte, solo all'inizio del '600, da Keplero che le sperimenta empiricamente, avendo adottato le stesse (per brevità di calcolo) solo come un'approssimazione di una successione di circonferenze

³⁶ Ipparco ipotizza l'esistenza di un continente (esteso come l'intera America), per spiegare il diverso comportamento della marea rispettivamente negli Oceani Atlantico ed Indiano. Claudio Tolomeo, dopo Erodoto (ed in modo più completo), disegna la mappa dell'ecumene allora conosciuto, in Occidente.

³⁷ Questa teoria è la base per tutte le osservazioni astronomiche tardo-antiche e medioevali.

³⁸ L'abbandono dell'ipotesi di una terra piatta è molto antica e si fonda sull'osservazione degli astri e su problemi di navigazione (del resto, già Omero descrive l'ornamento dello scudo di Achille, fatto da Vulcano, circondato dalle acque di Oceano).

³⁹ Una terra più piccola è anche alla base del primo viaggio di Cristoforo Colombo, per raggiungere l'Estremo Oriente, via occidente.

Dopo i geometri dell'antichità, sulla scorta della geometria euclidea (della tarda antichità e dell'alto medioevo: tra Bisanzio, la Persia, il mondo arabo e la Spagna moresca), nel basso medioevo ed il primo Rinascimento, le leggi della prospettiva sono scoperte da Filippo Brunelleschi, Leon Battista Alberti e Leonardo da Vinci (e, pressoché nello stesso periodo, Tommaso di Ser Giovanni di Mone Cassai – detto Masaccio, Piero della Francesca, Andrea Mantegna, Marco di Giuliano degli Ambrogi – detto Melozzo da Forlì e Donato di Angelo di Pascuccio – detto il Bramante concorrono alle prime applicazioni ed alla successiva diffusione della prospettiva ⁴³).

L'apporto scientifico della geometria euclidea è ancora notevole nel '700 (l'età dei lumi) e nell'800 (il secolo della prima rivoluzione industriale), dove prima Giovanni Girolamo Saccheri e Adrien-Marie Legendre, e poi Carl Friedrich Gauss, Nikolaj Ivanovič Lobačevskij e Georg Friedrich Bernhard Riemann, mettendo in dubbio la validità del quinto postulato (dove una delle sue più semplici formulazioni afferma che, per un punto, passa una ed una sola parallela ad una retta data cui il punto non appartiene), aprono la strada e fondano le geometrie non euclidee. Il dibattito sulle geometrie non euclidee (ellittiche che non ammettono alcuna parallela, oppure iperboliche che ammettono infinite parallele) è subito vivace e fecondo ⁴⁴ (oggi giorno poi alcuni effetti relativistici sono presi in considerazione dall'astronomia e dalla geodesia spaziale).

⁴⁰ I primi medici sono anche filosofi, più tardi la medicina assume il rango di scienza a sé stante, sempre comunque collegata alla matematica.

⁴¹ L'impero si dissolve rapidamente, dopo la scomparsa di Alessandro Magno, ma il mondo ellenistico gli sopravvive a lungo.

⁴² La concezione morale di Epicuro è utilitaristica, per la sopravvivenza dei più adatti (ovvero per il saggio), e richiede chiarezza e sincerità interiore. Ad essa possono richiamarsi materialisti e positivisti moderni, cosicché la sopravvivenza dei più adatti, nell'evoluzione della vita, collega quasi direttamente Epicuro e Darwin.

⁴³ Nel '600 (il Secolo d'oro francese), la geometria analitica è fondata da René Descartes (cioè da Cartesio) e la geometria proiettiva da Girard Desargues (a riguardo, lo studio della geometria analitica è certamente preliminare a quello della topografia, in particolare, nello spazio 3D, e della fotogrammetria, mentre quello della geometria proiettiva è preliminare a quello dell'informatica grafica e della modellazione solida).

⁴⁴ Eugenio Beltrami, Henri Poincaré e David Hilbert studiano alcune proprietà di queste geometrie ed un'applicazione notevole è data dalla teoria della relatività generale di Albert Einstein.

POTENZIALITÀ E PROBLEMATICHE NELL'UTILIZZO DELLA FOTOGRAMMETRIA SUBACQUEA PER LA MISURA DELL'ACCRESIMENTO DI COLONIE CORALLIGENE

EVALUATION OF UNDERWATER PHOTOGRAMMETRY' PERFORMANCES IN THE ASSESSMENT OF CORAL REEF 3D CHANGES

Rossi P.^(a), Castagnetti C.^(a), Capra A.^(a), Brooks A.J.^(b), Mancini F.^(a)

^a Dip. di Ingegneria "Enzo Ferrari", Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, via Pietro Vivarelli 10, 41125 Modena, Italia- (paolo.rossi, cristina.castagnetti, alessandro.capra, francesco.mancini)@unimore.it

^b Marine Science Institute, University of California, Santa Barbara. Santa Barbara, California 93106-6150, USA- andy.brooks@ucsb.edu

PAROLE CHIAVE: Fotogrammetria subacquea, accrescimento di strutture coralligene, change detection, valutazione delle accuratezze, misurazioni subacquee, compensazione delle misure

KEY WORDS: Underwater photogrammetry, coral growth detection, accuracy assessment, underwater measuring, network adjustment

Questo articolo è il sunto tradotto in italiano della versione sottomessa allo Special Issue "The Impact of Innovative and Emerging Technologies on the Surveying Activities" della rivista APPLIED GEOMATICS collegato al convegno SIFET 2018.

RIASSUNTO

La sperimentazione eseguita ha come obiettivo la messa a punto e verifica di una metodologia idonea alla misura dei livelli di accrescimento di complesse strutture coralline situate nell'Isola di Moorea (Polinesia Francese) attraverso rilievi fotogrammetrici subacquei ripetuti nel tempo. In considerazione del tasso di accrescimento prevedibile per tali organismi, dell'ordine di 10-15 mm/anno, il metodo proposto si basa su idonee procedure in grado di garantire tali livelli di accuratezza nella rappresentazione tridimensionale dell'oggetto di interesse. L'approccio seguito è quello fotogrammetrico basato sugli algoritmi di Structure from Motion e sull'installazione di reti topografiche di appoggio sul fondale, i cui vertici costituiscono i punti di controllo per le successive elaborazioni. La ricostruzione degli ammassi coralligeni a partire da immagini subacquee acquisite in immersione consente di quantificare le principali caratteristiche ecologiche e la complessità strutturale dell'ambiente di barriera. A tal fine, il lavoro presenta gli strumenti progettati e utilizzati per la misurazione dei punti della rete di controllo, i risultati della compensazione di osservazioni di distanza e dislivelli che ha portato a livelli medi di precisione di 1.2 mm e 2.9 mm rispettivamente nella componente orizzontale e verticale. Le accuratezze finali delle ricostruzioni fotogrammetriche sono nell'ordine di 1 centimetro e pochi millimetri rispettivamente per le due campagne di monitoraggio riportate (2017 e 2018); questo si traduce in una significatività del confronto multi-temporale di circa 1 cm. Le variazioni identificate possono essere ragionevolmente interpretate come crescita o dissoluzione del corallo, se superiori a questa grandezza. Il confronto diretto tra le due nuvole di punti successive è risultato efficace nella valutazione dei principali trend di crescita e nelle analisi morfometriche. Inoltre, il metodo proposto si rivela utile nelle valutazioni quantitative di fenomeni a livello locale condotte da operatori esperti attraverso una opportuna gestione dei modelli fotogrammetrici e dei prodotti bidimensionali ottenuti dal loro confronto.

ABSTRACT

This paper presents a multi-temporal underwater photogrammetric survey of a reef patch located in Moorea Island (French Polynesia) to detect a coral growth at a required level of accuracy of 10-15 mm\years. An approach based on processing of underwater imagery by the well-known Structure from Motion method and ground control points derived from the adjustment of underwater topographic measurements allowed the three-dimensional quantification of ecological characteristic at patch scale and an assessment of the reef growth and its structural complexity. To guarantee the repeatability of surveys over time at required level of accuracy and spatial resolution, the paper introduces issues related to reference frame, network adjustment and design of photogrammetric surveying. Measuring tools and reference points were properly designed and presented by the authors. The network adjustment performed after measuring distances and height differences, provided an average precision of 1.2 mm and 2.9 mm in the horizontal and vertical component respectively. The final positional precision of photogrammetric reconstructions was in the order of 1 centimeter and few millimeters for 2017 and 2018 monitoring campaigns respectively. Then, the accuracy of the comparison resulted of about 1 cm which represents a factor to be considered in the successive interpretations of coral growth or dissolution phenomena. The direct comparison of the two subsequent point clouds is effective in the evaluation of growth rates and in the successive morphometric analyses. For highly accurate quantitative assessment of local changes, an expert operator can create and analyze specific 2D profiles that easily come from the point clouds.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, numerosi autori hanno documentato il declino delle barriere coralline a livello globale (Bellwood e al., 2004; Gardner e al., 2003; Pennisi e al., 2002) in risposta a fattori antropici che operano sia a livello locale che globale. A scala locale intervengono alcune pratiche utilizzate nella pesca, lo sviluppo delle zone costiere e fenomeni di inquinamento (Mora, 2008); anche i mutamenti climatici e l'acidificazione degli oceani possono contribuire al declino dell'ecosistema delle barriere coralline a scala globale (Barker e al., 2008). Questa tendenza è documentata grazie a varie metodologie d'indagine che spaziano dal telerilevamento satellitare e aereo alle osservazioni ottenute da sensori sottomarini equipaggiati con sistemi ottici, acustici e LIDAR (Kocak and Caimi, 2005; Johnson-Roberson e al., 2010). A tali metodologie si aggiungono le operazioni "in situ" basate sulla fotogrammetria subacquea (Burns e al., 2015; Royer e al., 2018). Le metodologie citate hanno consentito la descrizione dell'habitat di barriera corallina a varia scala e con diversi livelli di accuratezza e definizione spaziale. I metodi satellitari hanno permesso di indagare vaste aree di barriera corallina mentre il rilievo condotto da imbarcazione è risultato spesso complesso nelle condizioni operative riscontrate in acque prossime alle barriere coralline. Al contrario, le operazioni eseguite sul campo da subacquei esperti con fotocamere amatoriali hanno permesso la ricostruzione 3D dell'ecosistema della barriera, aprendo le porte a rilievi accurati e dettagliati per il monitoraggio della crescita delle formazioni coralline e nella valutazione della loro complessità strutturale (Bryson e al., 2017).

Gli studi convenzionali sulle barriere coralline si basano su analisi di tipo planare e bidimensionale, e risultano inadeguati alla descrizione quantitativa dei parametri che si basano su caratteristiche 3D, come ad esempio la rugosità, la forma e il tasso di crescita. Tuttavia, la difficoltà nel generare prodotti 3D alla scala spaziale desiderata ha limitato, nell'ambito ecologico subacqueo, questo tipo di studi. Ad oggi, infatti, solo poche sperimentazioni sono state eseguite con i livelli di accuratezza metrica richiesti per la valutazione nella stima dei tassi di accrescimento e nella valutazione della complessità strutturale dell'habitat di barriera corallina.

Negli ultimi anni, grazie all'utilizzo della fotogrammetria basata sugli algoritmi di Structure from Motion (SfM), le immagini acquisite da UUV (Unmanned Underwater Vehicles) e da operatori subacquei possono essere utilizzate nella ricostruzione di caratteristiche morfologiche, siti archeologici e comunità bentoniche con una risoluzione spaziale a livello centimetrico e millimetrico, in funzione delle condizioni operative, della fotocamera utilizzata e della distanza di acquisizione (Capra e al., 2017, 2015; Drap e al., 2013). La sequenza di processamento delle immagini con gli algoritmi di SfM è documentata in numerose pubblicazioni in cui sono utilizzate immagini aeree o terrestri (Aguiera-Vega e al., 2016; Eltner e al., 2016; Harwin e al., 2015; Mancini e al., 2013; Nex and Remondino, 2013; Rupnik e al., 2014; Toschi et al., 2013). Questi studi dimostrano che si può ottenere un'accuratezza centimetrica nel posizionamento assoluto dei prodotti generati quando un sistema di riferimento affidabile è materializzato attraverso l'installazione di punti di vincolo (Ground Control Points, GCP) rilevati con metodologie accurate (deviazione standard inferiore al centimetro). Vi sono invece poche pubblicazioni che analizzano l'accuratezza metrica dei modelli tridimensionali ottenuti dal processing di dataset di immagini subacquee seguendo l'approccio SfM; l'argomento risulta di

fondamentale importanza nelle indagini rivolte al monitoraggio attraverso rilievi fotogrammetrici eseguiti in epoche successive. Figueira e al., (2015) hanno valutato la precisione (mediante rilievi ripetuti) e l'accuratezza (utilizzando un modello da laser come riferimento) di modelli 3D rappresentanti habitat marini utilizzando la fotogrammetria subacquea a varie scale di indagine. Replicando i rilievi in un ambiente controllato, gli autori hanno trovato differenze medie nella morfologia di 1-6 mm per le colonie di corallo e di 25 mm per l'area della barriera corallina. Le informazioni sull'accuratezza ottenute dai rilievi fotogrammetrici subacquei sono essenziali ogni volta che questi risultati sono pianificati per scopi di monitoraggio. In particolare, il livello di accuratezza raggiunto nel posizionamento di prodotti tridimensionali e nella loro definizione spaziale è cruciale nelle indagini fotogrammetriche subacquee multi-temporali finalizzate alla quantificazione dei cambiamenti ed alla determinazione del tasso di crescita.

Ai fini del confronto multi-temporale per il monitoraggio della crescita o del declino delle strutture coralline e degli ambienti circostanti, i modelli 3D ottenuti dai dataset fotogrammetrici devono essere riconducibili ad un riferimento comune e il confronto sufficientemente accurato per essere sensibile ai tassi di crescita tipici delle strutture coralligene, dell'ordine di 10-15 mm/anno (Skarlatos e al., 2017 Neyer e al., 2018). Da quanto detto si evince che la scelta di un sistema di riferimento accurato e l'implementazione della procedura di monitoraggio dello stato di salute della barriera corallina basata su fotogrammetria subacquea, nelle particolari condizioni operative, è ancora un problema aperto.

Per rispondere alle esigenze citate, lo studio presenta una metodologia per il rilevamento fotogrammetrico ripetuto di un'area di barriera corallina prospiciente l'Isola di Moorea (Polinesia Francese, Sud Pacifico). Data la necessità di accuratezze a livello centimetrico è stato necessario realizzare e misurare una rete di controllo finalizzata a materializzare il sistema di riferimento locale, comune fra le epoche, per il successivo confronto dei modelli fotogrammetrici ricostruiti nel tempo (Guo e al., 2016). L'indagine su scala locale (circa 100 m²) è stata eseguita nell'ambito del progetto Moorea Island Digital Ecosystem Avatar (IDEA), avviato nel 2013 da un gruppo di ricercatori internazionali. Questo articolo introduce una metodologia in grado di rilevare i tassi di crescita e i piccoli cambiamenti strutturali delle colonie coralline della barriera.

1.1 Il progetto IDEA Moorea

Il progetto IDEA Moorea è ispirato alla creazione di un avatar digitale di Moorea, isola di origine vulcanica situata in nella Polinesia francese. Il progetto coinvolge un gruppo interdisciplinare di esperti riunito al fine di sviluppare un sistema di relazioni complesse in cui i dati ecologici e le informazioni sociali sono riuniti in un modello complessivo di evoluzione dell'isola (<https://mooreaidea.ethz.ch/project>) che permetterà di identificare strategie preventive e definire politiche di sostenibilità. La misurazione tridimensionale dell'evoluzione nel tempo delle barriere coralline, come parte del complesso ecosistema, è una componente essenziale nelle indagini sugli impatti dei cambiamenti climatici (incremento delle temperature delle masse d'acqua oceaniche, incremento nella frequenza dei cicloni, fenomeni di acidificazione degli oceani). Le prime esperienze del gruppo coinvolto nelle indagini con fotogrammetria subacquea nell'isola di Moorea risalgono al 2015 e continuano tutt'ora. L'area investigata si trova al di fuori della laguna (Fig. 1) ad una profondità di circa 10 m. È stata selezionata per la sua posizione e la varietà di

colonie di coralli che la popolano. Il sito di test esaminato in questo documento (numero 17) fa parte di un'area di interesse più ampia (estesa in senso lineare per un centinaio di metri), e costituisce uno dei cinque siti campione che finora sono stati scelti per testare le prestazioni della fotogrammetria subacquea per gli scopi designati. In questo documento sono mostrati i risultati del monitoraggio ottenuti dal confronto fra i prodotti delle campagne relative agli anni 2017 e 2018.

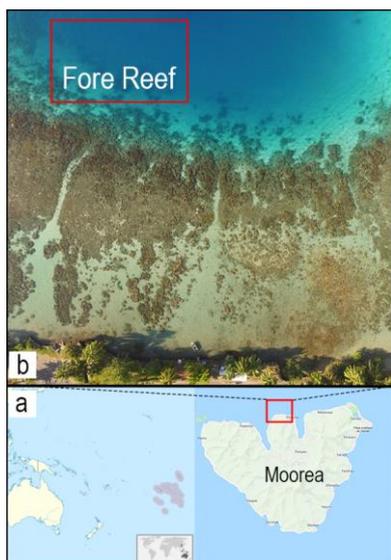


Figura 1. Area di indagine: a) mappa dell'area; b) foto di dettaglio dall'alto, nel rettangolo rosso è contenuta la porzione di barriera corallina analizzata, localizzata in mare aperto esternamente alla laguna.

2. METODOLOGIE

La fotogrammetria subacquea è una tecnica di rilievo non invasiva, adatta per eseguire una ricostruzione di alta precisione della barriera corallina ed fornire una risoluzione sufficiente per il monitoraggio delle barriere coralline nelle loro condizioni naturali. La progettazione e l'installazione di una corretta rete di controllo è necessaria per garantire la ripetibilità delle misure fotogrammetriche nel tempo all'interno dello stesso sistema di riferimento; questo è un aspetto essenziale per implementare sistemi di monitoraggio efficaci e per eseguire analisi multi-temporali affidabili in qualsiasi tipo di applicazione.

2.1 Rete di controllo

2.1.1 Progettazione ed installazione

La rete di controllo è definita mediante la materializzazione di un numero di punti di controllo (GCP), ben identificabili, con coordinate definite sulla base di un processo di compensazione di misure geodetiche. Tali GCP sono successivamente utilizzati come vincoli nella restituzione fotogrammetrica ai fini dell'orientamento dei modelli 3D generati e costituiranno il riferimento per i confronti multi-temporali. I punti sono posizionati in modo da ricoprire in modo omogeneo l'area investigata (sia in termini di estensione sia di profondità variabili), garantire la massima visibilità nelle immagini acquisite e consentire le misure topografiche della rete. I GCP richiedono un'installazione stabile e univoca per poter riposizionare il riferimento nella stessa posizione in ogni successiva campagna di monitoraggio. L'ambiente subacqueo richiede particolari accorgimenti: ogni GCP viene

materializzato perforando il substrato di roccia con un piccolo foro verticale (4-5 cm di profondità) e inserendo in ogni foro un tassello, in modo che una barra filettata da 5/8 di pollice possa esservi avvitata all'interno. Questa scelta non ha un impatto visivo sull'ambiente, non danneggia la barriera corallina e localizza i GCP in un substrato diverso rispetto a quello occupato dagli organismi coralligeni, che sono l'obiettivo del sistema di monitoraggio. Il sito indagato, denominato "fore reef n.17" (Fig. 2a), è caratterizzato da una rete che si estende per una lunghezza e una larghezza di circa 5 metri, costituita da 5 GCP distanziati in modo omogeneo installati durante la campagna di Gennaio 2017.

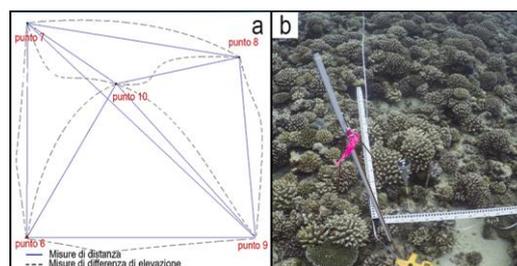


Figura 2. a) schema del sito investigato con indicazione dei punti di controllo e le misure geodetiche effettuate; b) immagine subacquea del sito con particolare delle barre graduate utilizzate per la validazione dei modelli 3D ottenuti.

2.1.2 Progettazione delle attrezzature ed esecuzione delle misure

L'identificazione dei cambiamenti morfologici e volumetrici nella struttura della barriera corallina rappresenta un'applicazione che comporta pratiche di rilevamento accurate sia nella generazione dei prodotti fotogrammetrici sia nel calcolo delle coordinate dei GCP. Nel contesto di questa sperimentazione gli strumenti geodetici più comuni non possono essere utilizzati ai fini del rilevamento dei GCP. Attrezzature speciali e dispositivi di misurazione ad-hoc sono stati progettati e sperimentati durante i test in campo per effettuare misure di distanza e dislivelli tra i punti di riferimento installati. Lo scopo è quello di fornire un protocollo di indagine applicabile al contesto delle barriere coralline da parte di operatori non necessariamente esperti nelle discipline del rilevamento di precisione per misurare GCP e consentirne l'identificazione univoca in fase di elaborazione delle immagini. Al fine di fornire le coordinate accurate dei GCP in un sistema di riferimento locale, sono stati progettati i seguenti dispositivi:

- barre filettate 5/8 di pollice, della lunghezza di 30 cm, avvitate su fori destinati ad ospitare i GCP per consentire le misurazioni ad ogni campagna di monitoraggio (Fig. 3a);
- cilindri in alluminio, con diametro di 30 mm e lunghezza di 160 mm, avvitati su ogni barra filettata sui quali si possono ospitare in sommità due inserti intercambiabili dedicati alle misure geodetiche o alla collimazione del GCP (Fig. 3a e 3b). Questi cilindri, accoppiati alle barre filettate, sono essenziali per sollevare i punti di riferimento dal fondale e superare eventuali ostacoli legati alla morfologia locale e rendere possibile la collimazione dei GCP a partire dagli altri punti della rete o da altre stazioni di misurazione;
- inserto dedicato alle misure di distanza (anello di misurazione). Questo è progettato con un perno inferiore che si inserisce nel cilindro in alluminio consentendo rotazioni in senso azimutale e evitando qualsiasi slittamento verticale. Sulla sommità vi è un anello con una piccola apertura laterale, a mezza altezza, che viene usata come riferimento per le osservazioni di distanza. Le misure di distanza tra i punti della

rete vengono eseguite per mezzo di un metro a nastro con gradazione millimetrica (Fig. 3b);

- inserto dedicato all'identificazione dei GCP nelle immagini per trasformare il vertice in target fotogrammetrico. È progettato per adattarsi al cilindro in alluminio, di forma circolare (80 mm di diametro e 40 mm di altezza) con una sottile trama in bianco e nero codificata attaccata nella parte superiore. Ogni target fotogrammetrico è denominato con un numero riportato sul lato (Fig. 3a). Il target è codificato per permettere il riconoscimento automatico durante il processo fotogrammetrico.

I due inserti sono progettati in modo tale che il target e il centro dell'anello (riferimento per le misure di distanza) si trovino alla stessa quota. Le due parti sono velocemente intercambiabili dall'operatore subacqueo in funzione della fase particolare di lavoro (misure della rete o acquisizione di immagini). L'intera installazione (barra, palo e adattatori) viene rimossa alla fine del rilievo per lasciare il fondale libero da oggetti artificiali;

- puntatore laser verde e stadia di livellazione con graduazione millimetrata. Questi sono utilizzati per misurare i dislivelli tra i punti: il puntatore laser è installato su un treppiede, quindi puntando verso l'asta il laser consente ai subacquei di eseguire la lettura precisa (Fig. 3f);

- supporto speciale per il puntatore laser. È stato sviluppato ad hoc a seguito di test, eseguiti in aria, che hanno evidenziato una deviazione della linea di mira in funzione dell'orientamento azimutale. La lettura sull'asta non è la stessa se eseguita con il dispositivo in posizione I o in posizione II (dove la posizione II si ottiene ruotando di 180° il puntatore laser intorno al suo asse). Per consentire la doppia misura, registrare le letture con il puntatore in entrambe le posizioni e quindi calcolare le medie tra le due osservazioni, il supporto è stato progettato in modo da consentire la rotazione senza modificare la posizione del puntatore né la posizione dell'origine di misurazione. L'installazione su un adattatore rotante avvitato al treppiede consente la rotazione azimutale del dispositivo, è quindi possibile puntare aste graduate posizionate in qualsiasi direzione (Fig. 3c) senza pregiudicare la qualità delle osservazioni;

- un adattatore da collegare al tassello di ciascun GCP è stato sviluppato per bloccare la stadia durante le livellazioni, consentendo un posizionamento ripetibile e facilitando il raggiungimento della verticalità della stadia durante le misure (Fig. 3d).

Tutti i dispositivi sono prodotti in alluminio, per evitare gli effetti della corrosione dovuta all'acqua marina, ed hanno un riferimento verticale comune che assicura l'intercambiabilità dei dispositivi che possono essere utilizzati sul punto.

Sono state seguite alcune strategie operative per ottimizzare l'acquisizione dei dati e migliorare l'accuratezza finale: 1. le misure di distanza sono ottenute dall'estensione del metro a nastro tra i due adattatori (anelli) installati sui GCP (Fig. 3e). Ogni distanza viene misurata due volte invertendo le estremità del metro. Questa fase richiede molta attenzione in quanto il metro deve essere ben disteso in entrambe le acquisizioni per evitare gli effetti delle correnti ma non tirato forzando sull'adattatore per evitare errori di misura legati all'eventuale piegamento delle barre di installazione dei GCP durante la misura. Sono eseguite numerose misure di distanza per ottenere una serie di osservazioni ridondanti tra i GCP (le distanze acquisite variano da 2 a 11 m). 2. Le misure dei dislivelli forniscono l'assetto altimetrico fra i vertici della rete (Fig. 3f). Si è eseguita una livellazione dal mezzo posizionando il puntatore laser a una distanza intermedia fra i GCP coinvolti nell'osservazione. In questo modo, gli errori residui di

verticalità del dispositivo di misurazione, causati dall'imperfetta installazione verticale del treppiede, vengono eliminati per simmetria. Inoltre, ogni lettura viene ripetuta due volte ruotando il puntatore laser di un angolo piatto, quindi eliminando anche la deviazione del raggio laser. La rete è stata misurata nell'agosto 2017 e nell'agosto 2018; la strategia sopra descritta è stata implementata nell'agosto 2018 (Fig. 2b) con ottimi risultati, significativamente migliori rispetto ai precedenti. Il presente documento riporta le coordinate dei GCP ottenute dalle misurazioni effettuate nel 2018.

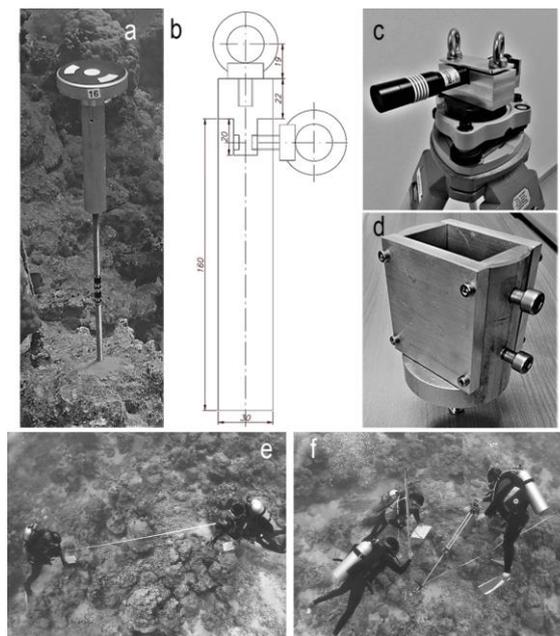


Figura 3. Attrezzature per l'esecuzione delle misure. a) installazione in sito di un GCP composta da barra filettata, cilindro in alluminio e target fotogrammetrico; b) progetto di un GCP, composto da cilindro in alluminio ed inserto per le misurazioni di distanza; c) puntatore laser con adattatore per l'installazione su treppiede; d) adattatore per la stadia di livellazione; e) acquisizione delle misure di distanza in condizioni operative; f) acquisizione delle misure di dislivello in condizioni operative.

2.1.3 Compensazione della rete

La rete di controllo subacquea ha consentito il calcolo delle coordinate dei punti, tramite compensazione delle misure effettuate, con accuratezza inferiore al centimetro. Tali GCP sono poi stati utilizzati come riferimento nell'orientamento esterno dei modelli fotogrammetrici.

La rete di controllo stabilisce il sistema di riferimento locale che viene convenzionalmente fissato definendo un punto di origine e un secondo che indica la direzione di riferimento (strategia a minimi vincoli). Il sistema di riferimento locale adottato nel sito indagato è fissato nel punto n. 6 con l'asse x rivolto verso il punto n. 9 (Fig. 2a). Per evitare valori negativi nella componente verticale, l'elevazione dell'origine è impostata su 5.00 m (Tabella 1). Le osservazioni grezze vengono pre-elaborate per rilevare eventuali valori anomali. Per le distanze si valuta lo scostamento dei due valori misurati rispetto alla media tra i due al fine di individuare errori grossolani; nei dislivelli si valuta invece l'errore di chiusura sugli anelli di livellazione eseguiti. Le deviazioni standard a priori sulle osservazioni sono impostate ad 1 mm per le osservazioni di distanza e 5 mm per le differenze di elevazione. Rispetto al numero delle incognite, le

osservazioni sono sufficientemente ridondanti per una operazione di compensazione rigorosa ai minimi quadrati; si hanno complessivamente 18 osservazioni tra distanze medie e dislivelli. La rete di controllo è composta da 5 vertici, di cui uno considerato origine del sistema locale ed un altro come orientamento. Le incognite sono quindi 11 e il numero di osservazioni ridondanti è 7. La compensazione è stata eseguita tramite la suite commerciale STAR * NETPRO v. 6.0.36, Starplus Software Inc. (Oakland, CA).

Le coordinate compensate dei GCP e le accuratze ottenute (con un livello di confidenza del 68%) sono riportate in Tabella 1. La compensazione della rete di controllo ha fornito risultati molto soddisfacenti: l'accuratezza media è di 1.2 mm nella componente orizzontale e 2.9 mm nella verticale. Le sigma più alte sono al vertice 8, punto più lontano dall'origine del sistema di riferimento.

| ID | X [m] | Y [m] | Z [m] | σX [mm] | σY [mm] | σZ [mm] |
|----|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 6 | 0.000 | 0.000 | 5.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 7 | 0.018 | 5.370 | 4.566 | 1.5 | 1.0 | 3.6 |
| 8 | 5.323 | 4.519 | 4.316 | 1.5 | 1.0 | 4.1 |
| 9 | 5.724 | 0.000 | 4.661 | 1.0 | 0.0 | 3.6 |
| 10 | 2.238 | 3.854 | 4.811 | 1.2 | 0.9 | 3.4 |

Tabella 1. Risultati della compensazione di rete. Coordinate e accuratze (al 68% livello di confidenza).

2.2 Rilevo fotogrammetrico subacqueo

Il rilievo fotogrammetrico è effettuato una volta all'anno da subacquei esperti che operano in aree di dimensioni medio-piccole e poco profonde. I subacquei provvedono all'installazione del target fotogrammetrico e al controllo dell'integrità della rete di controllo.

2.2.1 Acquisizione delle immagini

Negli anni di attività presso l'isola di Moorea sono state utilizzate diverse fotocamere e configurazioni per l'acquisizione dei fotogrammi, sia camere compatte sia *action cameras*, sia camere in modalità singola sia accoppiate, per testarne le prestazioni in ambiente subacqueo e definire le impostazioni ottimali. In questo studio sono presentati i risultati ottenuti con la fotocamera Lumix DMC-GH4. La custodia subacquea della fotocamera ha una *dome port* che riduce gli effetti di distorsione generati dalla presenza del mezzo acqua (Menna e al., 2016). La fotocamera è stata impostata con una lunghezza focale nominale in aria di 20 mm nel 2017 e 22 mm nel 2018; si prevede un valore effettivo inferiore nell'ambiente subacqueo in considerazione dell'effetto di ingrandimento pari a 1/4 prodotto dal mezzo acquatico (Capra, 1993). Il tempo di esposizione è stato fissato in 1/90 nel rilievo del 2017 e 1/125 nel rilievo 2018.

Inoltre, la messa a fuoco della fotocamera è stata impostata in modo automatico, la variazione della distanza di acquisizione delle immagini è risultata così leggera che la messa a fuoco automatica non ha prodotto alcun cambiamento significativo nella lunghezza focale e i parametri interni della fotocamera sono rimasti pressoché costanti durante il rilievo. La velocità di acquisizione dei fotogrammi è stata impostata ad 1 secondo e la distanza tra la fotocamera e il fondale era di 2 metri nel 2018 e di 5 metri nel 2017. Come indicato in Fig. 4, diverse strisciate sono state eseguite dai subacquei sul sito per garantire la giusta sovrapposizione di immagini e una ridondanza superiore al 90%. Per ottenere prodotti di elevata accuratezza è necessaria, infatti, una robusta geometria di acquisizione che si ottiene con

una copertura di immagini acquisite sia lungo direzioni longitudinali sia trasversali. L'area di interesse è stata rilevata con un assetto della fotocamera compreso tra 0° e 30°; ciò ha consentito di rappresentare nelle immagini anche le porzioni verticali delle strutture (Rossi e al., 2017) ed evitare occlusioni legate alla complessa morfologia delle colonie coralligene. L'acquisizione delle immagini è stata eseguita in condizioni di luce naturale, in assenza di correnti e preferendo le ore centrali della giornata, questo per evitare ombre, materiali sospesi e, quindi, ottenere immagini di miglior qualità.

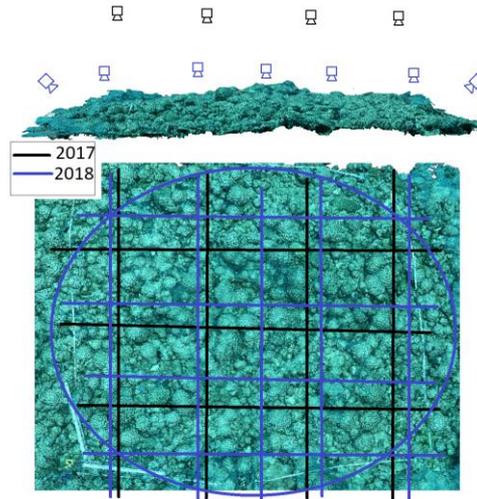


Figura 4. Schema di acquisizione fotogrammi. In nero il rilievo del 2017, in blu quello del 2018. Immagine in alto vista in sezione dello schema di acquisizione, in basso vista dall'alto.

2.2.2 Elaborazione delle immagini e confronto tra i modelli fotogrammetrici

L'elaborazione fotogrammetrica è stata eseguita all'interno il software commerciale Agisoft PhotoScan v.1.3.4 e progettata per garantire i migliori risultati ottenibili nelle condizioni operative descritte. In applicazioni di monitoraggio, la ripetibilità è un concetto chiave che consente di ottenere risultati confrontabili nel tempo; usare lo stesso software con le stesse impostazioni è rilevante. La prima fase di elaborazione consiste nella rimozione delle immagini di bassa qualità; quindi viene eseguito un orientamento preliminare delle immagini attraverso l'identificazione automatica dei punti di legame. I punti di legame con un errore di riproiezione elevato (principalmente quelli al di fuori dell'area indagata o rilevati in sole due immagini) vengono rimossi e i GCP, codificati, automaticamente identificati nelle immagini. L'orientamento delle immagini viene quindi ottimizzato e vincolato introducendo le coordinate dei GCP, i cui valori numerici e le relative accuratze sono ottenute dalla compensazione della rete (Tabella 1). I vincoli esterni definiti dalle coordinate dei GCP consentono di ottenere la posizione e gli orientamenti reali delle fotocamere, il calcolo dei parametri interni della fotocamera e di fornire un modello 3D georeferenziato. L'uso di una procedura di self-calibrazione garantisce risultati accurati (come dimostrato da Snavely e al., 2006) perché i parametri interni della fotocamera sono stimati sulla base delle immagini acquisite, quindi tenendo conto delle reali condizioni operative del rilievo. La nuvola di punti densa è generata utilizzando algoritmi di dense image matching: la correlazione tra pixel appartenenti a diverse immagini consente la ricostruzione di una mappa di profondità e la creazione di una nuvola di punti con elevata densità. Solo le nuvole di punti 3D originali saranno

coinvolte nelle analisi successive poiché qualsiasi intervento di modellazione di superfici introdurrebbe effetti di interpolazione con conseguente perdita di dettagli locali. La validazione delle nuvole di punti generate e la stima delle accuratèzze finali viene eseguita utilizzando punti/oggetti le cui coordinate/dimensioni sono note e non precedentemente impiegate nell'elaborazione fotogrammetrica (Toschi e al., 2013). A tal fine, alcune barre graduate sono state posizionate nell'area investigata (solo nel dataset del 2018) prima dell'acquisizione delle immagini in modo da essere disponibili per la validazione (Figura 1c). Le differenze tra i valori reali e le stime date dalla ricostruzione 3D, identificate per alcune distanze sulle barre graduate, determinano l'accuratèzza delle nuvole di punti calcolate. I modelli 3D ottenuti dai rilievi 2017 e 2018 vengono quindi confrontati per rilevare se si sono verificati cambiamenti significativi nella geometria della barriera corallina. Il confronto multi-temporale viene eseguito attraverso il calcolo delle distanze tra le nuvole utilizzando l'algoritmo Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2) (Lague e al., 2013) all'interno del software open source Cloud Compare v. 2.9. L'algoritmo tiene conto sia della complessità del modello 3D che del rumore della nuvola di punti per fornire un calcolo delle distanze corretto.

3. RISULTATI

3.1 Modelli 3D

I risultati dell'elaborazione fotogrammetrica per le missioni del 2017 e del 2018 sono elencati nella Tabella 2. L'orientamento

delle immagini è stato eseguito per entrambi i casi introducendo le medesime coordinate dei GCPs (valori riportati in Tabella 1). I due dataset differiscono in termini di numero di immagini e distanza di acquisizione (148 immagini acquisite con una distanza media di 4.5 m nel 2017, 552 immagini con distanza media di 2.1 m nel 2018); la risoluzione nelle immagini è quindi diversa (1.3 mm/pix e 0.5 mm/pix rispettivamente nel 2017 e 2018) e di conseguenza anche nei prodotti generati. Entrambe le acquisizioni hanno assicurato una elevata ridondanza delle immagini (> 9), ma la geometria di acquisizione è stata ulteriormente migliorata nel rilievo eseguito nel 2018 aumentando le strisciate nelle aree periferiche. I parametri di calibrazione interna della fotocamera variano tra le due epoche a seguito delle differenze di acquisizione, in particolare si notano variazioni di circa il 10% nei parametri di distorsione radiale ed intorno al 50% per i parametri di distorsione tangenziale. Al fine di ridurre le differenze nella risoluzione dei prodotti generati, la nuvola di punti densa per il dataset del 2017 è stata calcolata con impostazioni di alta qualità, mentre per il 2018 sono state utilizzate impostazioni di qualità media.

Questa strategia ridimensiona le immagini elaborate (alta qualità significa un fattore di riduzione dell'immagine pari a 4 rispetto alle dimensioni originali, media qualità indica un fattore di 16). Ciò si traduce in nuvole dense costituite da un simile numero di punti, a scapito di tempi di elaborazione più lunghi (per il calcolo relativo al 2017 è stato necessario un giorno in più rispetto al 2018 - Tabella 2, riga i).

| FORE REEF, PLOT 17 | | | | | | | | | |
|--|--|-----------------------------------|--------|--------|---------|----------------------|--------|--------|---------|
| | | Rilievo Agosto 2017 | | | | Rilievo Agosto 2018 | | | |
| c | Immagini acquisite | 148 | | | | 552 | | | |
| d | Distanza di acquisizione | 4.5 m | | | | 2.1 m | | | |
| e | Risoluzione a terra | 1.3 mm/pix | | | | 0.5 mm/pix | | | |
| f | Errore di riproiezione | 1 pix | | | | 1.1 pix | | | |
| g | Nuvola di punti | 35,660,000 punti(*) | | | | 33,550,000 punti(**) | | | |
| h | Orientamento delle immagini | 1 hour | | | | 11 hours 30 minutes | | | |
| i | Generazione della nuvola densa | 1 giorno 20 ore (*) | | | | 20 ore (**) | | | |
| l | Discrepanze sui GCP (valori medi) | X [mm] | Y [mm] | Z [mm] | 3D [mm] | X [mm] | Y [mm] | Z [mm] | 3D [mm] |
| | | 3.3 | -0.2 | -1.5 | 3.6 | 0.4 | 0.1 | -0.0 | 0.4 |
| m | Accuratezze stimate sulle barre graduate | | | | | X [mm] | Y [mm] | Z [mm] | 3D [mm] |
| n | | Area nell'intorno del punto 6 | | | | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.7 |
| o | | Area nell'intorno del punto 7 e 9 | | | | 0.9 | 0.4 | 0.05 | 1.0 |
| p | | Area nell'intorno del punto 8 | | | | 0.9 | 0.5 | 0.1 | 1.1 |
| (*) ricostruzione della nuvola di punti densa con impostazione di alta qualità | | | | | | | | | |
| (**) ricostruzione della nuvola densa con impostazioni di media qualità | | | | | | | | | |

Tabella 2. Principali risultati dell'elaborazione delle immagini mediante SfM: impostazione di acquisizione, numerosità dei punti ricostruiti, tempi di elaborazione, discrepanze sui GCP e valutazione delle accuratèzze ottenute sulle barre graduate.

Le nuvole di punti sono state generate nello stesso sistema di riferimento, definito dai vincoli imposti per le coordinate dei GCP. Il modello fotogrammetrico adatta la sua geometria ai vincoli imposti; di conseguenza si possono calcolare le discrepanze sui GCP tra le coordinate note a priori e quelle

stimate dal modello. Entrambi i modelli hanno mostrato discrepanze medie di pochi millimetri lungo le tre direzioni, 3.6 mm nel modello 2017 e 0.4 mm nel 2018 (Tabella 2, riga l); tali valori sono simili alla precisione delle coordinate in input. L'accuratèzza dei modelli 3D generati viene valutata

confrontando lunghezze note sulle barre graduate con le medesime misurate sul modello 3D. Le differenze ottenute sono poi state normalizzate alla distanza di riferimento di 1 metro e mediate per ottenere un valore rappresentativo di accuratezza finale raggiunta. La ricostruzione più accurata (<1 mm) si ottiene attorno al punto 6 (origine del sistema di riferimento), la meno accurata (1.1 mm) viene rilevata nella posizione opposta (area attorno al punto 8).

3.2 Analisi multi-temporale

L'analisi multi-temporale e le valutazioni sullo sviluppo delle strutture coralline sono eseguite attraverso il confronto dei due modelli disponibili. La distanza tra i modelli 3D può evidenziare l'evoluzione del reef nel lasso di tempo considerato. Il punto chiave della metodologia applicata in questo studio (algoritmo M3C2) è la definizione della direzione normale alla nuvola di riferimento, lungo la quale viene poi calcolata la distanza tra le due nuvole di punti. La barriera corallina ha una grande complessità geometrica, inoltre ogni cambiamento delle caratteristiche ecologiche non ha una direzione predefinita; per definire la direzione lungo cui effettuare il calcolo delle distanze tra nuvole di punti, l'algoritmo M3C2 consente di definire un diametro di ricerca sul modello di riferimento che crea una superficie per la quale viene calcolata la normale. In questa sperimentazione il diametro varia tra 0,002 m e 0,02 m a seconda delle caratteristiche geometriche della barriera; la distanza 3D viene calcolata definendo il modello del 2017 come riferimento, il modello del 2018 viene quindi confrontato con esso.

La Figura 5 mostra i risultati del confronto proiettando le distanze calcolate sul modello del 2017 (che è stato precedentemente ricampionato a 0.005 m per accelerare il calcolo e l'analisi dei risultati). I valori compresi tra -60 mm e 60 mm dovrebbero essere rappresentativi dei fenomeni naturali (Fig. 5), i valori superiori a questi sono principalmente dovuti a errori nel calcolo della distanza, alla presenza di oggetti estranei o alla rottura di concrezioni coralline. Nella medesima figura è riportato l'istogramma di frequenza relativo ai valori ottenuti (a destra), da cui si nota un valore centrale pari a +12 mm e deviazione standard pari a 21 mm. La curva appare sbilanciata su valori positivi, comportamento che può essere attribuito al processo di sviluppo della colonia. Per indagare nel dettaglio i valori maggiormente significativi, analizziamo i soli risultati che superano la deviazione standard (± 20 mm): le distanze positive sono rappresentate dai toni del rosso (potenziale crescita del corallo) mentre le distanze negative (potenziale rottura o dissoluzione del corallo) sono rappresentate in blu. Le distanze positive significative sono ben distribuite nelle aree studiate e situate principalmente sulla sommità delle concrezioni, dove la crescita dei coralli è verosimilmente maggiore. La scala dei colori rappresenta, con il colore arancione, le distanze uguali a 30 mm, valori ragionevoli di crescita; in rosso sono rappresentate le distanze uguali e superiori a 50 mm che possono essere dovute ad errori in fase di confronto dei modelli 3D più che ad una crescita effettiva del corallo. I valori negativi delle distanze calcolate sono meno numerosi dei valori positivi e le concrezioni dei coralli non possono essere chiaramente identificate. La scala di colori adottata rappresenta in blu i valori superiori a -50 mm che sono probabilmente il frutto delle difficoltà della tecnica fotogrammetrica nella ricostruzione di aree nascoste e/o non facilmente identificabili nelle immagini. Infatti, questi valori si trovano principalmente sulle pareti verticali delle concrezioni e nelle strette cavità tra queste. La mappa indica anche piccole

porzioni blu che rappresentano fenomeni localizzati di danno delle concrezioni. La Figura 6 mostra un dettaglio del sito investigato in cui sono stati estratti alcuni profili delle nuvole di punti generate. I profili sono stati creati sezionando con piani verticali i modelli 3D delle due epoche. In particolare, Fig.6b mostra un'area nell'intorno della sezione 2 in entrambi i modelli, visualizzati con colori naturali. Il confronto tra le nuvole di punti è rappresentato con una scala dal blu al rosso per facilitarne l'analisi: i valori blu (Fig. 6a, presso Sez. 2) rappresentano le distanze negative, in questo caso corrispondono a una perdita di materiale correlata alla rottura di una concrezione.

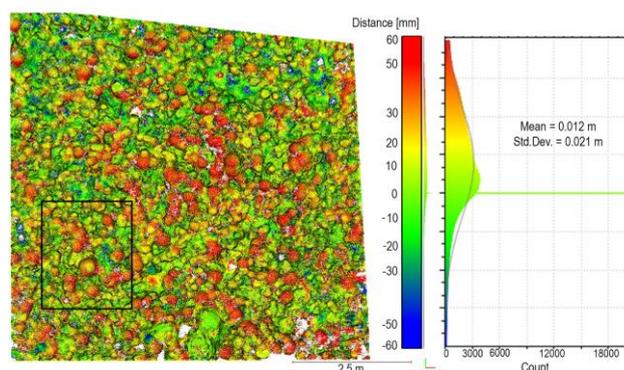


Figura 5. Confronto e calcolo della distanza tra il modello relativo all'anno 2017 (riferimento) e il modello ottenuto nel 2018; mappa delle distanze calcolate (valori compresi tra +/- 60 mm), distribuzione dei valori e parametri statistici. L'area nel riquadro è quella che sarà analizzata in dettaglio nella figura successiva.

Il materiale distaccato giace sul fondo marino vicino alla zona danneggiata ed è rilevato come area rossa nella mappa di confronto. Analisi più dettagliate possono essere eseguite mediante la creazione di sezioni verticali dei modelli 3D e dal confronto dei due profili estratti attraverso la misura manuale delle distanze dei punti (Fig. 6, in basso). In Figura 6a le linee nere specificano le sezioni verticali scelte, le frecce bianche indicano la direzione di osservazione per i profili estratti. Nella parte inferiore di Figura 6 sono mostrati i profili estratti, il confronto dei punti appartenenti alla stessa sezione verticale e le misurazioni manuali delle distanze consentono di eseguire un monitoraggio puntuale dei cambiamenti occorsi nella barriera corallina. I risultati ottenuti con il calcolo automatico della distanza, come eseguito con l'algoritmo M3C2, sono confermati in termini di variazioni medie. C'è un buon accordo geometrico tra i due modelli: il profilo 2018 mostra un processo di accrescimento, ponendosi tipicamente al di sopra di quello relativo al 2017 in corrispondenza delle concrezioni, mentre essi coincidono in corrispondenza di aree rappresentative del fondale. Le distanze positive sono più elevate nella parte sommitale delle concrezioni e diminuiscono sui fianchi. Nelle aree rosse le distanze identificate manualmente sono di circa 30 - 35 mm al massimo. Inoltre, rotture di concrezioni possono portare ad elevate distanze negative (ad esempio -135 mm nella Sez. 2), lo stesso effetto è generato anche dalle occlusioni che, nelle pareti verticali e nelle strette valli, impoveriscono la ricostruzione.

4. DISCUSSIONI

Il ruolo della rete di controllo è essenziale per la rigorosa definizione di un sistema di riferimento che permetta il

confronto multi-temporale e l'identificazione dei cambiamenti della struttura di una barriera corallina. Grazie al vincolo dei modelli imposti in base alle coordinate dei GCP, gli stessi sono direttamente e immediatamente comparabili senza dover manipolare ulteriormente i dati. Tali manipolazioni comprometterebbero il confronto rendendolo meno affidabile. La stima delle coordinate dei GCP deriva dalla compensazione ai minimi quadrati. Le scelte fatte in questo studio sulla compensazione della rete di controllo riguardano principalmente la strategia a minimi vincoli per stabilire il

sistema di riferimento. L'introduzione di un punto di vincolo e di un orientamento sono essenziali per la definizione esatta del sistema di riferimento. Questa scelta consente di riferire le elaborazioni di rilievi svolti in epoche successive al medesimo sistema di riferimento e non perdere la continuità temporale dei risultati qualora alcuni GCP venissero parzialmente danneggiati o si spostassero leggermente. In tal caso utilizzando i GCP rimasti si andrebbero ad aggiornare le coordinate pur rimanendo nello stesso sistema di riferimento, condizione essenziale nelle applicazioni di monitoraggio.

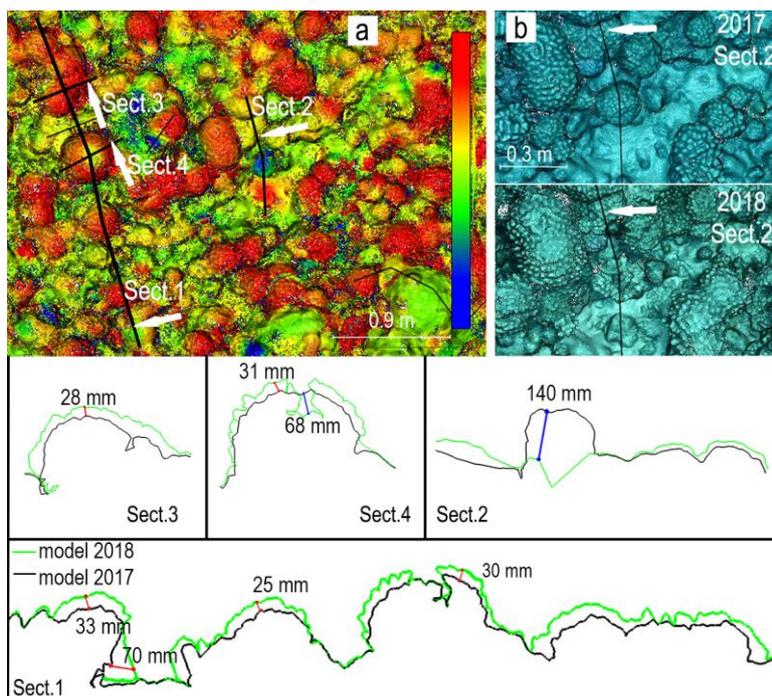


Figura 6. Confronto multi-temporale, sezioni verticali dei due modelli ottenuti. a, b) mappe delle sezioni estratte indicazione della vista. c) vista dei due modelli attorno a Sect.2. Nella parte bassa, n. 5 profili estratti con misure puntuali.

I risultati presentati si basano su diverse strategie di acquisizione dati poiché alcuni miglioramenti sono stati adottati nella campagna 2018: la distanza di acquisizione è stata ridotta, la fotocamera è stata posizionata con posa off-nadir e le strisciate sono state progettate a formare una griglia regolare sopra l'area di interesse che garantisce idonea copertura e ridondanza. La risoluzione media a terra varia da 1.3 mm/pixel nel 2017 a 0.5 mm/pixel nel 2018; questo si traduce in diverse caratteristiche all'interno delle nuvole di punti generate. Le modifiche alle impostazioni di generazione della nuvola densa consentono di ottenere prodotti con un numero di punti paragonabile e risoluzione confrontabile; i profili mostrati in Figura 4 evidenziano che entrambi i prodotti consentono l'identificazione di piccoli dettagli. Il minor numero di immagini nel 2017 influisce anche sulla robustezza della geometria della ricostruzione riducendo le osservazioni disponibili e la variabilità degli angoli di presa per punti ricostruiti (James et al., 2017). Alcune aree non sono state ricostruite a causa di occlusioni, queste sono principalmente localizzate in ambienti compresi fra le concrezioni (Fig. 5) e influenzano il confronto. L'acquisizione di immagini da distanze maggiori garantisce un'eccellente copertura dell'area, ma la risoluzione che ne deriva è inferiore e potrebbe non consentire di raggiungere l'accuratezza richiesta. Di contro, le immagini ottenute da distanza ravvicinata e in assetto convergente assicurano una maggior risoluzione della

ricostruzione, a discapito della possibilità di rappresentare correttamente ambienti quali canyon.

La stabilità del sistema di riferimento è l'ipotesi di base per una rete di controllo finalizzata ad un confronto multi-temporale affidabile; considerando il breve tempo intercorso tra le campagne di monitoraggio e il tipo di installazione dei benchmark, è ragionevole presumere che i GCP non siano soggetti a cambiamenti o modifiche e siano quindi stabili. Su lunghi periodi la loro stabilità deve essere verificata ripetendo le misure del terreno al fine di verificare la coerenza delle coordinate ed evitare un'interpretazione errata dei risultati. La causa più probabile dei diversi valori delle discrepanze sui GCP (riga 1 di Tabella 2) è la differenza tra le modalità di acquisizione delle immagini nelle due epoche. Infatti, la geometria di acquisizione influenza l'accuratezza dell'intera ricostruzione 3D (Harwin e al., 2015); in particolare, la maggiore distanza di acquisizione riduce l'accuratezza nell'identificazione dei target e impoverisce l'accuratezza complessiva dei prodotti generati, come suggerito da James e Robson (2012) per le applicazioni fotogrammetriche aeree, motivo per cui le discrepanze dei GCP risultano maggiori.

Il confronto delle nuvole di punti generate indica che le ricostruzioni sono ben allineate. L'algoritmo per il calcolo automatico delle distanze orientate tra le nuvole di punti evidenzia i principali comportamenti (Fig. 5): le aree di crescita sono situate principalmente sulla sommità degli organismi che

compongono la colonia di coralli. Va detto che il confronto tra nuvole di punti 3D ricostruite ad epoche differenti non costituisce un vero e proprio monitoraggio della deformazione, in quanto non è possibile identificare in modo univoco lo stesso punto nello spazio in due epoche diverse e seguirne l'evoluzione. L'algoritmo M3C2 tenta di risolvere questo problema definendo le soglie per i valori misurati e le direzioni di ricerca in relazione alla geometria della superficie 3D. Questo approccio consente l'analisi dei comportamenti prevalenti nell'evoluzione dell'architettura della barriera corallina, è un metodo molto efficace, automatico e veloce per valutare le tendenze di crescita e il comportamento medio delle varie colonie di coralli. Le distanze calcolate, però, non sono idonee ad una valutazione quantitativa e precisa dei cambiamenti nel tempo, per valutare quantitativamente delle modifiche relative a punti specifici nell'architettura della barriera è necessario creare sezioni e confrontare i profili estratti. In questo modo, un operatore esperto è in grado di identificare i punti di interesse omologhi ed effettuare misurazioni specifiche tra loro. Come discusso sopra, le distanze misurate sui profili sono più coerenti e rappresentative del fenomeno investigato e non superano +35 mm, anche nelle aree in cui l'algoritmo M3C2 calcola genericamente valori superiori a +45 mm.

Analisi effettuate sui risultati del confronto multi-temporale hanno permesso di valutare l'incertezza del confronto e definire le variazioni che possono essere ragionevolmente interpretate come crescita o dissoluzione del corallo, evitando così l'interpretazione errata di errori del modello 3D che non corrispondono a cambiamenti effettivi nella geometria della barriera corallina. I risultati generati dal confronto dei profili 2D sono influenzati dall'accuratezza di ciascuno dei due profili. Date le difficoltà introdotte dall'ambiente subacqueo, non è stato possibile impostare una metodologia per garantire il controllo dell'accuratezza sin dall'inizio delle sperimentazioni; il sistema di barre graduate è stato introdotto nel 2018 e ha consentito di verificare l'accuratezza del modello 3D tramite elementi di dimensioni note ed indipendenti dalla ricostruzione fotogrammetrica. Le valutazioni hanno fornito valori accuratezza pari a circa 1 mm (valore maggiore della discrepanza GCP fornita dal processo fotogrammetrico), pertanto è ragionevole considerare l'accuratezza del modello relativo all'epoca 2018 pari a pochi millimetri. Per quanto riguarda il modello ottenuto dalla campagna del 2017, in assenza di riferimenti esterni e tenendo conto delle discrepanze sui GCP, è ragionevole supporre un'accuratezza finale di 1 centimetro. Applicando la legge di propagazione degli errori si può attribuire al confronto multi-temporale un errore di circa 1 cm. Quindi, si può concludere che le differenze tra i modelli 2017 e 2018 superiori o inferiori a 1 cm potrebbero effettivamente rappresentare un cambiamento nell'architettura 3D della barriera corallina studiata. La verifica delle accuratezze sulle barre di riferimento è un processo empirico per la stima dell'accuratezza del modello 3D, ma risulta molto efficace in questo caso di studio e verrà potenziato nelle prossime campagne di rilievo.

5. CONCLUSIONI

Questo articolo rappresenta uno dei primi esempi di quantificazione tridimensionale dei cambiamenti geometrici di una barriera corallina a fronte delle perturbazioni antropogeniche e degli impatti legati ai cambiamenti climatici. I risultati discussi sono stati ottenuti grazie a indagini accurate, pur in presenza di problematiche relative al particolare contesto

ambientale, e a soluzioni strumentali e metodologiche adatte all'applicazione. I prodotti ottenuti garantiscono qualità metrica e definizione spaziale utile alla misura dei cambiamenti previsti nell'architettura 3D della barriera corallina. La lunghezza focale dell'obiettivo utilizzato deve rimanere fissa durante il rilievo per mantenere invariati tutti i parametri di calibrazione interni alla fotocamera; è consigliabile evitare lunghezze focali corte per ridurre le distorsioni metriche nelle immagini acquisite e utilizzare una custodia subacquea con una *dome port* adeguata per ridurre gli effetti di distorsione dovuti al mezzo acquoso. Il rilievo fotografico deve essere progettato in modo da garantire un elevato grado di sovrapposizione nelle immagini acquisite: eseguendo diverse strisciate sul sito di interesse con inclinazioni nadir e off-nadir della fotocamera. Una rete di appoggio accurata e materializzata in modo permanente ha un ruolo fondamentale nel confronto tra ricostruzioni 3D successive del sito. La scelta di idonea fotocamera, la distribuzione omogenea dei punti di riferimento nell'area, la loro materializzazione duratura e permanente nel tempo nonché le strategie di elaborazione rigorose permettono di ottenere prodotti 3D ad alta risoluzione e accuratezza. L'identificazione dei cambiamenti nel tempo è proposta in questo articolo attraverso il confronto di modelli 3D successivi nel tempo e consente la rimozione di errori sistematici comuni alle due ricostruzioni tridimensionali (Ogundare, 2015). L'uso delle stesse coordinate per i GCP, la rete di riferimento a minimi vincoli, i percorsi simili per l'acquisizione delle immagini e la ripetizione delle indagini in condizioni ambientali simili (sempre il medesimo periodo), sono strategie che consentono di ridurre gli errori relativi a strumentazioni, operatori, correnti marine, variazioni nell'indice di rifrazione dell'acqua e variazioni stagionali. La metodologia proposta costituisce un approccio efficace ed economicamente sostenibile finalizzato a quantificare la crescita o dissoluzione del corallo, i risultati ottenuti presentano un'accuratezza stimata e una risoluzione adatte alla quantificazione di cambiamenti di circa 10/15 mm / anno.

BIBLIOGRAFIA

- Adam, T. C., Brooks, A. J., Holbrook, S. J., Schmitt, R. J., Washburn, I., Bernardi, G., 2014. How will coral reef fish communities respond to climate-driven disturbances? Insight from landscape-scale perturbations. *Oecologia*, 176, pp. 285-296.
- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P., 2016. Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry. *J Surv Eng*, 04016025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000206](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000206)
- Baker, A. C., Glynn, P. W., Riegl, B., 2008. Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuar Coast Shelf Sci*, 80, pp. 435-471.
- Bellwood, D. R.; Hughes, T. P.; Folke, C.; Nystrom, M., 2004. Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429, pp. 827-833.
- Bryson, M., Ferrari, R., Figueira, W., Pizarro, O., Madin, J., Williams, S., Byrne, M., 2017. Characterization of measurement errors using structure-from-motion and photogrammetry to measure marine habitat structural complexity. *Ecol Evol*, 7(15), pp. 5669-5681.
- Burns, J. H. R., Delparte, D., Gates, R. D., Takabayashi, M., 2015. Integrating structure-from-motion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs. *PeerJ*, 3: e1077.

- Capra, A., 1993. Non-conventional system in underwater photogrammetry. *Int Arch Photogramm Remote Sens*, 29, pp. 234-234.
- Capra, A., Castagnetti, C., Dubbini, M., Gruen, A., Guo, T., Mancini, F., Neyer, F., Rossi, P., Troyer, M., 2017. High accuracy underwater photogrammetric surveying. In *3rd IMEKO international conference on metrology for archaeology and cultural heritage-MetroArcheo 2017*, pp. 696-701.
- Capra, A., Dubbini, M., Bertacchini, E., Castagnetti, C., Mancini, F., 2015. 3D reconstruction of an underwater archaeological site: Comparison between low cost cameras. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5W5), pp. 67-72.
- Drap, P., Merad, D., Seinturier, J., Mahiddine, A., Peloso, D., Boi, J. M., Garrabou, J., 2013 (October). Underwater programmetry for archaeology and marine biology: 40 years of experience in Marseille, France. In *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, Vol. 1, pp. 97-104.
- Edmunds, P. J., 2017. Unusually high coral recruitment during the 2016 El Nino in Moorea French Polynesia. *PLoS One*, 12(10): e0185167.
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., Abellán, A., 2016. Image-based surface reconstruction in geomorphometry – Merits, limits and developments. *Earth Surf Dynam*, 4(2): 359–389. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>
- Figueira, W., Ferrari, R., Weatherby, E., Porter, A., Hawes, S., Byrne, M., 2015. Accuracy and precision of habitat structural complexity metrics derived from underwater photogrammetry. *Remote Sens*, 7(12): 16883-16900.
- Guo, T., Capra, A., Troyer, M., Gruen, A., Brooks, A. J., Hench, J. L., Schmitt, R. L., Holbrook, S. J., Dubbini, M., 2016. Accuracy assessment of underwater photogrammetric three dimensional modelling for coral reefs. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41
- Harwin, S., Lucieer, A., Osborn, J., 2015. The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis. *Remote Sens*, 7(9): 11933–11953. <https://doi.org/10.3390/rs70911933>
- Holbrook, S. J., Adam, T. C., Edmunds, P. J., Schmitt, R. J., Carpenter, R. C., Brooks, A.J., Lenihan, H. S., Briggs, C. J., 2018. Recruitment drives spatial variation in rovery rates of resilient coral reefs. *Sci Rep*, 8: 7338.
- Holbrook, S. J., Schmitt, R. J., Adam, T. C., Brooks, A. J., 2016. Coral reef resilience, tipping points and the strength of herbivory. *Sci Rep*, 6: 35817.
- James M R, Robson S (2012) Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *J Geophys Res Earth Surf* 117(F3).
- James, M. R., Robson, S., Smith, M. W., 2017. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surf Proc Land*, 42(12), pp. 1769-1788.
- Johnson-Roberson, M., Pizarro, O., Williams, S. B., Mahon, I., 2010. Generation an visualization of large-scale three-dimensional reconstructions from underwater robotic surveys. *J Field Robot*, 27(1):21–51. <https://doi.org/10.1002/rob.20324>.
- Kayal, M., Lenihan, H. S., Brooks, A. J., Holbrook, S. J., Schmitt, R. J., Kendall, B. E., 2018. Predicting coral community dynamics using multi-species population dynamics models. *Ecol Lett*, 21(12), pp. 1790-1799.
- Kocak, D. M., Caimi, F. M., 2005. The current art of underwater imaging with a glimpse of the past and vision of the future. *Mar Technol Soc J*, 39(3): 5–26. <https://doi.org/10.4031/002533205787442576>
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J., 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 82, pp. 10-26.
- Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S., Gabbianelli, G., 2013. Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sens*, 5(12): 6880–6898. <https://doi.org/10.3390/rs5126880>
- Menna, F., Nocerino, E., Fassi, F., Remondino, F., 2016. Geometric and optic characterization of a hemispherical dome port for underwater photogrammetry. *Sensors*, 16(1): 48.
- Mora C (2008) A clear human footprint in the coral reefs of the Caribbean. *Proc. R. Soc. B-Biol. Sci* 275: 767–773
- Nex, F., Remondino, F., 2014. UAV for 3D mapping applications: a review. *Appl Geomat*, 6(1), pp. 1-15.
- Neyer, F., Nocerino, E., Gruen, A., 2018. Monitoring coral growth- the dicotomy between underwater photogrammetry and geodetic control network. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2)
- Ogundare, J. O., 2015. *Precision surveying: the principles and geomatics practice*. John Wiley & Sons, pp. 267-328.
- Pennisi E (2002) Survey confirms coral reefs are in peril. *Science* 297, pp. 1622b–1623b.
- Rossi, P., Mancini, F., Dubbini, M., Mazzone, F., Capra, A., 2017. Combining nadir and oblique UAV imagery to reconstruct quarry topography: Methodology and feasibility analysis. *Eur J Remote Sens*, 50(1), pp. 211-221.
- Royer, J. P., Nawaf, M. M., Merad, D., Saccone, M., Bianchimani, O., Garrabou, J., Drap, P., 2018. Photogrammetric Surveys and Geometric Processes to Analyse and Monitor Red Coral Colonies. *J Mar Sci Eng*, 6(2), pp. 42.
- Rupnik, E., Nex, F., Remondino, F., 2014. Oblique multi-camera systems–orientation and dense matching issues. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(3): 107. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W1-107-2014>
- Skarlatos, D., Agrafiotis, P., Menna, F., Nocerino, E., Remondino, F., 2017. Ground control networks for underwater photogrammetry in archaeological excavations. *Proceedings of the 3rd IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, MetroArcheo 2017* October 23-25, 2017, Lecce, Italy
- Snavely N., Seitz S. M., Szeliski R., 2006. Photo tourism: exploring photo collections. *3D. ACM T Graphic*, 25(3), pp. 835-846.
- Toschi, I., Rivola, R., Bertacchini, E., Castagnetti, C., Dubbini, M., Capra, A., 2013. Validation tests of open-source procedures for digital camera calibration and 3D image-based modelling. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W2: 647-652. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-647-2013>.
- Trapon, M. L., Pratchett, M. S., Adjeroud, M., Hoey, A. S., Baird, A. H., 2013. Post-settlement growth and mortality rates of juvenile scleractinian corals in Moorea, French Polynesia versus Trunk Reef. *Australia. Mar Ecol Prog Ser*, 488, pp. 157-170.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare Russell Schmitt e Sally Holbrook, professori dell'UC Santa Barbara, in qualità di co-principali investigatori di Moorea IDEA, il prof. Armin Gruen e Matthias Troyer, ETH Zurich, per l'invito a collaborare alla

ricerca. Un ringraziamento speciale al prof. Armin Gruen, dr. Erica Nocerino e dr. Fabian Neyer, ETH di Zurigo, per la discussione scientifica e la condivisione di opinioni sull'elaborazione dei dati.

IL PROCESSO DI VALIDAZIONE DI UN DATABASE 3D MULTISORGENTE E MULTIRISOLUZIONE PER LE INFRASTRUTTURE FERROVIARIE

THE VALIDATION PROCESS OF A 3D MULTISOURCE/MULTIRESOLUTION MODEL FOR RAILWAY INFRASTRUCTURES

M. Corongiu ^a, G. Tucci ^a, F. Flamigni ^b, A. Comparini ^b, F. Panighini ^a, E.I. Parisi ^a, L. Arcidiaco ^c

^a Laboratorio SCHEMA (Survey, Cultural Heritage, Monitoring, Analysis) - Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale (DICEA), Università di Firenze, Via di S. Marta 3, 50139, Firenze (Italy)
(grazia.tucci, manuela.corongiu, francesca.panighini, ericaisabella.parisi)@unifi.it

^b Geoin srl, Via Panciatichi 110, 50127 Firenze (Italy) – (f.flamigni, a.comparini)@geoin.it

^c Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Bioeconomia (CNR IBE). Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI), (Italy) - lorenzo.arcidiaco@ibe.cnr.it

PAROLE CHIAVE: qualità dati geografici, specifiche, infrastruttura ferroviaria, procedure di valutazione, certificazione, database spaziali multisorgente, BIG data

KEY WORDS: geographic data quality, data product specification, railway infrastructure data, evaluation procedures, certification, multisource spatial databases, BIG data

Questo articolo è il sunto tradotto in italiano della versione sottomessa allo Special Issue “The Impact of Innovative and Emerging Technologies on the Surveying Activities” della rivista APPLIED GEOMATICS collegato al convegno SIFET 2018.

RIASSUNTO

L'evoluzione tecnologica che segna il passaggio dalla cartografia tradizionale ai database topografici è spesso accompagnata, a livello di rilievo, dall'adozione di diverse fonti e strumenti per l'acquisizione di dati: telerilevamento, droni, laser scanner, ecc. Questo approccio ha però un impatto significativo sulla validazione dei dataset geografici: ogni singola fase deve tenere conto dello specifico sensore utilizzato e delle sue caratteristiche tecniche, ma anche delle congruenze tra i diversi passaggi che contribuiscono alla creazione di un database. Pertanto, la specifica del prodotto finale è solo il primo passo verso la certificazione della qualità del dataset, cui andrà aggiunta anche la correttezza dei processi intermedi eseguiti. In tale contesto, dove la standardizzazione dei processi di acquisizione non ha raggiunto un livello di stabilità consolidata, il presente contributo fa il punto sulle questioni critiche incontrate durante un processo di certificazione di qualità dei prodotti per l'infrastruttura geografica nel contesto ferroviario. Il processo di validazione è stato condotto per gradi. Per i prodotti aerofotogrammetrici tradizionali, la validazione ha seguito una prassi ormai consolidata mentre per quelli più innovativi acquisiti da treno con MMS (Mobile Mapping Systems) ha seguito una profilazione degli standard ISO sulla qualità. Infine, per il DBGT (database geotopografico) sono state combinate procedure massive (informatiche) con quelle a campione per le accuratèzze tematiche/metriche delle singole istanze. La notevole varietà e la quantità di dati forniti nella logica BIG Data, l'armonizzazione tra i diversi processi di valutazione, la tempistica serrata per la convalida dei vari lotti, sono stati ulteriori fattori caratterizzanti dei procedimenti attuati.

ABSTRACT

The technological evolution that marks the passage from traditional cartographies towards topographic databases is often characterised, at a surveying level, by the availability of different sources and tools for acquiring data: remote sensing, drones, laser scanner, etc.

These multiple sources have a significant impact during the dataset evaluation phases. For each specific sensor used, its technical characteristics have been taken into account. Therefore, data product specification is the first step towards understanding which spatial database quality and requirements must be satisfied. While sources and tools have yet to be established in the processing and methodologies, this article try to focus on critical issues encountered during the validation process of a geographical infrastructure in the railway context. The validation process has been carried out by a step-by-step approach. Basically, a consolidated validation methodology has been adopted for traditional products also carried out by new sensors, while a comparison with ISO standard specifications has been followed for innovative surveys such as MMS (Mobile Mapping Systems). Finally, for the GeoTopographic DataBase (DBGT) both massive (informatic procedures) and traditional thematic evaluation of accuracy have been combined. Therefore, the adherence with standards have been referred to consider both the quality of data and the conformity to data product specifications.

The considerable variety and the amount of the provided data in term of BIG Data, the harmonization between different evaluation processes, the need to validate with short time, the lack of on-the-field surveys, have been hardly considered as additional requirements of quality certification of the adopted procedures.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, i dati spaziali sono stati implementati combinando e armonizzando diversi dataset a loro volta acquisiti tramite diversi sistemi e sensori: rilievi aerei, rilievi terrestri, droni, LiDAR, ecc. Di conseguenza, il processo di validazione multirisoluzione e multiaccuratezza ha assunto connotazioni complesse e non consolidate rispetto ai criteri di certificazione della qualità di ogni singolo dataset, oltre che alla congruenza di tutte le informazioni in un database spaziale integrato. Il modello di gestione che ne deriva, non può che afferrare ad un approccio da BIG data per l'onerosità e la complessità dei dati trattati.

Questa notevole quantità di dati raccolti da diverse fonti ha aperto a una più ampia gamma di possibilità e approfondimenti per futuri miglioramenti tecnologici che copriranno nuove aree di applicazione (Thaduri et al. 2015).

Insieme alle criticità da BIG data, quindi, devono essere presi in considerazione due aspetti: le diverse fasi di fornitura e l'evoluzione della cartografia in banche dati topografiche, di seguito spiegate.

1.1 Le diverse fasi di fornitura di dati spaziali multidimensionali

Nel contesto di un processo di produzione di mappe cartografiche, un aumento significativo della disponibilità di diversi strumenti e sensori porta a una maggiore complessità delle strutture dati. In effetti, il classico processo di acquisizione è stato, in passato, principalmente ottenuto per via aerofotogrammetrica, finalizzato alla creazione di una mappa in un momento specifico per un determinato territorio. In questo caso, i processi, i tempi e le metodologie per la validazione dei dataset possono essere considerati stabili e standardizzati. Lo stesso non si può dire per un processo dove l'acquisizione avvenga con modalità multisorgente e multirisoluzione. In tale circostanza, il processo di validazione di ogni singola fase dovrebbe essere eseguito in conformità alla tecnologia adottata e successivamente integrato in un'infrastruttura geografica complessa.

Allora il prodotto cartografico finale sarà il risultato di un'elaborazione combinata di diverse fonti di dati. Il processo di implementazione sarà quasi sempre costituito da una sequenza di passaggi in cui il risultato di una fase sarà il punto di partenza di quella successiva. Le modalità di validazione di ciascun prodotto intermedio dipenderanno dalla gestione del processo da eseguire.

1.2 Cartografia tecnica vs database spaziali

In un contesto tradizionale, la cartografia di riferimento è redatta da un'entità istituzionale competente. In Italia, una CTR (Carta Tecnica Regionale) è realizzata da Enti Locali e rappresenta una base cartografica a grande scala (1:2.000, 1:5.000, 1:10.000). Per gestire grandi infrastrutture di trasporto a sviluppo longitudinale su territorio come strade, ferrovie, ecc., si necessita di dati spaziali sufficientemente precisi ma che coprano ampi territori, a cavallo di diverse Regioni. Se si vuole inquadrare congruentemente il dataset di una infrastruttura di trasporto con il territorio circostante occorre farsi carico dell'armonizzazione delle diverse CTR, tra loro, e con l'infrastruttura di trasporto considerata.

Inoltre, recentemente, il prodotto cartografico si è evoluto, passando in pochi decenni da una mappa di riferimento di base a complessi dataset composti da geometrie 3D, vincoli topologici, relazioni con i database, immagini, modelli

numerici, ecc. Spesso ogni contenuto deriva dall'interazione tra diversi sensori integrati con procedure implicite e complesse di cui non rimane traccia nel prodotto finale. Pertanto, anche l'attività di certificazione della qualità è diventata complessa e non è in grado di ignorare l'aspetto intermedio, soprattutto se ha contribuito al prodotto finale.

Al giorno d'oggi, dove la cartografia è diventata un database spaziale, l'esigenza di garantire un corretto livello di interoperabilità richiede un database topografico di riferimento che sia sufficientemente robusto da resistere all'evoluzione tecnologica e abbastanza flessibile da ricevere gli aggiornamenti continui nel tempo. Tuttavia, con riferimento alla specifica per i DBG (database geotopografici) (DM, 2012), esse si riferiscono a specifiche di contenuto in termini di modello concettuale, quindi qualsiasi Ente Locale può implementarle secondo le proprie esigenze a livello fisico e conformemente alle specifiche necessità di accuratezza spaziale e temporale.

1.2.1 Verso il 3D city model

Il 3D city model considera una rappresentazione di un ambiente urbano con una geometria tridimensionale di tutti gli oggetti e strutture presenti, in cui gli edifici sono le caratteristiche più importanti. La definizione di requisiti attraverso domini spaziali 3D tematici è stata descritta in studi recenti (Biljecki et al., 2015). Tuttavia, in passato, il 3D city model è stato principalmente adottato per scopi di visualizzazione, ma al giorno d'oggi, un numero crescente di applicazioni, ha necessitato di ulteriori informazioni rispetto a quelle disponibili per le sole rappresentazioni ancorché standardizzate (Kolbe, 2009). Solo per citare alcuni esempi: simulazioni e analisi dei trend di cambiamenti del suolo, pianificazione e programmazione urbana, gestione delle catastrofi, sicurezza nazionale sono solo alcuni esempi di applicazioni che necessitano di analisi anche complesse sul territorio basate su banche dati opportunamente strutturate.

1.2.2 Standard sul modello di rete ferroviaria

Il riferimento standard per la modellizzazione delle informazioni spaziali tematiche è rappresentato dalla Direttiva INSPIRE (INSP., 2007). Uno dei principali riferimenti standard nel contesto delle ferrovie è rappresentato dalla specifica sulle reti di trasporto (INSP.D2.8.I.7, 2014) che definisce il modello di rete di trasporto. In questo standard, i dati si riferiscono ad oggetti topografici correlati al trasporto stradale, ferroviario, marittimo e aereo e fornisce un approccio coerente ai modelli spaziali di rappresentazione (ingombro spaziale e struttura a grafo della rete).

Tutti i temi di dati spaziali devono seguire le indicazioni della Direttiva INSPIRE in termini di modello concettuale GCM (Generic Conceptual Model) (INSP.D2.10.1, 2013) e GNM (Generic Network Model) (INSP.D2.10.1, 2013). Il GNM comprende la definizione di: i) meccanismi di connessione di rete per stabilire la connettività transfrontaliera o intermodale, ii) riferimento a oggetti per supportare il riutilizzo delle informazioni e iii) riferimento lineare per supportare e collegare le diverse proprietà di trasporto agli elementi di trasporto. A loro volta si basano su diverse serie ISO di standard di informazione geografica per fornire le basi di aspetti specifici dell'interoperabilità in particolare con lo standard sui sistemi di trasporto intelligenti come l'LBS (Location Based Services) (ISO19148, 2012).

Per quanto riguarda il modello topologico geometrico delle reti di trasporto (INSP.D2.8.I.7, 2014), le specifiche dei dati definiscono uno schema concettuale a grafo con eventi proiettati come posizioni singole su questo e memorizzandone la

progressiva metrica. Per tale motivo il posizionamento sulle strutture a grafo avviene adottando il sistema di riferimento lineare (Linear Reference System) basato sul concetto di ascissa curvilinea. Tale modello è adatto per trasporti, servizi pubblici, servizi basati sulla posizione e altre applicazioni che definiscono posizioni relative ad oggetti lineari. La specifica dei dati include tre tipi di geometria: (a) (area d'interesse), (b) linea della mezzera come proiezione di un dato evento lungo l'elemento di grafo e (c) punti degli oggetti. I tipi (a) e (b) possono essere rappresentazioni alternative degli stessi fenomeni del mondo reale a cui gli utenti possono associare le proprie informazioni (oggetti). Il tipo (c) rappresenta sia i nodi della rete di trasporto che i punti d'interesse da proiettare su grafo. Il tipo di rappresentazione spaziale di base è un vettore 2D.

La topologia viene gestita nella specifica dei dati in modo implicito piuttosto che esplicito, principalmente al fine di mantenere il modello il più semplice possibile poiché si prevede che la maggior parte delle applicazioni utilizzerà i dati di rete in un ambiente topologico. Di conseguenza esiste il prerequisito per la "topologia implicita", in cui i dati forniti devono essere sufficientemente puliti e in grado di costruire una topologia automatizzata all'interno dell'applicazione dell'utente. Questo concetto è inquadrato da requisiti specifici, comprese le informazioni sulla qualità dei dati. In generale, anche se i modelli di rete sono semanticamente ricchi e complessi, rappresentano solo la topologia 2D della rete oltre alle informazioni logiche sulla connettività di rete. Una rappresentazione della geometria 3D potrebbe essere associata all'uso di funzionalità multipatch, tuttavia queste non sarebbero accoppiate alla modellazione di rete, ma solo a una visualizzazione 3D pura. Ciascuno dei modelli di dati di dominio rappresenta un'astrazione 2D della rispettiva rete ferroviaria nel mondo reale. Ogni modello di rete ferroviaria è specificatamente definito, non facilmente utilizzato per differenti tipi di rete ferroviaria, nel contempo nello standard non viene fornito alcun modello/database comune che integri modelli diversi. Tuttavia, il GNM consente la tracciabilità di un network o altri tipi di analisi dello stesso (Adolph et al., 2013).

2. OGGETTO: LA VALIDAZIONE DI DATASET GEOTOPOGRAFICI 3D E MULTISORGENTE

Questo articolo è focalizzato sulla descrizione degli aspetti critici incontrati durante le fasi di validazione dei dati spaziali nel contesto delle ferrovie, prendendo in considerazione sia metodiche tradizionali che innovative, integrandole, al fine di certificare la qualità dei dataset multisorgente e dei processi attuati per acquisirli. Il processo di validazione è stato condotto con un approccio graduale di validazione step-by-step delle singole fasi elementari. Fondamentalmente, è stata adottata una metodologia di verifica ormai consolidata per i prodotti di acquisizione aerofotogrammetrica tradizionale, mentre per i prodotti più innovativi e recenti, quali ad esempio le nuvole di punti acquisite da laser scanner montato su treno mediante sistemi MMS (Mobile Mapping Systems), si è fatto riferimento agli standard ISO sulla qualità dei dati geografici. Infine, per il DBGT sono state combinate procedure massive (informatiche) proprie del database con quelle a campione per le accuratèzze tematiche/metriche delle singole istanze.

Per garantire la conformità tra i diversi prodotti di fornitura, la valutazione della qualità è stata effettuata innanzitutto al termine ogni fase del processo produttivo, diventando questa propedeutica per la validazione di quella successiva. Inoltre, è necessario un ripensamento del processo di validazione nel

contesto di banche dati spaziali per tener conto della sorgente (e quindi dell'accuratezza) di acquisizione di una certa informazione, oltre che delle congruenze tra classi di oggetti nel loro insieme. Le procedure dovrebbero mirare a convalidare la conformità del contenuto e della struttura dei dati con il modello spaziale indicato nelle specifiche di contenuto, compresa la geometria e i vincoli topologici (Carrion et al., 2008). Infatti, la principale differenza tra un prodotto tradizionale della cartografia ed i contenuti di una più complessa SDI (Spatial Data Infrastructure) è la dipendenza di ogni fase da quella successiva in termini di prodotto di qualità e in generale, come coerenza tra le diverse parti del dataset. In questo contesto, la certificazione di qualità non si è fermata alla verifica di conformità rispetto alla specifica del prodotto, ma si è spinta a controlli di tipo analitico di congruenza tematica e spaziale sia dei singoli oggetti territoriali che in funzione del contesto nel quale si inseriscono.

Con riferimento allo standard sulle specifiche di prodotto (ISO19131, 2018), queste definiscono una descrizione dettagliata di uno o più dataset, corredati da informazioni aggiuntive che ne consentano la creazione, la fornitura e l'utilizzo da parte di un altro soggetto. In sintesi, lo standard definisce come formalizzare una descrizione tecnica precisa e formale del prodotto geografico che si vuole ottenere. Lo scopo di questo standard internazionale è quello di indicare come fornire i requisiti sul contenuto delle specifiche del prodotto in conformità con altri standard esistenti per le informazioni geografiche.

Quindi, conformemente a quanto indicato in questo standard, le specifiche per i DBGT (DM, 2012) sono state integrate con le specifiche tecniche di fornitura e le specifiche amministrative oltre che integrate con dati specifici del caso in esame (ambito ferroviario) dato che, come dichiarato nelle specifiche per i DBGT (DM, 2012), i dati territoriali ivi descritti costituiscono solamente un primo nucleo informativo da integrare con altri database tematici.

2.1 Specifiche di prodotto dei dati geografici e standard di qualità

La descrizione della qualità dei dati geografici facilita il confronto e la selezione di dataset su misura, per esigenze e requisiti specifici dell'applicazione. Descrizioni complete sulla qualità dei dati incoraggiano la condivisione, l'interscambio e l'uso appropriato dei dataset. Le informazioni sulla qualità dei dati geografici consentono al produttore di dati di valutare in che misura un dataset soddisfi i criteri stabiliti nelle specifiche di prodotto e aiuta gli utenti a valutare la capacità di un prodotto verso i requisiti di una particolare applicazione d'interesse. Ai fini della valutazione della qualità, sono state utilizzate le coerenze delle procedure definite nello standard sulla qualità dei dati geografici (ISO9157, 2013). Le diverse fasi e livelli di azioni necessarie alla valutazione di qualità sono state le seguenti:

- Risultati finali;
- Validazione;
- Accessibilità;
- Aggiornamento;

Considerando l'azione 1, un aspetto critico ha riguardato le fasi di assemblaggio dei risultati derivanti da ogni controllo specifico con le congruenze di aggancio tra lotti omogenei, oltre alla messa a sistema di processi dove la validazione di ogni step risultasse propedeutico all'avvio delle validazioni agli step successivi. In generale, i pesi da attribuire a ciascuna fase, le modalità di armonizzazione di diversi dataset multisorgente, la

certificazione di qualità complessiva del database, sono solo alcuni degli aspetti peculiari cui si è dovuto far fronte nella gestione delle fasi di certificazione di qualità.

Con riferimento allo standard sulle specifiche di prodotto dei dati geografici (ISO19131, 2018) si è dovuto tener conto di quanto richiesto nel caso studio in merito alle tempistiche ed alle congruenze nelle forniture dei vari lotti, in quanto esse hanno un impatto sul processo di valutazione sia della qualità in ciascun lotto che di una certificazione generale dei risultati.

Con riferimento allo standard sulla qualità dei dati geografici (ISO19157, 2013) occorre considerare diversi “elementi” e “sotto-elementi”. Per descriverli, vengono utilizzate le “unità di qualità dei dati”, ovvero la combinazione di “scopo” ed “elementi di qualità”. Gli “elementi di qualità dei dati” sono componenti che descrivono determinati aspetti della qualità dei dati geografici, organizzati in diverse “categorie”.

Le “categorie” considerate nella valutazione della qualità per il caso studio sono:

- Completezza (C1): definita come presenza e assenza di caratteristiche, attributi e relazioni. Consiste in:
 - commissione (C1_1): dati in eccesso presenti in un set di dati;
 - omissione (C1_2): dati assenti da un set di dati;
- Coerenza logica (C2): definita come il grado di aderenza alle regole logiche della struttura, dell'attribuzione e delle relazioni logiche (la struttura dei dati può essere concettuale, logica o fisica). Se queste regole logiche sono documentate altrove (ad esempio, in una specifica del prodotto dati), è necessario farne esplicito riferimento. Consiste in:
 - coerenza concettuale (C2_1): aderenza alle regole dello schema concettuale;
 - coerenza del dominio (C2_3): aderenza dei valori ai domini dei valori;
 - coerenza del formato (C2_4): grado in cui i dati vengono archiviati conformemente alla struttura fisica del set di dati;
 - coerenza topologica (C2_5): correttezza delle caratteristiche topologiche esplicitamente codificate di un set di dati;
- Precisione posizionale (C3): definita come accuratezza della posizione di un dato all'interno di un sistema di riferimento spaziale. Consiste in:
 - precisione assoluta o esterna (C3_1): vicinanza dei valori di coordinate assegnati a valori accettati come veri;
 - accuratezza relativa o interna (C3_2): vicinanza delle posizioni relative dei dati alle rispettive posizioni accettate come vere;
 - precisione della posizione dei dati con griglia (C3_4): vicinanza dei valori di posizione spaziale dei dati grigliati su valori accettati come veri;
- Accuratezza tematica (C4): è definita come l'accuratezza degli attributi quantitativi e la correttezza degli attributi non quantitativi rispetto alle classificazioni delle istanze e delle loro relazioni. Consiste in:
 - correttezza della classificazione (C4_1): confronto delle classi o dei loro attributi assegnati a un universo di discorso (ad es. Verità di base o dati di riferimento);
 - correttezza dell'attributo non quantitativo (C4_2): misura della correttezza o meno di un attributo non quantitativo;
 - accuratezza dell'attributo quantitativo (C4_3): vicinanza del valore di un attributo quantitativo a un valore accettato come o noto per essere vero;

• Qualità temporale (C5): è definita come la qualità degli attributi e delle relazioni temporali del dataset. Consiste in:

- accuratezza di una misurazione del tempo (C5_1): vicinanza delle misurazioni del tempo riportate a valori accettati o conosciuti come veri;
- coerenza temporale (C5_2): correttezza dell'ordine degli eventi;
- validità temporale (C5_3): validità dei dati rispetto al tempo;

Infine, abbiamo anche considerato la “categoria”:

• Misure di qualità dei dati (D1): un elemento di qualità dei dati dovrebbe riferirsi a una sola misura di qualità del dato, scelta come riferimento univocamente e completamente descritta tramite un identificatore ed una descrizione associata.

3. IL CASO STUDIO: INFRASTRUTTURE DELLA RETE FERROVIARIA

L'infrastruttura ferroviaria di cui parleremo in questo articolo si riferisce ai dataset forniti per il progetto italiano MUIF (Modello Unico dell'infrastruttura Fisica), sull'infrastruttura di RFI (Rete Ferroviaria Italiana). Il laboratorio SCHEMA (laboratorio congiunto tra Università degli Studi di Firenze e L'Istituto Geografico Militare), in tale contesto, è responsabile della certificazione di qualità dei prodotti cartografici.

A livello generale, il progetto MUIF ha lo scopo di gestire tutte le informazioni richieste dall'infrastruttura ferroviaria, in un unico modello, in termini di acquisizione e accessibilità dei dati, strutturati congruentemente per essere serviti attraverso le applicazioni WebGIS-WebService (Corongiu et al., 2018).

3.1 I dataset multisorgente

I dataset del MUIF utilizzati come caso studio si riferiscono ai seguenti prodotti:

- ortofoto (Ground Sample Distance - GSD=0.10 m);
- DTM (Digital Terrain Model) - DSM (Digital Surface Model) (1p.to/m²);
- DBGT integrato e multiprecisione, alla scala 1:1.000 nelle stazioni ferroviarie, alla scala 1:2.000 in aree di rispetto di 120m/500m lungo la tratta ferroviaria, Figura 1.

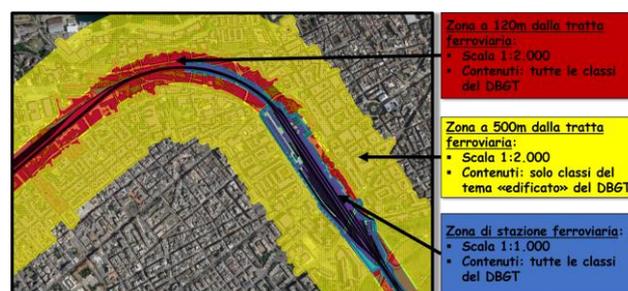


Figura 1 - database multirisoluzione

I dataset sono stati acquisiti da:

- Fotogrammetria aerea (GSD=0.08 m);
- Rilievo LiDAR da aereo (4 punti/m²);
- Rilievo MMS da treno con i seguenti prodotti: immagini side-by-side, immagini a 360° (sei scatti sincroni), nuvole di punti di telemetria con l'attribuzione del colore RGB (Red Green Yellow) da immagini a 360° (Fig. 2).



Figura 2 - Nuvole di punti da laser scanner telemetrico montato su treno

Nel contesto ferroviario, i dataset d'interesse sono caratterizzati da un significativo livello di dettaglio sia nella dimensione spaziale che in quella temporale, integrati congruentemente nel contesto topografico nel quale si inseriscono.

Per quanto riguarda le informazioni ferroviarie di dettaglio, vi sono alcune specificità da tenere in conto nel processo di validazione. Le recenti politiche europee stabiliscono che i gestori delle infrastrutture ferroviarie debbano concentrarsi sulla riduzione dei costi operativi ma, allo stesso tempo, aumentare le prestazioni sia delle attività finanziarie che della sicurezza. Per perseguire tali obiettivi, dal punto di vista tecnologico, uno dei componenti principali del sistema ferroviario è costituito da un CMMS (Computerized Maintenance Management System) che di fatto, implementando una LAM (Linear Asset Management), gestisce il posizionamento e l'anagrafica di ASSET ferroviari in un sistema "a grafo". Conseguentemente, l'utilizzo della segmentazione dinamica consente la proiezione di eventi lungo la linea di mezzieria del binario caratterizzandoli come attributi della rete ferroviaria. Il CMMS consente inoltre la descrizione delle relazioni lineari che indicano intersezioni e incroci paralleli o di pendenza di attività lineari.

L'implementazione di un sistema di monitoraggio delle risorse ferroviarie basato su un modello di dati semantici offre vantaggiose possibilità di integrazione, adattabilità e compatibilità dei dati rispetto agli approcci tradizionali. La mancanza di incentivi all'interoperabilità negli ultimi anni ha generato uno scenario non coordinato in cui diverse compagnie spesso gestivano rotte concorrenti tra le stesse destinazioni. In tale contesto, risulta evidente come l'impatto in termini di interoperabilità tra diversi modelli di dati sia il principale aspetto critico su cui concentrarsi per trovare una soluzione comune anche nella gestione dei dati spaziali ferroviari (Thaduri et al., 2015).

3.2 Le specifiche del prodotto dei dati per il DBGT

In termini di specifiche del prodotto dei dati geografici per il caso studio, le norme per i DBGT (DM, 2012) sono state profilate e armonizzate per consentirne l'implementazione

fisica. Pertanto, i contenuti sono stati organizzati in un unico database integrandolo ASSET ferroviari specifici. Esempio di ASSET sono; deviatoi, intersezioni, manufatti ferroviari, portali di alimentazione, ecc.). Questi sono stati integrati nel DBGT modellandoli coerentemente con gli altri oggetti di natura geotopografica (Fig. 3).



Figura 3 – oggetti semantici del DBGT integrato

Le risorse ASSET integrate nel DBGT mantengono il collegamento a ciascuna applicazione tematica specifica, tramite un identificatore esterno di connessione con tali archivi.

4. METODOLOGIE DEL PROCESSO DI VALIDAZIONE

4.1 La validazione nel contesto ferroviario

Per l'estensione della rete ferroviaria sul territorio nazionale, la fornitura è stata organizzata in lotti, e, per ogni lotto, suddivisa in funzione della fonte di rilevazione. Pertanto, i processi di validazione dei prodotti intermedi hanno tenuto conto della congruenza sia tra contenuti multisorgente che tra lotti. Per la prima questione di congruenza sono stati valutati diversi tipi di dataset (ortofoto vs. LiDAR, ecc.). Mentre per la seconda questione di congruenza sono stati considerati lotti adiacenti dello stesso tipo di dataset.

Di conseguenza, la certificazione di qualità dei dati spaziali non è stata ottenuta solo per semplice addizione del processo di validazione di ogni singolo tipo di dataset, ma andando a considerare anche tutte le dipendenze spazio/temporali, oltre alle congruenze richieste per dati multidimensionali, implementando regole, vincoli topologici e procedure in un unico DBGT. Questo approccio ha richiesto una definizione di un modello condiviso, tramite la realizzazione di una specifica di progettazione dei dati cartografici.

4.2 La validazione del rilievo fotogrammetrico aereo

Il rilievo aereo fotogrammetrico è stato profondamente rivoluzionato dall'avvento del digitale.

Le fotocamere a pellicola erano quasi tutte uguali per formato e prestazioni. A livello di lunghezze focali la scelta era ristretta a due tipologie: il grandangolo per la maggior parte degli impieghi e il teleobiettivo per le riprese finalizzate alla realizzazione di ortofoto. Le pellicole disponibili avevano una sensibilità standard per cui anche la risoluzione equivalente risultava costante. Tutto ciò comportava che l'intero processo di ripresa e di verifica potesse basarsi su set di parametri precostituiti. A una data scala cartografica corrispondeva una ben precisa scala fotogramma e questa poteva essere realizzata solo con una certa quota di sorvolo. Il processo di verifica e validazione risultava se vogliamo più semplice. Con il digitale ci si deve confrontare con molti sensori che variano per risoluzione e dimensione per la rapida evoluzione dei sensori optoelettronici. Le focali non sono più uno standard dovendosi sempre confrontare con la dimensione del sensore (sarebbe a

questo punto più corretto parlare di angoli di campo). La scala del fotogramma ha come equivalente nel digitale il GSD ovvero la dimensione della mattonella di territorio che corrisponde ad un pixel immagine che diventa quindi il parametro fondamentale per giudicare se un certo rilievo aereo è idoneo a rilevare cartografia con la scala (o livello di dettaglio) richiesta. Per misurare il GSD è necessario disporre del certificato di calibrazione della fotocamera, dei parametri di assetto dei singoli fotogrammi (oggi immediatamente disponibili perché forniti dal GNSS - Global Navigation Satellite System - e dall'IMU - Inertial Measurement Unit - dell'aereo) e di un modello numerico di dettaglio medio basso dell'area sorvolata (con una camera avente il pixel da 5µm ed una focale da 50mm una differenza di quota di 10 m produce una differenza del GSD di 1mm). Una volta ottenuta l'impronta al suolo di ogni fotogramma gli altri indicatori di qualità quali il ricoprimento dell'area oggetto del rilievo, l'adeguato ricoprimento longitudinale e trasversale dei fotogrammi possono essere analizzati in modo del tutto automatico. Ovviamente questi non sono i soli indicatori di qualità; occorre prendere in esame anche la qualità fotometrica delle immagini, l'eventuale presenza di elementi di disturbo quali nubi, incidenza delle ombre, per i quali è necessaria un'ispezione visiva anche se a campione.

Per gli aspetti metrici occorre considerare che da quando sono disponibili i sensori inerziali a bordo degli aerei il numero di GCP (Ground Control Point) per l'appoggio al suolo si è notevolmente ridotto.

Inoltre il costo esiguo del singolo fotogramma digitale (se confrontato col costo del fotogramma su pellicola) permette di acquisire fotogrammi con una notevole sovrapposizione, prerequisito fondamentale per poter impiegare tecniche SfM (Structure for Motion) per l'abbinamento automatico di punti omologhi (questo non ha effetti sulla precisione in quota in quanto la ridondanza nel numero di fotogrammi serve per poter "tracciare" in modo sicuro un certo particolare, in fase di misura il software provvederà a selezionare i soli fotogrammi con base adeguata). L'enorme numero di punti omologhi che è possibile utilizzare per la triangolazione aerea unitamente alla loro elevata confidenza ottenuta mediante procedure statistiche di eliminazione degli errori RANSAC (Random Sample Consensus) conferisce al blocco una grande rigidità, per cui la verifica potrà a sua volta basarsi su un esiguo numero di punti noti (check points) da rimisurare per stimare l'entità degli errori residui.

4.3 La validazione di DTM/DSM acquisiti da rilievo LiDAR su aereo

Con riferimento allo sviluppo territoriale di una infrastruttura di trasporto, l'orografia rappresenta uno dei dataset informativi fondamentali per comprendere connessioni, analisi di criticità, valutazione dei rischi, orientate alla pianificazione e gestione della relativa infrastruttura di dati territoriali. I sensori della tecnologia LiDAR creano strisciate grezze, mentre una fornitura generale è costituita da dataset organizzati in fogli di territorio. Il processo di suddivisione in tile è spesso uno strumento implicito all'interno del software in cui è difficile memorizzare informazioni sugli algoritmi utilizzati. Ciò rende il processo di certificazione della qualità di questo specifico aspetto piuttosto problematico. Sarebbe preferibile che la valutazione fosse effettuata considerando sia i prodotti finali che quelli intermedi (singole strisciate e nuvole di punti organizzate in fogli di fornitura), allo scopo di certificare sia la fornitura finale sia i processi seguiti.

Ad esempio, i file griglia sono il risultato di un processo di classificazione e interpolazione. L'interpolazione è efficace se i dati di origine sono sufficientemente densi considerando strisce grezze e nuvole di punti, per accertarsi che non esistano aree di sotto-campionatura. La correttezza della quota, inoltre, consente anche di verificare l'assenza di anomalie nei dati di origine. Quando si riscontrano anomalie solo nei file griglia, significa che si è verificato un errore durante il processo di interpolazione.

4.4 La validazione del rilievo da treno

Per quanto strettamente riguardante la sede ferroviaria, il dataset maggiormente significativo è rappresentato dalle nuvole di punti provenienti da laser scanner e immagini fotogrammetriche acquisite da treno. Per il caso studio il laser scanner è posizionato in coda al treno e rileva fino ad una distanza di circa 40 m dalla mezzera del binario, mentre le immagini stereoscopiche generano una nuvola di punti fino alla distanza di circa 25 m dalla mezzera del binario, con passo di acquisizione stabilito per il sistema di fotogrammetria di circa 2 m. Inoltre, nelle stazioni ferroviarie, dove la localizzazione degli asset ferroviari può essere esterna all'area coperta dal lidar da treno, vengono effettuati dei "rilievi aggiuntivi da terra" tramite laser scanner montati su zainetti, carrellini ferroviari, ecc. con caratteristiche simili alle precedenti. Ogni fase di integrazione nelle stazioni è comunque pianificata a priori.

Come accennato in precedenza, tutti i dataset forniti sono organizzati in lotti, come unità informative elementari omogenee, per garantire una buona gestione dei BIG data, consentendo così una valutazione della qualità dei risultati finali. Per ogni lotto, le nuvole di punti occupano circa 3-4 TB di spazio di archiviazione; poiché l'infrastruttura è divisa in 90 lotti, dobbiamo avere una dimensione dell'archivio di circa 300 TB. Con riferimento a quanto previsto nello standard (ISO19157, 2013), la valutazione della qualità è stata effettuata seguendo un approccio rigoroso sulla successione delle diverse fasi formali. Innanzitutto, il DQS (Data Quality Scope) è definito come gli elementi e le caratteristiche generali che identificano i dati su cui vengono condotti i controlli di qualità. Con riferimento al caso studio, gli elementi di base considerati sono stati:

- piano di acquisizione dei dati: definisce i dati da acquisire in termini di caratteristiche geografiche;
- GCP - punti di riferimento, misurati sul terreno, da utilizzare come parametro di confronto per valutare la precisione delle nuvole di punti;
- dati laser ferroviari: dati laser scanner acquisiti con MMS. Per ogni lotto esiste un solo tipo di dataset, ma può essere ottenuto da uno o più passaggi (corse) del treno sul quale è montato sia il laser scanner che il sistema fotogrammetrico, lungo la tratta ferroviaria. Conseguentemente gli output ottenuti saranno uno o più serie di nuvole di punti e una o più serie di immagini;
- nuvole di punti: costituito da una sequenza di dati laser, ordinati temporalmente, ogni acquisizione dà origine a una o più nuvole di punti. Per motivi di praticità nell'analisi, le nuvole di punti sono state a loro volta suddivise in sotto-nuvole (tronchi di nuvole di punti), lunghe circa 1 km sull'asse del binario. Tra tronchi adiacenti viene mantenuta un'area di sovrapposizione per consentirne la contiguità e corrispondenza;
- immagini 360: è una sequenza di immagini panoramiche acquisite simultaneamente ai dati laser, in modo che possa essere associato il loro valore RGB alla nuvola di punti laser.

Ogni immagine panoramica è geolocalizzata con punto 3D lungo l'asse del binario.

- dati fotogrammetrici da treno: si riferiscono a immagini stereoscopiche. Le immagini stereo sono ordinate temporaneamente, da ognuna di queste viene creata una nuvola di punti, grazie alle tecniche SfM. Ogni coppia stereo è geolocalizzata con punto 3D lungo l'asse del binario.

In linea con lo standard di qualità (ISO19157, 2013), gli elementi di qualità utilizzati sono:

- C1 - per verificare se tutti i file previsti dalle specifiche del prodotto siano stati forniti con la struttura appropriata;
- C2 - per verificare la congruenza sugli indici tra nuvole di punti ed immagini panoramiche, come anche la congruenza tra immagini stereoscopiche e nuvole di punti sintetiche;
- C2_4 - per verificare immagini panoramiche e stereoscopiche per quanto riguarda formato e luminanza;
- C2_5 - per verificare la contiguità delle immagini panoramiche, verificando anche che queste siano state acquisite nella frequenza definita per ogni corsa e che le nuvole di punti (sia laser che sintetiche) siano state correttamente colorate;
- C2_5 - per verificare la copertura di immagini panoramiche e stereoscopiche rispetto al piano di acquisizione;
- C2_5 - per verificare la copertura delle nuvole di punti laser considerando la loro impronta rispetto al piano di acquisizione;
- C2_5 - per verificare la contiguità delle nuvole di punti laser, in modo che i tronchi di nuvole di punti siano collegati in modo continuo e prestando anche attenzione a quando si sovrappongono diverse corse;
- C3_1 - per verificare la precisione delle nuvole di punti laser in relazione ai punti di controllo a terra;
- C3_2 - per verificare la precisione delle nuvole di punti stereoscopiche rispetto alle nuvole di punti laser, considerando il vicino punto di controllo a terra.

In tale contesto, la misura della qualità dei dati è stata associata a uno o più processi di valutazione in termini di DQM (Data Quality Measure) per ciascun DQE (Data Quality Element) di qualità degli stessi. Per il nostro caso di studio sono descritti in dettaglio due DQM (C2_4 e C2_5), come esemplificazioni particolari delle procedure da implementare.

Per quanto riguarda C2_4, l'identificazione di un metodo oggettivo per evidenziare anomalie nella valutazione della luminanza ha presentato alcuni aspetti critici. In particolare, la percentuale di immagini in cui l'esposizione presentava difficoltà di allineamento così come di colorazione delle nuvole era piuttosto elevata. Quindi, poiché ogni lotto comprende circa 250.000 immagini, è importante stabilire un livello di confidenza di qualità a priori, per evitare l'elaborazione di tutti i dataset. Per quanto riguarda la qualità dell'immagine, la procedura adottata trasforma il colore di ogni pixel in una intensità equivalente di grigio, quindi costruisce l'istogramma dei valori di grigio usando una scala di 256 classi. Come indice caratteristico della distribuzione dei grigi considera infine il valore della mediana, che viene assunto come valore di luminanza per l'immagine. Vengono classificate anomale, ovvero eccessivamente sovra o sottosposte, le immagini, il cui valore di luminanza è esterno a k volte la deviazione standard rispetto alla mediana delle luminanze complessive del campione. La definizione dell'ampiezza k e della percentuale p di immagini anomale che possono causare il rifiuto del dataset è uno dei principali aspetti da modulare. Poiché non espressa in termini di requisiti nelle specifiche del prodotto dati, questa scelta è stata fatta dal verificatore imponendo $k=2.5$ e $p=0.03$. Le considerazioni che inducono a fissare soggettivamente il parametro soglia k a 2.5 sono costituite dal fatto che in una distribuzione normale standard, il 99% circa dei campioni

ricade appunto nell'intervallo centrato sulla media (mediana) con raggio 2.5 volte la deviazione standard (SD). Il valore massimo di errore ammissibile nel rilievo cartografico è stato inoltre fissato dal committente alla soglia del 3%, per questa ragione si è ritenuto ragionevole estenderne la validità anche all'acquisizione delle immagini, da cui l'impostazione di p a 0.03.

Un altro aspetto critico era legato alla valutazione dell'intero dataset, tenendo conto dei tempi di elaborazione dovuti a questo controllo. Per ovviare a questo problema, secondo la valutazione SampleBasedInspection (ISO19157, 2013), è stata eseguita una procedura statistica, riducendo il più possibile il campione ma mantenendo comunque una valutazione affidabile. Per il caso in esame si è assunto che la percentuale di errore in un campione ridotto con un'ampiezza N sia la stima dell'errore reale sconosciuto. Pertanto, l'intervallo confidenziale è stato calcolato con livello di significatività (α)=0.01 ed una validazione positiva è stata concessa per un valore di stima inferiore a p e limite superiore nell'intervallo di confidenza inferiore a 0.06, ovvero il doppio dell'errore reale accettabile p . Inoltre, in questo caso, è sembrato ragionevole stabilire un'ampiezza del campione di $N = 300$ come un compromesso tra il tempo di elaborazione e l'intervallo di ampiezza accettabile.

Per quanto riguarda C2_5, il problema principale era legato alla dimensione dei dati da convalidare. Ciascun tronco di nuvole di punti può contenere oltre 20 GB e numero complessivo di tronchi per ogni fornitura generalmente superiore a 200. Oltre a ciò, è stato necessario implementare la validazione automatica della contiguità tra le nuvole di punti. Per il caso studio, sono stati calcolati i tronchi di confine di ogni corsa e sono state considerate le zone di reciproca sovrapposizione (FootPrints), quindi è stato scelto un punto interno per il confronto rispetto alle nuvole di punti in cui erano contenute. Questa valutazione è stata effettuata utilizzando un buffer cilindrico con raggio R e altezza h ed applicando l'algoritmo Iterative Closest Point (ICP). La convalida è accettabile se l'RMS è inferiore alla soglia e . I valori dei parametri selezionati erano $R=0.5$ m, $h=2.0$ m ed $e=0.10$ m. Opzionalmente, è stata effettuata una valutazione tra densità corrispondenti, imponendone una soglia limite.

Come conclusione intermedia per questa fase, la valutazione del rilievo terrestre potrebbe essere espressa in termini di aspetti critici relativi all'identificazione del DQE e alla modellizzazione del DQM correlato.

La scelta di adottare modelli statistici di campionamento ha avuto un impatto decisivo sulla riduzione delle elaborazioni necessarie al completamento delle attività di validazione, soprattutto nei casi in cui la numerosità degli elementi da analizzare assumeva le dimensioni tipiche dei contesti BIG Data.

4.5 La validazione del database

In termini di validazione del database, sono stati considerati sia aspetti specifici che validazioni riferibili all'intero processo, dato che l'acquisizione dei contenuti è ottenuta da diverse fonti, in momenti diversi, raccogliendo dati esistenti e monitorandoli e armonizzando oggetti topografici di base (DBGT) con oggetti tematici specifici dell'ambito ferroviario.

La validazione formale e la certificazione di qualità dei prodotti cartografici è stata eseguita seguendo le specifiche di prodotto dei dati ed in conformità agli standard internazionali (ISO19131, 2018 e ISO19157, 2013).

Le specifiche di prodotto definiscono quelle caratteristiche, attributi e relazioni che sono considerati importanti e devono

essere garantiti congruenti nel dataset di fornitura. Il DBGT è implementato secondo la metodologia del GeoUML (<http://geo.spatialdbgroup.polimi.it/en/>). La metodologia GeoUML è supportata dagli strumenti GeoUML, tra questi sono stati considerati:

- GeoUML Catalogue, che supporta la definizione di schemi concettuali (specifica) e la specifica di alcuni parametri utilizzati nella generazione di schemi fisici in base ai modelli di implementazione scelti.
- GeoUML Validator, che esegue il controllo di conformità di un dataset o di un database rispetto a una specifica (schema concettuale) prodotta dal GeoUML Catalogue.

Le relazioni di base del database e i vincoli topologici all'interno di una classe o tra classi diverse sono stati autocertificati dalla ditta esecutrice tramite l'uso del GeoUML Validator (Fig. 4) e documentati su specifici report.

| Elenco dei vincoli GeoUML controllati |
|--|
| SCCONSTRAINTNAME |
| (Sup_sede.uso = "autostradale"OR Sup_sede.uso = "stradale") PONTE.Sup_sede.superficie (INT) esiste (AC_VEI.SottoareeDi_Sede(Sede = "su ponte/viadotto/cavalcavia") , AR_VMS.SottoareeDi_Sede(Sede = "su ponte/viadotto/cavalcavia")) |
| (Sup_sede.uso = "pedonale") PONTE.Sup_sede.superficie (INT) esiste AC_PED.SottoareeDi_Sede(Sede = "su ponte/passerella pedonale") |
| (uso = "autostradale"OR uso = "stradale") GALLER.Sup_sede.superficie (INT) esiste (AC_VEI.SottoareeDi_Sede(Sede = "in galleria") , AR_VMS.SottoareeDi_Sede(Sede = "sotterraneo")) |
| (uso = "ferroviario") GALLER.Sup_sede.superficie (INT) esiste SD_FER.SottoareeDi_Sede(Sede = "in galleria/sottopassaggio pedonale") |
| (uso = "pedonale") GALLER.Sup_sede.superficie (INT) esiste AC_PED.SottoareeDi_Sede(Sede = "in galleria/sottopassaggio pedonale") |
| @ AB_CDA.Estensione BND compostoDa AB_CDA.trattiContorno3DDi_Tipo_sponda() |
| @ AB_CDA.Estensione PLN compostoDa AB_CDA.SottoareeDi_Livello() |
| @ AC_CIC.Estensione PLN compostoDa AC_CIC.SottoareeDi_Fondo() |

Figura 4 - Vincoli topologici e GeoUML Validator

Per quanto riguarda la scelta dei metodi di campionamento per la valutazione, è stato preso in considerazione l'allegato E dello standard sulla qualità dei dati geografici (ISO19157, 2013). In particolare, per quanto riguarda il processo di valutazione della qualità, dopo la definizione dell'unità di qualità dei dati, sono state prese in considerazione le seguenti fasi:

- specificazione delle misure di qualità dei dati: coerenza logica, completezza;
- specificazione delle procedure di valutazione della qualità dei dati;
- determinazione dell'output di valutazione della qualità dei dati: identificazione di errori, coerenza logica, completezza, accuratezza tematica (quantitativa, qualitativa).

Pertanto, in base alle specifiche di prodotto dei dati, oltre ai controlli di autocertificazione di qualità interni, condotti dalla Ditta esecutrice, sono stati eseguiti ulteriori specifici processi di validazione orientati a:

1. Verifica relativa al database nel suo insieme:
 - a. Validazione degli aspetti geometrici in termini di congruenza tra le geometrie e quelli previsti nelle specifiche di prodotto come dimensioni minime di aree e linee in base al livello di dettaglio;
 - b. Validazione della topologia dell'oggetto che appartiene a zone diverse (Fig. 1) con connessione di congruenza 3D lungo i confini;
2. Verifica con adozione di metodi di campionamento:
 - a. Accuratezza tematica e di completezza: basata sul fatto che ogni classificazione può essere soggetta ad errori di omissione/commissione e che la completezza o l'accuratezza tematica hanno sempre un certo grado di soggettività. Ad esempio, la classificazione errata di una casa come edificio industriale potrebbe alternativamente essere considerata come un errore di omissione dell'una e commissione dell'altra;

b. Precisione di misurazione: valutazione del posizionamento dell'oggetto in base a diverse accuratèzze, ovvero 0.40 m per scala 1:1.000 e 0.60 m per scala 1:2.000.

Per le verifiche di cui al punto 1) sono state definite delle procedure ad hoc eseguite da script in linguaggio Python¹, mentre le fasi dal punto 2) sono state eseguite manualmente, ripetendo l'acquisizione aerofotogrammetrica di un campione estratto casualmente dal dataset.

Il limite di accettazione è stato definito sulla base di criteri di valutazione ormai consolidati nella qualità dei prodotti cartografici e associati ad altri più "sperimentali", con riferimento a quanto definito in For inspection by sampling di cui all'allegato F dello standard sulla qualità dei dati geografici (ISO19157, 2013) e dello standard sui metodi statistici (ISO3534-2, 2006).

Inoltre, con riferimento agli operatori spaziali nei GIS, la mancanza di strumenti topologici 3D, sia nei software open source che in quelli commerciali, ha richiesto una fase di validazione ad hoc della terza coordinata, prestando attenzione alle consistenze tra oggetti diversi tramite l'implementazione specifica di procedure informatiche. Questo aspetto ha avuto un impatto significativo sulla pianificazione delle risorse per la modellazione e l'implementazione dell'infrastruttura geografica di interesse.

Uno dei principali vincoli topologici critici all'interno di un DBGT si riferisce alla valutazione delle congruenze tra diversi modelli topologici come la topologia areale rispetto alla topologia a grafo. Il primo si basa sugli operatori topologici spaziali (Egenhofer et al., 1994 e Clementini et al., 1996) per oggetti topografici di base, mentre il secondo si basa sul sistema di riferimento lineare e sulla topologia di un *network* (INSP.D2.10.1, 2013 e ISO19148, 2012), adatto alla definizione delle reti di trasporto. Nel contesto delle ferrovie, la mezzeria del binario ferroviario deve trovarsi all'interno della massicciata ferroviaria (tenendo conto delle eccezioni, ad esempio passaggi a livello, ecc.). Inoltre, la mezzeria del binario nella terza dimensione deve avere valori congruenti con la terza dimensione del ballast ferroviario (Fig. 5).

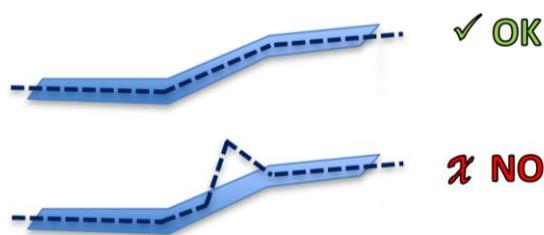


Figura 5 - Vincolo topologico 3D

5. DISCUSSIONE E ASPETTI CRITICI

Sulla base dei risultati delle fasi di validazione, si ritiene utile evidenziare, in considerazione di sviluppi futuri di ricerca, alcune questioni aperte, a partire dal caso studio considerato, le quali saranno oggetto di futuri approfondimenti.

5.1 Quantità di dati/validazione di BIG Data

Uno dei principali aspetti critici, che ha un impatto significativo sul processo di validazione, è la quantità di dati che devono essere elaborati con la stessa metodologia e con la capacità

¹ <https://www.python.it/>

(hardware e software) di perseguire risultati utili in un tempo sostenibile. Nell'era digitale dei BIG Data, la disponibilità di strumenti all'interno dei processi del prodotto promuove un nuovo ruolo delle attività di validazione.

Partendo dalla consapevolezza che il limite inferiore dei BIG Data si sta muovendo costantemente verso l'alto, emergono alcuni spunti di discussione. In generale, i BIG Data includono informazioni provenienti da fonti diverse, spesso prive di struttura, ma spesso fornite in tempo reale o quasi in tempo reale, consentendo di valutare il comportamento statistico dei fenomeni nel tempo. L'enorme quantità di dati non è facilmente gestibile dai processi tradizionali e richiede algoritmi e metodologie specifici per fornire i risultati in tempi ragionevoli. Per una singola fornitura di dati geografici, l'associazione di BIG Data è in realtà inappropriata se l'elaborazione non è richiesta in tempo reale, tuttavia nel caso di un rilievo multisensore e per un territorio esteso, i problemi possono essere considerati quasi simili.

Nel caso di un rilevamento di una infrastruttura di trasporto, l'estensione potrebbe essere considerevole e il piano di acquisizione deve essere puntuale, rigoroso e il più breve possibile, al fine di identificare una data per ciascuna tipologia di rilevamento topografico e conseguentemente pianificare la tempistica di aggiornamento. La produzione di dati ha tempistiche piuttosto ristrette, quindi, anche se ogni lotto non può essere classificato come BIG Data, lo diventa in considerazione della frequenza di fornitura. Peraltro, anche nel caso di un livello di dettaglio molto elevato, anche un singolo lotto potrebbe rientrare nel concetto di BIG Data.

Dal punto di vista della certificazione di qualità, queste premesse implicano l'adozione di una strategia che bilanci la richiesta di analizzare grandi quantità di dati con la necessità di produrre risultati in breve tempo. Pertanto, sono stati presi in considerazione metodi statistici per identificare la coerenza del campione più piccolo in grado di fornire una valutazione affidabile dell'intero dataset (con limite di confidenza superiore al 95%).

5.2 Definizione semantica/tematica diversa della validazione degli oggetti

I modelli di rete ferroviaria esistenti rappresentano servizi con un elevato valore semantico, ma i loro componenti non interagiscono o hanno relazioni esplicite con le caratteristiche informative di un prodotto cartografico di base. Poiché le reti ferroviarie sono descritte con una semantica ed un dettaglio piuttosto elevato, ben si prestano all'uso di diverse applicazioni: alcune sono dedicate all'uso quotidiano nelle società di servizi pubblici, alcune vengono utilizzate come modelli di scambio di dati e altre rappresentano reti di servizi all'interno di un ambito urbano. Ogni rete rappresenta un'astrazione e una riduzione di un sistema (modello) in sé; tuttavia, non forniscono connessioni immediate al contesto territoriale più ampio, pertanto non sono direttamente spendibili in termini di analisi o simulazione urbana, gestione dei rischi e dei disastri e gestione del ciclo di vita della città. Un modello adatto a tali scopi dovrebbe soddisfare i seguenti requisiti e dovrebbe rappresentare una generalizzazione ammissibile e sottoinsieme di situazioni tali per cui:

- Gli elementi di tale modello devono avere relazioni sia funzionali che strutturali l'uno con l'altro;
- Il modello deve rappresentare elementi indipendenti ma correlati per consentire la simulazione e l'analisi complessa;
- Il modello deve essere valido per diversi tipi di sistemi di rete eterogenei;

- Il modello deve ridurre la complessità preservando le informazioni richieste per l'uso in simulazioni, analisi, calcoli e visualizzazione cartografica in casi di catastrofe.

È necessario definire l'ambiente di modellazione rendendo esplicite le funzionalità pertinenti e le loro relazioni reciproche, consentendo così la modellazione topografica 3D di intere reti, sottoreti e funzionalità di rete, nonché le loro rappresentazioni grafiche. Il conseguente trattamento delle funzionalità di rete come un'astrazione di oggetti del mondo reale (punto di vista topografico) e di un oggetto grafico rappresentato dal proprio grafo dell'infrastruttura, rende il modello flessibile, come accaduto per i modelli creati nei sistemi di gestione GIS per le utilities (Adolphi et al. 2013).

L'aspetto innovativo di questa ricerca riguarda la volontà di andare oltre i vari programmi di conversione dati, verso un ambiente in cui i dati siano veramente integrati, il framework di modellazione sia più universale e gli standard dei dati si estendono su programmi software e piattaforme specifiche adottate da fornitore di dati (Zlatanova et al., 2005).

6. CONCLUSIONI

Un'analisi approfondita è stata effettuata sia sui dati forniti in forma di prototipo sia sui primi lotti consegnati ufficialmente, al fine di porre in evidenza gli aspetti metodologici e le questioni critiche descritte in questo articolo.

Gli aspetti salienti che sono stati impattanti rispetto alla validazione sono quelli di seguito elencati:

- La notevole varietà dei dati forniti (immagini, rilievi topografici, tracce GPS, triangolazione aerea, modelli numerici, acquisizione vettoriale, DBGT, immagini panoramiche e telemetria laser ad alta risoluzione), ciascuno con le proprie peculiarità, richiedono capacità e competenze di alto livello per poter essere analizzati e validati;
- L'armonizzazione tra diversi processi di validazione ha riguardato sia fasi ben note come best practices nella rilevazione fotogrammetrica tradizionale, come anche metodi di campionamento applicati per la validazione di dataset "di nuova generazione" (es. da MMS) ma anche per la validazione di DBGT complessi;
- L'enorme quantità di dati appartenenti a ciascun lotto di fornitura;
- La frequenza di rilascio dei lotti e la conseguente necessità di produrre gli output di validazione in poco tempo ma con un alto livello di affidabilità;
- L'impossibilità di eseguire sequenzialmente le operazioni di controllo per motivi formali;
- L'impossibilità di eseguire ricognizioni sul campo a causa dell'estensione spaziale dell'intero progetto di rilevamento.

Per far fronte a tutte le fasi di validazione, innanzitutto è stato istituito un gruppo di lavoro, riunendo competenze specifiche per ciascuna fase d'acquisizione/elaborazione dei dati. Il secondo passo è stato quello di identificare i punti di connessione tra le fasi per condividere gli output risultanti, permettendo così a ciascun gruppo di lavoro di concentrarsi solo sui propri problemi specifici, ma avendo allo stesso tempo la piena fiducia nell'affidabilità dei test di controllo effettuati sugli altri processi del sistema di validazione.

Inoltre, sono state sviluppate procedure specifiche per automatizzare il processo per tutte quelle attività in cui la validazione potrebbe essere condotta da una serie di operazioni in cascata e il relativo esito potrebbe essere stabilito sulla base di un confronto con soglie prestabilite. In quei casi, quando la fase di certificazione prevede operazioni manuali o la quantità

di dati è così grande che anche le procedure automatiche sono troppo onerose in termini di tempo macchina, sono state identificate metodologie adeguate di selezione del campione minimo significativo su cui effettuare un test affidabile.

I metodi di campionamento sono stati quindi utilizzati per sviluppare le procedure e bilanciare i tempi necessari per il completamento delle operazioni di controllo.

Ulteriori perfezionamenti sono stati infine apportati alla fornitura dei primi lotti, dopo l'implementazione delle metodologie sopra citate, per rendere più semplici e solide le procedure anche in presenza di dati non completamente conformi.

Il processo di validazione applicato sul caso studio, anche se relativo alle infrastrutture ferroviarie, si ritiene possa essere applicato in modo congruente a ciascun database spaziale in cui le fonti di rilevamento siano multiple purché in termini di accuratezza spaziale e temporale. Oggigiorno, accade sempre di più grazie all'evoluzione tecnologica, che per gestire complesse infrastrutture di dati spaziali, il requisito principale nella rilevazione dei dati, sia che questi siano continuamente aggiornati/aggiornabili, con fonti diverse nel miglior modo possibile. Pertanto, la correttezza dell'approccio, indipendentemente dallo specifico livello tematico spaziale d'interesse, è stata supportata dall'adozione agli standard internazionali relativi alla specifica di prodotto (ISO19131, 2018) ed alla qualità (ISO19157, 2013) dei dataset geografici validati.

7. RINGRAZIAMENTI

Per la collaborazione fornita gli autori desiderano esprimere la loro gratitudine al Generale Enzo Santoro per il contributo fornito al presente articolo. Gli autori desiderano ringraziare anche la rete ferroviaria italiana (RFI) per aver reso disponibili i dataset MUIF per questo caso di studio.

8. RIFERIMENTI

Adolphi, T., Nagel, C., Heinrich, T., Kolbe, T., 2013, Semantic 3D Modeling of Multi-Utility Networks in Cities for Analysis and 3D Visualization. DOI: 10.1007/978-3-642-29793-9_3 - In book: Progress and New Trends in 3D Geoinformation Sciences Project: BIM and GIS integration.

Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., Çöltekin, A., 2015, Applications of 3D City Models: State of the Art Review. ISPRS International Journal of Geo-Information, 4(4): 2842-2889.

Carrion, D., Maffei, A., Pinto, L., 2008, Metodi e modelli per il controllo di qualità di data base topografici multiscala. Atti 12a Conferenza Nazionale ASITA, 21 -24 ottobre 2008, L'Aquila, IT, ISBN 978-88-903132-1-9.

Clementini, E., Di Felice, P., 1996, A model for representing topological relationships between complex geometric features in spatial databases. Inform. Syst. 90, 1-4, 121-136.

Corongiu, M., Tucci, G., Santoro, E., Kourounioti, O., 2018, Data Integration Of Different Domains In Geo-Information Management: A Railway Infrastructure Case Study. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-4, 121-127, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-121-2018>.

DM, 2012, Decreto Ministeriale del 10 November 2011 (2012), Regole tecniche per la definizione delle specifiche di contenuto dei database geotopografici. (12A01800) (GU Serie Generale n.48 del 27-02-2012 - Suppl. Ordinario n. 37).

Egenhofer, M. J., Clementini, E., Di Felice, P., 1994, Topological relations between regions with Holes. Int. J. Geograph. Inform. Syst. 8, 2, 128-142.

Kolbe, T., 2009, Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. In: 3D Geo-Information Sciences pp 15-31 Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer Berlin Heidelberg.

INSP., 2007, Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32007L0002>.

INSP.D2.8.I.7, 2014, INSPIRE D2.8.I.7 Data Specification on Transport Networks, Technical Guidelines INSPIRE Infrastructure for Spatial Information in Europe <https://inspire.ec.europa.eu/id/document/tg/tn>.

INSP.D2.10.1, 2013, Data Specifications, Base Models, Generic Network Model <https://inspire.ec.europa.eu/documents/inspire-data-specifications-%E2%80%93-base-models-%E2%80%93-generic-network-model>.

ISO19131, 2018, ISO/CD 19131 Geographic information, Data product specifications. www.isolutions.iso.org.

ISO19148, 2012, ISO/IS 19148, Geographic information, Linear Referencing. www.isolutions.iso.org.

ISO19157, 2013, ISO/FDIS 19157 Geographic information, Data quality. www.isolutions.iso.org.

ISO3534-2, 2006, ISO 3534-2 Applications of statistical methods Statistics, Vocabulary and symbols — Part 2: Applied statistics. www.isolutions.iso.org.

Thaduri, A., Galar, D., Kumar, U., 2015, Railway assets: A potential domain for big data analytics. Procedia Computer Science, 2015 INNS Conference on Big Data, Volume 53, 2015, Pages 457-467 doi: 10.1016/j.procs.2015.07.323.

Zlatanova, S., Prosperi, D., 2005, Large-scale 3D Data Integration. CRC Press Reference. ISBN 9780849398988 - CAT# 9898.