

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA AMBIENTALE E DEI MATERIALI

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE MAGISTRALE

TESI DI LAUREA

in

FOTOGRAMMETRIA APPLICATA M

***UTILIZZO DEI DRONI INTEGRATO ALLE TECNICHE GEOMATICHE PER IL
MONITORAGGIO DELLA FASCIA COSTIERA***

CANDIDATO
Riccardo Collina

RELATORE:
Prof. Antonio Zanutta

CORRELATORI:
Prof. Luca Vittuari
Prof. Valentina Alena Girelli

Anno Accademico 2018/19

Sessione II

*Alle persone che rendono meravigliosa la mia vita, in particolare
A mia Mamma*

Vita in te ci credo...
(Mogol)

INDICE

ABSTRACT	pag. 11
PAROLE CHIAVE	pag. 13
ABSTRACT (English Version)	pag. 15
KEY WORDS	pag. 17
INTRODUZIONE	pag. 19
1) GEOMATICA	pag. 23
2) I SISTEMI DI COORDINATE, DATUM E TRASFORMAZIONI	pag. 25
2.1) Geodesia Classica	pag. 25
2.2) Geodesia Satellitare	pag. 28
2.3) Sistemi di Coordinate	pag. 31
2.4) Trasformazioni di Coordinate all'interno di un Datum	pag. 32
2.5) Trasformazioni di Datum Geodetico	pag. 35
2.6) ConvER3	pag. 39
2.7) Topografia Moderna	pag. 40
2.8) Topografia Satellitare	pag. 42
2.9) Il Posizionamento Satellitare	pag. 43
2.9.1) Posizionamento Relativo	pag. 44
2.9.2) Posizionamento Differenziale	pag. 45
2.9.3) Rilievo di precisione NRTK	pag. 46
3) PRINCIPI DI FOTOGRAMMETRIA	pag. 51
3.1) Le procedure classiche di orientamento e restituzione	pag. 51
3.2) La fotogrammetria digitale e le procedure di correlazione automatica	pag. 57
3.3) Structure From Motion: Bundler	pag. 84
4) FOTOGRAMMETRIA AEREA CON SAPR	pag. 87
4.1) Rilievo da aereo	pag. 87
4.2) Rilievo da drone	pag. 90
4.2.1) UAV – SAPR – UAS	pag. 91
4.2.2) Caratteristiche tecniche	pag. 92
4.2.3) I Micro Droni	pag. 94
4.2.4) I Droni Professionali	pag. 96
4.2.5) I Droni di grandi dimensioni	pag. 98

4.3) Principali scopi di impiego dei SAPR	pag. 103
5) NORMATIVA DI RIFERIMENTO SAPR	pag. 115
5.1) Regolamenti Internazionali	pag. 115
5.2) Normativa vigente in Italia	pag. 115
5.3) Regolamento ENAC (in sospensiva dal 1 Luglio 2019)	pag. 116
5.4) Nuovo Regolamento Europeo (in vigore dal Giugno 2020)	pag. 117
5.5) Considerazioni	pag. 117
6) RILEVAMENTO TERRITORIALE – METODI DI RILIEVO DELLA FASCIA COSTIERA	pag. 119
6.1) Servizio di Protezione Civile Nazionale e relativa normativa	pag. 119
6.2) Servizio di Protezione Civile Regione Emilia Romagna e relativa normativa	pag. 122
6.3) Servizio Difesa del Suolo, della Costa e Bonifica	pag. 126
6.3.1) La protezione della fascia costiera	pag. 127
6.3.2) Il monitoraggio della fascia costiera	pag. 130
6.4) Metodi di rilievo della fascia costiera	pag. 145
6.4.1) Sistemi UAV a basso costo per il monitoraggio del cambiamento delle dune costiere su larga scala e ad alta risoluzione	pag. 145
6.4.2) UAV per il monitoraggio della costa con la Structure from Motion in presenza di un corso d’acqua	pag. 149
7) INQUADRAMENTO DELLA ZONA DI RILIEVO LIDO ADRIANO (RA)	pag. 157
7.1) Descrizione generale dell’area	pag. 161
7.1.1) Inquadramento geologico dell’area	pag. 162
7.1.2) Morfologia della costa	pag. 163
7.1.3) Processi fisici	pag. 165
7.1.4) Erosione della costa	pag. 166
7.1.5) Cause dell’erosione	pag. 167
7.2) Aspetti socio-economici	pag. 168
7.3) Soluzioni e misure di protezione	pag. 169
8) DATASET E SOFTWARES IMPIEGATI	pag. 171
9) STRUMENTI UTILIZZATI PER IL RILIEVO	pag. 173
9.1) Drone DJI Spark	pag. 173

9.2) Ricevitore compatto TOPCON GRS-1 NRTK con antenna esterna PGA-1	pag. 175
9.3) Target per la materializzazione dei PFA	pag. 176
10) PROCEDURA DI RILIEVO IN SITU	pag. 179
10.1) Rilievo della rete topografica in NRTK	pag. 179
10.2) Rilievo fotogrammetrico	pag. 181
11) ELABORAZIONE DI PRODOTTI A VALENZA METRICA	pag. 185
11.1) Elaborazione in VisualSFM	pag. 185
11.2) Elaborazione in Agisoft Metashape	pag. 189
11.2.1) Operazioni preliminari al processing delle immagini	pag. 190
11.2.2) Primo allineamento delle immagini	pag. 191
11.2.3) Modello senza PFA	pag. 197
11.2.4) Modello con 4 PFA	pag. 200
11.2.5) Modello con 9 PFA	pag. 205
11.2.6) Confronto dei modelli	pag. 205
12) ANALISI DEI DSM E DELLE ORTOFOTO PRODOTTE	pag. 209
12.1) Valutazione degli errori a priori	pag. 209
12.2) Valutazione degli errori a posteriori	pag. 210
12.3) Confronto tra le nuvole dense	pag. 216
12.4) Confronto tra i DSM (Digital Surface Model)	pag. 218
13) LA GESTIONE IN AMBIENTE GIS	pag. 221
13.1) GIS (Geographic Information System)	pag. 221
13.2) Carta Tecnica Regionale dell'Emilia Romagna	pag. 223
13.3) Geoportale della Regione Emilia Romagna	pag. 224
13.4) Studio dell'area oggetto di tesi in ambiente QGIS	pag. 232
13.4.1) Individuazione della linea di costa	pag. 232
13.4.1.1) Confronto con CTR del 1998	pag. 234
13.4.1.2) Confronto con ortofoto progetto Agea 2011	pag. 236
13.4.2) Estrazione e confronto di sezioni	pag. 239
13.4.2.1) Trasformazione in quote ortometriche con il software ConvER3	pag. 239
13.4.2.2) Sezioni trasversali	pag. 241
13.4.2.3) Sezioni longitudinali	pag. 249
13.4.2.4) Confronto tra sezioni trasversali	pag. 252

13.4.2.5) Confronto tra sezioni longitudinali	pag. 254
CONCLUSIONI	pag. 257
BIBLIOGRAFIA	pag. 263
SITOGRAFIA	pag. 267
RINGRAZIAMENTI	pag. 269
ALLEGATI:	
1) ENAC - Circolare ATM-09 – Aeromobili a pilotaggio remoto – Criteri di utilizzo dello spazio aereo	
2) Gazzetta Ufficiale dell’Unione Europea - Regolamento di Esecuzione (UE) 2019/947 della Commissione del 24/05/2019, relativo a Norme e Procedure per l’Esercizio di Aeromobili Senza Equipaggio	
3) Gazzetta Ufficiale dell’Unione Europea - Regolamenti – Regolamento Delegato (UE) 2019/945 della Commissione del 12/05/2019, relativo ai Sistemi Senza Equipaggio e agli operatori di Paesi Terzi di Sistemi Senza Equipaggio	

ABSTRACT

La presente tesi si pone come obiettivo principale quello di individuare, nell'ottica del monitoraggio della fascia costiera per mezzo di droni, una soluzione di raccolta dati e successiva elaborazione economica e veloce, ai fini di un sistematico controllo a supporto delle attività di protezione operate dagli Enti Statali e Regionali.

In particolare, si è preso in considerazione il tratto di costa in località Lido Adriano, frazione del Comune di Ravenna, effettuando una tipologia di sperimentazione applicabile genericamente ad ogni costa.

I droni si prestano infatti come ottimo supporto alla fotogrammetria aerea, grazie alla possibilità di installare su di essi strumentazioni esterne come le camere fotografiche, se non già installate, risultando molto più economici ed appetibili dei classici voli aerei.

Alla descrizione dei sistemi a pilotaggio remoto, si affiancano i concetti teorici alla base delle metodologie adottate ai fini di definire un inquadramento più globale del lavoro svolto, nonché i principi di funzionamento dei software utilizzati che consentono di estrapolare informazioni a valenza metrica digitali, quindi facilmente archiviabili e condivisibili.

La parte sperimentale della tesi prende in esame l'estrazione di informazioni, con le relative precisioni, quali l'estensione della fascia sabbiosa, lo sviluppo altimetrico e della linea di riva, nell'ottica di monitorarne l'evoluzione temporale e territoriale, confrontando i risultati ottenuti istituendo una rete topografica e le informazioni raccolte dai droni con quelli ricavati solo dall'utilizzo di questi.

In particolare, il rilievo della rete topografica è stato eseguito nel mese di maggio 2019 da parte del Professor Luca Vittuari, afferente al Dipartimento ICAR/06 di Topografia e Cartografia dell'Università di Bologna, tramite posizionamento GPS (Global Positioning System) in NRTK. Le coordinate dei punti rilevati, in seguito chiamati punti fotogrammetrici di appoggio (PFA), sono riferite sia al sistema ETRS89 WGS84 che all'ED50 UTM32N.

Dal dataset di fotogrammi scattati da drone si sono ottenuti tre modelli digitali della superficie (DSM, Digital Surface Model) attraverso il software Agisoft Metashape reso disponibile dal Dipartimento. Si sono quindi potuti confrontare i risultati conseguiti nelle tre metodologie di lavoro, in termini di precisioni raggiunte.

Si sono altresì realizzati i relativi prodotti GIS (Geographic Information System) che permettono di catalogare, su più livelli logici raster e vettoriali, l'area in esame e di

renderne disponibili le informazioni estratte agli organi che operano la salvaguardia del territorio quali il Servizio di Difesa del Suolo, della Costa e Bonifica della regione Emilia-Romagna, l'ARPAE, nonché Protezione Civile e Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. Ai fini di un risultato più organico ed integrato alle attuali metodologie messe in atto dalla Regione Emilia-Romagna, sono stati raccolti i dati relativi al monitoraggio da parte degli Enti preposti al controllo e le tempistiche da questi adoperate, in modo da poter confrontare nonché proporre un metodo più intuitivo, semplice e veloce, nell'ottica di dover operare in contesti di primo intervento.

Grazie ai prodotti realizzati, in particolare elementi vettoriali, sezioni ed ortofoto, si è redatta una metodologia di studio basata su tecnica speditiva e sistematica ai fini di ottenere informazioni e renderle disponibili in un arco temporale adatto ad un contesto di emergenza.

PAROLE CHIAVE

- Fotogrammetria digitale
- Monitoraggio costa
- GIS
- UAV
- UAS
- SAPR
- GPS
- Droni
- Structure from Motion
- Normativa
- Protezione Civile
- Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco
- Regione Emilia-Romagna

ABSTRACT (English Version)

This thesis aims to identify, from the point of view of monitoring the coastal area by means of drones, a data collection solution and subsequent economic and fast processing, for the purposes of a systematic control to support the protection activities carried out by State and Regional Authorities.

In particular, the stretch of coast in Lido Adriano area, part of the municipality of Ravenna, was considered, carrying out the experiments applicable generically to all coasts.

In fact, the drones lend themselves as an excellent support to aerial photogrammetry, thanks to the possibility of installing on them external instruments such as photographic cameras, resulting much cheaper and more attractive than classic air flights.

The description of the remote piloting systems is flanked by theoretical concepts underlying methodologies adopted for the purpose of defining a more global framework of the work done, as well as the operating principles of the software that allow to extrapolating information with digital metric valence, then easily storable and shareable. The experimental part of the thesis examines the extraction of information, with relative precisions, such as the extension of sandy belt, the development of altimetry and shore line, with a view to monitoring the temporal and territorial evolution, comparing the results obtained by establishing a topographic network and the information collected by the drones with those obtained only by the use of drones.

In particular, the survey of the topographic network was carried out in May 2019 by Professor Luca Vittuari, afferent to ICAR/06 Department of Topography and Cartography of the University of Bologna, using GPS (Global Positioning System) in NRTK. The coordinates of detected points, later called ‘ground control points’, are referred to ETRS89 WGS84 system.

From the frames dataset taken by drone, three Digital Surface Models has been kept through Agisoft Metashape software made available by the Department. Therefore it was possible to compare the results achieved in the two working methods in terms of precision reached.

The related GIS (Geographic Information System) are also produced, which make it possible to catalog, on several logic raster and vector levels, the area in question to make the information extracted available to the Authorities that operate to safeguard the

territory, such as Servizio di Difesa del Suolo, della Costa e Bonifica of Emilia-Romagna Region, ARPAE, as well as Protezione Civile and Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. In order to obtain a more organic and integrated result from the current methodologies implemented by Emilia-Romagna Region, it has been collected data and timing of the monitoring activities performed by Authorities in charge of control, in order to be able to compare, as well as propose, a more intuitive, simple and fast method, with a view to having to operate in emergency contexts.

Thanks to products made, in particular vector elements, sections and orthophotos, a study methodology has been drafted based on a rapid and systematic technique in order to obtain informations and make them available in a time frame suitable for emergency context.

KEY WORDS:

- Digital photogrammetry
- Coastal surveying
- GIS
- UAV
- UAS
- SAPR
- GPS
- Drones
- Structure from Motion
- Normativa
- Protezione Civile
- Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco
- Emilia-Romagna Region

INTRODUZIONE

La tesi nasce dall'interesse e dalla curiosità maturate nel corso di Fotogrammetria Applicata del Professore Antonio Zanutta, nel quale è stato approfondito l'impiego dei droni come strumento attualissimo nel campo della restituzione fotogrammetrica.

In seguito al tirocinio in preparazione della prova finale, mirato alla maturazione delle competenze necessarie per poter redigere autonomamente i prodotti fotogrammetrici, in particolare con l'impiego di Agisoft Metashape, è stato concordato assieme al Professore l'obiettivo della presente tesi: individuare, nell'ottica del monitoraggio della fascia costiera per mezzo di droni, una soluzione di raccolta dati e successiva elaborazione economica e veloce, ai fini di un sistematico controllo a supporto delle attività di protezione operate dagli Enti Statali e Regionali.

La tesi risulta strutturata in due blocchi principali.

La prima parte, teorica, è dedicata ad i concetti ampiamente richiamati nel successivo caso pratico ed è mirata non solo ai professionisti ma si presenta come un piccolo manuale per coloro che, pur non avendo basi tecniche, intendono approcciarsi al rilievo di porzioni di terreno per mezzo di droni. Per utenti non esperti risulta infatti fondamentale sviluppare le competenze di base atte ad ottenere buoni risultati potenzialmente condivisibili con gli Enti Pubblici. I primi quattro capitoli sono quindi incentrati sui seguenti argomenti:

- I sistemi di riferimento e le attuali tecniche di rilevamento: i prodotti fotogrammetrici devono essere inquadrati in un sistema di riferimento univoco ed oggettivo. Si ritiene pertanto fondamentale includere nella tesi un focus relativo ad alcune definizioni e ai sistemi di riferimento maggiormente utilizzati e alle tecniche topografiche attuali messe in atto per definire, in tali sistemi, la posizione dei punti rilevati
- Fotogrammetria: disciplina che si occupa di determinare la forma e la dimensione di oggetti attraverso l'acquisizione e l'analisi di immagini, sfruttando le relazioni tra spazio bidimensionale e tridimensionale. Nel capitolo sono spiegate le formule che definiscono la correlazione tra i due spazi e i parametri delle camere fotografiche che la caratterizzano. Successivamente, un focus sulla fotogrammetria digitale mostra le metodologie messe in atto dai software che negli ultimi vent'anni hanno reso completamente automatico il processo di restituzione, per giungere al metodo più innovativo, la Structure from Motion

- Fotogrammetria aerea con SAPR: dopo una breve introduzione alla fotogrammetria da aereo, ormai superata per le applicazioni su piccola scala, si pone l'attenzione sull'esecuzione di rilievi con Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto, mostrandone le principali caratteristiche e qualità, per concludere sulle vastissime potenzialità e applicazioni a cui si prestano i droni
- Normativa di riferimento SAPR: per poter volare i SAPR devono essere conformi alle prescrizioni del “Regolamento Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto” dell'ENAC, ma in ragione della continua evoluzione tecnologica dei droni, lo stesso ente, a partire dal 1 Luglio 2019 ha emesso un decreto sospensivo del regolamento stesso, al fine di adeguare la normativa italiana al nuovo Regolamento Europeo in materia che entrerà in vigore in Giugno 2020. La circolare transitoria ATM e il futuro Regolamento Europeo sono allegati alla tesi
- Rilevamento territoriale – metodi di rilievo della fascia costiera: si riportano nel capitolo le attuali metodologie messe in atto per il monitoraggio territoriale da parte degli enti pubblici preposti, sia scala nazionale che regionale, con un successivo focus sulle metodologie attuali di rilievo della linea di costa con UAV a basso costo, confrontando e portando ad esempio alcune delle attività recenti e tuttora in corso più interessanti per gli aspetti approfonditi nella tesi

La seconda parte, pratica, è suddivisa in conformità agli step di lavoro seguiti. In particolare:

- Inquadramento della zona di rilievo: descrizione del tratto di costa preso in esame in località Lido Adriano, frazione del Comune di Ravenna, da un punto di vista sia geomorfologico che socio-economico, per comprendere al meglio lo stato di fatto attuale della costa
- Strumenti utilizzati per il rilievo: illustrazione delle tecniche di rilievo e dei mezzi impiegati in situ, i cui principi di funzionamento sono stati descritti nella prima parte della tesi
- Procedura di rilievo in situ: in questo capitolo vengono descritti sia i parametri del volo del drone nonché l'esecuzione del rilievo dei punti fotogrammetrici d'appoggio per mezzo di tecnica di posizionamento globale in NRTK
- Elaborazione di prodotti a valenza metrica: si illustrano le metodologie impiegate per ottenere i modelli esposti nei successivi capitoli
- Analisi dei DEM e delle ortofoto prodotte: si analizzano i risultati ottenuti dai modelli per poter individuare la soluzione più veloce che consente di ottenere

delle precisioni accettabili, attraverso un confronto sia relativo che assoluto, inquadrando i prodotti nel datum ED50 UTM32N

- La georeferenziazione e gestione in ambiente QGIS: nell'ottica della georeferenziazione illustrata nel capitolo teorico dei sistemi di riferimento, si mostra il caricamento dei risultati ottenuti in un ambiente georeferenziato ed opensource, valido per integrare le informazioni cartografiche delle Regione Emilia-Romagna e renderle disponibili agli Enti che operano la salvaguardia del territorio quali il Servizio di Difesa del Suolo, della Costa e Bonifica della regione Emilia-Romagna, l'ARPAE, nonché Protezione Civile e Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

Si riportano infine le conclusioni tratte dal lavoro svolto, facendo un bilancio delle tempistiche e delle precisioni che caratterizzano i modelli ottenuti e come questi possono essere utilizzati ed implementati, evidenziando i vantaggi offerti dai droni come ottimo supporto alla fotogrammetria aerea, poichè risultano molto più economici ed appetibili dei classici voli aerei.

La tesi si propone quindi di avvalorare e migliorare questa tecnica speditiva e sistematica ai fini di ottenere informazioni e renderle disponibili in un arco temporale adatto ad un contesto di emergenza.

1) GEOMATICA

Si definisce geomatica la disciplina che si occupa della gestione automatizzata dell'informazione relativa al territorio, il cui obiettivo è di trattare grandi quantità di dati e di informazioni di diversa natura e di organizzarli, elaborarli, gestirli e rappresentarli in cartografie digitali e numeriche per ottenere una buona conoscenza della situazione territoriale.

Le discipline afferenti alla geomatica, oltre all'informatica, sono la cartografia, la geodesia, la topografia, il telerilevamento, il posizionamento satellitare, i sistemi informativi territoriali, la fotogrammetria e la scansione laser.

In questi primi capitoli ci si soffermerà sui sistemi di riferimento, i datum geodetici e le trasformazioni, per poi passare alla fotogrammetria, oggetto di base della tesi.

2) I SISTEMI DI COORDINATE, DATUM E TRASFORMAZIONI

I prodotti fotogrammetrici devono essere inquadrati un sistema di riferimento globale, univoco ed oggettivo: si ritiene pertanto fondamentale includere nella tesi un focus relativo ad alcune definizioni e ai sistemi di riferimento maggiormente utilizzati e alle tecniche topografiche attuali messe in atto per definire, in tali sistemi, la posizione dei punti rilevati.

Il Datum Geodetico è un sistema di riferimento che permette di esprimere in termini numerici la posizione di punti della superficie fisica della Terra o in prossimità ad essa. La georeferenziazione è l'operazione con la quale si esprime la posizione di un punto o di un oggetto qualsiasi, attraverso opportune coordinate in un assegnato datum. La superficie terrestre e tutti i punti che la vanno a comporre, vengono rappresentati su una opportuna superficie di riferimento.

2.1) Geodesia Classica

Un Datum Geodetico definisce un Sistema di Riferimento per i Sistemi di Coordinate.

Al fine di individuare, nella maniera esatta, la posizione di un punto è necessario specificare le sue coordinate ed il sistema di riferimento, il datum geodetico. La Terra ha una forma irregolare e può quindi essere rappresentata attraverso il geoide: la sua superficie eguaglia in ogni suo punto il potenziale gravitazionale terrestre. In tal modo ogni punto appartenente alla superficie terrestre è rappresentato univocamente sul geoide attraverso la direzione della verticale, che si presenta sempre perpendicolare alla superficie del geoide stesso.

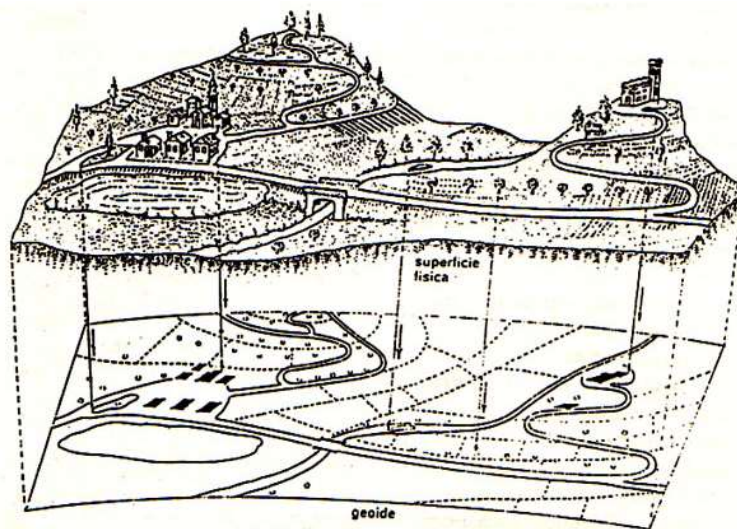


Figura 2.1: Rappresentazione del Geoide rispetto alla Superficie terrestre reale - Fichera, 2016

A causa dell'irregolarità del geode si è cercata una soluzione con la rappresentazione della superficie ad esso simile, ma planare e più semplice, arrivando a costituire il cosiddetto sferoide che rappresenta una superficie di rotazione attorno all'asse polare, differendo di poco dall'ellissoide di rotazione ottenuto dalla rotazione di un'ellisse attorno al suo asse minore. In *Figura 2.2* sono rappresentate le due superfici di rotazione e quella reale.

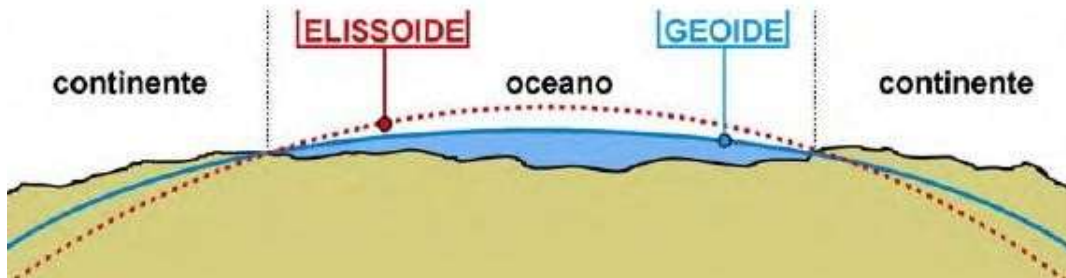


Figura 2.2: Confronto tra Superficie ellissoidica, Superficie geoidica e Superficie reale - Fichera, 2016

La forma geometrica regolare più simile alla forma reale della Terra è l'ellissoide di rotazione; caratterizzato dal raggio equatoriale, più lungo, e da quello polare, più corto. Per utilizzarlo come sistema di riferimento terrestre, occorre definire la sua orientazione ed il centro rispetto al Geode, pertanto ogni Datum Geodetico fa riferimento ad un ben preciso ellissoide, avendo una determinata posizione rispetto al geode. Nel passato si sono utilizzati datum diversi, con ellissoidi diversi ed altrettante diverse orientazioni, al fine di ottenere una migliore approssimazione della superficie che si desiderava rappresentare. Il punto sulla superficie terrestre che si deve definire, lo si fa corrispondere ad un punto dell'ellissoide proiettandolo e se ne rilevano le coordinate geografiche su questa superficie di comodo (*Figura 2.3*).

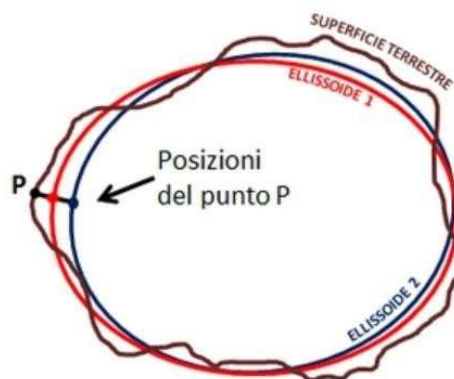


Figura 2.3: Ellissoide e superficie terrestre – www.mondogeo.it [20]

L'ellissoide impiegato ha parametri noti, per forma e dimensione e viene orientato in un punto chiamato di emanazione, che soddisfa le seguenti condizioni:

- La normale coincida con la verticale

- Le direzioni di meridiano ellissoidico e astronomico devono coincidere
- Le quote ellissoidica e ortometrica coincidano

Nel punto di emanazione risulterà nulla la deviazione della verticale.

L'ellissoide orientato localmente risulta tangente al geoide nel punto di emanazione (Figura 2.4).

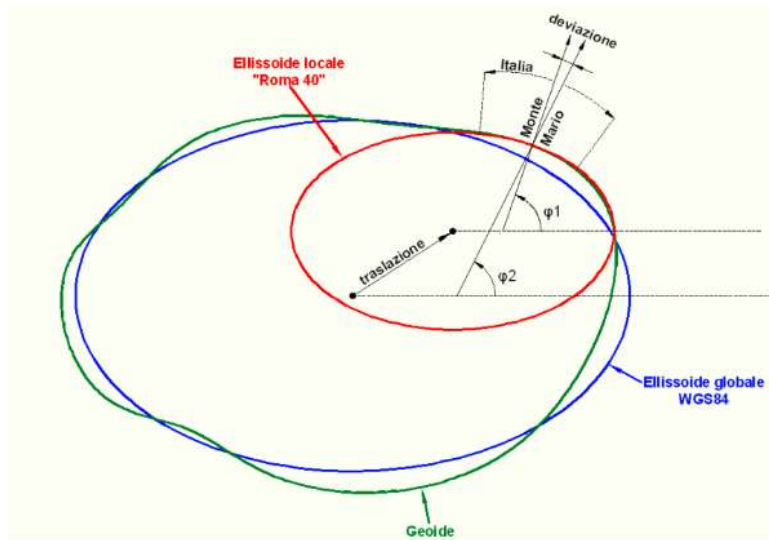


Figura 2.4: Geoide, ellissoide locale (orientato localmente) ed ellissoide globale (geocentrico) –
www.3dmetrica.it [21]

Come si è già accennato, ad ogni datum geodetico è strettamente associata una rete geodetica, derivante da un gruppo di misure eseguite attraverso un calcolo di compensazione; tale rete costituisce la realizzazione del datum.

Normalmente in ogni nazione si ha un proprio datum geodetico ma, in particolare, in Italia si utilizzano diverse definizioni di datum.

Di seguito si descrivono i principali datum impiegati sul territorio italiano:

Datum Roma 40

L'ellissoide di riferimento è quello internazionale di Hayford, orientato a Roma Monte Mario con dati astronomici relativi al 1940, il cui meridiano è quello fondamentale, ma per riferire le longitudini al meridiano di Greenwich, deve essere sommata una costante denominata “longitudine Est di M. Mario da Greenwich”. La rete geodetica associata è quella di triangolazione dell'IGM (Istituto Geografico Militare).

Questo sistema viene utilizzato come riferimento per la cartografia nazionale e regionale (coordinate piane Gauss-Boaga) e per la cartografia catastale di alcune province.

Datum ED50 (European Datum 1950)

L'ellissoide di riferimento è quello internazionale di Hayford con "orientamento medio europeo", la cui deviazione della verticale viene annullata a Potsdam in Germania, calcolato nel 1950. Il meridiano fondamentale è quello di Greenwich e la rete associata deriva da una selezione di maglie ottenute con triangolazioni, desunte dalle reti dei singoli stati, compensate poi a livello europeo. Questo sistema viene utilizzato per definire le coordinate piane UTM-ED50 e per la cartografia IGM.

Datum catastali

I datum principali impiegano l'ellissoide di Bessel, orientato a Genova (per l'Italia del centro-nord), a Castanea delle Furie (per l'Italia meridionale) e a Roma Monte Mario (per parte dell'Italia centrale).

Il meridiano fondamentale è quello che insiste sul rispettivo punto di emanazione.

La rete associata è quella IGM, integrata da reti catastali di raffittimento, utilizzati nella cartografia catastale e nei GIS.

2.2) Geodesia Satellitare

Attualmente, la geodesia moderna è di tipo satellitare, nella quale la determinazione della posizione dei punti sulla Terra (posizionamento), viene eseguita attraverso le misurazioni dai satelliti orbitanti.

Un generico sistema satellitare globale per posizionamento è il GNSS (Global Navigation Satellite System). Il GPS è tra i sistemi GNSS più usati, a questo si aggiunge il sistema russo GLONASS e quello europeo GALILEO, nonché quello indiano in via di sviluppo IRNSS.

TABELLA COMPARATIVA DEI SISTEMI GNSS:

SISTEMA	Gps	Glonass	Galileo	BeiDou1/2
Proprietario	Stati Uniti	Fed.ne Russa	Unione Europea	China
Datum geodetico	WGS84	PZ-90	GTRF	CGCS2000
Errore minimo	5 m	5 m	1 m	10 m
Altitudine orbitale	20,180 km	19,130 km	23,222 km	21,150 km
Periodo orbitale	11 h 58 min	11 h 16 min	14 h 5 min	12 h 38 min
Satelliti in orbita	31	27	24	23
Satelliti previsti	24	24	26	35
Stato	Operativo	Operativo	Op.vo	Op.vo (2020)
Copertura attiva	Globale	Globale	Globale	Loc. (globale)

Dati aggiornati al 8/2018.

Figura 2.5: Tabella degli attuali sistemi GNSS in orbita – www.geomappando.com, 2018 [23]

I diversi sistemi satellitari possono essere utilizzati contemporaneamente (interoperabilità); in questo caso i datum utilizzati non sono di tipo locale ma globale e sono quindi validi globalmente.

La definizione di tale sistema si basa su una terna di assi XYZ geocentrica in cui l'asse Z coincide con l'asse polare di rotazione terrestre, mentre gli assi X e Y sono diretti sul piano equatoriale. In particolare l'asse X è diretto secondo il meridiano di Greenwich e l'asse Y in modo da definire una terna destrorsa.

Il datum globale più utilizzato è il WGS84 (WGS = World Geodetic System, sistema geodetico mondiale) che attualmente è quello su cui si basa il sistema satellitare GPS.

Per rendere più agevole la georeferenziazione di punti mediante le classiche coordinate geografiche, più comode e intuitive di quelle cartesiane geocentriche, si associa alla terna cartesiana un ellissoide geocentrico, avente il centro coincidente all'origine della terna.

Per il sistema WGS84 si applicano i seguenti parametri:

$$\text{Semiasse maggiore } a = 6378137 \text{ m} \quad (2.1)$$

$$\text{Schiacciamento } f = 1/298,257223563 \quad (2.2)$$

Ai datum globali deve essere associata una rete geodetica di reti internazionali, raffittite a livello nazionale.

L'Italia è dotata della rete IGM95 che è un raffittimento di quella europea EUREF, che a sua volta, fa parte di quella mondiale IGS, basata sul datum europeo ETRS89 solidale alla piattaforma continentale europea, mentre, a livello locale, esistono altre reti che raffittiscono ulteriormente la rete IGM95. Sono inoltre presenti numerose stazioni permanenti GPS/GNSS.

Si riporta di seguito la *Tabella 2.1* riassuntiva dei vari Datum.

	DATUM GEODETTICI			REALIZZAZIONI			SISTEMI CARTOGRAFICI		
	Nome	Ellissoide	Orientamento	Rete	Epoca	Tipo	Denominazioni	Rappresentazione	Zone per l'Italia
Datum Classici	ROMA 40	Internazionali (Hayford)	Roma M. Mario 1940	Vecchia Rete geodetica IGM	1880-1995	Triangolazione integrata da distanze	Gauss-Boaga	Gauss Cilindro secante	Fuso Ovest (1) Fuso Est (2)
	ED50	Internazionali (Hayford)	Postdam ca.1950	Sottoinsieme delle reti nazionali europee	Ca.1950	Triangolazione integrata da distanze	UTM-ED50	Gauss Cilindro secante	Fuso 32 Fuso 33 Fuso 34
	DATUM CATASTALI	Bessel	Vari: Genova, Roma, Castanea delle Furie	Rete IGM ante 1919 e Reti catastali di raffittimento	Ca.1880-1940	Triangolazione e raffittimenti	SISTEMI CATASTALI	Cassini-Soldner	31 "grandi" 800 "piccoli"
	WGS84	WGS84	Geocentrico	Satelliti; tracking USA Rete IGM95(Italia)	1984; 1989; 1995;	GPS GNSS GPS	UTM-WGS84	Gauss Cilindro secante	Fuso 32 Fuso 33 Fuso 34
Datum Satellitari									

Tabella 2.1: I principali sistemi geodetico-cartografici utilizzati Italia, modificata da Zanutta Datum Geodetici, 2008

È possibile distinguere tra Datum locali e globali; i primi permettono di trascurare la deviazione della verticale. Vengono usati ai fini planimetrici mentre per quanto riguarda l'altimetria sono integrati da un datum verticale. I datum globali, invece, sono utilizzati per le misure satellitari e permettono di definire le altezze ellissoidiche.

2.3) Sistemi di Coordinate

Una volta definito il datum geodetico in cui si opera, la posizione di un punto può essere individuata, mediante diversi tipi di coordinate, tra loro equivalenti, in quanto è possibile passare dall'uno all'altro con opportune formule di trasformazione.

Di seguito, si elencano i principali tipi di coordinate utilizzati nella geodesia operativa, con le rispettive caratteristiche.

- Coordinate geografiche ellissoidiche: Definita φ la latitudine e ω la longitudine, si trova una coppia di valori di (φ, ω) che definisce la posizione di un punto nel piano, ovvero la proiezione del punto sull'ellissoide. Nella geodesia satellitare viene associata anche la quota ellissoidica h . Si ottiene quindi la terna (φ, ω, h) che determina la posizione tridimensionale del punto.
- Coordinate cartesiane geocentriche: X, Y, Z sono le coordinate cartesiane di un punto rispetto alla terna d'assi geocentrica $OXYZ$; questa definisce la posizione tridimensionale di un punto in modo equivalente alla terna φ, ω, h riferita all'ellissoide geocentrico, con gli assi lungo le direzioni X, Y, Z .
- Coordinate cartesiane locali: Sono le coordinate e, n, h (Figura 2.6) di un punto rispetto alla terna euleriana avente origine in P_0 della superficie ellissoidica, con asse h diretto secondo la normale all'ellissoide in P_0 , ed assi e ed n nel piano tangente rispettivamente al meridiano e al parallelo per P_0 .

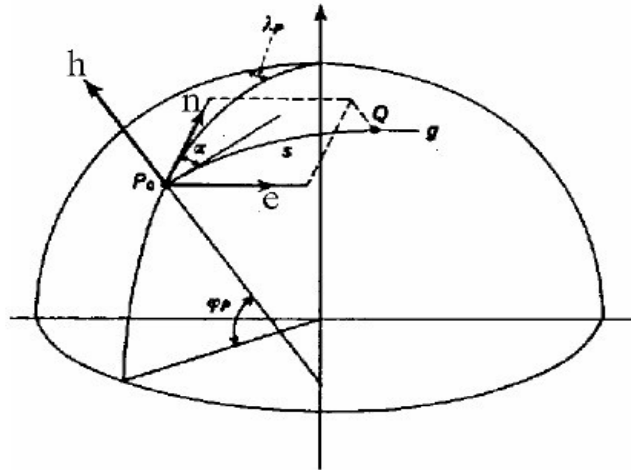


Figura 2.6: Terna euleriana, coordinate cartesiane locali - Stoppini, Radicioni, 2013.

- Coordinate geodetiche locali: la posizione di un punto nel piano si può esprimere tramite coordinate geodetiche polari (s, α) rispetto ad un punto O dell'ellissoide assunto come origine (polo). La coordinata s (distanza polare) è la distanza del punto dal polo misurata lungo l'arco di geodetica, e α (azimut) è l'angolo formato dalla geodetica con il

meridiano per **O**, in senso orario partendo dal Nord (*Figura 2.7*). Oppure possono utilizzarsi le coordinate geodetiche ortogonali o rettangolari (**X,Y**) rispetto ad un punto **O** assunto come origine. La **X** è la lunghezza dell'arco di meridiano tra **O** e **Q**; la **Y** invece la lunghezza dell'arco di geodetica **Q-P** (*Figura 2.7*).

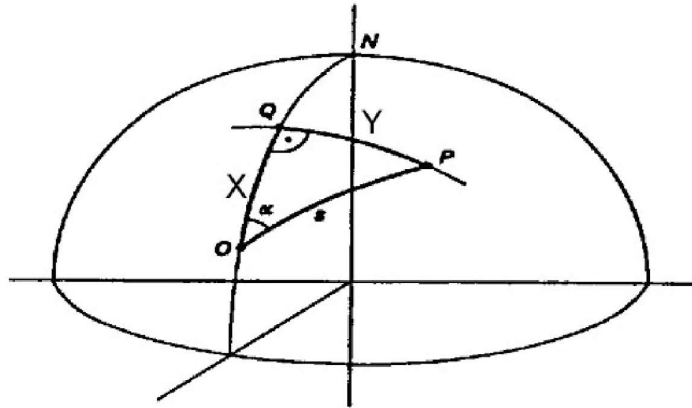


Figura 2.7- Coordinate geodetiche polari e ortogonali - Stoppini, Radicioni, 2013.

- Coordinate piane cartografiche: la posizione planimetrica di un punto può essere espressa in una qualsiasi rappresentazione cartografica.

In Italia le coordinate più usate sono **Gauss-Boaga** (N,E) e quelle catastali **Cassini-Soldner** (X,Y).

2.4) Trasformazioni di Coordinate all'interno di un Datum

Le *trasformazioni di coordinate* sono risolvibili con operazioni geometrico-matematiche, che non comportano alcuna perdita di precisione dei dati originari.

Da geografiche ellissoidiche a cartesiane geocentriche e viceversa

Questo sistema viene utilizzato dalle applicazioni GPS e interessa tre dimensioni (planimetria e altimetria).

➤ Da geografiche a geocentriche

Le equazioni dell'ellissoide sono le seguenti:

$$\begin{cases} X = N \cos\varphi \cos\omega \\ Y = N \cos\varphi \sin\omega \\ Z = N(1 - e^2) \sin\varphi \end{cases} \quad (2.3)$$

le quali forniscono le coordinate cartesiane di un punto **P0** che appartiene alla superficie ellissoidica (*Figura 5*) in funzione delle coordinate geografiche (φ, ω), invece, per un generico punto **P**, alla una quota ellissoidica **h**, rispetto alla superficie ellissoidica, le equazioni diventano:

$$\begin{cases} X = (N + h) \cos\varphi \cos\omega \\ Y = (N + h) \cos\varphi \sin\omega \\ Z = [N(1 - e^2) + h] \sin\varphi \end{cases} \quad (2.4)$$

che consentono di eseguire la trasformazione da coordinate geografiche (e quota ellissoidica) a coordinate cartesiane geocentriche.

➤ Da geocentriche a geografiche

Questo metodo di trasformazione non è immediato e, per effettuare l'inversione, si possono applicare diversi metodi, di cui la soluzione di **Bowring**, che si presenta in forma chiusa è:

$$\varphi = \arctg \frac{Z + e^2 B \sin^3 \theta}{p - e^2 a \cos^3 \theta} \quad (2.5)$$

$$\omega = \arctg \frac{Y}{X} \quad (2.6)$$

$$h = \frac{p}{\cos\varphi} - N \quad (2.7)$$

dove:

$$p = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad \text{distanza dall'asse polare} \quad (2.8)$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \quad \text{seconda eccentricità} \quad (2.9)$$

$$\theta = \arctg \left(\frac{Za}{pb} \right) \quad \text{angolo ausiliario} \quad (2.10)$$

Da cartesiane geocentriche a cartesiane locali e viceversa

➤ Trasformazione diretta

Tale trasformazione è eseguita a livello tridimensionale (componente planimetrica e componente altimetrica). Facendo riferimento alla *Figura 2.6*, P_0 è l'origine della terna euleriana e di P, punto generico di coordinate geocentriche (X, Y, Z), vengono calcolate le componenti del vettore "baseline" date dalla differenza tra le coordinate di P e di P_0 :

$$\begin{cases} \Delta X = X - X_0 \\ \Delta Y = Y - Y_0 \\ \Delta Z = Z - Z_0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Si ricavano le coordinate di P (e, n, h) con le formule di rotazione tra i due sistemi:

$$\begin{bmatrix} e \\ n \\ h \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\varphi, \omega) \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

dove $\mathbf{R}(\varphi, \omega)$ rappresenta la matrice di rotazione calcolata per le coordinate geografiche di P_0 , ottenibili dalle geocentriche mediante le formule di Bowring:

$$\mathbf{R}(\varphi, \omega) = \begin{bmatrix} -\sin\omega & \cos\omega & 0 \\ -\sin\varphi\cos\omega & -\sin\varphi\sin\omega & \cos\varphi \\ \cos\varphi\cos\omega & \cos\varphi\sin\omega & \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

➤ Trasformazione inversa

Si ottiene invertendo le formule di rotazione riportate nella pagina seguente.

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1}(\varphi, \omega) \begin{bmatrix} e \\ n \\ h \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

dove la matrice inversa $\mathbf{R}^{-1}(\varphi, \omega)$ coincide con la trasposta (per le proprietà della matrice di rotazione):

$$\mathbf{R}^{-1}(\varphi, \omega) = \mathbf{R}^T(\varphi, \omega) = \begin{bmatrix} -\sin\omega & -\sin\varphi\cos\omega & \cos\varphi\cos\omega \\ \cos\omega & -\sin\varphi\sin\omega & \cos\varphi\sin\omega \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

le coordinate geografiche rimangono sempre quelle dell'origine P_0 , mentre quelle geocentriche di P si ottengono da:

$$\begin{cases} X = X_0 + \Delta X \\ Y = Y_0 + \Delta Y \\ Z = Z_0 + \Delta Z \end{cases} \quad (2.16)$$

Da geodetiche polari a geografiche e viceversa

➤ Trasformazione diretta

Questa trasformazione è relativa alla sola planimetria, il cui problema viene considerato "classico" noto come "Primo problema fondamentale della Geodesia" od anche "trasporto di coordinate geografiche lungo un arco di geodetica", ma soprattutto non è di uso frequente nelle applicazioni del GPS. Per effettuare la trasformazione, è necessario conoscere le coordinate geografiche del polo.

➤ Trasformazione inversa

Nota come trasformazione con metodo "classico", si classifica come "Secondo problema fondamentale della Geodesia".

Da geocentriche a geodetiche rettangolari e viceversa

Questa trasformazione, con procedimenti diretto ed inverso, interessa la sola planimetria e viene prevalentemente utilizzata per il calcolo delle coordinate catastali piane Cassini-Soldner, che sono numericamente uguali alle coordinate geodetiche rettangolari.

Da geografiche a piane cartografiche e viceversa

La trasformazione è relativa alla sola planimetria, il passaggio da coordinate geografiche a cartografiche, in base al tipo di rappresentazione cartografica adottato, si effettua con le formule di corrispondenza dirette ed inverse.

La *Figura 2.8* rappresenta il riepilogo delle principali trasformazioni di coordinate all'interno di un Datum geodetico ben definito, nel quale sono indicati i passaggi più utilizzati, distinguendo le trasformazioni 2D da quelle 3D.

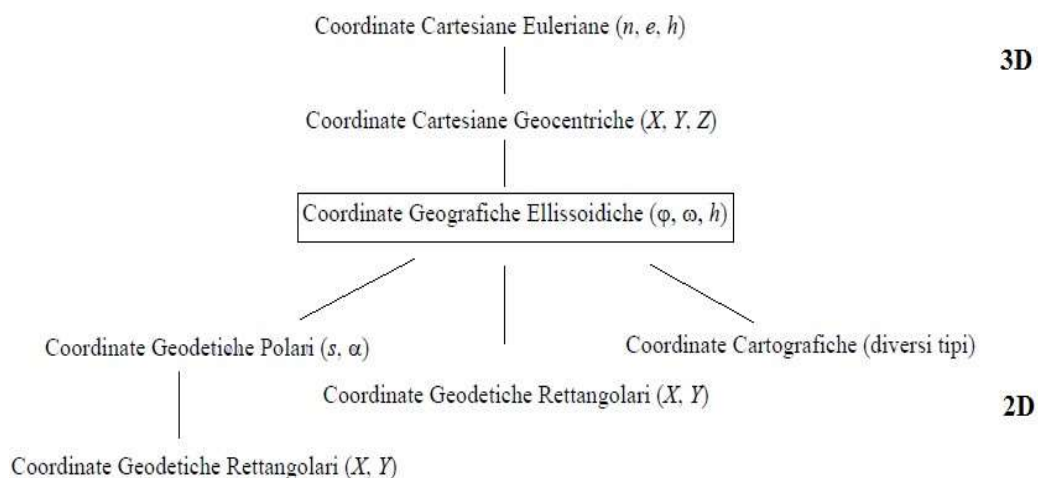


Figura 2.8: Riepilogo delle principali trasformazioni di coordinate eseguibili in un datum - Stoppini, Radicioni, 2013

2.5) Trasformazioni di Datum Geodetico

Le trasformazioni, spesso effettuate da reti geodetiche affette da errori, si basano sull'impiego di parametri determinati statisticamente, in base alla conoscenza delle coordinate, per un certo numero di punti: ciò comporta indeterminazioni maggiori a quelle derivanti da una trasformazione di coordinate.

L'obiettivo è quello di passare da un sistema di riferimento geodetico ad un altro, le cui procedure utilizzate sono raggruppate in due categorie:

- **trasformazione fra sistemi cartesiani nello spazio**
- **trasformazioni di tipo empirico valide localmente**

Trasformazione tra sistemi cartesiani nello spazio (trasformazione di Helmert)

Tale metodo viene eseguito operando sulle coordinate cartesiane geocentriche nei due sistemi, passando quindi da un sistema cartesiano nello spazio ad un'altra terna cartesiana, traslata e diversamente orientata rispetto alla prima, tenendo in considerazione di eventuali variazioni di scala e distorsioni.

La procedura di trasformazione più utilizzata è quella conosciuta come trasformazione di Helmert, che consiste in una rototraslazione nello spazio, con un fattore di scala, tenendo conto della seguente equazione:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \lambda \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_k \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

- Le tre componenti di traslazione, X_0, Y_0, Z_0 sono le coordinate cartesiane nel sistema 2 dell'origine del sistema 1
- Le tre matrici $\mathbf{R}_\omega, \mathbf{R}_\varphi, \mathbf{R}_k$ esprimono la rotazione del sistema 2 suddividendola in tre distinte rotazioni attorno agli assi del sistema 1
- λ è il fattore di scala costante

In particolare:

- Le convenzioni di segno (le rotazioni sono considerate positive se antiorarie per un osservatore il cui verso piedi-testa coincida con quello dell'asse) meritano particolare attenzione dato che non tutti i software di trasformazione adottano le stesse
- La trasformazione di Helmert non comporta deformazioni all'infuori del fattore di scala, uniforme in tutte le direzioni

I sette parametri di Helmert vengono stimati ai minimi quadrati sulla base della conoscenza delle coordinate in entrambi i sistemi per un numero congruo di punti ed ogni punto "tridimensionale" (cioè planimetrico e altimetrico) noto in entrambi i sistemi permette di scrivere tre equazioni (una per coordinata) nelle quali sono incogniti i sette parametri. Occorre, pertanto, disporre di almeno tre punti "tridimensionali" comuni ai due sistemi; mentre se ne dovrebbero utilizzare un numero maggiore, per controllare l'affidabilità della trasformazione attraverso i residui sulle coordinate dei punti noti.

Supponendo che le reti di appoggio dei due sistemi geodetici, fossero prive di errori, l'algoritmo di Helmert realizzerebbe una trasformazione praticamente "perfetta", con residui nulli, ma tutte le reti geodetiche sono caratterizzate da deformazioni di vario tipo dovute ad errori di misura e di calcolo, pertanto la stima dei parametri comporta necessariamente dei residui e la trasformazione risulta sempre approssimata.

In Italia la trasformazione di Helmert viene applicata in passaggio dal Datum WGS84 al Roma 40.

Pertanto resta la problematica di risolvere, quando si vuole inserire un rilievo GNSS georeferenziato nel datum ETRF89-WGS84 in una cartografia preesistente georeferenziata nel vecchio Datum nazionale Roma 40, come accade per buona parte della cartografia IGM e regionale.

L'IGM, dopo anni di studi, per semplificare la trasformazione evitando ambiguità, ha proceduto al calcolo e alla pubblicazione di "grigliati" di trasformazione che riportano le variazioni di latitudine e longitudine tra WGS84 e Roma 40 in funzione delle coordinate geografiche del punto considerato; tali variazioni sono calcolate per incrementi finiti di latitudine e longitudine, in sostanza, quindi, ne vengono dati i valori sui nodi di un grigliato a maglia quadrangolare. Per calcolare le variazioni da attribuire a un generico punto rilevato, tale grigliato bidimensionale deve essere interpolato, e per farlo in maniera univoca l'IGM fornisce un software di interpolazione denominato VERTO.

Inoltre i grigliati IGM comprendono anche le ondulazioni del geoide, calcolate nei nodi della stessa griglia, per poter passare da altezza ellissoidica a quota ortometrica e viceversa.

I files relativi ai grigliati sono files di testo (ASCII), con validità nell'intorno di un singolo vertice, vengono ceduti dall'IGM a pagamento.

Sono disponibili files con validità nell'intorno di un singolo vertice IGM95, oppure (più pratici per l'utilizzo) validi in un intero foglio della carta IGM in scala 1:50.000.

Esistono anche altri software commerciali o free che utilizzano i grigliati IGM, oltre al citato software VERTO, quali, per esempio, FERENS+.

Per problemi di trasformazione locali, che interessino zone non troppo estese, può essere vantaggioso ricorrere, anziché alla trasformazione di Helmert, a procedimenti più semplici: per esempio un procedimento, utilizzabile per la sola planimetria, consiste nell'effettuare il passaggio diretto da coordinate piane cartografiche nel primo datum a coordinate piane cartografiche nel secondo datum.

Di seguito, si riporta una trasformazione affine nel piano:

$$N_2 = a_1 N_1 + b_1 E_1 + c_1 \quad (2.18)$$

$$E_2 = a_2 N_1 + b_2 E_1 + c_2 \quad (2.19)$$

che tiene in considerazione la stima di sei parametri, da effettuare sempre ai minimi quadrati, necessitando di un minimo di tre punti comuni (3 punti x 2 coordinate = 6 equazioni).

Gli svantaggi della trasformazione affine nel piano è, in primis, che crea modelli con molte distorsioni locali delle reti i cui residui sono accettabili e validi solo per zone molto limitate, utilizzando una rototraslazione piana, semplice o con fattore di scala. Secondariamente le procedure risultano soggettive, in quanto la stima dei parametri è legata alla scelta dei punti “doppi” fatta dall’operatore in ambito locale.

Per zone più estese, si possono utilizzare espressioni più complesse, per tener conto degli effetti distorsivi e della differenza di curvatura e orientamento delle superfici ellissoidiche nei due datum.

Nella pagina successiva, si riporta la *Figura 2.9* con il riepilogo delle principali trasformazioni di coordinate e di Datum della cartografia italiana.

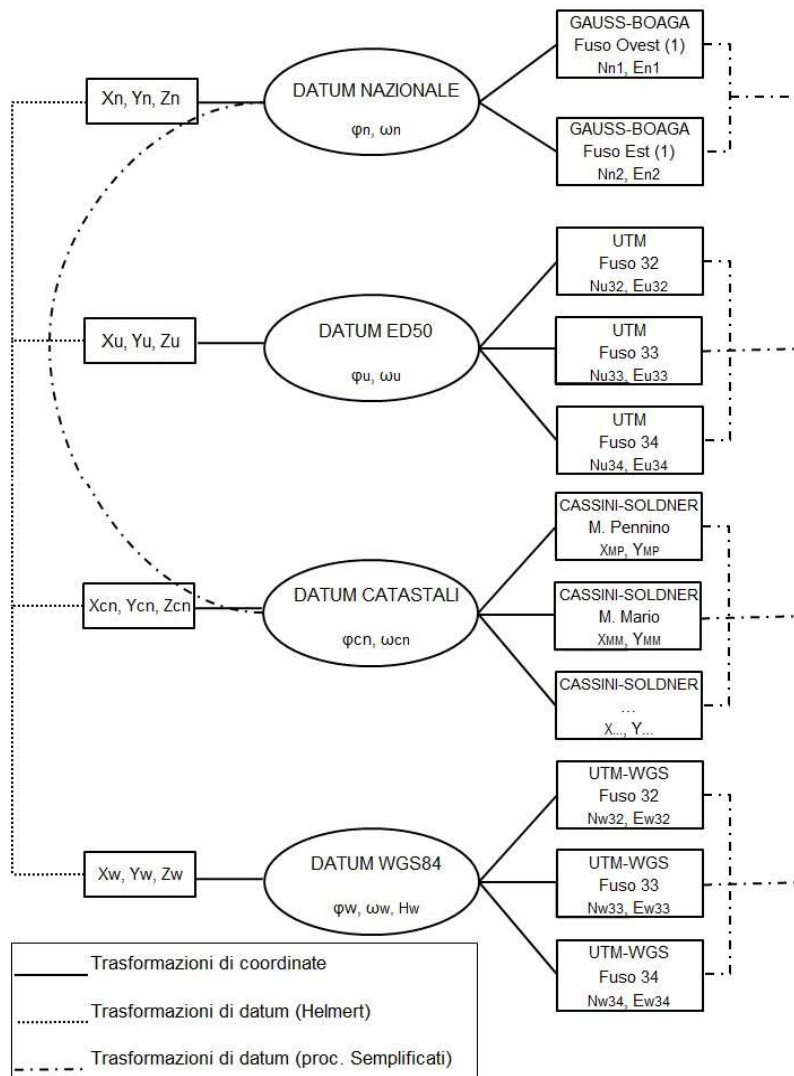


Figura 2.9: Riepilogo delle principali trasformazioni di coordinate e di datum della cartografia italiana – modificata da Stoppini, Radicioni, 2018

2.6) ConvER3

Si reputa opportuno inserire all'interno di questo capitolo il software impiegato per la trasformazione di coordinate nel lavoro di tesi, inquadrandone i principi generali.

ConvER3 è un software dedicato alla trasformazione di coordinate sul territorio dell'Emilia Romagna, che permette di eseguire il passaggio di coordinate fra i sistemi ETRS89 (nelle realizzazioni ETRF89 e ETRF2000), ED50 e ROMA40, considerando anche i rispettivi sistemi cartografici (rappresentazioni UTM e Gauss-Boaga), compreso il sistema regionale denominato "UTMRER".

Nei calcoli di trasformazione viene considerata anche la componente altimetrica, con le opportune conversioni fra quote ellissoidiche e geoidiche.

La funzionalità delle conversioni è limitata all'area geografica della Regione Emilia Romagna, convenientemente estesa per permettere l'elaborazione di eventuali dati a cavallo del confine.

I limiti geografici di funzionamento sono i seguenti:

- Latitudine: da 43° 20' a 45° 40'
- Longitudine: da 8° 40' a 13° 20'

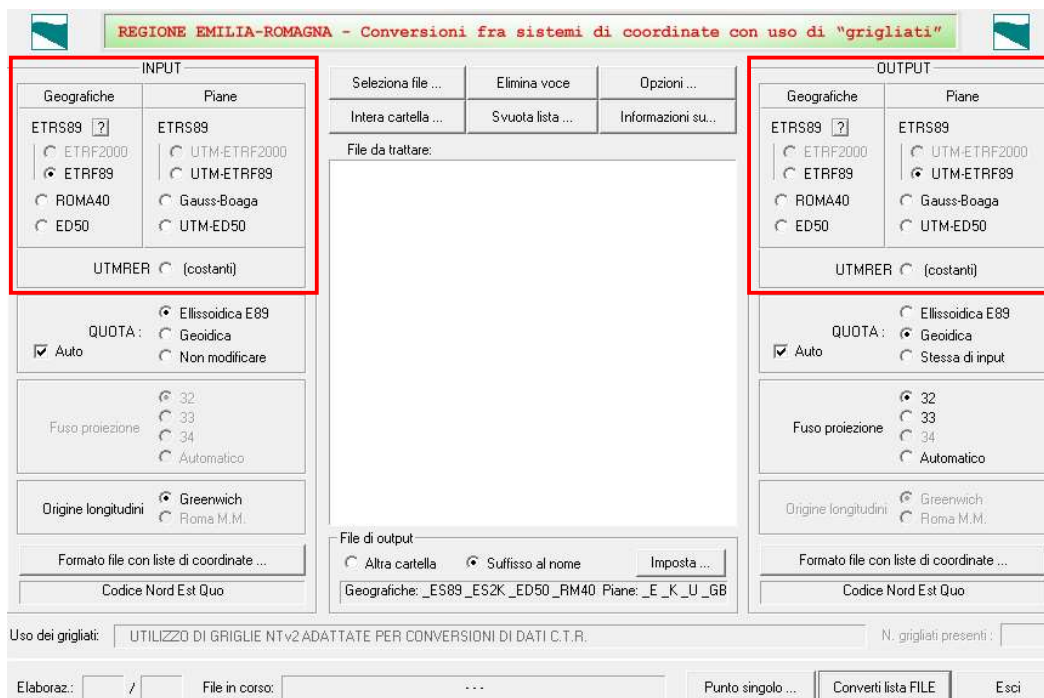


Figura 2.10: Interfaccia di ConvER3

Come evidenziato in Figura 4.10, nella parte a sinistra dell'interfaccia sono raccolte le impostazioni da assegnare per descrivere il sistema di coordinate in ingresso;

analogamente, nella parte a destra sono riportate le stesse opzioni, per indicare il sistema di coordinate richiesto in uscita.

La scelta della quota fra ellissoidica e geoidica può essere eseguita dall'utente, oppure lasciata decidere al programma in base all'associazione più usuale: ellissoidica con le coordinate geografiche ETRS89 e geoidica in tutti gli altri casi.

In Italia, come anche in Emilia Romagna, sono attualmente in uso diversi sistemi di riferimento. Questo equivale ad una importante quantità di dati geografici e topografici realizzati nei diversi sistemi d'uso; nel dettaglio ci si riferisce al Roma40, ED50, ETRF89, ETRF2000 che, aggiunti all'uso della tecnologia satellitare comportano, oltre a considerare i movimenti crostali, la necessità di un approccio globale. Tutto questo viene soddisfatto dal sistema globale ITRS, dal quale deriva il sistema europeo ETRS89 (definito appunto nel 1989).

Il passaggio tra i vari sistemi non è una semplice trasformazione geometrica, ma un calcolo eseguito su molti punti che legano i sistemi tra loro; si tratta quindi della generazione di un modello delle deformazioni mediante interpolazione tra i suddetti punti. I metodi utilizzati in passato, (costanti additive, linee isotransitive, algoritmi polinomiali, rototraslazioni), generavano comunque problemi di accuratezza o discontinuità.

Il metodo adottato oggi anche dall'IGM, si basa su matrici di differenze di coordinate, dette grigliati, che coprono il territorio nazionali senza discontinuità e sono forniti dalla Regione in un formato interpretabile dal software (NTV2).

2.7) Topografia Moderna

Negli ultimi decenni, grazie ai passi da gigante dell'elettronica e dell'informatica, vi è stato il passaggio dalla topografia alla geomatica, disciplina che si occupa di acquisire, modellizzare, interpretare, elaborare, archiviare e divulgare informazioni georeferenziate, ovvero informazioni caratterizzate da una posizione in un prescelto sistema di riferimento.

In particolare, tale progresso ha coinvolto molti settori:

- strumenti/sensori
- tecniche (di rilievo e di processamento)
- prodotti

Le attuali total station consentono di misurare angoli e distanze di una serie di punti e di determinarne la collocazione spaziale rispetto a un sistema di coordinate predefinito. La total station è uno strumento autonomo che non ha bisogno della presenza di satelliti, ma risente delle condizioni atmosferiche come umidità e temperatura, che influiscono

sull'indice di rifrazione aumentando l'errore medio; inoltre alcuni modelli, sono in grado di mettersi automaticamente in posizione corretta senza l'intervento dell'operatore grazie al PC integrato, per questo motivo, quindi, i teodoliti sono stati quasi completamente sostituiti dalle stazioni totali.



Figura 2.11: Stazioni Totali - www.archeomatica.it, 2018 [24]

Attualmente, la topografia moderna ha la capacità di misurare la distanza con elevata qualità e possibilità di misurarla senza l'ausilio di prismi, come risultava necessario in ambito classico.

In questo modo, anche il rilievo ha subito un importante progresso, avendo maggiore produttività, soprattutto sul processamento dei dati, con la possibilità di effettuare i rilievi con le sole misure di distanza (trilaterazioni).

La nascita dei distanziometri elettronici ha portato alla nascita di una nuova tipologia di sensori legati unicamente alla misura di distanza: i laser scanner.

I laser scanner si configurano come stazioni totali senza riflettore, motorizzati ed automatizzati, che danno la possibilità di rilevare in tempi brevissimi milioni di punti, infatti, una volta impostato un passo di campionamento ed il campo di misura, il laser scanner rileva qualsiasi oggetto.

Un difetto dei laser scanner (*Figura 2.11*) è che rilevano un numero enorme di punti, ma non effettuano nessuna scelta ed i punti risultano distribuiti secondo una maglia regolare, ma casuale, a differenza della strumentazione topografica tradizionale in cui l'operatore sceglie i punti caratteristici.

Per questo motivo, al fine di trasformare il dato acquisito dal laser scanner, in un rilievo metrico vero e proprio, si deve effettuare un'onerosa fase di post-elaborazione.

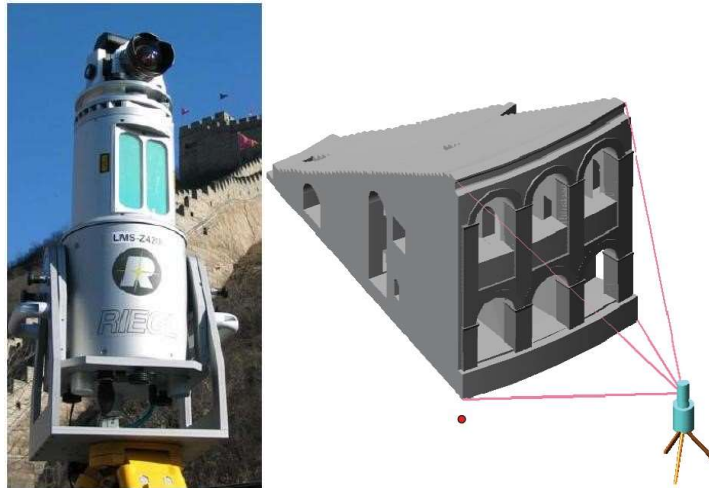


Figura 2.12: Laser scanner – A. Piemonte, 2009

2.8) Topografia Satellitare

Sin dal 1960 la NASA, il DoT (Department of Transportation) e il DoD (Department of Defence) cominciarono a sviluppare un sistema di posizionamento globale, nacque così il GNSS che sta per Global Navigation Satellite System (sistemi di navigazione satellitare globale), acronimo usato per il posizionamento satellitare.

Successivamente, nel 1977 nacque il programma NAVSTAR GPS che divenne fondamentale in tutti i settori del rilevamento, terrestre ed aereo, costituito da un sistema di posizionamento satellitare globale e concretizzato da una costellazione di satelliti che emettono incessantemente dei segnali elettromagnetici verso la Terra (*Figura 2.13*) che vengono captati, memorizzati ed elaborati da speciali ricevitori al fine di determinare, con elevata precisione, la posizione occupata.

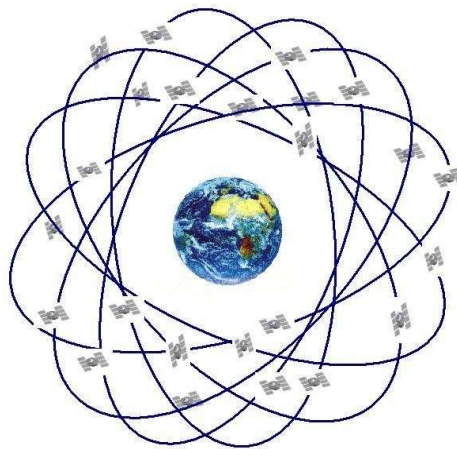


Figura 2.13- Sistema Satellitare - P.C.P.M. Pardal, 2009 [25]

Lo scopo è quello di permettere in ogni istante, in ogni luogo e con ogni condizione climatica il posizionamento tridimensionale di oggetti sia fermi che in movimento.

Il GPS è stato una rivoluzione perché andava, in alcuni casi, a scardinare alcuni principi su cui la topografia classica si poggiava, ossia il rilievo basato su osservazioni relative ed il rilievo di punti statici.

La sostanziale differenza tra la topografia classica e l'utilizzo del GPS è che la topografia classica si basa sulla collimazione di punti, misurando solo ciò che si vede e le misure vengono fatte verso punti fermi sul territorio, inoltre effettua misure relative di angoli e distanze; mentre il GPS permette di determinare la posizione reciproca tra due punti senza che essi siano intervistabili e determina direttamente le coordinate in un sistema di riferimento assoluto.

Una caratteristica fondamentale del GPS è quella di poter determinare la traiettoria di un veicolo in movimento solo posizionando un ricevitore sullo stesso; per questo motivo si è adottato definitivamente il GPS nel rilievo da mezzi in movimento (aerei, elicotteri, etc).

Il sistema GPS ha talmente rivoluzionato il metodo di rilevamento, facendo percepire le proprie innumerevoli possibilità di utilizzo, che attorno ad esso, si è sviluppata un'intera branca di ricerca, comportandone profonde evoluzioni nei seguenti ambiti:

- nelle **caratteristiche dei segmenti** (satelliti, stazioni di controllo, ricevitori)
- nelle **soluzioni di processamento** (tipologie di segnale)
- nelle **tecniche di posizionamento** (assoluto, relativo, differenziale)

Per quanto riguarda esclusivamente il ramo di rilevamento topografico, il GPS ha evidenziato immediatamente le sue potenzialità nel rilevamento terrestre affiancando in breve tempo le tecniche topografiche classiche in quello che viene diffusamente chiamato rilievo integrato. Questa tecnica permette di misurare le coordinate tridimensionali assolute, mentre la topografia, invece, ha la capacità di misurare la posizione di punti non stazionabili e punti situati al chiuso o in zone con scarsa visibilità dei satelliti.

2.9) Il Posizionamento Satellitare

Il posizionamento GPS si basa sulla capacità del ricevitore di determinare la distanza che lo separa dal satellite (*Figura 4.13*), che viene ottenuta dal tempo di volo; il passaggio tra il tempo e la distanza viene banalmente ottenuto come evidenziato:

$$D = Tempo \times velocità \quad (2.20)$$

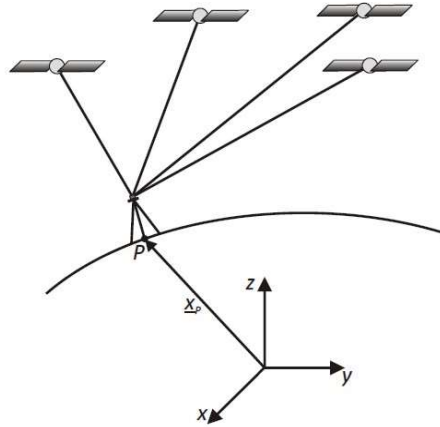


Figura 2.14: Sistema di Posizionamento Globale - modificata da Berti, 2010

Le posizioni sono determinate combinando le informazioni di distanza satellite-ricevitore e la posizione di punti noti, in questo caso i satelliti; tale tecnica è chiamata trilaterazione.

Esistono tre tecniche di posizionamento:

- posizionamento **assoluto** (m)
- posizionamento **relativo** (mm)
- posizionamento **differenziale** (cm)

Si sceglie quello più idoneo, in base agli obiettivi, ma in particolare per le finalità topografiche, solitamente possono essere presi in considerazione solo il posizionamento relativo e quello differenziale, in particolare nell'ottica del processamento delle informazioni acquisite attraverso il rilievo da drone.

2.9.1) Posizionamento Relativo

Questo metodo di posizionamento, si basa sull'osservazione simultanea degli stessi satelliti da due o più ricevitori, ma devono essere visibili almeno 4 satelliti contemporaneamente (Figura 2.15). La precisione aumenta se sono visibili più satelliti.

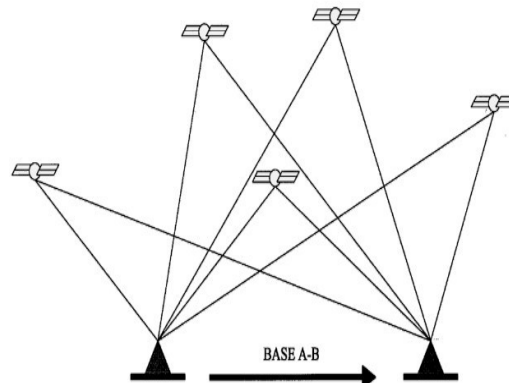


Figura 2.15: Posizionamento Relativo, il ricevitore deve vedere almeno 4 satelliti, modificata da Berti, 2010.

2.9.2) Posizionamento Differenziale

Se si opta per questo posizionamento, l'ubicazione del punto viene ricavata da osservazioni contemporanee effettuate presso una stazione fissa, detta Master, di posizione nota, ed un ricevitore mobile, Rover. La Master, partendo da queste osservazioni, calcola delle correzioni da applicare alle misure effettuate dal Rover al fine di migliorarne la precisione (Figura 2.16).

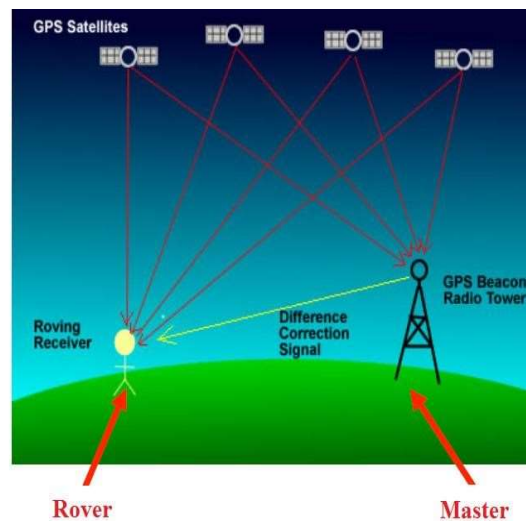


Figura 2.16: Posizionamento Differenziale, osservazioni contemporanee effettuate presso una stazione fissa, Master di posizione nota, ed un ricevitore mobile Rover

Se i due ricevitori sono connessi tra loro, questa operazione può essere effettuata in tempo reale.

Il GNSS più noto è il GPS ma non è l'unico, altri sistemi di posizionamento globale esistenti o in programma sono:

- **Glonass** (Russia)
- **Compass o Beidou** (Cina)
- **Galileo** (Europa)

Tutti i sistemi hanno caratteristiche diverse ma si basano sostanzialmente sulla stessa architettura e sui medesimi principi di posizionamento.

2.9.3) Rilievo di precisione NRTK

Al centro delle attuali attività topografiche si ha l'esigenza di ottenere precisioni di alcuni centimetri a distanze dell'ordine dei chilometri, avendo inoltre la possibilità di verificare il raggiungimento di tale precisione ricercando la massima efficienza delle operazioni sia in fase di campagna che di calcolo.

Di norma, per ottenere tali precisioni attraverso l'impiego di satelliti, occorre eseguire misure in relativo, come da paragrafo 2.9.1. Il rilievo in relativo presenta però alcuni svantaggi da prendere in considerazione:

- Richiede il coordinamento tra più squadre, almeno due, che operano in contemporanea e che siano in contatto per garantire la contemporaneità delle ricezioni delle rispettive antenne GPS
- Richiede uno stazionamento prolungato
- Richiede tempo per il calcolo per delle basi misurate
- Non si ha garanzia in campagna che le misure abbiano dato esito positivo
- Se il rilievo è complesso e richiede più basi, occorre eseguire la compensazione in blocco delle basi
- Se richiesto, occorre effettuare l'inquadramento in rete preesistente, tecnica o geodetica, inserendo tra i punti rilevati anche vertici appartenenti alla rete d'inquadramento

Questa tecnica risulta quindi impegnativa a livello organizzativo, ed il lavoro non finisce in campagna, anche se l'uso di basi indipendenti in numero ridondante garantisce l'analisi di qualità dei dati e la possibilità di dimostrare la qualità del lavoro svolto, ottenendo precisioni millimetriche.

Uno degli obiettivi principali che la tesi si pone è la ricerca di soluzioni veloci, sia di rilievo che di elaborazione dati: si è quindi impiegata una differente tecnica di posizionamento satellitare, basata su quello differenziale descritto al paragrafo 2.9.2.

Invece che impiegare puntualmente due antenne, una delle due si mantiene sempre accesa in un punto a coordinate note, prendendo il nome di Master (o Stazione Permanente).

Pertanto in campagna, il rilevatore acquisisce dati solo attraverso il ricevitore (Rover) ed in post-processing vengono calcolate la distanza relativa (base) tra le due antenne e la posizione del punto di stazione, nota quella della Stazione Permanente.

Si riportano le Stazioni Permanenti degli Enti Pubblici che interessano ad oggi il territorio italiano e che pubblicamente dispongono di dati per il post-processing, accessibili in maniera automatizzabile.

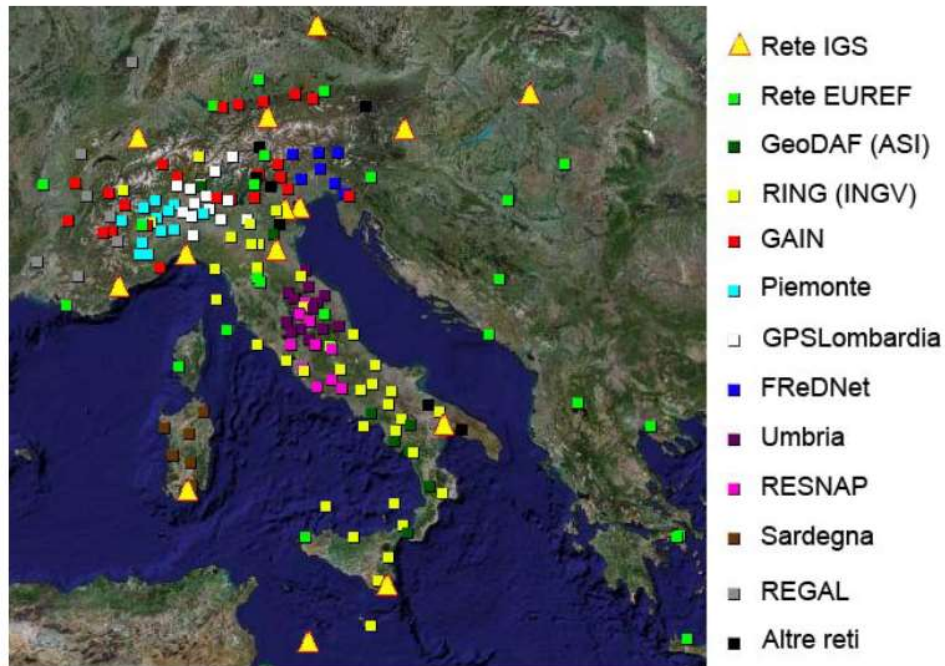


Figura 2.17: Stazioni Permanenti sul territorio italiano – Roggero, 2007

L'efficienza del rilievo si aumenta impiegando il sistema RTK (Real Time Kinematic), in cui il sistema Master-Rover dispone di un mezzo di trasmissione dei dati tra le due antenne, come un radio modem, cellulari GSM o GPRS. In tal modo, adottando un intervallo di campionamento di 1 secondo, i dati sono direttamente inviati dal Master al Rover, che li elabora calcolando la base.

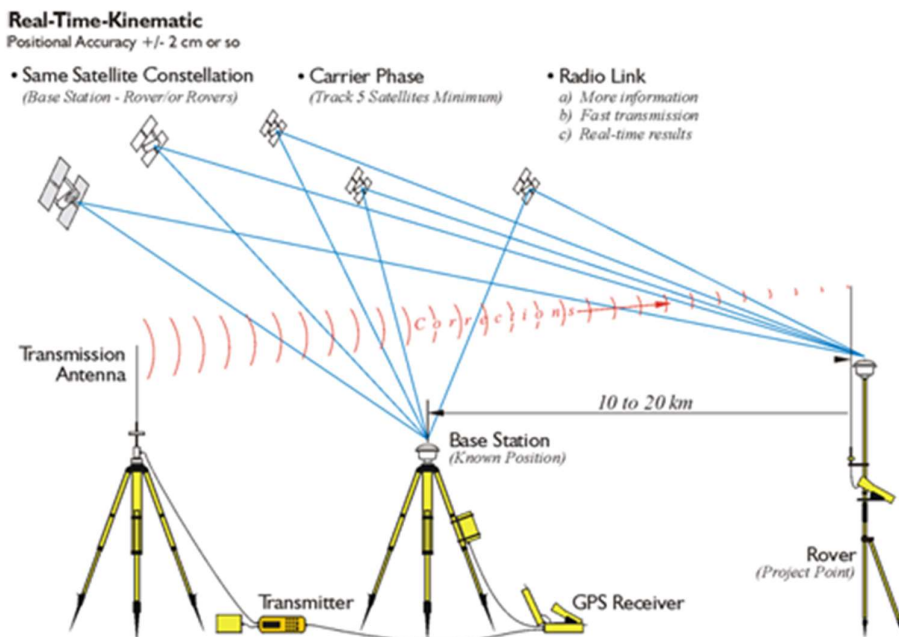


Figura 2.18: Funzionamento master-rover in RTK– J. Van Sickle, 2015

Oltre alla riduzione del tempo di misura e di calcolo, col rilievo RTK si ottengono i seguenti vantaggi:

- Sapere già al momento del rilievo se questo è riuscito correttamente o meno
- Conoscere le coordinate del rover già in campagna
- Poter effettuare un tracciamento, ovvero andare ad occupare punti del terreno dei quali si conoscono le coordinate
- Conoscere le coordinate nel sistema voluto, se su questo sono assegnate le coordinate del master

Per poter funzionare correttamente però deve funzionare il collegamento e le misure, una volta eseguite, non sono ridondanti (a meno di non rioccupare il punto e fare una nuova misura) per cui non ci si accorge di eventuali errori.

Da questa tecnica si ottengono precisioni centimetriche, mantenendo una distanza massima di 10 chilometri tra Master e Rover.

Tale precisione, per questa scala massima, è la stessa raggiunta con il rilievo post-processato che però richiede tempistiche molto più lunghe, non idonee ai contesti di prima emergenza. E' infatti sempre più preferita la tecnica Real Time a quella relativa, ormai obsoleta per il contesto analizzato.

Per ovviare al limite di distanza imposto dalla connessione tra le due antenne, il sistema si è evoluto nel Network Real Time Kinematic (NRTK), costituito da un elevato numero di stazioni atte a coprire una vasta area quale la regione Emilia-Romagna.

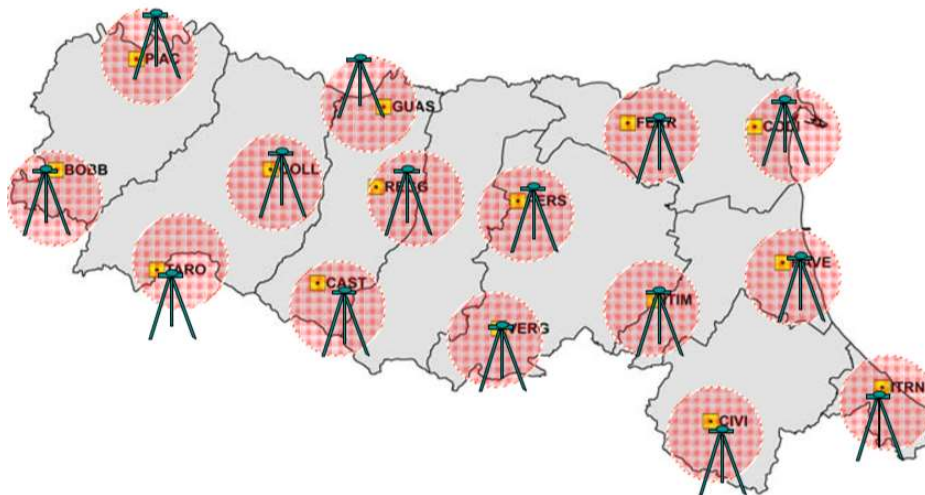


Figura 2.19: Rete di stazioni interoperanti in Emilia-Romagna – gpsemiliaromagna.it, 2015 [26]

Le stazioni di riferimento (SR), posta ad un'interdistanza di circa 26 chilometri, svolgono due compiti:

- Tracciano i satelliti in vista
- Trasferiscono automaticamente i dati verso un centro di controllo

Un software residente nel centro di controllo:

- Riceve in Real Time i dati acquisiti dalle SR
- Esegue un controllo di qualità dei dati
- Calcola gli effetti sistematici (errori legati al passaggio del segnale nella ionosfera, correzioni orbitali e degli orologi) per tutti i satelliti
- Esegue la modellazione dei sistematismi su tutta l'area
- Gestisce la disseminazione delle correzioni direttamente all'utenza, costituita dal ricevitore Rover.

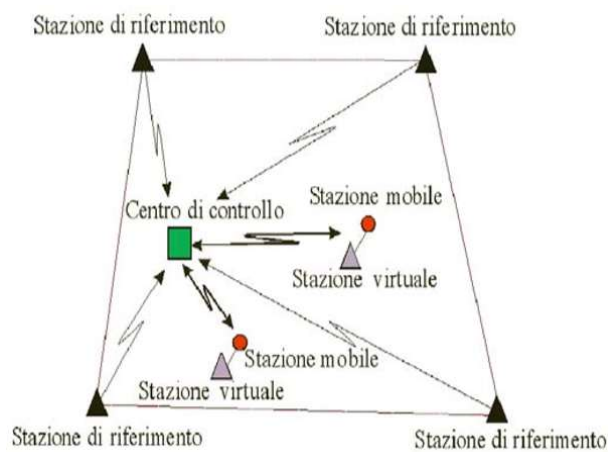


Figura 2.20: Principio di funzionamento NRTK – modificata da gpsemiliaromagna.it, 2015 [26]

Bastano 15 stazioni a decine di chilometri per consentire il rilievo in tempo reale su tutta l'Emilia Romagna: le correzioni vengono trasmesse all'utente autorizzato che si collega al Centro di controllo ed il ricevitore "RTK" dell'operatore calcola istantaneamente la posizione, qualunque sia la distanza dalle stazioni di riferimento.

3) PRINCIPI DI FOTOGRAMMETRIA

3.1) Le procedure classiche di orientamento e restituzione

La fotogrammetria si occupa di determinare la forma e la dimensione di oggetti attraverso l'acquisizione di immagini sfruttando la proiettività che rappresenta la relazione tra spazio 2D e 3D.

La relazione fra coordinate immagine e coordinate oggetto è definita dalle equazioni di collinearità che si ottengono dalla formulazione di una trasformazione conforme a:

$$\bar{X} - \bar{X}_0 = \lambda R(\bar{x} - \bar{x}_0) \quad (3.1)$$

Dove:

\bar{X} è il vettore delle coordinate oggetto

\bar{X}_0 è il vettore delle coordinate oggetto del centro di proiettività

λ è il fattore di scala esprimibile come $\frac{Z_0}{c}$ con c la distanza focale della camera

R è la matrice di rotazione spaziale funzione delle rotazioni elementari ω, φ, k

\bar{x} è il vettore delle coordinate immagine

\bar{x}_0 è il vettore delle coordinate immagine del centro di proiettività

L'equazione può essere scritta come:

$$\begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} R \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Si può affermare, pertanto, che ad ogni punto oggetto corrisponde solo un punto immagine, mentre ad un punto immagine, corrispondono infiniti punti oggetto, rendendo necessario avere informazioni su Z , oppure due immagini dello stesso oggetto.

In generale le equazioni di collinearità sono definite dalle seguenti formule:

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \quad (3.3)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \quad (3.4)$$

Dove:

- (X, Y, Z) sono le coordinate nello spazio oggetto tridimensionale
- (ξ, η) sono le coordinate nello spazio immagine bidimensionale
- (ξ_0, η_0) sono le coordinate del punto principale PP, proiezione sul fotogramma del centro di presa
- c è la distanza focale del centro di presa al piano immagine
- (X_0, Y_0, Z_0) sono le coordinate del centro di presa nello spazio oggetto
- r_{ij} sono gli elementi della matrice di rotazione spaziale, per $i = 1,2,3$ e $j = 1,2,3$

In conclusione, per definire la trasformazione tra coordinate immagine e oggetto sono necessari 9 parametri fondamentali per la ricostruzione metrica dell'oggetto, che vengono distinti in:

- Parametri di Orientamento Interno (P.O.I.): x_0, y_0, c
- Parametri di Orientamento Esterno (P.O.E.): $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, k$

La posizione e l'assetto dei fotogrammi viene ricostruita individuando dei punti fotogrammetrici di appoggio, cioè punti a coordinate note.

Orientamento interno di una camera metrica

Attraverso le equazioni di collinearità si è definita una corrispondenza rettilinea tra i punti oggetto e i punti immagine ipotizzando che le rette proiettive si intersechino tutte nel punto **O** detto centro di proiezione, *Figura 3.1.*

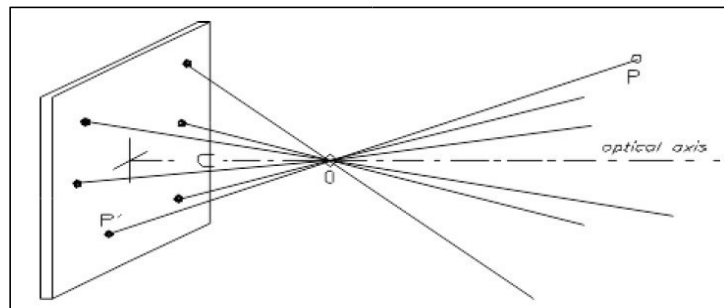


Figura 3.1: Rette proiettive e centro di proiezione O. – modificata da Zanutta et al.,2019

Per il modello ideale gli unici parametri di orientamento interno sono la distanza focale **c** e le coordinate immagine del punto principale che è il punto in cui si intersecano il piano di proiezione con la perpendicolare condotta dal centro di proiezione. Nei casi reali occorre, invece, tenere in considerazione gli inevitabili errori dovuti all'obiettivo, alla camera e al fotogramma.

Inoltre, in un sistema ottico ideale i due piani ottici principali, **H** per lo spazio-oggetto e **H'** per lo spazio-immagine, sono tra loro perfettamente paralleli e per il caso aria-vetro-aria si ha che i due punti ottici principali (intersezione tra asse ottico e piani principali) coincidono con i due punti nodali **N** e **N'**. I raggi centrali passanti per i punti nodali formano con l'asse ottico lo stesso angolo τ inoltre la distanza principale **c** coincide con la distanza immagine s' , *Figura 3.2.*

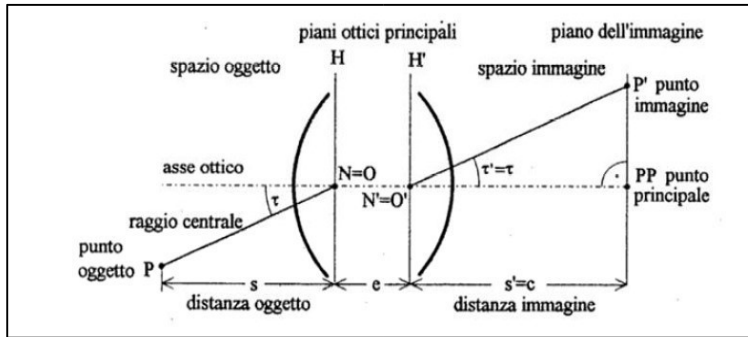


Figura 3.2: caso ideale di formazione dell'immagine - modificata da Zanutta et al.,2019

Nel caso reale occorre tenere in considerazione quanto segue:

- Gli obiettivi sono solitamente molto spessi e asimmetrici e le lenti sono ricavate da diversi tipi di vetro ottico. Il diaframma, che non è al centro dell'obiettivo, limita l'effettivo fascio di raggi che formano il punto immagine, ottenendo un'immagine apparente chiamata pupilla di entrata **EP** e analogamente si ha la pupilla di uscita **EP'** nello spazio-immagine dell'obiettivo. Questo implica che la posizione del centro di proiezione **O** debba essere determinata.
- L'asse ottico dovrebbe contenere i centri di tutte le superfici sferiche, ma a causa di imprecisioni nell'incollaggio/assemblaggio delle lenti e dell'obiettivo si saranno accumulati una serie di piccoli errori che portano a non avere più l'asse ottico come asse di riferimento fotogrammetrico, si avrà, pertanto, un raggio principale **PR_A** calibrato che sarà perpendicolare al piano immagine nello spazio oggetto e passerà per il centro della **EP** il cui prolungamento interseca il piano immagine nel punto principale di autocollimazione **PPA**.
- La pupilla di ingresso, generalmente, non giace sul piano principale **H**, ne segue che τ e τ' sono diversi.
- La distanza principale **sm'** definita dal telaio del piano focale della camera differisce dalla distanza principale ottica **s'**.

Il piano immagine non è rigorosamente perpendicolare all'asse ottico.

Possiamo definire quindi un centro di proiezione matematico **Om** collocato perpendicolarmente al piano immagine ad una distanza **c** dal **PPA** in modo da riprodurre gli angoli τ il più fedelmente possibile. Gli errori residui vengono attribuiti alla distorsione ottica, *Figura 3.3*.

$$\rho = c \tan \tau + \Delta \rho \quad (3.5)$$

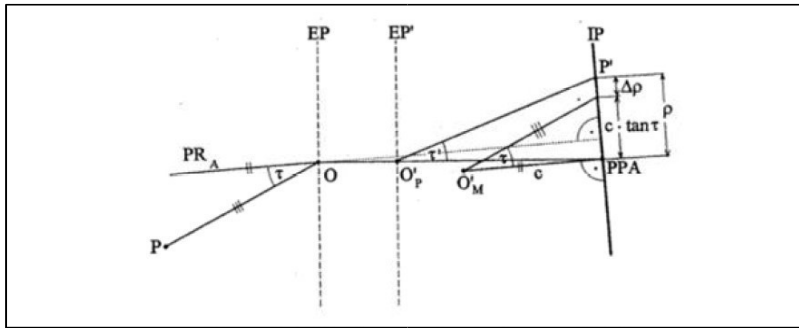


Figura 3.3: Caso reale di formazione dell'immagine - modificata da Zanutta et al.,2019

Le camere fotogrammetriche possono essere calibrate in laboratorio usando un goniometro ottico oppure a mezzo di opportuni software.

Negli obiettivi moderni si è osservato che la distorsione è praticamente trascurabile, e viene considerata solo per la fotogrammetria analitica di precisione.

Possiamo avere tre tipi di distorsione, *Figura 1.4*:

- Distorsione simmetrica detta “a barilotto”, essendo simmetrica è facilmente eliminabile
- Distorsione asimmetrica detta “a cuscinetto”
- Distorsione casuale ad esempio a causa di una bolla d’aria che curva la pellicola; è una distorsione molto grande.

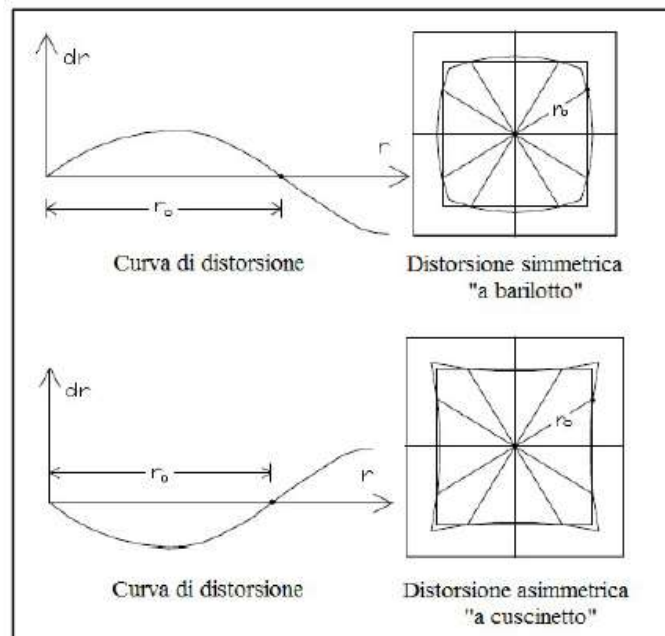


Figura 3.4: Distorsione simmetrica e asimmetrica - modificata da Zanutta et al.,2019

Il sistema di coordinate immagine e il relativo centro di presa vengono determinati utilizzando su ogni fotogramma le marche fiduciali; l'intersezione delle rette passanti per le coppie di marche fiduciali opposte definisce il centro fiduciale **FC**.

In un certificato di calibrazione di una camera fotogrammetrica si possono trovare le seguenti informazioni:

- Le coordinate immagine delle marche fiduciali (ed eventualmente le distanze fra le marche)
- Le coordinate del punto principale di autocollimazione **PPA**, del punto principale di simmetria **PBS** (punto dato dall'intersezione del raggio principale di simmetria con il piano immagine) e del centro fiduciale **FC**.
- La distanza principale **c**
- La curva di distorsione media radiale
- La data della calibrazione
- Informazioni sulla risoluzione dell'immagine

Le camere sono sensibili agli urti e agli sbalzi di temperatura, ciò rende necessaria la loro costante calibrazione.

Orientamento esterno di una camera metrica

La fase successiva all'Orientamento Interno è quella di Orientamento Esterno (O.E.), avente lo scopo di ricostruire la posizione spaziale dei fotogrammi al momento dello scatto, ossia, di determinare i 12 parametri (6 per ogni fotogramma) di O.E. che compaiono nelle equazioni di collinearità.

Si possono distinguere tre diverse procedure:

- Orientamento indipendente di due fotogrammi

Sono necessari almeno 3 punti di appoggio (tridimensionali) in ciascun fotogramma. Si può risolvere il sistema dopo aver linearizzato le equazioni mediante l'introduzione di valori approssimati delle incognite.

Questa procedura è detta anche "dei vertici di piramide" e non si sfruttano le informazioni dei punti omologhi, *Figura 3.5*.

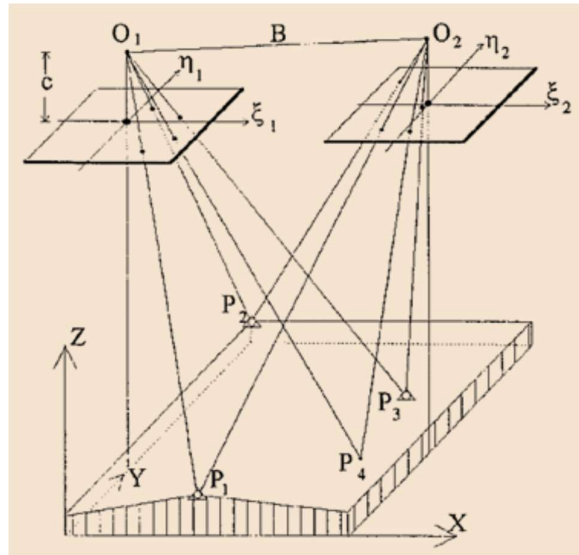


Figura 3.5 - Orientamento contemporaneo di due fotogrammi - modificata da Kraus, 1994

- Orientamento simultaneo di due fotogrammi

Attraverso un qualsiasi numero di punti di appoggio e ulteriori punti di legame (visibili su entrambi i fotogrammi) si perviene a un sistema ridondante che può essere risolto con il metodo della compensazione ai minimi quadrati.

- Orientamento simultaneo di due fotogrammi in due fasi successive

Nella prima fase, chiamata “Orientamento Relativo”, si ricrea un modello stereoscopico (a partire da due fotogrammi) un sistema x, y, z modello. Il modello è completamente definito se si vengono a intersecare i raggi omologhi di almeno cinque punti. Quindi, si determina solo la posizione relativa fra le stelle di raggi proiettanti senza nessun riferimento al sistema oggetto X, Y, Z . Nella seconda fase, detta “Orientamento Assoluto”, il modello viene roto-traslato e scalato con una trasformazione conforme spaziale delle coordinate x, y, z per portarlo in coordinante X, Y, Z .

I punti d'appoggio per l'orientamento esterno dei fotogrammi

I punti d'appoggio, che verranno poi utilizzati nelle operazioni di orientamento esterno dei fotogrammi, dovranno essere determinati con tradizionali strumentazioni e tecniche topografiche, ottenendo le loro coordinate in base a un opportuno sistema di riferimento. In generale, su ciascun punto, viene realizzata un'intersezione in avanti adottando come base nota la stessa base di presa dei fotogrammi.

Sono utilizzabili, tuttavia, anche altre tecniche di rilievo, che dovranno comunque fornire con precisione la posizione dei punti di appoggio.

I punti di appoggio (P.A.), preferibilmente, vanno materializzati mediante opportuni segnali su cartoncino rigido, incollati provvisoriamente all'oggetto; essi devono essere opportunamente numerati per il loro riconoscimento certo.

Le loro dimensioni, affinché siano ben visibili sui fotogrammi, vanno stabilite in relazione alla scala degli stessi fotogrammi.

Quando non è possibile o quando è impraticabile materializzare i punti di appoggio con i target, è possibile individuare, al loro posto, dei particolari architettonici sull'edificio, ben visibili sui fotogrammi e facilmente collimabili, come possono essere angoli di finestre, architravi di porte, ecc.

3.2) La fotogrammetria digitale e le procedure di correlazione automatica

La fotogrammetria digitale ha sostituito le classiche fotografie su pellicola con quelle ottenute con supporti digitali e memorizzate sotto forma di numeri. Il software, al contrario di quanto avviene con il metodo analogico, è in grado di eseguire automaticamente la scelta dei punti omologhi attraverso l'uso di algoritmi di image matching, permettendo di ridurre i costi e rendendo questa tecnologia accessibile ad una più ampia base di utenza.

L'immagine viene descritta come una funzione $g(x,y)$, con x e y variabili nello spazio, dove la variabile dipendente esprime il contenuto radiometrico che può essere ad esempio il valore **B/N** (bianco o nero), un livello di grigio o un valore **RGB** (rosso, verde, blu).

L'immagine non può essere descritta come una funzione analitica chiusa: è necessario, pertanto, trovare una funzione discreta che la rappresenti, questo processo è detto digitizing e permette di rappresentare l'immagine come una matrice $g(x,y)$ di elementi areali finiti, pixel.

$$g(x,y) = \begin{bmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \dots & g(0,C-1) \\ g(1,0) & g(1,1) & \dots & g(1,C-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(R-1,0) & g(R-1,1) & \dots & g(R-1,C-1) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Dove:

x è l'indice di colonna che va da 0 a $C-1$, C è il numero massimo di colonne

y è l'indice di riga che va da 0 a $R-1$, R è il numero massimo di righe

$g(x,y)$ è il valore di grigio $\{0,1, \dots, max\}$

Ad ogni pixel viene associato un valore DN, ossia un digital number, che rappresenta la radiometria di quella porzione di immagine.

Per il DN vale la relazione:

$$DN = 2^{(n^{\circ}bit)} \quad (3.7)$$

dove “**n° bit**” è il numero di bit a disposizione che con l’aumentare dei quali si può rappresentare un numero sempre maggiore di livelli di radianza; l’esempio più classico e semplice con 2 bit è possibile rappresentare un’immagine in bianco e nero mentre con 24 bit si hanno più di 16 milioni di colori dove i pixel a radianza minore, e quindi a DN minore, rappresentano i toni più scuri.

Infatti, se si vuole rappresentare la radianza di un’immagine in bianco e nero in toni di grigio è sufficiente un numero compreso tra 0 (nero) e 255 (bianco) occupando 8 bit, ovvero $2^8 = 256$, che corrispondono ad 1 byte.

Invece, se si vogliono ottenere immagini a colori, si hanno due modi di rappresentare la radiometria, la prima è la modalità “**True Color RGB**” e l’altra è la “**modalità colore tavoloza**”.

La modalità **True Color RGB** prevede che ogni colore sia la sovrapposizione di tre colori fondamentali additivi rosso, verde, blu, ottenendo un valore compreso tra 0 e 255 per ciascuno dei tre colori. Questo comporta che l’immagine sia a tre piani, ovvero costituita da tre matrici rappresentabili come

$$G_C = \{g_1(x, y), g_2(x, y), g_3(x, y)\} \quad (3.8)$$

dove **g1, g2, g3** possono essere i tre livelli RGB e di conseguenza si avrà bisogno di 3 byte per ogni pixel.

Nei sistemi di rilevamento mobili (*mobile mapping system*), vengono prodotte anche immagini multicanali fondamentali, dove si possono avere n funzioni del tipo $g_n = (x, y)$ come, ad esempio in una sequenza video le immagini sono funzione anche nel tempo.

La modalità **tavoloza** consente di avere immagini di dimensioni ridotte andando a selezionare dalla stessa solo i 256 colori che meglio le rappresentano. In questo caso la radianza del *pixel* è rappresentata da **1 byte** soltanto e l’immagine contiene meno dati dell’originale.

Ai fini della fotogrammetria occorre definire la relazione che si instaura tra la posizione del pixel e le coordinate immagine, infatti se l’origine del sistema di riferimento dell’immagine è posto a mezzo pixel di distanza dalla matrice immagine, le coordinate immagine del centro di un pixel si possono ottenere moltiplicando il numero di indice per la dimensione del pixel come mostrato in *Figura 3.6*.

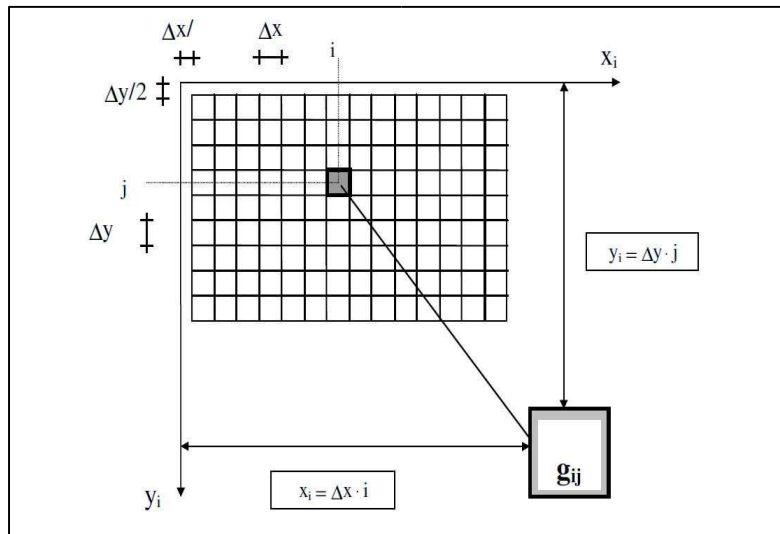


Figura 3.6: Sistema di coordinate immagine in un'immagine digitale - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al., 2019

La dimensione di un pixel, d_{pix} , viene in genere indicata come densità di campionamento in punti per pollice con l'acronimo d_{pi} , dall'inglese dots per inch, e definisce la risoluzione. Un modo per indicare la risoluzione dell'immagine, considerando che un pollice corrisponde a $25400 \mu m$, si ha la seguente relazione:

$$d_{pix} = \frac{25400}{dpi}; \quad dpi = \frac{25400}{d_{pix}} \quad (3.9)$$

Un altro modo, in modo più corretto, per indicare la risoluzione dell'immagine, consiste nell'utilizzo del ground sampling distance GSD, termine anglosassone per indicare la dimensione del pixel al suolo. Questo sistema considera l'area di superficie reale che copre un pixel sul sensore della fotocamera, pertanto risulta più indicato, in quanto la risoluzione dipende sia dalla dimensione del pixel che dalla focale della camera, ottenendo la seguente relazione:

$$GSD = l \frac{Z}{c} \quad (3.10)$$

Dove:

Z è la distanza di presa

l è la dimensione lato del pixel

c è la focale della camera

quindi con pixel di $10 \mu m$ con focale di 100 mm , si arriva ad ottenere una risoluzione maggiore di pixel più piccoli da $8 \mu m$ con focale di 60 mm .

Infine, occorre tenere in considerazione che:

- la riduzione della dimensione del pixel può migliorare la risoluzione geometrica, ma non la qualità radiometrica dell'immagine
- la massa di dati da trattare cresce col quadrato della risoluzione e triplica ulteriormente, se l'immagine è a colori.

Trattamento delle immagini digitali

Innanzitutto, va sottolineato che le immagini digitali hanno il vantaggio di poter essere facilmente elaborate ed opportunamente modificate per gli scopi fotogrammetrici.

Le procedure, per trattare le immagini digitali, possono essere riepilogate nelle seguenti cinque fasi:

- **Acquisizione** – fase durante la quale viene generata l'immagine, suddivisa in:
 - *diretta*: se si utilizza una fotocamera,
 - *indiretta*: se si effettua l'acquisizione di un'immagine tradizionale con uno scanner.
- **Compressione** – fase di diminuzione della mole di dati.
- **Pretrattamento** – fase di miglioramento dell'aspetto dell'immagine, suddivisa in:
 - *tecniche di ripristino*: utilizzate per eliminare lo sfocamento, i movimenti, i disturbi radiometrici e la distorsione delle lenti,
 - *tecniche di miglioramento*: utilizzate per esaltare i bordi, senza modificarne la posizione geometrica, ridurre il rumore, migliorare il contrasto, la variazione dei valori di grigio.
- **Segmentazione** – fase nella quale si adottano i criteri più appropriati per suddividere l'immagine in aree significative.
- **Visualizzazione** – fase di utilizzo vero e proprio delle tecniche di presentazione delle immagini.

Ai fini di trattamento delle immagini digitali, le caratteristiche che interessano maggiormente sono:

- la luminosità,
- il contrasto,
- l'istogramma dei contenuti radiometrici.

Si definisce la **luminosità** come la media $g_a(x,y)$ della funzione:

$$g_a = \frac{1}{RC} \sum_{x=0}^{R-1} \sum_{y=0}^{C-1} (g(x, y)) \quad (3.11)$$

Dato $\mathbf{g(x,y)}$ modello di immagini in toni di grigio

La deviazione standard σ è la misura del suo **contrasto**, un'immagine con valori bassi di contrasto apparirà piatta, a cui funzione è:

$$\sigma = \frac{1}{RC} \sum_{x=0}^{R-1} \sum_{y=0}^{C-1} (g(x, y) - g_a)^2 \quad (3.12)$$

Questi due parametri permettono di definire la funzione di trasferimento del contrasto:

$$g'_{ij} = \alpha g_{ij} + r \quad (3.13)$$

Nella quale:

$\mathbf{g'_{ij}}$ è l'elemento della matrice immagine modificato

$\mathbf{g_{ij}}$ è l'elemento della matrice immagine non modificato

α è il parametro del controllo del contrasto

r è il parametro di controllo della brillantezza

Ma si dovrà considerare che, se si varia il parametro r si schiariscono, oppure scuriscono, in uguale maniera tutti i colori, essendoci valori maggiori di 255, si rischia di perdere informazioni.

Occorre, considerare che variando il contrasto, si agisce sul coefficiente angolare della funzione di trasferimento, portando i toni alti verso il bianco e i toni bassi verso il nero, *Figura 3.7*; da cui saranno esaltate le differenze tra i valori cromatici, ottenendo un aumento di profondità.

La funzione di trasferimento del contrasto, può non essere lineare ma soggetta ad un parametro γ , che consente di aumentare il dettaglio in un'immagine a basso contrasto senza influenzare significativamente le ombre o le zone di luce.

$$g_{ij} = g'_{ij}{}^\gamma \quad (3.14)$$

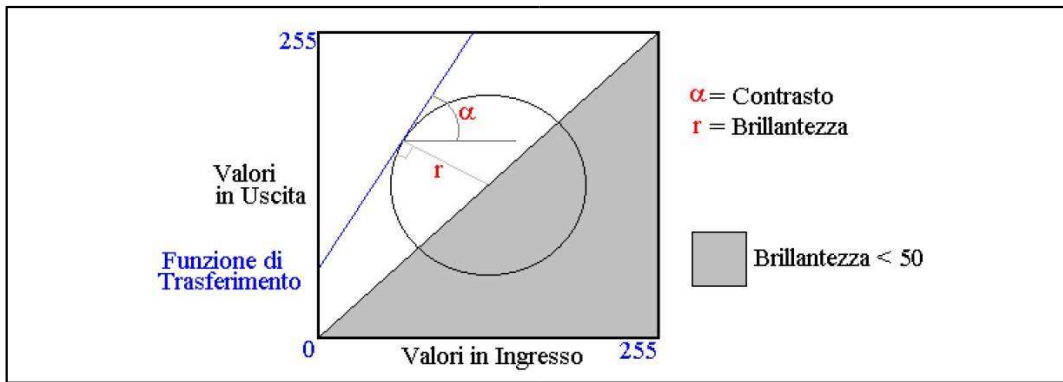


Figura 3.7: Funzione di trasferimento. - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al.,2019

Con il calcolo dell'istogramma dei contenuti radiometrici, si ottiene un quadro immediato della distribuzione radiometrica, al fine di avere una rappresentazione sintetica dei dati immagine. Inoltre, assumendo il DN di ciascun pixel, come una variabile casuale, il corrispondente **istogramma** rappresenta un grafico discreto di frequenza che esprime la distribuzione dei livelli di grigio in tutta l'immagine.

Nella Figura 3.8 si osserva sull'asse delle ascisse il valore che ogni pixel può assumere e su quello delle ordinate le frequenze cioè il numero di pixel che hanno quel valore.

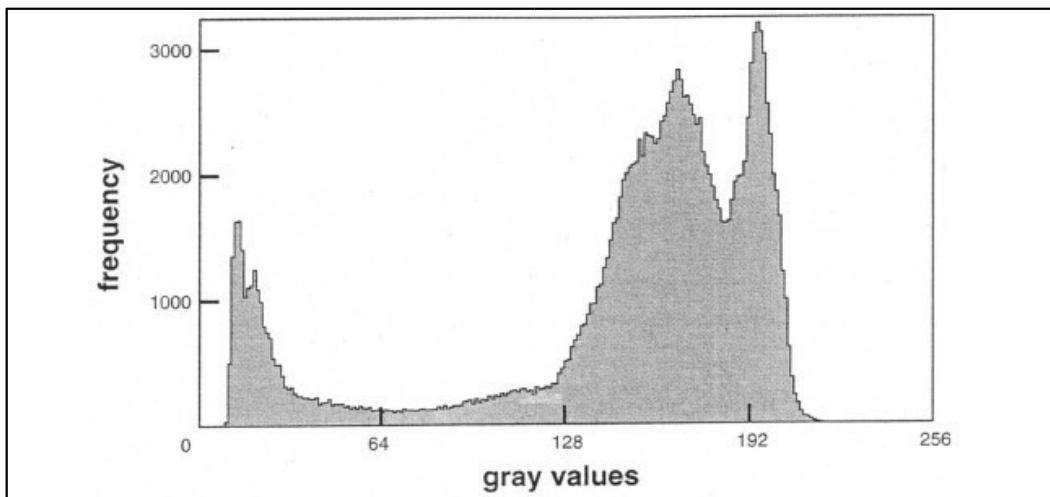


Figura 3.8: Istogramma dei valori di grigio di un'immagine - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al.,2019

Nel caso in esame, si può osservare che la figura non è di buona qualità cromatica, mentre se lo fosse l'istogramma assumerebbe una forma a campana di Gauss, che coprirebbe tutta l'ampiezza disponibile dei valori radiometrici. Nel caso di una distribuzione normale si ha un valore di DN centrale che può essere ottenuto come media aritmetica dividendo la somma di tutti i valori dei pixel per il numero dei pixel. Per ottenere espansioni o riduzioni di scala, è necessario conoscere l'istogramma dei valori di grigio e dei suoi valori di

minimo e massimo, infatti, ad esempio, l'espansione della scala dei livelli radiometrici può essere usata per esaltare il contrasto dell'immagine rendendola più nitida e definita. Infine, nel trattamento delle immagini digitali, si dovrà considerare il **ricampionamento**, ossia una ridefinizione del contenuto radiometrico di un'immagine che ha subito una trasformazione piana, che potrebbe comportare qualche problematica, infatti se si prova a trasformare un pixel dell'immagine iniziale nel sistema dell'immagine finale, il processo interesserà più pixel della seconda immagine, *Figura 3.9*.

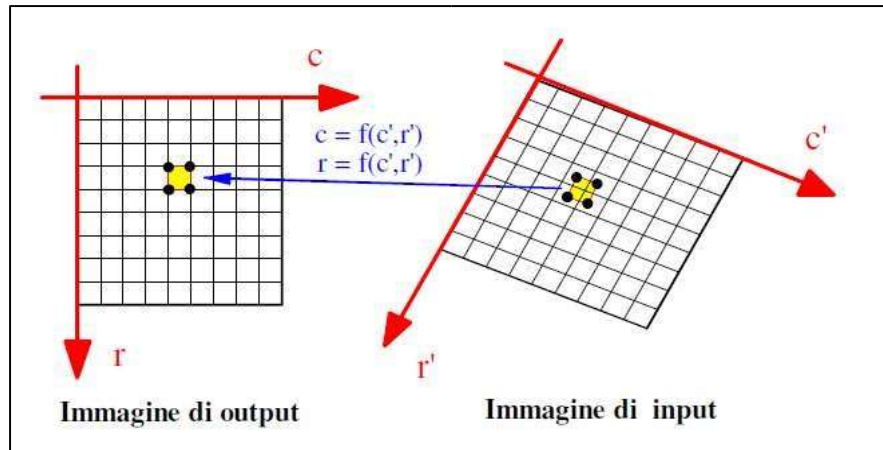


Figura 3.9: trasformazione piana di un'immagine e principio di ricampionamento. - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al., 2019

Per risolvere il problema, esistono due metodi:

- **Metodo dei baricentri:** consiste nel trasformare le coordinate del baricentro del primo pixel dell'immagine ricampionata nel sistema dell'immagine iniziale. Il punto cadrà all'interno di un pixel dell'immagine da cui posso leggere il valore radiometrico e lo ricopio nel pixel di partenza.

Anche questo metodo potrebbe essere insufficiente alla risoluzione del problema, infatti che si possono avere più baricentri che cadono nello stesso pixel dell'immagine iniziale ottenendo gruppi di pixel contigui che hanno lo stesso valore radiometrico; questo fenomeno è noto col nome di "effetto blocking".

Per ridurre questo effetto, sono state elaborate delle strategie interpolative tra cui:

- il *metodo delle zone di influenza*
- il *metodo delle distanze pesate*
- il *metodo per interpolazione bilineare*
- il *metodo per interpolazione bicubica*

- **Metodo del trasporto dei vertici:** consiste nel trasportare i vertici di ogni pixel output sull'immagine di input secondo una data trasformazione geometrica. I quattro vertici definiscono un'area che contiene varie porzioni di pixel e di ognuna di tali porzioni si calcola la sua dimensione. Il valore radiometrico ricampionato sarà la media dei valori radiometrici dei pixel dell'area pesati in funzione delle dimensioni dell'area che racchiudono.

In conclusione, dalla scelta del metodo di ricampionamento, dipende la qualità del risultato e il tempo di elaborazione., ma si ottiene un effetto di sfocamento rispetto all'immagine iniziale.

Il miglior metodo, se non si ha l'esigenza di restituzione in tempi brevi, è l'interpolazione bicubica che annulla completamente l'effetto blocking, in alternativa anche l'interpolazione bilineare fornisce risultati soddisfacenti.

Acquisizione analogica e digitale a confronto

Da più di cent'anni, l'immagine tradizionale si ricava, utilizzando una pellicola fotosensibile opportunamente inserita nella macchina fotografica, la quale è un supporto sottile e trasparente che può essere di origine naturale o sintetica, a cui è sovrapposto uno strato di antialone per evitare riflessi interni e successivi strati costituiti da un'emulsione di microcristalli di alogenuro d'argento che in origine erano dispersi in una gelatina animale, mentre oggi in gelatina sintetica. Sono proprio i sali di alogenuro alchilici di bromo, cloro e iodio combinati col nitrato d'argento a dare la fotosensibilità; tale combinazione può essere opportunamente variata ottenendo come risultato dimensioni diversi dei cristalli e, di conseguenza, risoluzioni differenti. Nelle pellicole in bianco e nero è presente un solo strato di emulsione fotosensibile, mentre in quelle a colori, se ne devono avere tre, ognuno dei quali, grazie a delle molecole organiche dette sensibilizzatori spettrali, è sensibile ad una diversa frequenza di luce: rosso in basso, verde al centro e blu in alto, inoltre tra lo strato blu e quello verde è posto un filtro colorante giallo per evitare il passaggio del blu agli strati sottostanti. Si può agire anche variando la taratura delle emulsioni per frequenze diverse da quelle visibili come l'infrarosso, l'ultravioletto, i raggi X e raggi gamma.

Durante lo scatto la luce che entra dall'obiettivo, attiva i cristalli di alogenuro imprimendo un'immagine che, però, non è visibile, denominata "immagine latente". L'immagine si riesce a rivelare, attraverso opportuni trattamenti chimici in soluzione, rendendola insensibile ad ulteriori esposizioni di luce; tali operazioni sono chiamate sviluppo e fissaggio.

L'immagine rivelata se il risultato deve essere in bianco e nero, è costituita da un finissimo particolato d'argento metallico in cui i toni di chiaro e scuro sono invertiti, mentre nell'immagine rivelata di una pellicola a colori si hanno tre strati sovrapposti di coloranti complementari ai colori primari; questa particolarità cromatica della pellicola uscita dal trattamento chimico è detta **negativo**.

Le camere digitali sostituiscono alla pellicola un sensore fotosensibile che può essere:

- *lineare* (o linear array) se è formato da un'unica riga di pixel
- *a matrice* (o area array) di forma quadrata o rettangolare dove i pixel costituiscono un grigliato.

Esistono due tipi di sensori fotosensibili “**a matrice**”:

- *Charghed-coupled device CCD*: introdotti negli anni '70 e al momento i più utilizzati, trasformano la luce incidente sui pixel in una carica elettrica, successivamente tali cariche vengono trasferite in modo sequenziale da un pixel all'altro, creando una matrice di numeri memorizzabili ed elaborabili dal computer
- *Complementary Metal Oxide Semiconductor C-MOS o CCD Fuji*: in cui ogni fotodiode è accompagnato da un convertitore che trasforma l'energia luminosa in voltaggio, riduce il rumore e digitalizza il segnale, spesso amplificandolo, il prodotto in uscita dal sensore il segnale è già digitale
- *Foveon*: che prendendo spunto dal funzionamento della retina dell'occhio umano, utilizza i fotodiode con tre strati non omogenei disposti verticalmente in uno spessore di $2\ \mu\text{m}$ e sensibili alle tre bande delle onde elettromagnetiche dei tre colori primari

Il sensore CCD è schematizzabile come una piastra di silicio di tipo positivo **P** con dei canali di tipo negativo **N** detti fotodiode; nella *Figura 3.10* è indicato un reticolato ideale passante nella mezzeria delle strisce inter-canale; ogni quadrato di questa maglia è un pixel.

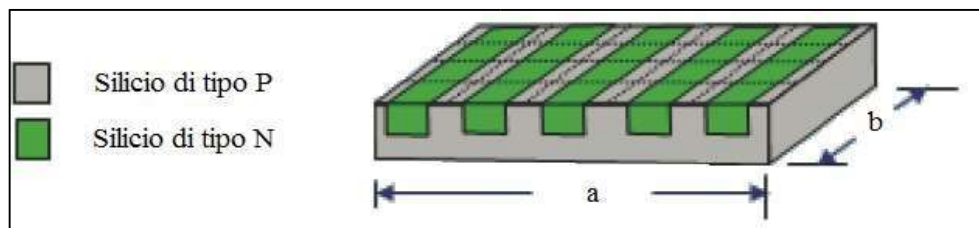


Figura 3.10: Schema di un sensore CCD. Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al., 2019

Alla base della matrice si trova un sensore lineare che ha tanti pixel quante sono le colonne della matrice; tra questo sensore e la matrice si trova una barriera di elettrodi di controllo,

detta *transfer gate*, il cui scopo è di gestire il trasferimento delle cariche contenute nell'ultima riga del grigliato verso il sensore lineare, successivamente le cariche elettriche passano dal sensore lineare ad un dispositivo che le converte da tensione, segnale analogico, in un numero ad esso proporzionale, segnale digitale.

Di seguito viene schematizzata la struttura di un pixel vista in sezione ortogonale ai canali di silicio **N** e i relativi componenti, *Figura 3.11*.

- Corpo del cristallo di silicio **P**
- Fotodiode costituito dal silicio **N**
- Elettrodo trasparente caricato positivamente che crea nel silicio **P** un pozzo nel quale spinge e intrappola gli elettroni che vengono liberati dal silicio **N**
- Un elettrodo che comanda il tempo di integrazione, il tempo durante il quale si forma la carica elettrica in seguito all'esposizione alla luce.
- Filtro che permette il passaggio di un colore primario
- Può essere presente una microlente che converge tutta la luce incidente sul pixel nel fotodiode.

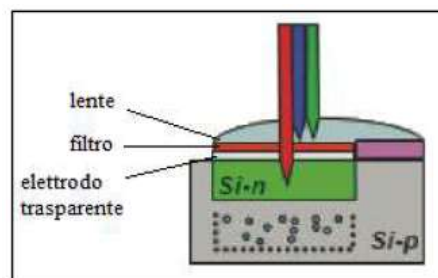


Figura 3.11: Struttura di un pixel in sezione ortogonale - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al., 2019

Visto che i filtri sui fotodiode permettono il passaggio di un solo colore primario per ottenere un'immagine a colori, è necessario che alcuni pixel del sensore siano sensibili al rosso, altri al verde e gli ultimi al blu.

Ci sono svariate disposizioni dei filtri tra questi ricordiamo lo schema Bayer che prevede che il 50% dei pixel siano sensibili alla luce verde, che è quella che l'occhio umano percepisce in maniera predominante per la nitidezza e la definizione dell'immagine, mentre la restante metà è dedicata in egual misura alla luce rossa e blu.

In fase di post processing su ogni pixel verranno derivati i colori mancanti mediando l'intensità dei pixel adiacenti, *Figura 3.12*.

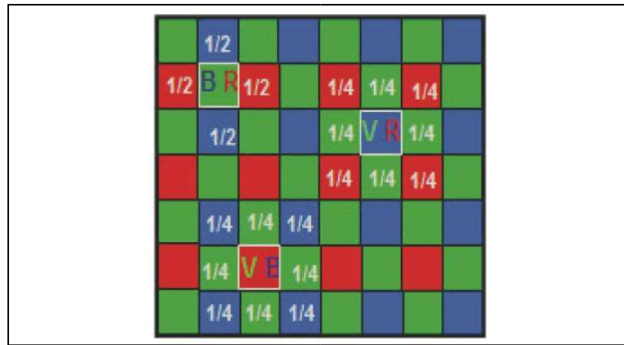


Figura 3.12: Disposizione dei filtri con schema Bayer - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al.,2019

Si possono utilizzare un maggior numero di pixel per interpolare i colori mancanti, però a scapito della risoluzione dell'immagine; entrando più nel dettaglio si può osservare che vi è differenza tra la dimensione del pixel e del fotodiodo che deve necessariamente essere contornato dagli elettrodi che gestiscono il controllo del tempo di integrazione e il trasferimento delle cariche. Nel caso di pixel quadrati si corre il rischio che elementi lineari non vengano mai catturati perché passanti sulla zona "cieca" del sensore, per questo motivo sono state adottate altre forme più adeguate come quella ottagonale e disposti in modo quinconce.

In Figura 3.13 vengono riportati i tre sensori citati.

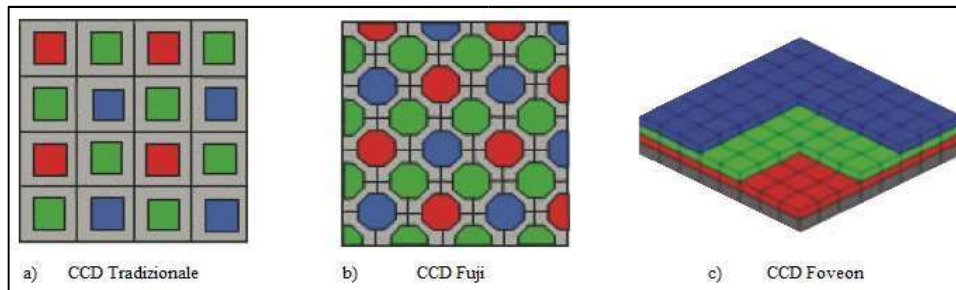


Figura 3.13: Diverse tipologie di Pixel - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al.,2019

Come è facilmente intuibile, per quanto riguarda i sensori lineari, si ha un sensore costituito da un'unica riga di pixel che, dopo aver acquisito la carica, la fa pervenire al convertitore digitale. Successivamente, si procede facendo traslare il sensore sul piano focale, costruendo l'immagine come accostamento di numerose strisciole, Figura 3.14, rendendo obbligatoria l'immobilità del soggetto per tutto il tempo dell'acquisizione ed inoltre si procede ad una scansione per ogni colore primario, antepoendo al sensore il filtro corrispondente.

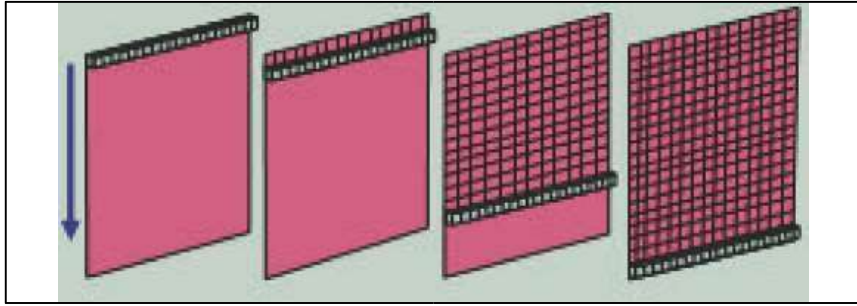


Figura 3.14: *Acquisizione mediante sensore lineare - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al., 2019*

Al fine di evitare la tripla scansione è possibile utilizzare un sensore trilineare, costituito dall'unione di tre sensori lineari, *Figura 3.15*.

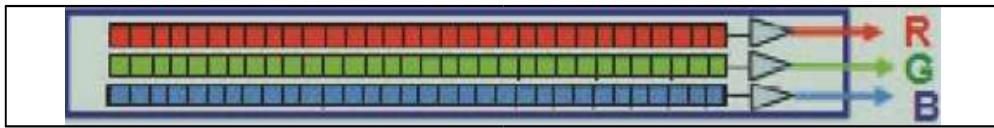


Figura 3.15: *Sensore trilineare - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al., 2019*

I sensori lineari possono arrivare agevolmente a 14.400 pixel e consentono una risoluzione maggiore rispetto ai sensori a matrice, per i quali, per estendere il numero di pixel, si deve aumentare sia le righe che le colonne, incorrendo in notevoli difficoltà costruttive per dimensioni maggiori ai 5000x7000 pixel.

Durante le acquisizioni di immagini satellitari o aeree si presenta il problema della non stazionarietà della presa, pertanto si utilizzano i pushbroom line scanner che effettuano la ripresa, necessitando, però, dello svuotamento delle cariche accumulate durante il tempo di integrazione in tempi molto brevi in funzione della dimensione del pixel a terra e della velocità dell'aereo.

Come è già stato esposto nel paragrafo 3.2, la dimensione del pixel a terra è data dalla seguente funzione:

$$GSD = l \frac{Z}{c} \quad (3.10)$$

Dove Z è la distanza di presa, c la focale e l la dimensione del pixel.

Se la velocità media V è data dal rapporto tra lo spazio δS percorso e l'intervallo di tempo ΔT impiegato, ossia:

$$V = \frac{\delta S}{\Delta T} \quad (3.15)$$

Si avrà che per percorrere lo spazio δS pari al GSD occorrerà il tempo, ovvero:

$$\Delta T = \frac{GSD}{V} \quad (3.16)$$

Quindi il tempo di svuotamento del sensore per garantire la continuità dell'immagine dovrà essere minore di

$$\Delta T < \frac{l \frac{Z}{c}}{V} \quad (3.17)$$

Allo scopo di il tempo di svuotamento del sensore, come primo step, si è introdotto l'utilizzo di due registri di scorrimento uno per le cariche pari e uno per le cariche dispari, *Figura 3.16*, riuscendo quindi a dimezzare i tempi.

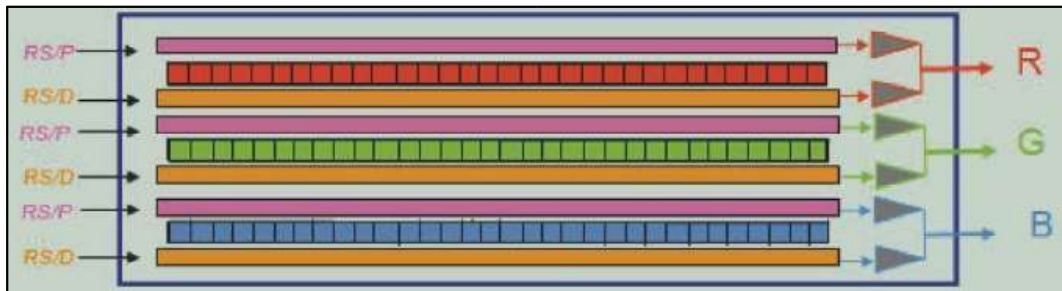


Figura 3.16: Sensore lineare a due registri di scorrimento, una per cariche pari e una per dispari - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al.,2019

Come secondo step, si sono utilizzati due convertitori analogico/digitale, in modo che ogni registro si svuoti per metà verso destra e per metà verso sinistra, riducendo il tempo necessario ad un quarto di quello del sensore standard, *Figura 3.17*.

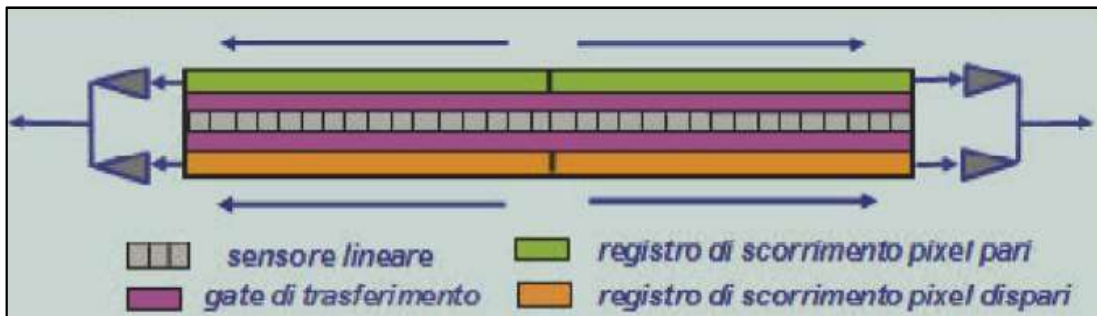


Figura 3.17: Sensore lineare a due registri di scorrimento e due convertitori A/D - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al.,2019

Image Matching

Si definiscono Image Matching quelle procedure automatiche atte ad identificare i punti omologhi nei fotogrammi digitali, il cui procedimento può essere suddiviso in quattro fasi:

- 1) Selezione di una porzione di immagine
- 2) Ricerca di entità coniugate nell'altra immagine

3) Calcolo della posizione 3D dell'entità nello spazio oggetto

4) Applicazione dei filtri per eliminare gli outliers

La fase più difficile da risolvere è la ricerca di entità coniugate, se infatti si volesse confrontare ogni singolo pixel di due immagini sovrapposte per il 60% sarebbero necessario un numero di operazioni molto elevato; inoltre l'entità ricercata non sarebbe univoca, è infatti possibile che esistano due pixel non omologhi con lo stesso contenuto radiometrico.

Al fine di ridurre il numero di operazioni si rende necessario restringere la ricerca di entità coniugate in zone minori, utilizzando dei criteri logici, mentre per risolvere le ambiguità si adottano entità campione più caratteristiche.

Nell'eventualità teorica, di presa in assetto normale di una zona pianeggiante, si potrebbero ottenere due immagini coincidenti alla perfezione, senza distorsioni e centrate sul punto coniugato come mostrato nella *Figura 3.18*.

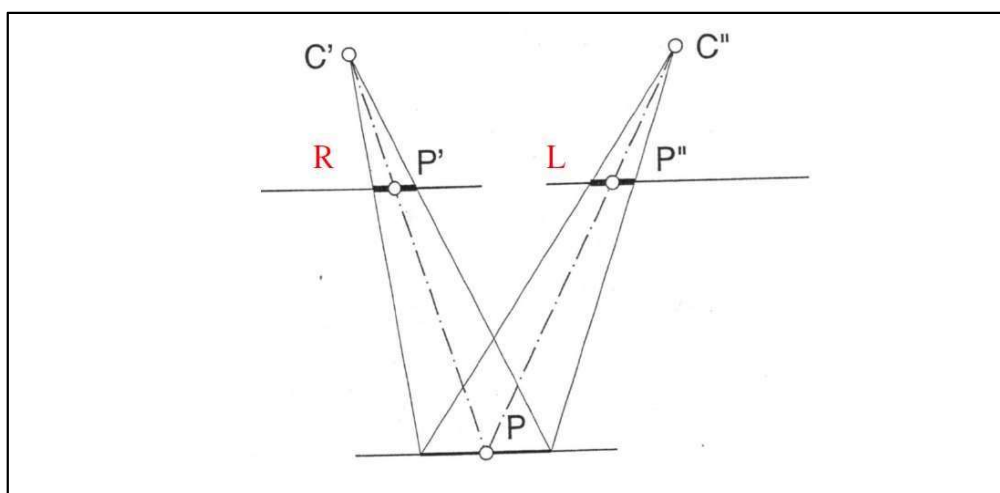


Figura 3.18: Caso ideale di presa in assetto normale con terreno pianeggiante - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al., 2019

Come è noto, il terreno non è perfettamente pianeggiante e ciò comporta che anche in caso di sovrapposizione di immagini campione nel punto omologo, a causa della distorsione geometrica dovuta alla tridimensionalità del terreno stesso, si otterranno pixel relativi a porzioni di terreno differenti, *Figura 3.21*. Inoltre, potrebbero aggiungersi delle variazioni di scala dell'immagine causati dalla variazione della quota di presa, *Figura 3.19* e gli effetti delle singole rotazioni, rollio, beccheggio e deriva, che anche in caso di perfetta sovrapposizione del punto omologo, otterranno pixel relativi a porzioni di terreno differenti, *Figura 3.20*.

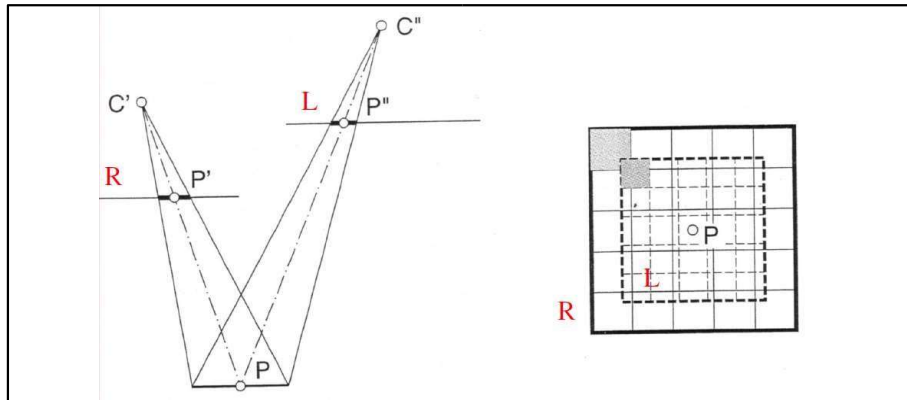


Figura 3.19: Variazione di scala per presa a quota diversa. Fonte - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al.,2019

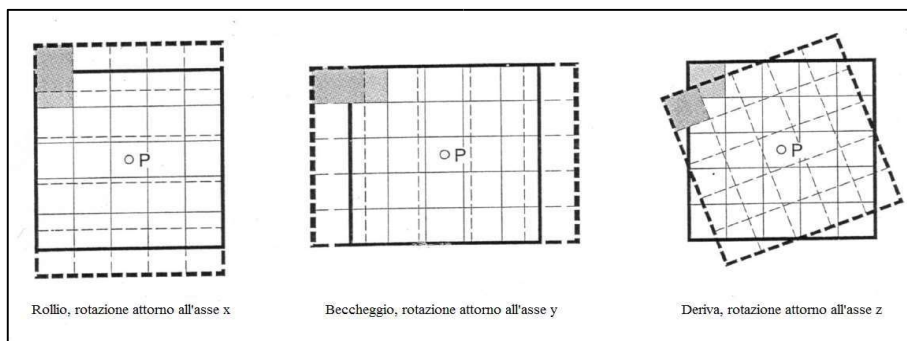


Figura 3.20: Effetti delle singole rotazioni - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al.,2019

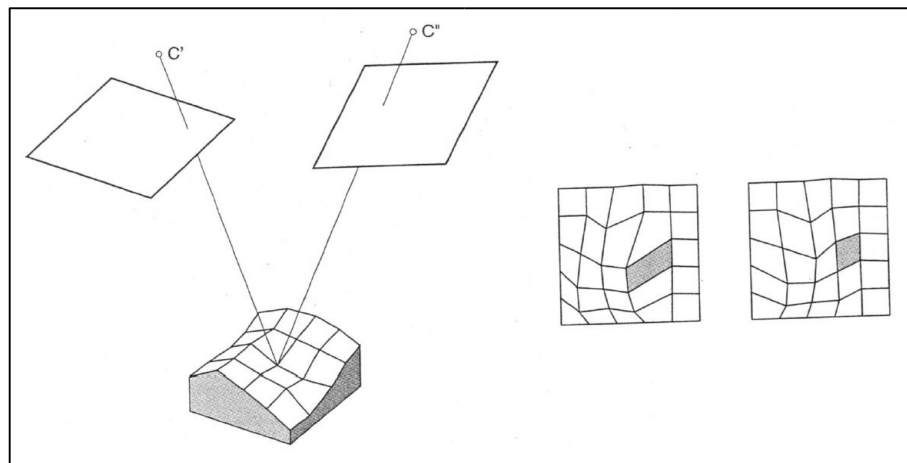


Figura 3.21: Distorsione geometrica dovuta alla tridimensionalità del terreno - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al.,2019

Diventa, pertanto, fondamentale utilizzare dei metodi per ridurre lo spazio di ricerca, utilizzando diversi metodi:

- il metodo delle linee epipolari
- la correlazione vertical line focus

- l'approccio gerarchico
- la ricerca di similitudini con metodi di correlazione Area Based

Metodo delle linee epipolari

Quando si applica la geometria epipolare, la stessa scena viene catturata da due fotocamere con posizione e orientamento distinto, in stereoscopia, *Figura 3.22*, nella quale assunto un punto oggetto P e i 2 centri di proiezione c dei due fotogrammi, si definisce piano epipolare il piano passante per questi 3 punti. L'intersezione dei piani dei fotogrammi con il piano epipolare costituisce le due linee epipolari.

I punti omologhi devono trovarsi necessariamente sulle linee epipolari e questo riduce notevolmente la ricerca che deve compiere l'algoritmo. Nel caso generale le linee epipolari non sono orientate parallelamente agli assi del sistema immagine, ma è possibile ricampionare le immagini originali in modo da renderle parallele e ottenere così delle immagini normalizzate ottenendo quindi assi della camera paralleli tra loro e ortogonali alla linea di base con parallasse trasversale nulla = 0.

Il procedimento si distingue quindi in due fasi:

- Creazione di un'immagine in assetto normale
- Ricerca di correlazione lungo la linea epipolare

Nella creazione di un'immagine avendo noti i parametri di orientamento interni ed esterni, oppure eseguito l'orientamento relativo, è possibile ottenere delle immagini normalizzate, cioè con parallasse orizzontale nulla.

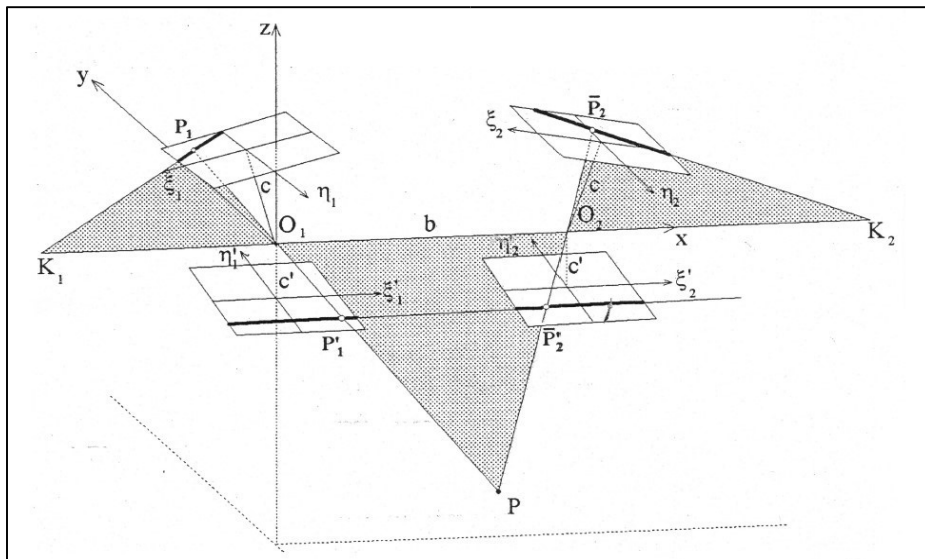


Figura 3.22: Geometria Epipolare - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al., 2019

Le relazioni analitiche per passare dalle coordinate dell'immagine originale (ξ, η) alle coordinate dell'immagine normalizzata (ξ', η'), utilizzando le equazioni di collinearità sono:

$$\begin{bmatrix} \xi - \xi_0 \\ \eta - \eta_0 \\ -c \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad \text{con } R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 & j_1 & k_1 \\ i_2 & j_2 & k_2 \\ i_3 & j_3 & k_3 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Dove

ξ, η sono le coordinate immagine

c, ξ_0, η_0 sono i parametri di orientamento interno

x, y, z sono le coordinate oggetto locali

x_0, y_0, z_0 sono le coordinate del centro di proiettività del primo fotogramma

r_{ij} sono gli elementi della matrice di rotazione R, funzioni trigonometriche delle tre rotazioni ω, φ, κ attorno agli assi principali

i, j, k sono i versori delle tre rotazioni ω, φ, κ attorno agli assi x, y, z .

che equivalgono alle seguenti

$$\xi - \xi_0 = r_{11}(x - x_0) + r_{21}(y - y_0) + r_{31}(z - z_0) \quad (3.19)$$

$$\eta - \eta_0 = r_{12}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{32}(z - z_0) \quad (3.20)$$

$$-c = r_{13}(x - x_0) + r_{23}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0) \quad (3.21)$$

Dividendo la prima e la seconda di queste equazioni con la terza, si ottengono le equazioni di collinearità. La forma inversa assume le espressioni:

$$x - x_0 = r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{31}c \quad (3.22)$$

$$y - y_0 = r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{32}c \quad (3.23)$$

$$z - z_0 = r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c \quad (3.24)$$

Attraverso le relazioni analitiche fra le coordinate immagine ξ, η , e le coordinate ξ', η' dell'immagine normalizzata, *Figura 3.23*, si ottengono dalle equazioni di collinearità facendo le seguenti assunzioni:

- $(\xi_0, \eta_0) = (0,0)$ coordinate immagine del punto di miglior simmetria (BPS)
- Si sostituisce $(z - z_0)$ alla distanza principale $-c'$
- Si sostituisce $(x - x_0) = \xi'$ e $(y - y_0) = \eta'$

Per sostituzione dalla precedente, si ottiene:

$$\begin{bmatrix} \xi - \xi_0 \\ \eta - \eta_0 \\ -c \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad \text{con } R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 & j_1 & k_1 \\ i_2 & j_2 & k_2 \\ i_3 & j_3 & k_3 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ -c \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} \xi' \\ \eta' \\ -c' \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

E infine

$$\xi = -c \frac{r_{11}\xi' + r_{21}\eta' - r_{31}c'}{r_{13}\xi' + r_{23}\eta' - r_{33}c'}; \quad \eta = -c \frac{r_{12}\xi' + r_{22}\eta' - r_{32}c'}{r_{13}\xi' + r_{23}\eta' - r_{33}c'} \quad (3.27)$$

I punti immagine omologhi si trovano su di una linea avente la stessa coordinata η è quindi possibile correlare in modalità monodimensionale l'intero modello stereoscopico.

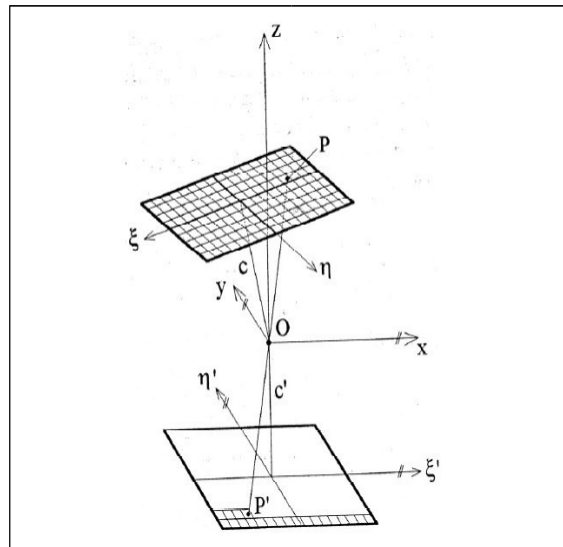


Figura 3.23: Fotogramma originale e normalizzato - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al., 2019

Nella ricerca di correlazione lungo la linea epipolare, facendo riferimento alla Figura 3.24 si vuole determinare la posizione di un punto a terra S con una procedura di image matching eseguita lungo la linea epipolare corrispondente.

Se sul primo fotogramma si individua un punto immagine P' , corrispondente ad un punto oggetto P , la ricerca del corrispettivo punto omologo P'' sul secondo fotogramma si concentrerà solo sulla linea epipolare di tale fotogramma e non su tutta la zona di sovrapposizione, inoltre, se si conosce la scabrosità e la quota media della zona, la ricerca può essere ulteriormente ridotta; uno spostamento di quota di P lungo la retta proiettiva che lo unisce al centro di proiezione c' , comporta una variazione di posizione del punto immagine corrispondente P'' sul secondo fotogramma lungo la linea epipolare.

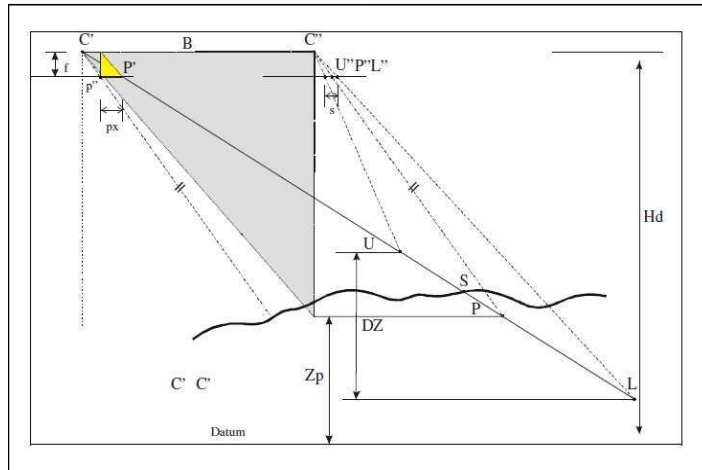


Figura 3.24: Ricerca della posizione omologa di un punto lungo la linea epipolare corrispondente. -
 Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al., 2019

La posizione di x''_p del punto P può essere determinata dalla:

$$x''_p = x'_p - b_0 \frac{H_D}{H_D - Z_D} \quad (3.28)$$

Dove:

x'_p è la coordinata immagine del punto oggetto P sul primo fotogramma (P')

b_0 è l'immagine della fotobase

H_D è la quota del centro di proiezione del fotogramma

Z_D è la quota del punto oggetto ideale P che rispecchia la quota media della zona.

Essendo S il punto reale a terra, il punto P è un punto stimato sulla base della quota di zona e ΔZ sarà l'incertezza della stima della quota valutata in base al valore massimo e minimo delle quote di zona indicati in figura con la lettera U ed L .

L'incertezza ΔZ definisce sulla linea epipolare un segmento s funzione della fotobase, della quota di volo, dell'incertezza della stima di ΔZ e della quota degli estremi U ed L .

$$s = \frac{b_0 H_D \Delta Z}{(H_D - Z_U)(H_D - Z_L)} \quad (3.29)$$

Quindi individuato un punto immagine, nel primo fotogramma si è in grado di focalizzare la ricerca dell'omologo lungo il tratto s .

La procedura può essere schematizzata in:

- Selezione di una porzione della prima immagine che contenga il punto immagine P'
- valutazione della quota Z_p del punto P e la sua incertezza ΔZ
- calcolo della posizione del punto P stimato sulla seconda immagine, punto P''
- calcolo dell'intervallo di ricerca s
- realizzazione del matching all'interno dell'intervallo di ricerca s

- valutazione delle misure di similarità per la determinazione della posizione coniugata **P''**

Correlazione Vertical Line Focus

Questo metodo consiste nel restringere la ricerca delle corrispondenze alle linee epipolari generate dall'intersezione tra le due immagini ed i piani principali che contengono la linea verticale passante per il punto oggetto, *Figura 3.25*.

Si parte da una stereocoppia con C' e C'' i centri di proiezione dai quali si individua a terra un punto reale S , facendoci passare la verticale lunga ΔZ avente come centro il punto P a quota stimata, si considerino i triangoli $C'UL$ e $C''UL$ costituiti dalle rette proiettive colleganti i centri di proiezione con gli estremi della verticale. I 2 triangoli si intersecano con i piani immagine formando le 2 linee epipolari convergenti verso i rispettivi punti nadirali.

Anche in questo caso la ricerca dei punti omologhi si concentra sulle linee epipolari.

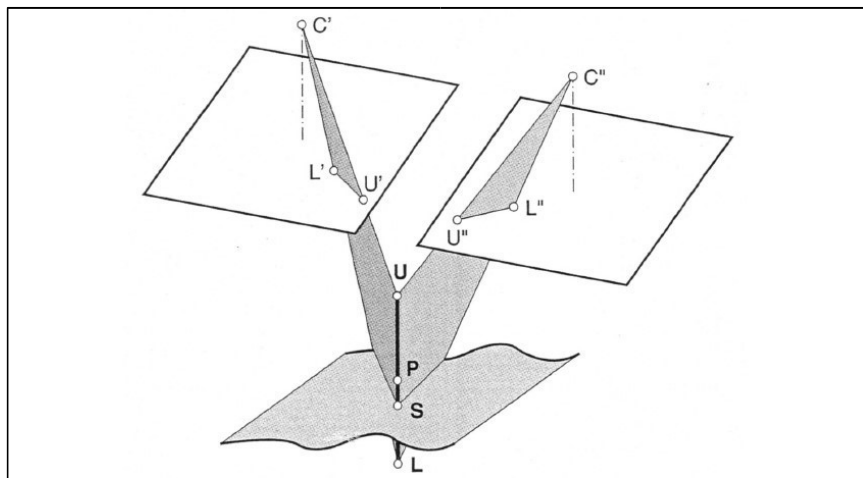


Figura 1.25: Correlazione Vertical Line Focus - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al.,2019

Approccio gerarchico

Adottando questo metodo, si effettua la ricerca di corrispondenze per livelli partendo da un'immagine a risoluzione grossolana, fino ad arrivare ad un'immagine a risoluzione più fine, vengono generate delle immagini piramidali estraendo dall'immagine originale, altre immagini a risoluzione differente, *Figura 3.26*, partendo dalla risoluzione grossolana i punti omologhi individuati diventano i punti centrali nel livello successivo fino ad arrivare all'immagine con la risoluzione più fine. Si riesce, quindi, a ridurre lo spazio di ricerca e a determinare con accuratezza i valori approssimati delle posizioni coniugate dei punti.

Al fine di ottenere un'automatizzazione della ricerca di coppie di punti omologhi, si individua una matrice sagoma sulla prima immagine che viene ricercata sulla seconda utilizzando le tecniche di autocorrelazione; si evidenzia che maggiore sarà la dimensione dell'immagine sagoma e minore sarà l'ambiguità, ma in questa maniera aumentano le distorsioni geometriche. Ciò è possibile grazie agli operatori di interesse che sono in grado di individuare i punti, linee o aree che presentano variazioni di densità, detti bordi radiometrici, analiticamente si tratta di matrici alle derivate prime e seconde dell'immagine originale; per ottimizzare il processo è possibile esaltare le discontinuità, usando dei filtri che esaltino i contrasti senza falsare il contenuto geometrico.

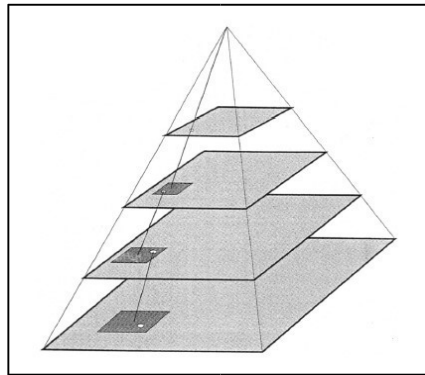


Figura 3.26: Schema di immagini piramidali - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al.,2019

Ricerca di similitudini con metodi di correlazione Area Based

In questo caso vengono correlati i livelli di grigio in base alla loro distribuzione in una porzione di immagine, chiamata sagoma o image patch, con la sua controparte nell'altra immagine; la porzione di immagine entro la quale andiamo a muovere l'immagine sagoma è detta matrice di ricerca o search window, infine la porzione di immagine ottenuta comparando l'immagine sagoma nella finestra di ricerca è detta finestra di correlazione, in inglese matching window.

La matrice sagoma dipende dal problema che si vuole risolvere; ad esempio nel caso della ricerca automatica di marche fiduciali o croci di reticolo la matrice sagoma sarà proprio la marca fiduciale, nel caso di punti d'appoggio segnalizzati la matrice sagoma sarà l'immagine digitale del segnale mentre per punti naturali vanno create matrici sagoma di forma e condizioni differenti in base alle caratteristiche dei punti impiegati, infine per la ricerca di punti di legame si avrà che la matrice sagoma sarà una porzione delle immagini e l'area di ricerca una zona dell'altra immagine.

I metodi di correlazione area based si fondano principalmente su due criteri:

- la ricerca del massimo coefficiente cross-correlazione
- il metodo dei minimi quadrati per minimizzare la differenza del livello di grigio

Il primo metodo consiste nel cercare la massima correlazione dei livelli di grigio spostando l'immagine mobile su quella fissa; viene quindi valutato l'indice di correlazione \mathbf{r} , nel punto dove la funzione di cross correlazione è massima si ha la posizione di migliore somiglianza tra matrice ricerca e matrice sagoma.

Il fattore di correlazione ρ che va calcolato per ogni posizione dell'immagine sagoma all'interno della finestra di ricerca è:

$$\rho = \frac{\sigma_{LR}}{\sigma_L \sigma_R} \quad \text{dove } -1 \leq \rho \leq 1 \quad (3.30)$$

Con:

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_L(x_i, y_i) - \bar{g}_L)^2}{nm - 1}}; \quad \bar{g}_L = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_L(x_i, y_i)}{nm} \quad (3.31)$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_R(x_i, y_i) - \bar{g}_R)^2}{nm - 1}}; \quad \bar{g}_R = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_R(x_i, y_i)}{nm} \quad (3.32)$$

$$\sigma_L \sigma_R = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((g_L(x_i, y_i) - \bar{g}_L)(g_R(x_i, y_i) - \bar{g}_R))}{nm - 1} \quad (3.33)$$

Dove:

σ_L è la deviazione standard dell'immagine L (sagoma)

σ_R è la deviazione standard dell'immagine R (finestra di matching)

σ_{LR} è la covarianza delle porzioni di immagine L e R

\bar{g}_L è il valore medio della matrice L

\bar{g}_R è il valore medio della matrice R

n numero di righe

m numero di colonne

L'obiettivo è determinare la posizione \mathbf{u}, \mathbf{v} nella quale tale valore sia massimo. Il coefficiente di cross correlazione assume valori compresi tra 1 se le immagini sagoma e la finestra di correlazione sono uguali, $e -1$ se la relazione è perfettamente inversa. Quando ρ si annulla non c'è similarità.

E' possibile, tuttavia, che un valore massimo di ρ non corrisponda effettivamente all'individuazione di un punto omologo (e non sempre un valore basso corrisponda a punti non omologhi), infatti in caso di aree in ombra e quindi con radianza simile, due punti

possono essere restituiti erroneamente come omologhi, si può determinare la qualità di un punto omologo attraverso il fattore di schiacciamento (flatness) α che viene ottenuto calcolando le tangenti alla curva ottenuta per interpolazione di ρ in prossimità del punto di massimo.

Un alto valore di α restituisce una curva piatta che evidenzia una debole corrispondenza dei punti omologhi caratterizzata da un basso contrasto, al contrario un basso valore di α osservabile con massimo ben definito porta a credere che i punti siano effettivamente omologhi.

Nel caso vi siano due picchi siamo in presenza di pattern ripetuti nelle immagini sagoma e di matching, in questo caso la scelta del punto omologo è ambigua.

In *Figura 3.27* sono riportati i tre casi.

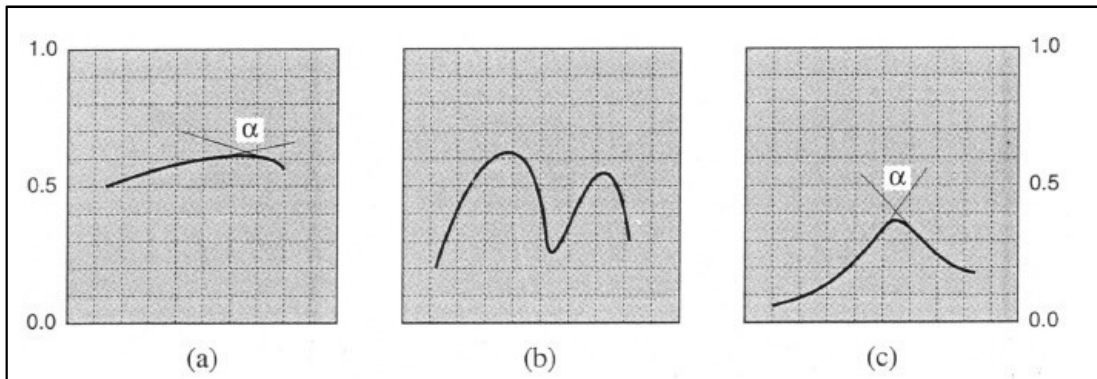


Figura 3.27: andamento della funzione di cross correlazione e parametro α - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al., 2019

L'algoritmo di correlazione può essere reso più stabile ricorrendo alla pesatura della matrice sagoma, è possibile, infatti, assegnare ai pixel dell'area centrale della matrice sagoma un peso maggiore che decresce allontanandosi da questo.

Il secondo metodo è la correlazione ai minimi quadrati nota anche come Least Square Matching (LSM) prevede di determinare il grado di correlazione tra matrice sagoma e matrice ricerca come somma dei quadrati delle differenze dei valori di grigio.

Anche in questo caso viene estratta una matrice sagoma $g_1(\xi, \eta)$ mentre dalla posizione approssimata nella seconda immagine viene estratta una porzione di immagine detta matrice di ricerca $g_2(\xi, \eta)$. Nel caso senza deformazione si avrebbe uguaglianza delle matrici

$$g_1(\xi, \eta) = g_2(\xi, \eta) \quad (3.34)$$

Nel caso reale, invece, esse differiranno per posizione e densità. Il grado di somiglianza è misurato dalla somma dei quadrati delle differenze dei valori radiometrici dei pixel corrispondenti nelle due immagini. La posizione ideale si avrà imponendo:

$$\sum_i \sum_j (g_1(\xi, \eta) - g_2(\xi, \eta))^2 \quad (3.35)$$

A differenza del metodo precedente ora vengono inserite nella funzione da minimizzare una serie di parametri che permettono di variare forma e contenuto della finestra mobile e di realizzare la correlazione subpixel generando un procedimento iterativo che governa la convergenza al minimo.

Le differenze locali fra le due immagini sono legate alla geometria ed alla radiometria, dipendendo molteplici fattori, fra cui:

- Le **differenze geometriche** dipendono dalla posizione del punto di presa, assetto del sensore, focale e distanza di presa, forma e variazione nel tempo dell'oggetto
- Le **differenze radiometriche** dipendono da variazioni di illuminazione, riflettività dell'oggetto, funzione di trasferimento del sensore, esposizione, sviluppo e variazioni temporali dell'oggetto

Si procede, quindi, applicando una trasformazione geometrica bidimensionale e una trasformazione radiometrica alla matrice di ricerca $g_2(\xi, \eta)$ per renderla più simile alla matrice sagoma.

Quindi diventa:

$$g_1(\xi, \eta) = f_r[g_2(u, v)] \quad (3.36)$$

Con:

$u = u(\xi, \eta)$ trasformazione geometrica lungo u

$v = v(\xi, \eta)$ trasformazione geometrica lungo v

f_r = trasformazione radiometrica

L'approccio rigoroso prevede l'utilizzo delle equazioni della proiezione centrale ma, essendo l'immagine indagata piccola, è possibile usare la trasformazione omografica o nei casi più semplificati una trasformazione affine o conforme.

Per quanto riguarda le differenze radiometriche si usa una trasformazione lineare a due parametri.

$$g_1(\xi, \eta) = g \cdot g_2(u, v) + s \quad (3.37)$$

Con:

g = guadagno radiometrico (*gain*); è un fattore moltiplicativo dei valori di grigio che ha l'effetto di un fattore di scala che realizza uno stiramento del contrasto

s = traslazione (*shift*) dei valori radiometrici; è uno spostamento della scala dei valori di grigio

Per ogni finestra di matching, vengono calcolati i parametri di trasformazione ai minimi quadrati, successivamente vengono applicati e valutati i residui; i residui più bassi individuano le corrispondenze; dalla compensazione si può ricavare la precisione di posizione che può avere un ordine di grandezza migliore della dimensione del pixel.

Feature Based Matching (FBM)

Dalle immagini vengono estratte delle caratteristiche, dette **feature**, che sono elementi chiaramente distinguibili dagli elementi geometrici o radiometrici adiacenti. Le feature possono essere locali o globali; quelle locali sono entità semplici come punti, bordi di oggetti, linee o aree con tessiture particolari, mentre le globali sono costituite da poligoni, che possono essere aperti o chiusi, o da un insieme di semplici feature.

Al termine della procedura di estrazione, viene creata per ogni immagine una lista che raccoglie tali caratteristiche e le loro descrizioni in modo che solo queste liste vengano messe a confronto per cercare delle corrispondenze ottenendo infine una lista di elementi omologhi a partire da coppie di immagini cui applicare il Least Square Matching (LSM). Per estrarre i feature puntuali si utilizzano gli operatori di interesse.

Relation Matching (RM)

È spesso usato per l'interpretazione delle immagini nella Computer Vision e consiste in un paragone di relazioni che vengono estratte da ogni immagine e poste a confronto, in tal caso sono usate le feature globali che possono essere geometriche, nel caso di poligoni aperti o chiusi, radiometriche, nel caso di differenze tra i valori di grigio di aree adiacenti, topologiche nel caso di notazioni di caratteristiche contenute in un'altra.

In seguito l'operatore di interesse estrae le feature che verranno poi confrontate con il database modello per determinare le feature globali le quali verranno salvate in modo simbolico attraverso dei grafi e registrate per essere messe a confronto e trovare le corrispondenze.

Un limite del matching relazionale è dato dalla grande varietà di forme che possono avere gli oggetti; se il numero di corrispondenze è elevato sarà necessario ridurre lo spazio di ricerca il più possibile e introdurre informazioni aggiuntive nel modello per semplificare il problema.

I detectors per rilevare i punti di interesse

I detectors sono operatori in grado di individuare i punti di interesse analizzando la luminosità, agiscono quindi sulle derivate del contenuto radiometrico nella matrice immagine, e estraendo i contorni determinano la variazione di direzione di segmenti costituiti da medesima intensità di colore.

I più comuni operatori per individuare i punti di interesse sono:

- tipo **Harris**
- tipo **Hessian**

L'operatore di **Harris** prevede l'utilizzo di un campionario di dimensione fissa che ricerca cambiamenti geometrici nell'immagine, *Figura 3.28*; l'operatore utilizza il coefficiente di cross correlazione per individuare una variazione significativa dei bordi e una volta individuato un punto di interesse ne registra le coordinate. Gli operatori di Harris non sono invarianti rispetto alla scala ma solo alla rotazione.

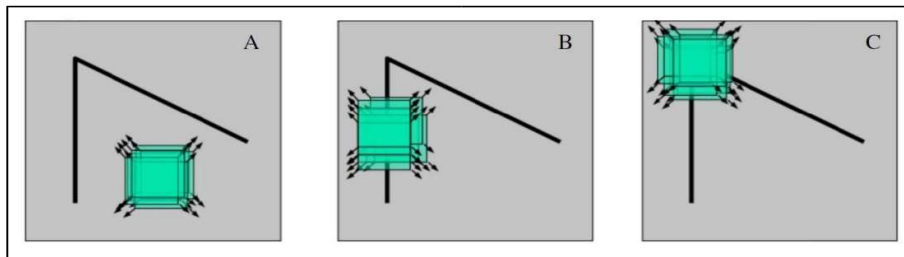


Figura 3.28: Operatore di Harris: A regione omogenea, B bordo, non ci sono variazioni lungo la direzione del bordo, C angolo, ci sono variazioni significative in tutte le direzioni. - Harris, C., & Stephens, M, 1988

Gli operatori di Hessian si basano sull'uso della matrice Hessiana, matrice alle derivate parziali del secondo ordine, della funzione immagine f .

$$H_f = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Tra gli algoritmi che utilizzano una variante dell'operatore Hessiano si ricordano:

- SIFT Scale Invariant Feature Transform
- SURF Speeded Up Robust Features

- ASIFT

Gli operatori SIFT e SURF associano un descriptor ad ogni feature estratta dall'immagine; si tratta di un vettore a numero di elementi variabile che descrive la feature. La ricerca dei punti omologhi è condotta per comparazione dei descriptor.

Nel dettaglio l'operatore SIFT ricerca i punti su regioni ampie dell'immagine superando i problemi di occlusione e deformazione prospettica. Le immagini sono invarianti ai cambiamenti di scala, alla rotazione, e all'illuminazione e i punti vengono trovati cercando feature stabili su tutte le scale possibili usando la funzione Gaussiana spazio-scala.

Ogni immagine è sottocampionata ad intervalli regolari formando un insieme di immagini convolute dette ottave. I punti di interesse sono i massimi o i minimi ottenuti calcolando le differenze fra gaussiane adiacenti DoG (Difference of Gaussian) per ogni ottava; si sta ricercando quindi un punto di massimo o di minimo tra gli 8 pixel adiacenti nella matrice DoG corrente, e nei 9 nella matrice DoG superiore e inferiore, *Figura 1.29*. Una volta individuato il punto viene definito un vettore che descrive i gradienti radiometrici nell'intorno del punto di interesse.

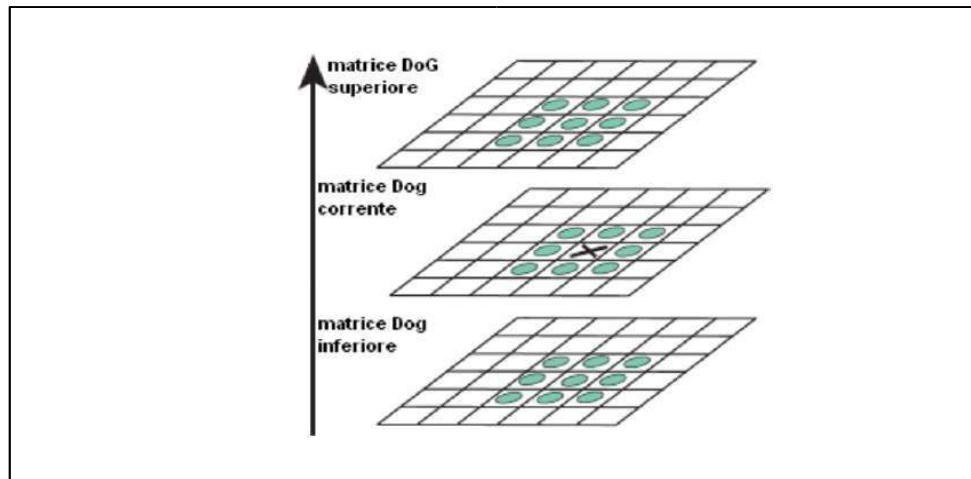


Figura 1.29: Determinazione dei punti di interesse calcolando la DoG - Introduzione alla fotogrammetria digitale, modificata da Zanutta et al., 2019

Raggruppano i vettori di tutti i pixel si forma un istogramma di gradienti orientati i cui picchi rappresentano le direzioni dominanti. La distanza euclidea di questi vettori n-dimensionali permette di individuare i punti omologhi tra le immagini ad esempio con la lenta ma rigorosa quadratic matching procedure che compara tutte le combinazioni dei

punti di interesse di due immagini e quelli che avranno la minor distanza euclidea dai vettori descrittivi saranno valutati come corrispondenze.

Un'altra correlazione veloce ma approssimativa è la kd-tree procedure; si tratta di un albero binario in cui ogni nodo è un punto k-dimensionale.

L'operatore SURF è parzialmente ispirato a al descrittore SIFT ma secondo i suoi sviluppatori è più veloce, più stabile e più robusto tra diverse trasformazioni di immagini. Per rilevare i punti di interesse l'operatore SURF usa un'approssimazione intera del determinante del rivelatore blob di Hessian che può essere calcolato con tre operazioni interne usando un'immagine integrale precalcolata. Anche il punto di interesse può essere calcolato con l'aiuto di un'immagine precalcolata. Invece di valutare il gradiente degli istogrammi calcola le somme dei componenti del gradiente e le somme dei loro valori assoluti. Le caratteristiche rilevate dalle immagini vengono poi incrociate da algoritmi di matching.

3.3) Structure From Motion: Bundler

Negli anni '90 la diffusione delle camere digitali nel campo della visione artificiale ha permesso di concentrarsi sull'analisi di sequenze di immagini, affrontando la ricostruzione della Structure from Motion (SfM), la quale permette, utilizzando l'operatore SIFT o SURF, di risolvere l'orientamento interno ed esterno di un blocco fotogrammetrico con il minor numero di informazioni possibili, utilizza infatti soltanto le features, ovvero l'individuazione di corrispondenza.

Il software Bundler, il cui codice sorgente è stato reso disponibile da uno dei suoi sviluppatori, Noah Snavely, permette di calcolare la geometria proiettiva relativa delle immagini così come un set di punti 3D che rappresentano la struttura della scena e che sono acquisite spostandosi attorno alla scena, vengono successivamente sovrapposte assieme grazie alle feature locali di ciascuna immagine facendo poi corrispondere tali punti bidimensionali nelle immagini multiple. In definitiva lo SfM stima il posizionamento dei punti di interesse nelle coordinate di riferimento locale, che prende il nome di spazio modello, producendo una nuvola di punti tridimensionale sparsa che rappresenta la geometria della scena.

In *Figura 3.30* è riportato il Workflow generale per la risoluzione dello SfM.

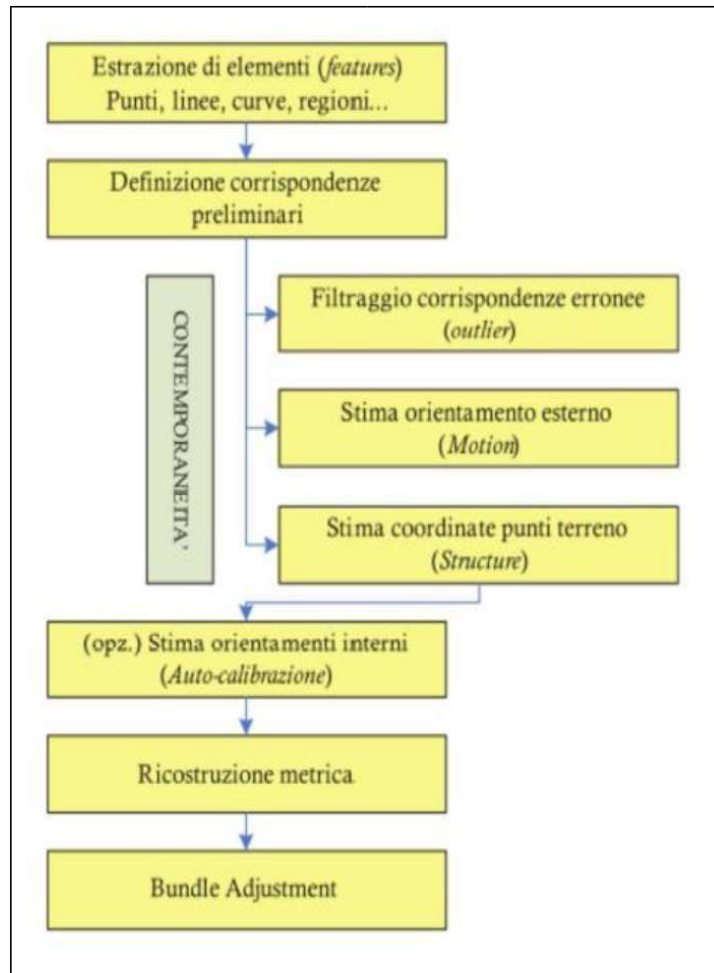


Figura 3.30: Workflow generale per la risoluzione dello SfM - Roncella, 2005

4) FOTOGRAMMETRIA AEREA CON SAPR

4.1) Rilievo da aereo

Da molti anni, la fotogrammetria aerea è divenuta l'unico strumento per la produzione cartografica di medio-grandi estensioni di territorio.

Questo sistema si avvale di camere sofisticate, dotate di numerosi automatismi e collocate sul pavimento dell'aereo, affinché il loro asse mantenga il più possibile la ripresa verticale e rivolto verso il basso per riprendere il terreno, denominata "presa nadirale".

Al fine di applicare il principio di base della fotogrammetria, per ottenere la carta dai fotogrammi ripresi, è fondamentale che ogni punto del terreno sia ripreso almeno da due fotogrammi consecutivi (*Figura 4.1*).

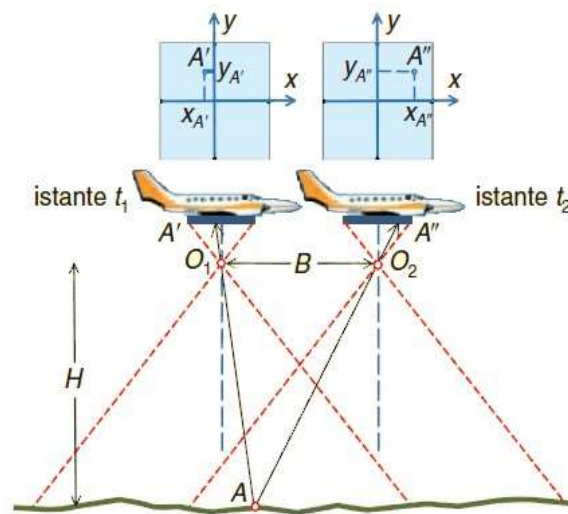


Figura 4.1: Schema della presa aerea nadirale – Cannarozzo, Cucchiarini, Meschieri, 2012

In sostanza, l'aereo segue una traiettoria rettilinea e la camera, a bordo, scatta fotogrammi ad intervalli di tempo regolari, sui quali vengono registrate rispettivamente le due immagini A' e A'' , omologhe di A , con coordinate lastra $(x'A' y'A')$ sul primo fotogramma e $(x''A' y''A')$ sul secondo fotogramma, che verranno misurate in fase di restituzione e permetteranno il posizionamento di A .

La posizione di A si può stabilire, pertanto, con le due immagini omologhe A' e A'' sulla lastra.

Le modalità di volo dell'aereo, per il rilievo, sono di seguito riportate:

- velocità costante
- altezza media H dal terreno nota
- percorsi rettilinei affiancati lungo direzioni parallele come da *Figura 4.2*

Gli scatti della fotocamera saranno fatti all'istante t_1 quando il centro di presa della camera si trova in O_1 e riprende il primo fotogramma, e all'istante t_2 , dopo aver percorso un certo spazio che costituisce la base di presa B , esso si troverà nella posizione O_2 dove riprenderà il secondo fotogramma, tali scatti formeranno le singole strisciate, costituite da fotogrammi ripresi lungo uno stesso percorso rettilineo; l'insieme di più strisciate viene chiamato blocco di strisciate.

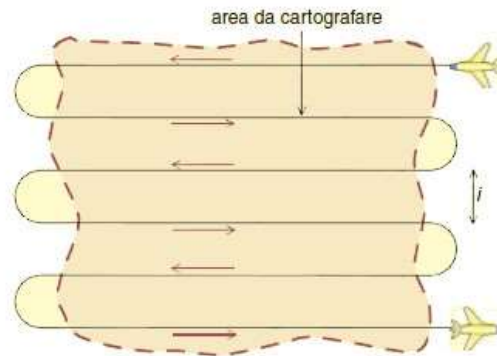


Figura 4.2: Schema di copertura del territorio con un volo fotogrammetrico organizzato in traiettorie rettilinee e parallele durante le quali viene preso un certo numero di fotogrammi detto strisciata-
Cannarozzo, Cucchiarini, Meschieri, 2012

Per evitare porzioni di territorio non rilevate, poiché il ricoprimento longitudinale μ , viene stimato al 60%, è necessario che l'interasse i , tra due strisciate adiacenti, garantisca un ricoprimento laterale ϵ compreso tra il 10%-20% dell'abbracciamento L del fotogramma, (Figura 4.3).

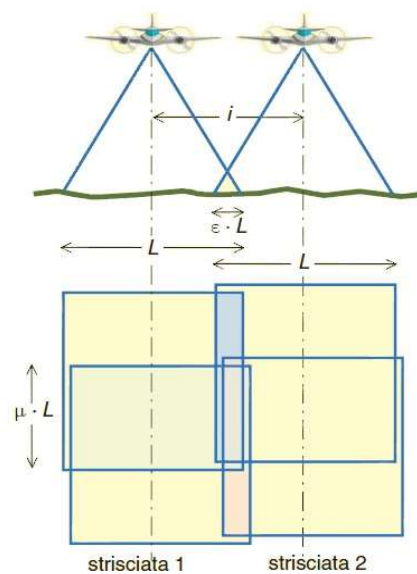


Figura 4.3: Due strisciate adiacenti devono presentare un interasse i tale da generare un ricoprimento laterale in ragione del 10-20% dell'abbracciamento L dei fotogrammi – Cannarozzo, Cucchiarini, Meschieri, 2012

Tutta l'area da rilevare deve essere ripresa e ogni punto del terreno deve comparire almeno su due fotogrammi, attraverso il ricoprimento longitudinale (overlap) dell'abbracciamento L del fotogramma che produce due strisce di sovrapposizione del 10% (Figura 4.4).

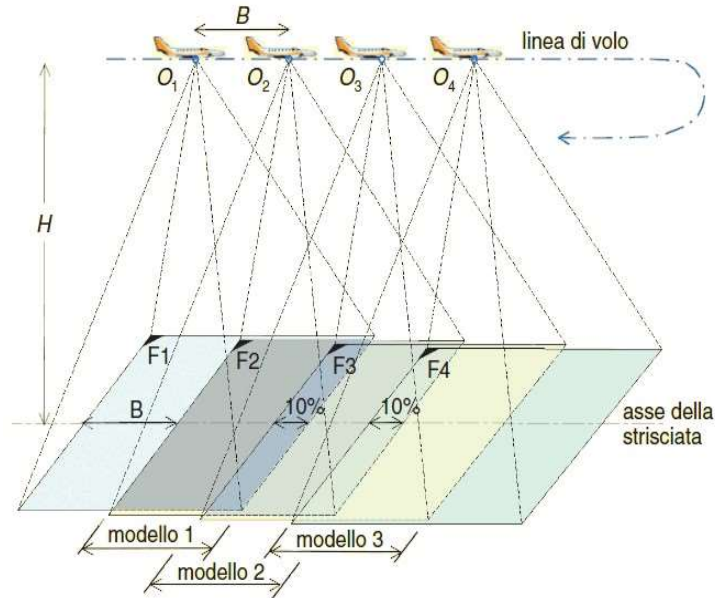


Figura 4.4: Sovrapposizione delle strisciate - Cannarozzo, Cucchiarini, Meschieri, 2012

L'overlap permette la scomposizione ideale del terreno in tanti modelli stereoscopici che, a loro volta, presentano una sovrapposizione del 10% necessaria al loro concatenamento. Se il terreno da riprendere è irregolare e montagnoso, il ricoprimento longitudinale dovrà avere un valore più alto, fino anche al 75%.

Una condizione necessaria è, infine, che i voli fotogrammetrici devono essere effettuati in condizioni meteorologiche perfette (in assenza di nubi, ma anche di foschia), negli orari centrali della giornata, per sfruttare la massima illuminazione disponibile e per minimizzare l'influenza delle ombre al suolo (Figura 4.5).

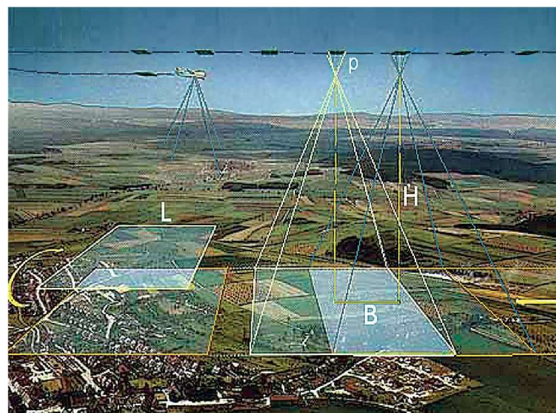


Figura 4.5: Vista schematica della presa aerea - Cannarozzo, Cucchiarini, Meschieri, 2012

4.2) Rilievo da drone

L'ultima evoluzione delle tecniche di rilevamento aereo è rappresentata dal **rilievo da drone**, di cui il mercato attuale riesce a fornire modelli con caratteristiche tecniche adeguate allo scopo dell'utilizzo finale, in base a:

- tipo di vettore
- tipo di sensori montati a bordo
- metodologie di processamento dei dati

Confronto tra fotogrammetria aerea e rilevamento con droni

I punti di contatto tra la fotogrammetria aerea e quella da drone, sono principalmente i seguenti:

- tipologia di sensori
- tipologia di processamento delle immagini
- tipologia di prodotti

Mentre, le peculiarità che rendono le due tecniche ancora sostanzialmente diverse, sono le seguenti:

- flessibilità
- produttività
- calibrazione
- orientamento

4.2.1) UAV - SAPR - UAS

La fotogrammetria aerea può anche essere applicata, con gli opportuni accorgimenti, a sistemi di volo con UAV.

Gli UAV, acronimo di **Unmanned Aerial Vehicle**, comunemente noti con il nome di **droni**, attualmente sono denominati APR o meglio **SAPR**, in quanto l'**ICAO**, l'Organizzazione mondiale dell'aviazione civile, ha adottato un termine più corretto per questi velivoli.

SAPR, è l'acronimo di **Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto**, Remotely Piloted Aircraft System, cioè aerei con sistema di pilotaggio remoto, sono velivoli senza pilota umano a bordo, ovvero a pilotaggio remoto.

Va evidenziato che il termine **SAPR** sarà sostituito dal termine internazionale **UAS**, acronimo internazionale di, già citato nel recentissimo Regolamento Europeo di riferimento.

Per procedere ad un rilievo con i **SAPR**, innanzi tutto viene disegnato il piano di volo, direttamente sul software installato sulla **GCS**, acronimo di **Ground Control Station** (oppure importando dati di piani di volo calcolati in precedenza).

Come già accennato, occorre impostare la traiettoria in modo tale che ogni fotogramma abbia un overlap del 60% con quello successivo e ogni strisciata un sidelap del 20% con quella successiva.

Come per la fotogrammetria aerea, anche per i droni, bisogna tenere conto di:

- altezza di volo
- velocità del drone
- frequenza di scatto della macchina fotografica

Si devono utilizzare macchine fotografiche, più piccole, leggere e amatoriali e soprattutto di costi più accessibili, tenendo presente che il drone è molto più piccolo di un normale aereo, rendendo fondamentale la scelta del giusto obiettivo in termini di lunghezza focale, che dovrà essere di grandezza il più simile possibile alla diagonale del sensore, per ridurre al massimo le problematiche di determinazione della curva di distorsione.

Un aspetto positivo del drone è che permette di effettuare strisciate anche molto ravvicinate, seguendo il tracciato più corto possibile, elemento fondamentale per la limitatezza di autonomia di volo.

Una volta pianificato il volo, la GCS invia al drone le coordinate tridimensionali dall'inizio e alla fine di ogni strisciata, definite **waypoint**, che, grazie al sistema GPS integrato, segue la traiettoria impostata e anche se, a causa di problemi dovuti alla

tecnologia o più spesso al vento, dovesse uscire traccia, si torna a riposizionare nel punto corretto al successivo waypoint, proseguendo sulla strisciata successiva, fino al termine del volo.

Terminata la fase di acquisizione, si passa alla fase di restituzione.

Per prima cosa, bisogna acquisire dei **PFA**, acronimo di punti fotogrammetrici di appoggio, sul territorio indagato, e reperire i dati forniti dal drone, per ogni istante del tempo di, che riguardano, in particolare:

- la posizione nel sistema di riferimento assoluto del velivolo
- gli assetti di volo, indispensabili per ricostruire la stella dei raggi proiettivi
- i parametri di orientamento del fotogramma

4.2.2) Caratteristiche tecniche

La loro autonomia di volo silenzioso può raggiungere oltre 20 ore senza rifornimento; su aree assai vaste e raccogliere informazioni di ogni tipo.

I **SAPR** sono formati da tre componenti:

- **il veicolo o piattaforma**, costituito da:
 - scheletro
 - sistema di propulsione
 - sistema di controllo e di navigazione, con sistemi anti collisione e di cui esistono software con pilotaggio via satellite
- **il payload**: costituito da sistemi accessori, indispensabili per lo scopo del volo, quali gli infrarossi, sistema di posizionamento, sensori ambientali, il radar, che dovranno essere selezionati in base allo scopo del volo.
- **la Ground Control Station o System (GCS)**: lo strumento in mano al pilota, dove vengono visualizzate le informazioni del volo

Esistono diversi modelli di droni, il cui peso va da meno di un chilogrammo a diverse tonnellate, come il **Global Hawk** che può volare a 40 mila metri di altezza, in qualsiasi condizione meteo, infatti, non trasportando passeggeri, i droni non sono pressurizzati e possono volare ad altezze precluse agli aerei di linea.

I modelli che pesano alcune decine di chili sono pilotati a vista da una piccola attrezzatura portatile, mentre i droni di peso maggiore, vengono pilotati via satellite da stazioni a terra, simili alla cabina di pilotaggio di un aeromobile di linea.

I sensori o le armi che sono installate a bordo costituiscono, sostanzialmente la differenza tra l'uso a scopo civile e quello militare, infatti, questi veicoli vengono dotati, soprattutto

sensori di vario tipo e macchine per riprese audio e video ad alta definizione, oltre che di armi impiegate per missioni militari.

Al gruppo dei SAPR appartengono diverse tipologie di velivoli (aeroplani, elicotteri, dirigibili) e anche velivoli innovativi rappresentati dagli elicotteri multirotori (quadrirotori, esarotori e ottorotori). Questi oggetti hanno la possibilità di montare diversi sensori sul corpo principale del quadrirotore, capaci di realizzare immagini nel visibile e nell'infrarosso, immagini termiche e acquisire parametri ambientali.

Il loro recente sviluppo è legato alla crescita dell'affidabilità e alla riduzione dei costi dei componenti elettronici basati su nano tecnologie MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). I velivoli sono equipaggiati con schede e componentistica utile al volo (barometri, accelerometri, GPS etc) e possono trasportare sensori dedicati a diverse tipologie di rilievo.

I sensori sono trasportati su apposite "culle" con caratteristiche hardware diverse, alcune sono nadirali stabilizzate per il mantenimento della verticale, altre sono inclinabili con gradazione definibile per riprese prospettiche.

Le modalità di pilotaggio prevedono:

- il volo a vista che consente il trasporto dei sensori con l'utilizzo del radiocomando fino ad un massimo di circa 250 metri rispetto all'operatore, maggiormente indicato in zone ristrette e accessibili (sito archeologico, discarica, incrocio stradale);
- il volo FPV: (acronimo di First Person View, volo in prima persona), che consente un avvicinamento maggiore all'obiettivo da rilevare perché il pilotaggio avviene con un visore che riceve le immagini direttamente da una telecamera posta sul velivolo, indicato in aree morfologicamente complesse e pericolose (riprese di zone di distacco di frane, superamento di ostacoli quali fiumi e altre barriere, avvicinamento in luoghi contaminati);
- il volo autonomo che infine garantisce il massimo della sicurezza sulle lunghe distanze, la traiettoria di volo è preimpostata e la posizione del velivolo è controllata o dal GPS di bordo o da un sistema alternativo.

Il monitoraggio del territorio richiede un'innovazione costante in termini di processi e di strumenti e in particolare la ripresa dall'alto del territorio è in rapida evoluzione sia nelle tecnologie che nelle metodologie.

Di seguito si riepilogano, in breve, le tipologie, di APR/SAPR:

Tipologie APR	Classi
Multirotore MC	inoffensivo <300g
Ala fissa AP	inoffensivo <2kg (e.c. impatto <122 J)
Dirigibile AS	0.3kg<VL<4 kg
Elicottero HC	4.0kg< L <25 kg
	H>25 kg

Figura 4.6: Schema riassuntivo delle categorie di droni - www.icvbc.cnr.it [2]

4.2.3) I Micro Droni

I Micro-SAPR sono ormai quelli maggiormente utilizzati per la ripresa del territorio ad alta risoluzione e a bassa quota di volo, permettendo il monitoraggio di città, rilievi di parchi, infrastrutture, aree industriali, edifici, aree in dissesto idrogeologico.

Sono velivoli di piccole dimensioni, da un minimo di 60x60 mm ca., con peso inferiore ai 2 chilogrammi in assetto di volo, composti da un telaio portante in alluminio o fibra di carbonio (Figura 4.7), volano grazie alla spinta di quattro o più motori ad elica brushless controllati da regolatori di velocità dedicati ad ogni singolo motore.

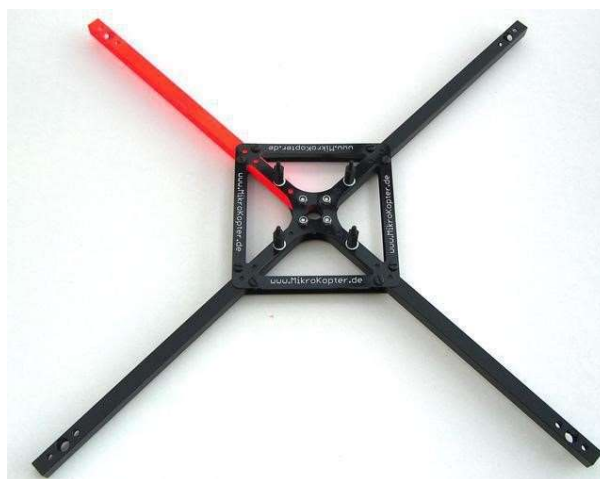


Figura 4.7: Telaio portante in alluminio o fibra di carbonio - www.dronezine.it, 2019 [3]

Come per gli altri velivoli, sono equipaggiati di schede e componentistica utile al volo (barometri, accelerometri, GPS etc) che possono trasportare sensori di rilievo dedicato (Figura 4.8).

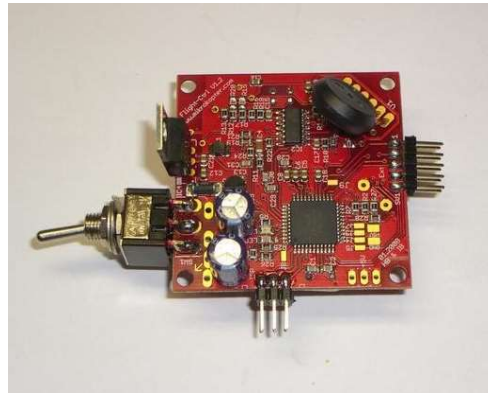


Figura 4.8: Sensore di rilievo - www.dronezine.it, 2019 [3]

Il loro impiego è legato alla possibilità di costruire una piccola flotta di quadricotteri (8-10) dotati di diversi sensori e che potranno agire in modo coordinato permettendo di acquisire molteplici informazioni del territorio sorvolato in contemporanea dallo “sciame” di multi-rotori dotati di una serie di sensori diversi a bordo.

Il volo, sincrono e semiautonomo, permette di coprire porzioni di territorio contemporaneamente con diversi sensori realizzando così un campionamento contemporaneo di diverse grandezze.

Le possibili applicazioni di questi strumenti, quindi, sono:

- Riprese aeree di porzioni di territorio con telecamere
- Riprese aeree fotografiche a bassa quota ed alta risoluzione
- Produzione di modelli digitali della superficie a partire da stereo coppie
- Realizzazione di strisciate
- Rilievo a distanza di aree non accessibili o non sicure
- Analisi degli inquinanti dispersi in atmosfera
- Ripresa del territorio nel campo del visibile, dell'infrarosso e del termico
- Rilievi a distanza di aree edificate, centri urbani o singoli edifici
- Creazione di quadri di conoscenza

Nello specifico, in **Italia**, il volo attraverso pilotaggio remoto è permesso solo previo ottenimento del “Permesso di Volo per scopi sperimentali” rilasciato dall’**ENAC** - Ente Nazionale per l'Aviazione Civile.

Un esempio di Micro Drone, di ultima generazione, è il **Micro Drone 3.0**, quale modello tra i più impiegati e di rara bellezza in termini di design tanto da essere considerato come

un gioiello sofisticato, ma il suo fascino non si esaurisce in qualcosa di meramente estetico, visto che la sua forza è racchiusa nella sua capacità di realizzare delle straordinarie riprese in HD di alto livello.

Si parla, infatti, di un comparto multimediale davvero molto interessante, le cui caratteristiche specifiche che possono raggiungere i 720×1280 pixel a 30 frame al secondo.



Figura 4.9: Micro Drone 3.0 - www.dronezine.it, 2019 [3]

Le sue alte prestazioni sorprendono, in particolare per quanto riguarda le micro-camere che sono montate solitamente sui quadricotteri di ultima generazione, ottenendo l'esperienza visiva di pilotaggio di altissimo livello.

I suoi filmati aerei possono essere inviati in streaming video, condividendoli via WiFi, grazie all'applicazione Companion, avendo a disposizione tutte le feature del controller di base, oltre ad una straordinaria visione panoramica a 360° della micro-gimbal.

Un altro punto di forza del velivolo è sicuramente la sua versatilità di volo, infatti è facilmente utilizzabile sia dai piloti alle prime armi che per quelli di livello avanzato che sono in grado di realizzare delle straordinarie rotazioni, caratteristiche.

4.2.4) I Droni Professionali

Attualmente, per poter fare volare in modo sicuro, in Italia, significa acquistare una macchina SAPR che sia certificata da ENAC, l'Ente Nazionale Aviazione Civile, è, infatti, in vigore un regolamento (disponibile sul sito ufficiale di ENAC) restrittivo per il volo con mezzi a pilotaggio remoto che ha reso moltissimi droni non adatti ad essere utilizzati per scopi lavorativi su suolo italiano.

Si sottolinea, però, che il Regolamento sopra citato sarà, molto presto, oggetto di importanti modifiche, in riferimento al Nuovo Regolamento Europeo, di recente pubblicazione, come meglio descritto nel capitolo riguardante la Normativa di riferimento.

Per lavorare nell'ambito dei SAPR è quindi necessario dotarsi di una macchina che risponda a tutti i requisiti di legge, sia sicura e affidabile e con caratteristiche tecniche vantaggiose per poter operare in tutti gli ambiti.

È compito dell'operatore scegliere la macchina più idonea alle proprie esigenze.

Questi velivoli, in genere, sono tutti dotati di navigazione GPS, decollo e atterraggio automatico, Return to Home, doppi controlli per la videocamera e altri piccoli dettagli che li rendono per molti versi simili gli uni agli altri, mentre ciò che li contraddistingue è il payload, ossia il carico trasportabile, il numero di minuti di volo, il peso complessivo, la trasportabilità e, naturalmente, il prezzo.

Un esempio di drone professionale di ultima generazione è il **DJI MAVIC 2 PRO**, con caratteristiche tecniche idonee a riprese per mappatura territoriale:



Figura 4.10: DJI Mavic 2 Pro – www.dronerush.com [4]

Le cui caratteristiche (da scheda tecnica) di seguito riassunte forniscono le motivazioni per le quali è tra i più impiegati (www.dji.com [5]):

Velivolo

Chiuso	83 x 83 x 198 mm
Diagonale (eliche escluse)	335 mm
Peso (con batteria ed eliche)	734 g (senza cappuccio del gimbal)
	743 g (con cappuccio del gimbal)
Massima velocità ascensionale	5 m/s in modalità Sport
Massima velocità di discesa	3 m/s
Velocità massima	65 km/h in modalità Sport e in assenza di vento
Quota massima di tangenza operativa sul livello del mare	5000 m
Autonomia di volo	27 minuti (a 25 km/h costanti e in assenza di vento)
Autonomia in volo stazionario	24 minuti (in assenza di vento)
ESC (controllo velocità)	FOC
Massima distanza di volo (batteria completamente carica, in assenza di vento)	13 km
Temperatura operativa	0° – 40° C
Sistemi di posizionamento satellitare	GPS / GLONASS

Fotocamera

Sensore	1/2.3" (CMOS), pixel effettivi:12.35 M (pixel totali:12.71M)
Obiettivo	Campo visivo 78,8° 26 mm (35 mm equivalente) f/2.2 Distorsione < 1.5% Messa a fuoco da 0.5 m a ∞
Intervallo ISO	Video: 100-3200 Foto: 100-1600
Velocità dell'otturatore elettronico	8s -1/8000 s
Dimensione dell'immagine	4000×3000
Modalità fotografiche	Scatto singolo
	Scatto a raffica: 3/5/7 fotogrammi
	Bracketing automatico dell'esposizione (AEB): 3/5 fotogrammi con esposizione variata a 0.7 EV bias
Modalità video	C4K: 4096×2160 24p
	4K: 3840×2160 24/25/30p
	2.7K: 2720x1530 24/25/30p
	Full HD: 1920×1080 24/25/30/48/50/60/96p HD: 1280×720 24/25/30/48/50/60/120p
Bit-rate massimo del video	60 Mbps
File system supportati	FAT32 (≤ 32 GB); exFAT (> 32 GB)
Formato foto	JPEG, DNG
Formato video	MP4/MOV (H.264/MPEG-4 AVC)
Schede SD supportate	microSD™
	Capacità massima: 128 GB Classe 10 o standard UHS-1
Temperatura operativa	0° – 40° C

Sistema di visione

Sistema di visione	In avanti
	Verso il basso
Distanza di rilevamento anti-collisione	Distanza di misurazione di precisione: 0,7 – 15 m; distanza di rilevamento: 15 – 30 m
Ambiente operativo	Superfici definite con illuminazione adeguata (>15 lux)
Intervallo di velocità	≤36 km/h a 2 m di altezza
Intervallo di quota	0,3 – 13 m
Intervallo operativo	0,3 – 13 m

E', inoltre dotato di sistema WiFi integrato, Gimbal, batteria di volo intelligente e relativo carica batteria.

4.2.5) I Droni di grandi dimensioni

Considerato che, generalmente, i droni di grandi dimensioni sono utilizzati **esclusivamente per scopi militari**, non essendo, pertanto, reperibile materiale in merito, per ovvie ragioni di segretezza, si deciso di fare riferimento ad un interessantissimo articolo, riportato interamente dal sito di "*Repubblica Tecnologia*", nel quale si possono comprendere meglio gli scopi e gli utilizzi di questo tipo di SAPR.

“La base dell'Aeronautica che ospita anche i sistemi Predator è ai piedi del Promontorio del Gargano” [6]

A pochi chilometri da Foggia e dal Golfo di Manfredonia. Dalla palazzina di comando del 28° Gruppo si intravedono, a qualche centinaio di metri di distanza, le grandi parabole satellitari che fanno parte del complesso sistema di guida del Predator A+ (MQ-1) e del più grande ed evoluto B (MQ-9A).



Figura 4.11: Esempio di drone militare - www.repubblica.it [6]

Droni disarmati. Gli APR (Aeromobili a Pilotaggio Remoto) dell'Aeronautica Militare Italiana - più comunemente conosciuti come droni - sono equipaggiati con sistemi di sorveglianza e ricognizione.

Una scelta precisa del Governo e del Parlamento. A bordo hanno parabole, sensori, telecamere e fotocamere ma non armi. Nelle aree di conflitto, come in Afghanistan, hanno sempre e soltanto fornito intelligence e supporto ai reparti a terra. Numerosi convogli non sono saltati sulle mine o caduti nelle imboscate perché le "Streghe" di Amendola sorvegliavano il percorso e segnalavano tutte le attività sospette.

L'area operativa è una base nella base, protetta da ulteriori recinzioni e telecamere di sorveglianza. Può accedervi soltanto il personale autorizzato e per i giornalisti c'è bisogno di un permesso dello Stato Maggiore dell'Aeronautica Militare. Possiamo fotografare i due droni sul piazzale davanti agli hangar (che custodiscono gli altri) ma non parabole o apparati di trasmissione e i sensori contenuti nella cupola sotto la pancia degli APR. Parte della tecnologia è top secret.

Visti da vicino. Questi oggetti volanti sono davvero incredibili. Fotografie e filmati non rendono l'idea delle dimensioni. Il Predator A+, quello più "piccolo", è lungo nove metri e ha un'apertura alare di 17 metri. Il Predator B è lungo undici metri e ha un'apertura alare di venti metri. Hanno più o meno le dimensioni di un Piper. Questi due bestioni riescono a stare in aria anche ventiquattr'ore di seguito e a raggiungere rapidamente la zona in cui

devono operare. Il Predator A+, spinto da un motore a cilindri, vola fino a circa 200 chilometri all'ora, mentre il B ha un motore a turboelica e può toccare i 420 km/h.

L'elica è in coda, i sensori sono nella cupola sotto la pancia, sul muso ci sono le telecamere per la guida del velivolo, mentre i sistemi di trasmissione e ricezione sono sistemati nella torretta senza vetri, che ricorda un po' quella degli aerei tradizionali.

L'equipaggio. I Predator sono costruiti negli Stati Uniti dalla General Atomic Aeronautical Systems. In Europa sono in dotazione alla britannica RAF e all'Armée de l'Air francese oltre che all'Aeronautica Militare italiana. Nella base di Amendola lavorano un migliaio di militari e sono parecchi gli uomini e le donne assegnati alle "Streghe". Ci sono i piloti, gli operatori dei sensori, i supervisori della missione, gli analisti di immagini e il personale della manutenzione, che si occupa di avionica e meccanica.

Incontrarli, parlare con loro, vederli in azione, è stata un'altra sorpresa. Tutt'altro che fanatici dei videogame di guerra o personaggi di film come *Top Gun*. Abbiamo conosciuto persone che sanno il fatto loro e hanno dimostrato un approccio lucido e professionale al compito assegnato. I piloti dei Predator sono ufficiali di grande esperienza, che alternano la guida degli APR a quella degli aviogetti Aermacchi MB-339 del 32° Stormo, per mantenere gli standard di sicurezza del volo con le due tipologie di velivoli.

Comandare e guidare un APR è dunque una fase del percorso professionale, perché lo stesso ufficiale potrebbe essere assegnato ad altri aerei. Il pilota manovra con il sistema Line of Sight (LOS), oppure grazie al sistema di guida satellitare Beyond Line of Sight (BLOS). Nel primo caso non c'è praticamente ritardo tra gli input dati dal pilota e la risposta del velivolo, e per questo è usato nelle operazioni di volo più "delicate", come decollo e atterraggio.

Accanto al pilota, nella Ground Control Station (stazione mobile di pilotaggio) siede il Sensor Operator, il sottufficiale che governa i sensori. Ci sono due cockpit speculari. A sinistra c'è il pilota militare che è il comandante del velivolo. Ha un joystick e un throttle per gestire movimenti e potenza del motore.

La Ground Control Station è il centro nevralgico di ogni missione. La luce è soffusa e gli operatori hanno gli occhi puntati sui monitor e le mani ben salde sui comandi. È una simulazione, perché mai un giornalista potrebbe assistere a una vera missione, ma l'ufficiale che ci accompagna (e del quale non possiamo fare il nome per esigenze di sicurezza) dice che è questa l'atmosfera che si respira quando il Predator è in attività.



Figura 4.12: Ground Control Station - www.repubblica.it

Per esempio, come si fa a essere certi che la persona inquadrata ha in spalla un tappeto e non un RPG? Lo stesso ufficiale ci conferma che, con i sensori oggi in dotazione è impossibile identificare una persona dal volto oppure leggere la targa di un'automobile. Le cose che vediamo fare ai droni nei film o in serie tv come *Homeland* sono, appunto, pura fiction.

Gli analisti d'immagine devono essere almeno due. Dipende dalla delicatezza e dall'importanza dell'operazione. Lo Screener è in contatto costante in interfonico con il pilota ed è sempre concentrato sulle riprese in corso, mentre l'Exploiter al suo fianco, su un'altra postazione collegata in rete ultra-protetta, studia a fondo le immagini per trarne le informazioni necessarie.

Nella prima fase si fa uno snapshot, un'istantanea che viene trasmessa senza commenti, all'analista successivo. In questa seconda fase si aggiungono commenti e interpretazioni. La terza fase è la Mission Storyboard, il resoconto finale contenuto in una timeline. In pochi minuti, così, è possibile avere il quadro completo dei dati. La geolocalizzazione delle immagini è favorita da un software che ricorda Google Maps ma è molto, molto più potente e dettagliato.

Dell'equipaggio di un Predator fa parte anche il supervisore della missione (Mission Monitor), un ufficiale esperto che è in stretto contatto con pilota, Sensor Operator e analisti di immagine, oltre che con il reparto o l'ente che ha commissionato quella particolare missione.

Infine c'è lo specialista in avionica, che fa parte del personale tecnico. Anche il suo ruolo è importante, perché un drone è fatto al novanta per cento di elettronica, con numerosissimi switch e sensori, non tutti controllabili dal pilota. L'avionico tiene sotto controllo la telemetria di tutti i sensori (temperature, amperaggio, antenna, eccetera) e interviene immediatamente se c'è bisogno.

Gli occhi del Predator. La cupola sotto la pancia del Predator ospita sensori in grado di filmare e fotografare oggetti e persone anche da grande altezza. L'importante è cercare di non finire in una nuvola, perché il ghiaccio è un nemico temibile. Gli Aeromobili a Pilotaggio Remoto hanno caratteristiche simili a quelle degli alianti e dunque sono molto sensibili al peso. Un deposito di ghiaccio sulle ali potrebbe causare seri problemi. In ogni caso gli standard di sicurezza di volo dei velivoli teleguidati sono molto elevati.

Le nuvole, invece, non ostacolano le riprese con il Synthetic Aperture Radar. Il SAR permette di scattare foto - e non video - con la stessa tecnica adottata dai satelliti, ed entra in azione quando gli altri sensori non possono operare. Il SAR ha anche la funzione Ground Moving Target Indicator (GMTI). È un sistema che sfrutta l'effetto doppler, cioè fa la scansione di un settore e rileva ogni movimento a terra. Si imposta il sensore in base alle dimensioni dell'oggetto che si sta cercando (un gommone, un camion, un'automobile) e GMTI fa il resto.

La Low Light TV (LLTV) ha invece un funzionamento simile a quello dei visori notturni dei soldati: amplifica le piccole fonti luminose sul terreno per agevolare la visuale, soprattutto all'imbrunire. I sensori possono anche essere impiegati in modalità "fusion" per integrare due tipologie differenti di immagini. I Predator possono anche trasmettere i video a terra, tramite il Remotely Operated Video Enhanced Receiver (ROVER), uno speciale computer portatile. Chiunque abbia giocato a *Battlefield* o *Call of Duty* sa di cosa parliamo. Il ROVER permette di visualizzare in tempo reale tutto ciò che vede il "drone". I reparti o i singoli militari che ne sono dotati possono eventualmente chiedere spostamenti del velivolo e nuove inquadrature. La cupola del Predator contiene anche una telecamera diurna a colori e una a infrarossi, particolarmente versatile sia di giorno che di notte.

Che differenza c'è tra Predator A+ e Predator B? Il B ha prestazioni migliori e può operare a quote più elevate. Inoltre è più veloce e può raggiungere più rapidamente le aree di interesse, con il vantaggio di una maggiore autonomia. Può infatti operare più a lungo sugli obiettivi richiesti.

Nuovi scenari. Le "Streghe" di Amendola sono destinate a un ruolo sempre più importante anche sul territorio nazionale, come prevede l'accordo siglato il 27 novembre scorso tra Aeronautica Militare, Polizia di Stato e Arma dei Carabinieri. I Predator del 28° gruppo potrebbero essere infatti impiegati "per controllare manifestazioni, stadi, strade, autostrade e sorvegliare aree specifiche". L'attacco terroristico alla redazione di Charlie Hebdo a Parigi ha fatto aumentare le misure di sicurezza in tutta Europa e le forze dell'ordine potrebbero chiedere l'intervento dei droni in situazioni ed eventi particolari. D'altronde è già successo. Nel 2007 i Predator hanno partecipato alla sorveglianza dall'alto del vertice intergovernativo Russia-Italia a Bari e, nel 2009, del G8 all'Aquila. Il magazine statunitense di strategia militare C4ISR & Networks scrive, citando fonti riservate, che i "droni" militari italiani avrebbero anche preso parte a operazioni di monitoraggio antimafia in Sicilia. Di questi nuovi scenari, però, i militari della base pugliese non sono autorizzati a parlare.

Intanto, mentre lasciamo la base di Amendola, laggiù nel Corno d'Africa e nella Penisola Arabica altri equipaggi del 28° Gruppo sono impegnati nella caccia ai pirati che assaltano i mercantili al largo delle coste somale e a perlustrare dall'alto i territori occupati dall'Isis. Dove osano le "Streghe".

4.3) Principali scopi di impiego dei SAPR

Grazie alla loro versatilità, oggi i **SAPR** vengono utilizzati in ambito sia in ambito civile che militare, di cui si riassumono i principali scopi:

Videoriprese e fotografie in generale

I SAPR, si stanno rendendo sempre più concorrenziali per tutte quelle necessità di ripresa "aerea" che fino ad ora sono state appannaggio quasi esclusivo di complicati e costosi strumenti, se non addirittura l'elicottero vero e proprio.



Figura 4.13: Borgo Medioevale di Magliano in Toscana (GR) - www.droniworld.net [7]

Monitoraggio ambientale e calamità naturali - Operazioni di ricerca e soccorso

Uno dei principali utilizzi dei SAPR è il monitoraggio ambientale e delle aree colpite gravemente da calamità naturali quali terremoti e inondazioni.



Figura 4.14: Intervento di sorvolo di zone danneggiate dal terremoto 2016 - www.peake.com [8]



Figura 4.15: Ripresa aerea da drone dei Vigili del Fuoco di Amatrice (RI) post-sisma 2016 - www.rietinvetrina.it [9]

I SAPR stanno, sempre più, svolgendo un ruolo importante nelle operazioni di ricerca e soccorso, consentendo di effettuare delle ricognizioni in tempi rapidi, in particolare a seguito del verificarsi di situazioni di emergenza.

In Italia, in queste circostanze straordinarie vengono principalmente i SAPR sono utilizzati dal Corpo dei Vigili del Fuoco e dalla Protezione Civile, i quali hanno trovato un validissimo alleato, che ha consentito loro di velocizzare di molto i tempi di intervento sul salvataggio di vite umane in pericolo, aumentando, al contempo, in maniera sensibile, la sicurezza individuale del personale impiegato, che rischia spesso in prima persona a causa delle condizioni ambientali avverse, infatti gli accessi sono spesso impediti, a causa dei muri crollati o, peggio, pericolosi a causa degli impianti (elettrico, idrico e di riscaldamento) danneggiati, che possono improvvisamente avere un tracollo.

Un primo esempio, infatti, come si può vedere nell'immagine *Figura 4.16*, il Vigile del fuoco è in fase di predisposizione del drone per il monitoraggio della situazione di stabilità della torre campanaria di Castelluccio di Norcia (PG), alle sue spalle, danneggiata dal terremoto del Centro Italia nel 2016.

L'accesso diretto alla torre, per la sua instabilità avrebbe potuto comportare un ulteriore crollo, mettendo in serio pericolo sia l'operatore che la struttura stessa, ma con l'impiego del drone si è potuto lavorare in sicurezza:

Un secondo esempio riguarda il salvataggio di persone in montagna (*Figura 4.17*), in pericolo a causa di valanghe oppure semplicemente perché si sono perse

L'ausilio dei SAPR che sorvolano rapidamente l'area di interesse e restituisce in chiaro le immagini in tempo reale hanno già consentito numerosi recuperi, altrimenti non eseguibili.



Figura 4.16: Vigile del Fuoco a Castelluccio di Norcia (PG) 2016 - www.ansa.it [10]

Infine, una delle novità più recenti di quest'ultimo anno, riguarda il salvataggio in mare (Figura 4.18), con l'ausilio dei SAPR, riferito specificatamente al ruolo di "bagnino", già adottato in diverse realtà delle nostre coste, che trasporta un dispositivo di salvamento da lanciare alla persona in difficoltà a cui aggrapparsi, in attesa dell'intervento umano vero e proprio.



Figura 4.17: Esempio di SAPR utilizzato per il salvataggio in montagna - www.redattoresociale.it [11]



Figura 4.18: Esempio di SAPR utilizzato per il salvataggio (bagnino) - www.droni.it [12]

Aerofotogrammetria e rilievo architettonico

Sinteticamente, come già visto, con l'avvento delle camere digitali di ridotte dimensioni, compatte o reflex, che possono garantire un elevato standard qualitativo relativamente all'immagine prodotta, la fotogrammetria utilizza i **SAPR** (Figure 4.19, 4.20, 4.21) per la creazione di Modelli digitali del terreno, produzione ortofoto e, per il rilievo architettonico di infrastrutture ed edifici per la creazione di modelli 3D.



Figura 4.19: Rilievo aerofotogrammetrico con SAPR in porzione della provincia di Catania - www.geometric.it [14]



Figura 4.20: Esempio di SAPR in azione per il rilievo fotografico con drone delle campagne toscane - www.attilocallegari.it [15]



Figura 4.21: Esempio di rilievo con drone a scopi architettonici per la formazione di modelli 3D - www.rgdroni.it [16]

Monitoraggio centrali termoelettriche e degli impianti industriali

I SAPR vengono utilizzati per monitorare, nel tempo, gli impianti di produzione di energia elettrica, impianti industriali, ecc..., accessoriandoli di sensori quali termocamere, camere multispettrali ecc.).

Un esempio è quello documentato di un'area industriale (Figure 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26), documentata dall'Agenzia Regionale per l'Ambiente Toscana (www.arpat.it) a Cerreto Guidi (FI), in cui ha incaricato una ditta di Genova, che con l'utilizzo di SAPR è stata in grado di far sorvolare, in una sola giornata, 16 chilometri quadrati di territorio, a diverse quote e con sensori differenti. Sono state rilevate ortofoto e immagini multispettrali con precisioni fino al cm, che sono state utilizzate ai fini della valutazione dei danni verificatisi a seguito di un calamitoso.



Figura 4.22: Rilievo fotografico effettuato con SAPR a Cerreto Guidi (FI) - www.arpat.it [17]

Nelle pagine seguenti si possono evincere, dalle immagini, come i sensori abbiano evidenziato diverse problematiche.



Figura 4.23: Foto multispettrale - bande visibili (RGB) - www.arpat.it [17]



Figura 4.24: Foto multispettrale – Infrarosso – www.arpat.it [17]

L'elevata precisione delle foto a colori (dimensione del pixel al suolo pari a 5cm e 1 cm), difficilmente raggiungibile con voli tradizionali, consente in particolare di verificare nel dettaglio i danni ai singoli manufatti.



Figura 4.25: Dettaglio zona industriale - risoluzione a 5cm – www.arpat.it [17]



Figura 4.26: dettaglio zona industriale - risoluzione a 1cm – www.arpat.it [7]

Il dato rilevato con sensore multispettrale in una porzione della zona industriale per finalità sperimentali ha consentito di classificare coperture e depositi di materiale, identificando in automatico zone a probabile presenza di cemento amianto.

Monitoraggio siti Archeologici

Al fine di evitare saccheggiamenti e danni ai reperti archeologici e per lo studio approfondito degli stessi si sta, sempre più diffondendo il sistema di monitoraggio con l'utilizzo di SAPR.

Recentemente è stato effettuato il monitoraggio dell'antichissima necropoli di Fife (Giordania) ad opera dei SAPR, una soluzione valida, considerando anche la difficoltà oggettiva di avere e reperire personale in zone militarmente attive come il Medio Oriente. In Italia, un intervento di rilievo dettagliato è stato effettuato nel sito archeologico di Nora Terme, una frazione di Pula (CA), di cui si può vedere il risultato in *Figura 4.27*:



Figura 4.27: Rilievo archeologico con drone a Nora Terme (CA) – www.archeodigital.it [8]

Telerilevamento

Per tale scopo vengono utilizzati gli SAPR appartenenti in particolare alla categoria mini, poiché hanno la possibilità di volare anche a quote molto basse e di disporre di sensori di piccole dimensioni, ma di buona qualità, infatti di possono creare mappe di vigore di colture agricole e monitorarne lo stato di salute della vegetazione, creare mappe di copertura e uso del suolo, per l'analisi e il supporto nelle fasi immediatamente successive a calamità naturali oppure monitorare e mappare le dispersioni termiche di edifici (case, capannoni, impianti industriali) privati e pubblici in un periodo, come quello attuale, in cui si parla molto di sviluppo sostenibile e perdita di terreno da destinare ad aree verdi.

Sicurezza territoriale, delle frontiere, lotta al terrorismo ed ai narcotrafficienti

Per la propria sicurezza, un esempio di applicazione dei SAPR è quello degli Stati Uniti che hanno iniziato, in collaborazione con il Messico, per arginare il fenomeno dell'immigrazione clandestina e del traffico di sostanze stupefacenti attraverso il loro confine ad impiegare i droni in dotazione all'esercito statunitense nei cieli del Paese vicino, segnalando i movimenti e la forza numerica dei narcotrafficienti, informazioni che vengono subito comunicate agli agenti sul territorio. In questo caso volano a 18.000 metri d'altezza, praticamente invisibili da terra, e in un solo giorno possono controllare minuziosamente un'area di circa 100.000 chilometri quadrati.

Sempre a scopo di monitoraggio del territorio, ai fini della sicurezza, si è approfondito meglio l'argomento nel capitolo 4.2.3, riguardante i sistemi a pilotaggio remoto utilizzati dall'esercito italiano.

Biodiversità e monitoraggio fauna

I SAPR possono essere utilizzati per il monitoraggio degli animali selvatici e il controllo numerico periodico per quelle specie con un alto tasso di riproduzione che potrebbero essere un problema sia per la biodiversità dell'ambiente in cui vivono che per quanto riguarda i danni economici causati alle produzioni agricole e zootecniche presenti sul territorio, ma anche per la salvaguardia delle specie in estinzione.

Di seguito si riporta un interessante articolo di Marzia Fiori Andreoni su Ninjamarketing.org, che riprende i dati dall'ONG Sahara Conservation Fund (*Figura 4.28*):

“Quando senti parlare di animali in via di estinzione, la maggior parte delle volte si tratta di rinoceronti, elefanti, tigri e altri animali possenti. Molto meno noto è il dramma che sta vivendo nel Niger l'antilope Addax.

Conosciuta anche come antilope dalle corna a vite, è un animale che vive in alcune regioni isolate del deserto del Sahara e rischia di estinguersi perché gravemente minacciata dal bracconaggio e dal massiccio disturbo provocato dalle installazioni petrolifere gestite dalla China National Petroleum Corporation (CNPC).

Negli ultimi anni era stata registrata la presenza di circa 200 antilopi, ma la situazione è velocemente precipitata. Nel marzo 2016, stando a quanto afferma un'indagine condotta dalla IUCN (Unione Internazionale per la Conservazione), con Sahara Conservation Fund e l'ONG Noè, si è arrivati addirittura a contarne soltanto 3 esemplari in Niger.



Figura 3.28: Monitoraggio antilopi del Sahara – www.ninjamarketing.org [19]

L'ultimo rifugio rimasto per le poche antilopi sopravvissute è la zona protetta più grande dell'Africa, il National Nature Reserve Termit & Tin-Toumma, in Niger orientale.

Creato nel 2012, il Termit & Tin Toumma si estende per oltre 97.000 chilometri quadrati (37.500 miglia quadrate), oltre tre volte le dimensioni del Belgio e parte del parco si trova nel bacino del lago Ciad.

Il Niger si sta ora rivolgendo, grazie alla partnership con l'ONG Noè, **ai droni come mezzo di sorveglianza e protezione delle antilopi** nella riserva naturale di Termit & Tin Toumma.

I droni saranno utilizzati per monitorare non solo le antilopi Addax in via di estinzione, ma anche le gazzelle e i ghepardi che vivono nel parco. La tecnologia dei droni verrà dunque utilizzata a difesa della biodiversità: un uso innovativo, che è possibile solo grazie alla capacità di queste macchine di sorvolare e mappare aree altrimenti difficili se non impossibili da raggiungere e controllare.

È interessante notare che proprio una società francese chiamata Noè - come il patriarca che nel Vecchio Testamento salvò con un'arca tutti gli esseri viventi dall'estinzione per causa del diluvio universale - abbia ottenuto il contratto di 20 anni per fornire i droni e tutti i servizi associati relativi al monitoraggio degli animali.

A proposito di questi mezzi innovativi c'è però da considerare che gli Stati Uniti proprio in Niger sarebbero in fase di costruzione di una base per droni, secondo alcune fonti. Si tratterebbe di una base costruita a lunga distanza, un progetto molto ambizioso, come ha

commentato l'esperto Dan Gettinger, co-fondatore del Centro per lo studio dei droni al Bard College.

Potrebbe essere solo una coincidenza che un'azienda europea stia preparando l'uso di droni per monitorare la fauna selvatica per un periodo di 20 anni nello stesso paese in cui gli USA stanno costruendo una base militare per droni da 240 milioni di dollari, o c'è forse qualche motivo strategico nascosto?

Mentre c'è chi solleva questi dubbi, si spera che con l'introduzione dei droni le povere antilopi potranno almeno essere protette dal bracconaggio.”

Ampliamento della connessione Internet

Sino a circa due anni fa numerose aziende di software internazionali avevano provato a utilizzare i droni per diminuire il digital divide del pianeta, vale a dire aumentare la copertura di Internet nel mondo, ma hanno constatato l'insuccesso sia oggettivo che economico ed hanno abbandonato il sistema a favore dei satelliti.

Impiego militare

Infine, purtroppo, i **SAPR** vengono utilizzati anche per scopi militari di cui se ne riassumono rapidamente le “attività”:

- *attività di spionaggio militare* ha sfruttato a pieno le potenzialità di questi mezzi, che stanno rivoluzionando le politiche di difesa e di offesa, divenendo strategici per intervenire in zone del globo, nelle quali è difficile impiegare truppe di terra a causa dell'orografia del territorio
- *interventi di attacco aereo* (bombardamenti)

5) **NORMATIVA DI RIFERIMENTO SAPR**

Innanzitutto, per fare chiarezza, si deve considerare che sia la tecnologia sia le attrezzature relative in materia sono in continua evoluzione, pertanto anche il Legislatore è costretto continuamente ad adeguarsi, rimanendo al passo coi tempi, infatti, ad oggi, riassumendo, si dovrebbe fare riferimento alle seguenti disposizioni:

5.1) **Regolamenti Internazionali**

L'ICAO, acronimo del già citato organismo **International Civil Aviation Organization**, attraverso la **Convenzione di Chicago**, definisce all'Art. 8 gli **Aeromobili senza pilota**, come segue: "Nessun aeromobile manovrabile senza pilota può sorvolare senza pilota il territorio di uno Stato contraente, salvo autorizzazione speciale di detto Stato e conformemente alle condizioni di questa. Ogni Stato contraente si impegna a provvedere affinché il volo senza pilota di un tale aeromobile nelle regioni aperte agli aeromobili civili sia controllato in modo da evitare qualsiasi pericolo agli aeromobili civili".

5.2) **Normativa vigente in Italia**

L'art. 743 del Codice della Navigazione definisce "I Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto, noti come droni, sono considerati a tutti gli effetti aeromobili come previsto e definiti come tali da leggi speciali, dal regolamento comunitario dal **Regolamento dell'ENAC**, acronimo dell'**Ente Nazionale Aviazione Civile**, e, per quelli militari, dai decreti del Ministero della Difesa".

Come già meglio specificato in precedenza, l'impiego dei SAPR è sempre più diffuso e frequente per i più svariati impieghi, ma occorre fare molta attenzione alle **ultimissime novità** in materia.

Nello specifico, in Italia, infatti, si deve fare riferimento al "Regolamento Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto" emesso dall'ENAC (Ente nazionale Aviazione Civile), ma lo stesso ente, a partire dal 1 Luglio 2019 ha emesso un decreto sospensivo del regolamento stesso, al fine di adeguare la normativa italiana al nuovo Regolamento Europeo in materia, le cui regole dettagliate sono state pubblicate l'11 Giugno 2019, sulla Gazzetta Ufficiale Europea, nel quale è specificato che tutti gli stati membri dell'Unione Europea, avranno tempo fino a Giugno del 2020, per adeguarsi alle nuove disposizioni.

5.3) Regolamento ENAC (in sospensiva dal 1 Luglio 2019)

La sospensiva emanata il 1 Luglio 2019 dall'ENAC ha determinato molta incertezza negli operatori di settore, ma il medesimo ente ha provveduto, al fine di non lasciare buchi normativi, ad emanare la circolare **ATM-09**, che in sintesi, si può riassumere come segue:

- 1 Luglio 2019: uscita della nuova circolare ATM-09 che pone le nuove regole e limiti di volo negli spazi aerei controllati.
- 1 Luglio 2019: uscita del nuovo Regolamento Europeo, che inizierà ad essere applicato solo da Giugno 2020.
- Fino a Giugno 2020: rimane in corso di validità il regolamento attuale e la formazione necessaria rimane esattamente quella di adesso, necessitando di corsi per il brevetto basico e critico (per i non hobbisti).
- Appena il portale sarà attivo (ovvero entro pochi mesi): sarà obbligatorio registrare tutti i droni > 250 g sul nuovo portale D-FLIGHT.

Considerato che, sino al Giugno 2020, non saranno recepiti i nuovi regolamenti, in riferimento al regolamento attuale, l'impiego dei droni può essere distinto in vari metodi, come di seguito meglio descritti.

In base agli scenari:

- *Scenari "non critici"*: sono gli scenari per i quali le operazioni sono condotte in **VLOS** e non prevedono il sorvolo, anche in caso di avarie e malfunzionamenti, di aree congestionate, assembramenti di persone, agglomerati urbani, o infrastrutture sensibili.
- *Scenari "critici"*: sono tutti gli scenari che, anche solo parzialmente, non rispettano le condizioni sopra citate.

In base alla distanza:

- *Operazioni condotte in VLOS, acronimo di Visual Line of Sight*: sono operazioni condotte entro una distanza, sia orizzontale che verticale, tale per cui il pilota remoto è in grado di mantenere il contatto visivo continuativo con il mezzo aereo, senza aiuto di strumenti per aumentare la vista, tale da consentirgli un controllo diretto del mezzo per gestire il volo, mantenere le separazioni ed evitare collisioni.
- *Operazioni condotte in EVLOS, acronimo di Extended Visual Line Of Sight*: sono operazioni condotte in aree le cui dimensioni superano i limiti delle condizioni VLOS e per le quali i requisiti del VLOS sono soddisfatti con l'uso di metodi alternativi.

- *Operazioni condotte in BVLOS, acronimo di Beyond Visual Line Of Sight*: operazioni condotte ad una distanza che non consente al pilota remoto di rimanere in contatto visivo diretto e costante con il mezzo aereo.

5.4) Nuovo Regolamento Europeo (in vigore dal Giugno 2020)

Il Nuovo Regolamento Europeo, in sintesi, prevede un periodo transitorio di 2 anni (2020-2022) in cui i droni attualmente in circolazione, senza nuovo marchio CE, potranno volare nelle Limited Open Category e riqualifica tutte le categorie e le modalità di volo, ma sarà necessaria un'assicurazione anche per i modelli micro.

Inoltre, quelli utilizzati attualmente, dovranno osservare (sino allo scadere dei tempi di adeguamento) delle nuove normative di riferimento, come ad esempio, quelli in categoria A1C1 non dovranno pesare più di 500 grammi, in A2 non più di 2 kg e dovranno mantenere almeno 50 m di distanza da persone non coinvolte, quelli fino a 25 kg potranno volare in categoria A3, dove dovranno essere condotti mantenendo una distanza di almeno 150 m dalle zone residenziali, industriali, ricreative, ma nella zona di volo non dovranno essere presenti persone non informate.

Per tutte le open category, ad eccezione della A1C0 (droni < 250 g), il pilota dovrà seguire un corso online e superare un test, anche questo online.

Sul drone > 250 g dovrà essere applicato un dispositivo elettronico di identificazione, inoltre per condurre tutti i droni, compresi quelli < 250 g, dotati di dispositivo in grado di captare dati personali, come ad esempio una telecamera, sarà necessario registrarsi in uno speciale albo e saranno esonerati soltanto i droni dichiarati giocattolo, secondo la relativa direttiva europea.

5.5) Considerazioni

In virtù di quanto in precedenza esposto, ne consegue che entro pochi anni l'intero comparto subirà importanti modifiche, che riguarderanno anche la sfera economica, in particolare:

- i produttori di mezzi a pilotaggio remoto dovranno adeguarsi e trasformare, non solo in termini di attrezzatura e tecnologia i propri prodotti, ma verificare che il tutto sia rispondente alle nuove normative;
- i commercianti, dovranno verificare che i propri magazzini non conservino materiale non più rispondente alle norme ed, eventualmente, smaltire quelli non più rispondenti alle norme;

- I possessori di droni, prodotti in passato, dovranno verificare che possano ancora volare, eventualmente adeguarli alle norme oppure rottamarli; dovranno, inoltre, verificare di possedere le idoneità per il loro utilizzo.

6) RILEVAMENTO TERRITORIALE - METODI DI RILIEVO DELLA FASCIA COSTIERA

Si riportano nel presente capitolo le attuali metodologie messe in atto per il monitoraggio territoriale da parte degli enti pubblici preposti, con un successivo focus sulle metodologie attuali di rilievo della linea di costa con UAV a basso costo, confrontando e portando ad esempio alcune delle attività recenti e tuttora in corso più interessanti per gli aspetti approfonditi nella tesi.

6.1) Servizio di Protezione Civile Nazionale e relativa normativa

Negli ultimi decenni il nostro territorio è vittima di un degrado sempre maggiore e la sua fragilità sta diventando la problematica principale della maggior parte delle regioni del nostro paese, in relazione ai danni provocati a persone e cose causati da frane, alluvioni, eruzioni vulcaniche, incendi, erosioni costiere e così via.

Gli eventi naturali si sommano a quelli legati alle attività umane che contribuiscono a rendere, sempre più, esposto il nostro territorio.

Per fronteggiare nel modo più opportuno questi imprevisti il Legislatore ha, pertanto, istituito il **Servizio di Protezione Civile**, le cui finalità si evincono dall'art. 1 della **Legge n. 225/92**, che recita: *“È istituito il Servizio nazionale della protezione civile al fine di tutelare l'integrità della vita, i beni, gli insediamenti e l'ambiente dai danni o dal pericolo di danni derivanti da calamità naturali, da catastrofi e da altri eventi calamitosi”*, le cui tipologie d'intervento, come dall'art. 2, come di seguito riepilogate:

- a) Eventi naturali o connessi con l'attività dell'uomo che possono essere fronteggiati mediante interventi attuabili dai singoli enti e amministrazioni competenti in via ordinaria;
- b) Eventi naturali o connessi con l'attività dell'uomo che per loro natura ed estensione comportano l'intervento coordinato di più enti o amministrazioni competenti in via ordinaria;
- c) Calamità naturali o connesse con l'attività dell'uomo che in ragione della loro intensità ed estensione debbono, con immediatezza d'intervento, essere fronteggiate con mezzi e poteri straordinari da impiegare durante limitati e predefiniti periodi di tempo.

Le attività ed i compiti di Protezione Civile definite nell'art. 3, sono i seguenti:

1. Sono attività di protezione civile quelle volte alla previsione e alla prevenzione dei rischi, al soccorso delle popolazioni sinistrate e ad ogni altra attività necessaria e

indifferibile, diretta al contrasto e al superamento dell'emergenza e alla mitigazione del rischio, connessa agli eventi di cui all'articolo 2.

2. La previsione consiste nelle attività, svolte anche con il concorso di soggetti scientifici e tecnici competenti in materia, dirette all'identificazione degli scenari di rischio probabili e, ove possibile, al preannuncio, al monitoraggio, alla sorveglianza e alla vigilanza in tempo reale degli eventi e dei conseguenti livelli di rischio attesi.

3. La prevenzione consiste nelle attività volte a evitare o a ridurre al minimo la possibilità che si verificano danni conseguenti agli eventi di cui all'articolo 2, anche sulla base delle conoscenze acquisite per effetto delle attività di previsione. La prevenzione dei diversi tipi di rischio si esplica in attività non strutturali concernenti l'allertamento, la pianificazione dell'emergenza, la formazione, la diffusione della conoscenza della protezione civile nonché l'informazione alla popolazione e l'applicazione della normativa tecnica, ove necessarie, e l'attività di esercitazione.

4. Il soccorso consiste nell'attuazione degli interventi integrati e coordinati diretti ad assicurare alle popolazioni colpite dagli eventi di cui all'articolo 2 ogni forma di prima assistenza.

5. Il superamento dell'emergenza consiste unicamente nell'attuazione, coordinata con gli organi istituzionali competenti, delle iniziative necessarie e indilazionabili volte a rimuovere gli ostacoli alla ripresa delle normali condizioni di vita.

6. I piani e i programmi di gestione, tutela e risanamento del territorio devono essere coordinati con i piani di emergenza di protezione civile, con particolare riferimento a quelli previsti all'articolo 15, comma 3-bis, e a quelli deliberati dalle regioni mediante il piano regionale di protezione civile.

7. Alle attività di cui al presente articolo le amministrazioni competenti provvedono nell'ambito delle risorse umane, strumentali e finanziarie disponibili a legislazione.

Inoltre, l'art. 4 dispone le competenze in merito a "Direzione e coordinamento delle attività di previsione, prevenzione e soccorso" e nell'art. 5, entra nello specifico come segue:

"Fermo restando quanto previsto al comma 1, con le ordinanze si dispone, nel limite delle risorse disponibili, in ordine:

- a) All'organizzazione ed all'effettuazione dei servizi di soccorso e di assistenza alla popolazione interessata dall'evento;
- b) Al ripristino della funzionalità dei servizi pubblici e delle infrastrutture di reti strategiche, entro i limiti delle risorse finanziarie disponibili;

- c) Alla realizzazione di interventi, anche strutturali, per la riduzione del rischio residuo strettamente connesso all'evento, entro i limiti delle risorse finanziarie disponibili e comunque finalizzate prioritariamente alla tutela della pubblica e privata incolumità;
- d) Alla ricognizione dei fabbisogni per il ripristino delle strutture e delle infrastrutture, pubbliche e private, danneggiate, nonché dei danni subiti dalle attività economiche e produttive, dai beni culturali e dal patrimonio edilizio, da porre in essere sulla base di procedure definite con la medesima o altra ordinanza;
- e) All'avvio dell'attuazione delle prime misure per far fronte alle esigenze urgenti di cui alla lettera d), entro i limiti delle risorse finanziarie disponibili e secondo le direttive dettate con delibera del Consiglio dei ministri, sentita la Regione interessata”.

Entrando più nello specifico, per quanto riguarda l'attività di **Prevenzione**, la si può individuare come l'insieme di tutte quelle attività volte ad evitare od a ridurre al minimo la possibilità che si verifichino danni conseguenti agli eventi di calamità naturale e danni connessi all'attività umana, anche sulla base delle conoscenze acquisite per effetto delle attività di previsione.

La prevenzione dei diversi tipi di rischio, si esplica in attività non strutturali individuabili tramite:

- L'allertamento,
- La pianificazione dell'emergenza,
- La formazione,
- La diffusione della conoscenza della protezione civile,
- L'informazione alla popolazione,
- L'applicazione della normativa tecnica, ove necessarie,
- L'attività di esercitazione.

Naturalmente, di massima importanza è l'attività di soccorso, che consiste nell'attuazione degli interventi integrati e coordinati, diretti ad assicurare, alle popolazioni colpite dagli eventi, ogni forma di prima assistenza.

Inoltre, il superamento dell'emergenza consiste unicamente nell'attuazione coordinata con gli organi istituzionali competenti, delle iniziative necessarie e non rinviabili volte a rimuovere gli ostacoli alla ripresa delle normali condizioni di vita.

6.2) Servizio di Protezione Civile Regione Emilia Romagna e relativa normativa

Per gestire il rischio, occorrono piani e programmi di gestione, tutela e risanamento del territorio, che devono essere coordinati con i piani di emergenza di protezione civile ed a quelli deliberati dalle singole regioni mediante il “**Piano Regionale di Protezione Civile**”.

Per ciò che riguarda la **Regione Emilia Romagna** ed il suo Servizio di Protezione Civile, l’ente ha messo a punto dei propri “Piani di messa in sicurezza e interventi urgenti” che la Regione adotta per mettere in sicurezza i territori, colpiti da eventi calamitosi per realizzare lavori su sponde, argini e versanti franosi, per ripristinare le infrastrutture pubbliche e private danneggiate, per **salvaguardare la costa dall’erosione o da altri contesti gravosi**.

Punto di forza del sistema regionale di protezione civile, la gestione delle emergenze si basa sull’integrazione, il coordinamento, la condivisione delle conoscenze e delle procedure di intervento ai vari livelli istituzionali.

Il Sistema Regionale di protezione civile è composto da Regione, Province, Comuni, Comunità Montane, Unioni di Comuni e altre forme associative previste dalle disposizioni in materia di enti locali, e vi concorre ogni altra istituzione ed organizzazione pubblica o privata, quali le organizzazioni di volontariato, che svolgono nel territorio regionale compiti, anche operativi, di interesse della protezione civile (L.R. n.1/2005, art.1).

Il coordinamento passa anche da preparazione e pianificazione, ovvero:

- **Preparazione** intesa come progettazione, realizzazione e verifica che le risorse pianificate siano effettivamente disponibili per fronteggiare le crisi e le emergenze.
- **Pianificazione** intesa come insieme delle procedure operative di intervento da attuare in caso di evento calamitoso. Ciò consente ad enti e strutture di agire in modo coordinato e integrato.

Gli strumenti utilizzati sono:

- Realizzazione di una rete di strutture di protezione civile (Sale Operative, Centri di Coordinamento, Aree e Strutture di prima assistenza, Aree di Ammassamento)
- Definizione del modello di intervento per ogni tipologia principale di rischio
- Assegnazione alle strutture operative ed al volontariato di mezzi e materiali di pronto impiego
- Pianificazione regionale, provinciale e comunale di emergenza
- Esercitazioni di protezione civile integrate

Si evidenzia che il 14 ottobre 2004 è stato firmato un Protocollo di Intesa tra la Regione Emilia-Romagna e le principali componenti del sistema regionale di protezione civile sulle Linee Guida in materia di pianificazione di emergenza e su un modello coordinato di intervento. Il Protocollo di Intesa è stato approvato con Delibera di Giunta regionale n. 1166/2004 "Approvazione del protocollo d'intesa e delle linee guida regionali per la pianificazione di emergenza in materia di Protezione Civile" integrata dalla Delibera di Giunta Regionale n° 962 del 6 luglio 2009 "Disposizioni organizzative finalizzate all'attivazione del sistema di allertamento di Protezione Civile sul territorio regionale per il rischio idrogeologico-idraulico" i cui obiettivi sono:

- Fornire agli Enti Locali un quadro di riferimento omogeneo per l'elaborazione dei Piani di emergenza nel proprio territorio, favorendo l'integrazione e la collaborazione tra le strutture
- Favorire una gestione coordinata delle emergenze, assicurando interventi più efficaci e tempestivi in caso di alluvioni, terremoti, eventi idrogeologici, incendi boschivi o rischi di tipo chimico-industriale

In situazioni di crisi e di emergenza, inoltre, possono rendersi necessari interventi urgenti per realizzare opere a salvaguardia del territorio, acquisire in via d'urgenza beni e servizi per assicurare la prima assistenza alla popolazione e favorire il ritorno alle normali condizioni di vita.

Non bisogna dimenticare della rete fanno parte i numerosi volontari che vanno ad integrare la rete delle istituzioni già preposte ed infatti, per una adeguata risposta alle situazioni di crisi e di emergenza e per una gestione efficiente delle risorse, da tempo, la Regione Emilia Romagna, tramite l'Agenzia regionale di protezione civile, dispone della **Colonna Mobile Regionale del Volontariato**, istituita con la Delibera di Giunta regionale n. 2320 del 10 dicembre 2008.

La Colonna Mobile Regionale è costituita da moduli funzionali di pronto impiego autosufficienti, pronti ad essere aggregati se necessario per interventi di emergenza sul territorio regionale, in Italia e all'estero.

I moduli sono dislocati presso i centri logistici di protezione civile, le sedi dei coordinamenti provinciali del volontariato, dei Vigili del Fuoco, del Corpo Forestale dello Stato.

Al seguito della colonna mobile operano squadre professionali dedicate alla riattivazione delle infrastrutture essenziali, valutazione dell'agibilità e censimento danni, emergenza veterinaria e supporto psicologico.

I moduli funzionali di pronto impiego sono:

- task force in pronta partenza
- assistenza alla popolazione
- produzione e distribuzione pasti
- posto medico avanzato
- segreteria e comando
- telecomunicazioni
- logistica e soccorritori

I moduli specialistici sono:

- intervento rischio idraulico
- ricerca persone
- antincendio boschivo

Infine si delinea, in breve, il Piano d’Emergenza, ossia lo strumento che definisce in via preventiva, quando si verifica un evento calamitoso, le responsabilità ed i compiti di chi deve intervenire, la catena di comando e le risorse da attivare per la salvaguardia dei cittadini e del territorio.

La Regione Emilia-Romagna è stata la prima in Italia a siglare un Protocollo di intesa tra le principali componenti del sistema di protezione civile contenente Linee guida per la pianificazione di emergenza e un modello di intervento coordinato, per assicurare interventi più efficaci e tempestivi in caso di alluvioni, terremoti, eventi idrogeologici, incendi o rischi di tipo chimico, industriale.

Il suddetto piano si articola in tre parti fondamentali:

1. Parte generale: raccoglie tutte le informazioni sulle caratteristiche e sulla struttura del territorio;

2. Lineamenti della pianificazione: stabiliscono gli obiettivi da conseguire per dare un’adeguata risposta di protezione civile ad una qualsiasi situazione d’emergenza, e le competenze dei vari operatori;

3. Modello d’intervento: assegna le responsabilità decisionali ai vari livelli di comando e controllo, utilizza le risorse in maniera razionale, definisce un sistema di comunicazione che consente uno scambio costante di informazioni.

L’Emilia-Romagna può contare su una **Rete di strutture di protezione civile** diffuse sul territorio in cui coordinare operatori, mezzi e attrezzature per rispondere in maniera efficace alle situazioni di crisi e di emergenza.

Dal 2001 la Regione, in accordo con gli enti locali, ha incentivato e co-finanziato per oltre 20 milioni di Euro (Fondo di protezione civile) la realizzazione di:

- centri unificati provinciali
- aree di ammassamento
- strutture di prima assistenza
- centri sovracomunali
- centri operativi misti
- centri operativi comunali

Infine, la regione ha approvato, attraverso la “ Delibera di Giunta regionale n. 1439 del 10 settembre 2018 il documento "Indirizzi per la predisposizione dei piani comunali di protezione civile", con la quale invita, singolarmente, i comuni a dotarsi, pur rispettando le linee regionali, di una propria macchina di protezione civile da integrare a quella già esistente.

In *Figura 6.1* si schematizza la Rete Regionale dei Centri dei Presidi di Protezione Civile:



Figura 6.1: Rete regionale centri di protezione civile dell'Emilia Romagna - modificata da Protezione Civile – ER, 2014 [27]

Non si può pensare a una Rete di centri, senza un'apposita infrastruttura tecnologica avanzata di telecomunicazioni che permetta di fronteggiare le emergenze e comunicare con la rete degli enti istituzionali e delle strutture operative del Sistema Regionale di Protezione Civile (Prefetture, Aree Metropolitane/Province, Comuni, Vigili del Fuoco, Corpo Forestale dello Stato, Capitaneria di Porto, Volontariato di protezione civile).

Al contempo la Protezione Civile regionale si è dotata di un sistema informativo che ha l'obiettivo di supportare la pianificazione d'emergenza, la predisposizione del programma regionale di previsione e prevenzione e la preparazione di scenari in corso di evento calamitoso per l'adozione di misura urgenti di risposta.

In conclusione, la Regione ha predisposto e attuato programmi regionali di previsione e prevenzione e svolge azione di indirizzo rivolta alle Aree Metropolitane/Province per predisporre programmi provinciali di previsione e prevenzione, ha realizzato un sistema di cartografia sulla pericolosità e sviluppa progetti tematici avvalendosi di un sistema informativo condiviso con le componenti istituzionali e le strutture operative di protezione civile.

Partendo, quindi, dal quadro normativo che indirizza le attività che partono dalla prevenzione e giungono al monitoraggio, si vuole specificare come avviene il monitoraggio di un evento disastroso come quello di un dissesto idrogeologico.

L'attività di previsione svolta con il concorso di soggetti scientifici e tecnici competenti mira a valutare gli scenari di rischio e, quando possibile, a preannunciare, a monitorare, a sorvegliare e a vigilare gli eventi e i livelli di rischio attesi.

6.3) Servizio Difesa del Suolo, della Costa e Bonifica

La Regione Emilia-Romagna, ai sensi della **legge regionale 30 luglio 2015 n.13**, svolge prioritariamente funzioni di indirizzo, programmazione e controllo, perseguendo la massima integrazione tra tutti i livelli istituzionali del governo territoriale.

Il Servizio Difesa del Suolo, della Costa e Bonifica è la struttura tecnico-amministrativa che persegue il raggiungimento di adeguati livelli di sicurezza territoriale idraulica ed idrogeologica per la riduzione del rischio in un'ottica di salvaguardia dell'ambiente e del paesaggio, attraverso la pianificazione dell'uso del territorio e la programmazione degli interventi di difesa del suolo, della costa e della bonifica, collaborando attivamente con le Autorità di Bacino, per la formazione dei piani di bacino.

Inoltre, elabora normative, regolamenti, atti di indirizzo e controllo per le materie delegate.

Negli stessi ambiti operavano i Servizi tecnici di bacino (STB) della Regione Emilia-Romagna che, con la riforma del sistema di governo regionale e locale prevista dalla L.R. n. 13/2015, sono stati soppressi, e le loro attività sono state assegnate in parte all'Agenzia regionale per la sicurezza territoriale e la protezione civile e in parte all'Agenzia regionale per la prevenzione l'ambiente e l'energia (Arpa), con compiti, come di seguito meglio specificati:

l'Agenzia per la sicurezza territoriale e la protezione civile che svolge attività di gestione relative alla prevenzione del dissesto idrogeologico e alla sicurezza idraulica, al servizio di piena, al rilascio del nullaosta idraulico e dei pareri previsti dalla normativa in materia.

l'Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia (Arpae) che svolge attività di gestione in materia di ambiente e di energia in particolare attraverso il rilascio delle concessioni e la realizzazione delle analisi e dei controlli previsti in materia.

Inoltre, con il completamento della riforma prevista dal D.Lgs. n. 152/2006, il 17 febbraio 2017, con l'entrata in vigore il D.M. 25 ottobre 2016, sono state soppresse anche le Autorità di bacino nazionali, interregionali e regionali e tutte le relative funzioni sono state trasferite alle Autorità di bacino distrettuali.

6.3.1) La protezione della fascia costiera

La Regione Emilia Romagna [28] vanta una esperienza pluridecennale nella protezione e gestione delle zone costiere, fin da quando, negli anni '70, è stato creato il livello amministrativo regionale in Italia.

La prima legge regionale in materia di protezione della costa è stata infatti la legge regionale 7/1979, da questo atto è disceso il primo Piano Costa 1981 (approvato nel 1983) seguito da un secondo progetto di Piano nel 1996, e da relazioni sullo stato del litorale negli anni 2000 e 2007.

È opportuno sottolineare che le competenze in materia di difesa della costa sono stati trasferite dal governo italiano alle Regioni soltanto nel 2001.

Il piano costiero del 1981 indicava la difesa "morbida", come il ripascimento, quale strumento migliore per contrastare i fenomeni di erosione e di rischio di sommersione, al posto della realizzazione di nuove opere di difesa rigide.

Sempre in quegli anni, la Regione Emilia-Romagna ha bloccato lo scavo di sabbia e ghiaia dai letti dei fiumi (Deliberazione della Giunta Regionale n.1300 del 1982), al fine di migliorare il trasporto solido fluviale utile per il ripascimento naturale dei litorali. In questo percorso si inserisce anche la deliberazione del Consiglio Regionale n. 72 nell'anno 1983, in cui si regolamenta e limita il prelievo di fluidi sotterranei nelle aree costiere, al fine di ridurre il tasso di subsidenza (abbassamento del terreno) e quindi la vulnerabilità, delle zone costiere e dell'entroterra, all'ingressione marina.

Il litorale emiliano-romagnolo è costituito da una costa bassa e sabbiosa, che si estende per circa 130 km tra Cattolica a sud e la Foce del Po di Goro a nord, caratterizzata da estese aree a intensa urbanizzazione, a massima concentrazione nel settore centro

meridionale, e da più limitate aree naturali, facenti parte del Parco del delta del Po, nel settore settentrionale.

Nel corso del '900 il sistema costiero emiliano-romagnolo ha subito profonde trasformazioni di origine antropica che hanno portato alla scomparsa di gran parte dei caratteri paesaggistico-ambientali originari: le dune sono state in gran parte spianate, diverse zone vallive bonificate e le aree boschive e incolte fortemente ridotte.

I primi fenomeni di erosione si sono manifestati all'inizio del '900 in corrispondenza di alcune cuspidi fluviali e nelle spiagge a nord dei moli portuali di Rimini e Porto Garibaldi, in seguito al prolungamento degli stessi. Ma è nel secondo dopoguerra che il degrado ambientale (erosione delle spiagge ed eutrofizzazione delle acque costiere) ha assunto dimensioni eclatanti, fino ad arrivare, negli anni '70, a compromettere lo sviluppo dell'industria turistico-balneare, nel frattempo diventata leader in Europa.

Dopo un primo periodo in cui gli interventi di difesa con ripascimento artificiale venivano realizzati con sabbie provenienti soprattutto cave, alla fine degli anni '90 si afferma l'uso di sedimenti provenienti da accumuli litoranei e poi, nei primi anni del decennio 2000, l'utilizzo di depositi sottomarini. I due principali interventi di ripascimento con sabbia proveniente da giacimenti sottomarini sono stati realizzati nel 2002 e nel 2007.

Nel 2005 vengono approvate le linee guida per la **Gestione Integrata della Zona Costiera (GIZC)**, con delibera C.R. 20 gennaio 2005, n.645 e della quale si riassumono brevemente i criteri:

La delibera prevede che la Regione si doti di un Piano per la Gestione Integrata della Costa da predisporre con il coinvolgimento degli Enti locali (Comuni e Province) interessati per territorio e dei vari settori regionali che operano su tematiche di diretto interesse per la zona costiera.

Gli organi attraverso i quali governare il processo sono indicati in:

- *un Comitato Istituzionale*, di riferimento per l'indirizzo strategico dell'attività di gestione integrata della costa, a cui partecipano la Regione, i 14 Comuni rivieraschi e le 4 Province competenti per territorio;
- *un Comitato Intersectoriale di progetto*, composto dai Direttori Generali dei settori regionali interessati, con il compito di indirizzo e verifica delle fasi di attività secondo un Piano operativo di dettaglio definito dal Comitato stesso. Le Direzioni Generali coinvolte sono: Ambiente e Difesa del Suolo e della Costa; Programmazione Territoriale e Sistemi di Mobilità; Attività Produttive; Commercio e Turismo; Agricoltura.

Il progetto di Piano per la Gestione Integrata Zone Costiere

Le attività per la predisposizione del progetto di Piano GIZC, iniziate nel corso del 2002 e concluse alla fine del 2003, sono state condotte attraverso 9 gruppi di lavoro, uno per ogni profilo tematico, con la partecipazione di esperti anche di altri enti ed istituti ed il supporto della Fondazione Cervia Ambiente.

Tali attività si sono articolate nelle seguenti 3 fasi di lavoro principali:

- la prima dedicata all'analisi di stato nei vari settori e rivolta all'individuazione e definizione delle problematiche specifiche e delle criticità relative ai diversi profili tematici, attraverso la raccolta, l'organizzazione e l'eventuale aggiornamento di dati e studi prodotti dai settori regionali e da altri enti ed istituti;
- la seconda dedicata all'analisi intersettoriale sulle pressioni e sulle interazioni fra le problematiche afferenti ai diversi profili tematici e alla definizione delle possibili integrazioni per l'implementazione di soluzioni di mitigazione, inversione di tendenza o superamento dei problemi;
- la terza fase dedicata alla definizione delle linee guida, per i diversi profili tematici, finalizzate ad attivare o rinforzare i processi di gestione della zona costiera e a porre le basi per la loro sostenibilità nel futuro; propria di questa fase è stata la definizione delle linee di intervento secondo azioni di carattere strutturale, azioni di supporto (assistenza, formazione, divulgazione), di monitoraggio e di studio.

I temi su cui si sono sviluppate le attività sopradescritte, definiti dal Comitato Intersettoriale e riferiti ad altrettanti settori regionali, riguardano i seguenti profili:

- 1) Sistema fisico costiero, fattori di rischio e strategie di difesa
- 2) Carichi inquinanti, gestione risorse idriche, monitoraggio
- 3) Portualità, rifiuti da natanti, rischi da trasporto marittimo
- 4) Valorizzazione habitat, biodiversità, paesaggio
- 5) Turismo
- 6) Pesca e acquicoltura
- 7) Agricoltura
- 8) Politiche energetiche
- 9) Sistema insediativi e infrastrutturale (servizi e mobilità)

Il processo finalizzato alla definizione delle politiche regionali in materia di Gestione Integrata delle Zone Costiere, ha visto il completamento della sua fase progettuale alla fine del 2003 (cfr. Settimo Eurorapporto) con la produzione di un rapporto finale

(31/12/2003) presentato, in prima istanza, il 20 aprile 2004 con il format di Linee Guida per le nove tematiche di riferimento.

La fase di consultazione, successivamente avviata, ha consentito una prima revisione e correzione, in termini di coerenza interna, degli indirizzi relativi ai nove tematiche di riferimento, attraverso i contributi apportati dai diversi soggetti del sistema (componenti i Comitati Istituzionale e Intersettoriale), nell'ambito di varie iniziative promosse dalla Regione Emilia-Romagna durante tutto il primo semestre del 2004.

La fase di consultazione e partecipazione dei vari portatori d'interesse è proseguita, nel secondo semestre del 2004, con l'apertura di un Forum di discussione e con lo svolgimento di un convegno conclusivo, a Cervia l'8 e il 9 ottobre 2004, promosso dalla Regione e dalla Fondazione Cervia Ambiente, che hanno condotto ad ulteriori integrazioni e affinamenti degli indirizzi contenuti nel documento Linee Guida.

Il documento così completato, è passato all'esame della Cabina di Regia del Piano Triennale Ambiente (approvazione della proposta di Linee Guida nella seduta dell'11 novembre 2004) e ha successivamente registrato il parere favorevole della Conferenza Regionale Autonomie Locali (seduta del 22 novembre 2004).

In ambito regionale, il Servizio Difesa del Suolo della Costa e Bonifica partecipa inoltre a progetti di cooperazione interregionale europea sulle tematiche della difesa e della gestione costiera. In particolare alcune importanti attività e azioni si sono ottenute attraverso i progetti comunitari COASTVIEW, BEACHMED-e (legato anche al recupero delle dune sabbiose costiere), già conclusi, il progetto COASTANCE (che ha sviluppato un sistema di gestione della costa basato sulla suddivisione del litorale in 118 celle - SICELL) e il progetto MAREMED ("Cooperazione fra le Regioni marittime del Mediterraneo") in corso di realizzazione. Ultima iniziativa della serie è quella denominata FaceCoast (vedi collegamento al sito Med-cluster), legata al progetto COASTGAP.

6.3.2) Il monitoraggio della fascia costiera

Attualmente per continuare nello studio approfondito della situazione, si fa ancora riferimento allo "**Stato del Litorale Emiliano-Romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione**", nel quale è stata svolta un'analisi approfondita dello stato della costa emiliano-romagnola, analogamente a quanto avviene nel campo della medicina moderna, dove l'analisi dello stato di salute dei pazienti si basa, ormai, prevalentemente su dati riferiti ad un ampio spettro di parametri significativi, forniti da strumenti di analisi specialistica, anche nel settore ambientale diventa sempre più una necessità procedere con lo stesso metodo.

I sistemi ambientali sono infatti paragonabili per diversi aspetti a degli organismi viventi, in quanto anche la loro salute si regge su equilibri molto complessi. Lo stato di un litorale sabbioso ad esempio può variare repentinamente sotto l'azione di una mareggiata e ricomporsi nell'arco di un periodo di tempo più o meno lungo.

Il suo equilibrio è quindi estremamente dinamico e dipende dall'interazione di diversi fattori, alcuni sono alla base del suo sviluppo, altri invece possono determinarne la crisi fino alla scomparsa. Solo conoscendo nel dettaglio l'entità dei processi, il trend evolutivo del sistema e il grado di incidenza dei fattori che ne governano l'equilibrio, si può salvaguardare un sistema litoraneo complesso come quello emiliano-romagnolo, che con i suoi 130 km di costa bassa e sabbiosa rappresenta di fatto una delle spiagge più importanti d'Europa sotto il profilo turistico-balneare.

È stato quindi una scelta lungimirante quella della Regione Emilia-Romagna di istituire, nel 1983-84, reti di controllo dell'evoluzione della costa e dei principali fattori alla base del suo dissesto, così come indicato dal "Piano progettuale per la difesa della costa adriatica emiliano-romagnola" di seguito denominato "Piano Costa 1981". La redazione di quel Piano da parte della società regionale Idroser era avvenuta infatti in un contesto in cui i dati disponibili erano pochi e spesso disomogenei tra loro, in quanto raccolti da Enti diversi, con personale, metodologie e riferimenti differenti. A partire dal 1983 sono state istituite e rilevate periodicamente, da Idroser prima e da ARPA poi, le reti per il controllo di:

- *evoluzione della linea riva* (1983, 1991, 1998 e 2006);
- *evoluzione della spiaggia emersa e sommersa* (1984, 1993, 2000 e 2006);
- *subsidenza del territorio costiero* (1984, 1987, 1993, 1999 e 2005).

Il secondo studio di carattere generale avente per titolo "Progetto di piano per la difesa dal mare e la riqualificazione ambientale della Regione Emilia-Romagna", di seguito denominato "Piano Costa 1996", realizzato sempre da Idroser tra il 1993 e il 1996, ha potuto fornire risposte più oggettive sulla situazione dell'intero litorale, proprio perché per la prima volta è stato possibile confrontare tra loro dati omogenei, ottenuti con rilievi eseguiti nel decennio che va dal 1983 al 1993. Alla luce di questa esperienza, nel 2000, al termine delle campagne di rilievo delle tre reti avvenuto tra il 1998 e il 2000 stesso, si è pensato che, pur in assenza di un incarico per la realizzazione di un terzo piano costa, sarebbe stato di grande utilità rifare il punto sullo stato di salute del sistema litoraneo regionale.

È così nata l'idea di riportare in un volume dal titolo "Stato del litorale emiliano romagnolo all'anno 2000", edito da ARPA nel 2002, dati, confronti, considerazioni riguardanti la situazione del sistema ambientale costiero, l'efficacia delle opere di difesa e le indicazioni sulle strategie di intervento da adottare. Il volume ebbe ampia diffusione presso pubblici amministratori, tecnici del settore, ricercatori e docenti universitari. anche al di fuori dell'Emilia-Romagna Alla luce di questi risultati, la Giunta regionale, su proposta dell'Assessore alla difesa del suolo e della costa, ha incaricato (delibera n.1319 del 1.8.2005) ARPA Ingegneria Ambientale di ripetere l'iniziativa al termine del rilievo delle tre reti di monitoraggio previsto per il 2005-2006. Il presente lavoro rappresenta quindi una ulteriore tappa del percorso metodologico del tutto innovativo, avviato dalla Regione nel 1979 con l'approvazione della L.R. n. 7 per la difesa della costa. Inizialmente i principali obiettivi del presente lavoro erano:

- descrivere lo stato del litorale all'anno 2007, tenendo conto dell'elevato numero di interventi di ripascimento effettuati negli ultimi anni e delle nuove tipologie di opere sperimentate;
- verificare e descrivere il trend evolutivo del litorale e l'efficacia delle politiche per la difesa della costa attuate negli ultimi 25 anni;
- fornire indicazioni utili al miglioramento delle politiche di difesa della costa fin qui adottate.

In seguito, durante la stesura della relazione finale, si è deciso di sviluppare ulteriormente la fase di analisi per effettuare un significativo passo in avanti nella politica di difesa della costa, definendo, per la prima volta, un piano di gestione decennale dell'intero litorale.

Infine, essendo quello della Regione Emilia-Romagna un modello del tutto originale di politica di difesa della costa non solo in Italia, si è pensato di rendere questo lavoro accessibile anche in campo internazionale. Negli ultimi anni infatti, grazie anche alla partecipazione a convegni e a progetti europei, è stato possibile stabilire una fitta rete di contatti che ha reso evidente come l'evoluzione costiera e la difesa dal mare siano un problema mondiale.

I dati risultanti dalla raccolta regionale si possono raccogliere come segue:

- Clima del moto ondoso

La serie dei dati ondametrici più ampia e completa raccolta davanti al litorale emiliano-romagnolo è quella acquisita tra il 1971 e il 1989 sulla piattaforma PCB dell'Agip, al largo di Ravenna. I dati meteomarini provenienti da diverse altre piattaforme AGIP al largo della costa regionale coprono in maniera discontinua il periodo dal 1983 al 2000 e

non hanno permesso di ricostruire una serie storica altrettanto affidabile e lunga come quella della PCB. Tra il 2000 e il 2006, la mancanza dei dati rilevati davanti al litorale è stata colmata ricorrendo a quelli della boa di Ancona appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale, ubicata 22 km al largo del promontorio del Conero, 70 km a sud del confine tra le regioni Emilia-Romagna e Marche. Al fine di disporre in futuro di dati più attendibili sul clima del moto ondoso davanti alla costa regionale, nella primavera del 2007 è stata installata una boa ondametrica galleggiante al largo di Cesenatico su un fondale di 10 m. Questo intervento è stato finanziato dal progetto europeo Beachmed-e, dalla Regione Emilia-Romagna e da ARPA.

- Subsidenza della fascia costiera

La subsidenza è il fattore che più di ogni altro compromette la stabilità del litorale emiliano-romagnolo. Per controllarne l'andamento, la Regione ha istituito una apposita rete di monitoraggio nel 1983. Oltre ai dati ottenuti con 5 campagne di rilievo geometrico di alta precisione della rete, nel presente lavoro sono stati presi in considerazione anche quelli ottenuti con l'analisi interferometrica tra il 1992 e il 2006 dai radar satellitari. In 55 anni Rimini si è abbassata di 70 cm e il litorale più a nord, fino al Delta, di circa 1 metro. Ciò ha comportato, per quanto riguarda il bilancio sedimentario, una sottrazione di circa 100 milioni di m³ di materiale in circa 70 anni. La subsidenza, di cui si può vedere l'effetto in località Lido di Dante (RA) nella *Figura 6.2*, ha determinato e continua a determinare altri effetti estremamente negativi, quali:

- l'aumento del grado di vulnerabilità del territorio e degli abitati;
- l'ingressione del cuneo salino;
- la variazione di pendenza dei corsi d'acqua e dei sistemi fognari.

Stante le basse quote del territorio in esame, per contrastare i suddetti fenomeni, sono state realizzate a partire dagli anni '50 opere per centinaia di milioni di euro e altre sono in corso.

Le cause accertate della subsidenza della fascia costiera emiliano-romagnola sono l'estrazione di acque sotterranee, da migliaia di pozzi distribuiti lungo tutta la costa, e di metano, da giacimenti a terra e a mare in particolare nell'area centro-settentrionale. Il fenomeno ha subito una notevole riduzione nei primi anni '90, quando molti acquedotti comunali hanno iniziato a utilizzare le acque della diga di Ridracoli, posta sull'Alto Appennino, e molti prelievi da pozzi agricoli e industriali sono stati sostituiti con le acque del canale Emiliano-Romagnolo che deriva acqua dal Po.

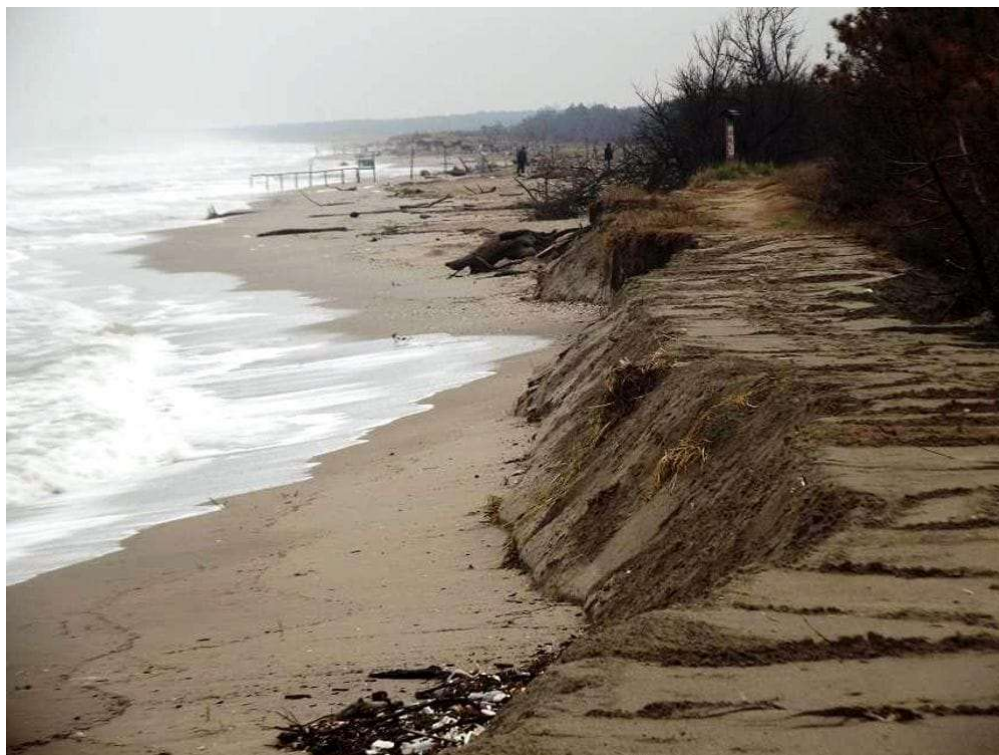


Figura 6.2: Subsidenza costiera – www.ravennatoday.it, 2019 [29]

- Trasporto solido fluviale

L'apporto di sabbia al mare da parte dei fiumi è da sempre il parametro meno noto e definito. Negli ultimi anni, alcune Autorità di Bacino hanno realizzato studi specifici per la misura e la stima del trasporto solido di fondo lungo alcuni fiumi tributari del litorale emiliano-romagnolo. Dai rilievi topo-batimetrici eseguiti sulla spiaggia emersa e sommersa risulta che tra il 2000 e il 2006 il contributo sedimentario dei fiumi sia stato di circa 330.000 m³/anno, una quantità inferiore rispetto a quella prevista dagli studi realizzati in passato. Da queste analisi emerge che pur avendo la Regione bloccato le escavazioni lungo gli alvei fluviali nel 1983, non vi è stato ancora alcun aumento del trasporto di sabbia al mare. I fattori principali che limitano l'alimentazione naturale delle spiagge sono la riduzione della piovosità verificatasi negli ultimi decenni, l'aumento del territorio cespugliato e boschivo sui versanti montani e le opere trasversali lungo il corso dei fiumi.

- Rilievi topo-batimetrici

Per poter seguire l'evoluzione del litorale emiliano-romagnolo e quantificare la portata dei processi erosivi, nel 1984 la Regione ha istituito la rete dei profili topo-batimetrici. Dopo il 1984, la rete è stata rilevata da Idroser e poi da ARPA altre 3 volte: nel 1993, nel 2000 e nel 2006. Tenuto conto delle modeste variazioni che si verificano procedendo

longitudinalmente lungo la costa, l'interesse tra le sezioni trasversali da rilevare è stato stabilito in circa 500 m. Durante la prima campagna, nel 1984, sono state rilevate 142 sezioni trasversali, in seguito questo numero è stato incrementato fino ad arrivare alle 251 della 4ª campagna (2006). A queste vanno aggiunti altri 200 km di profili longitudinali eseguiti in particolare sul lato terra e sul lato mare delle scogliere parallele. La profondità di chiusura dei profili trasversali varia tra 6 e 8 m, a seconda della pendenza del fondale; un profilo ogni 10 km si spinge fino alla batimetrica dei 10 m. Altimetricamente, la rete è sempre stata vincolata ai capisaldi della rete di misura della subsidenza lungo costa, a sua volta vincolata alla rete nazionale IGM (Istituto Geografico Militare). Per quel che riguarda la strumentazione.

Il monitoraggio dell'evoluzione morfologica della spiaggia è fondamentale per la conoscenza del fenomeno erosivo e della sua quantificazione.

Nel 1983, per la misura del profilo della spiaggia emersa e sommersa del litorale emiliano-romagnolo, è stata istituita la **rete regionale topo-batimetrica**. Da allora, la Regione Emilia-Romagna, con il supporto tecnico-scientifico dell'**Unità Mare Costa** di ArpaER, effettua il monitoraggio topo-batimetrico dei 130 km di costa regionale.

Il confronto tra i profili rilevati nelle varie campagne di misura, permette:

- di seguire le modificazioni morfologiche della spiaggia emersa e sommersa;
- di quantificarne i volumi di sabbia erosi o accumulati sulle varie spiagge;
- di valutare il tasso di erosione costiera.

Nel tempo sono state effettuate diverse campagne di misura.

Il primo rilievo topo-batimetrico è stato condotto nel 1984. La rete di allora, era costituita da 150 profili topo-batimetrici rilevati lungo sezioni perpendicolari alla costa, che partivano dalla zona più alta della spiaggia emersa e terminavano in mare, oltre la profondità di chiusura.

Negli anni seguenti, **la rete è stata integrata e migliorata**. Attualmente è costituita da:

- 251 sezioni perpendicolari alla costa, che si sviluppano fino alla batimetrica dei 6-10 m;
- 163 profili perpendicolari alla costa di raffittimento, che si chiudono alla batimetrica dei 3-5 m e posti in corrispondenza di spiagge prive di opere di difesa o di foci fluviali. Tale posizionamento è utile per rappresentare meglio le barre sommerse;
- diverse centinaia di chilometri di profili longitudinali alla costa, che intercettano elementi morfologici quali tomboli, salienti e buche, non adeguatamente rappresentabili dai soli profili perpendicolari.

La **più recente campagna di misura** si è svolta all'inizio del **2012** (quinta campagna topo-batimetrica). Sono stati misurati oltre 6 milioni di punti topografici e batimetrici lungo, circa, 1000 km di profili.

Il rilievo topografico è stato eseguito con GPS differenziale in modalità RTK; per il rilievo batimetrico il sistema di posizionamento satellitare è stato accoppiato con l'ecoscandaglio singlebeam o multibeam. Il sistema di riferimento planimetrico utilizzato è stato il WGS84 fuso 32, mentre, per la quota, si è fatto riferimento alla rete di caposaldi ArpaER utilizzati per la misura della subsidenza.

Per l'intera spiaggia, emersa e sommersa, del litorale emiliano-romagnolo sono stati prodotti i seguenti elaborati, richiedibili all'Unità Mare Costa di ArpaER:

- 11 mappe della rete di monitoraggio;
- 11 mappe della topografia e batimetria al 2012;
- 11 mappe della topografia e batimetria al 2006;
- 11 mappe delle aree di accumulo e erosione del periodo 2006-2012;
- 251 immagini dei profili topo-batimetrici.

- Calcolo del volume dei sedimenti accumulati o erosi

Anche dal calcolo dei volumi del materiale accumulato o eroso, ottenuto per confronto dei profili topo-batimetrici, emerge un netto miglioramento della situazione del litorale nell'ultimo periodo rispetto agli anni '90. Il risultato è infatti positivo sia nella fascia comprendente la spiaggia emersa e la prima parte di quella sommersa, fino alla batimetrica dei 2,5 m o alla linea delle scogliere laddove presenti, sia nella vasta area di fondale compreso tra la batimetrica dei 2,5 m e la profondità di chiusura dei profili. Nella prima fascia, di fatto la più importante e dinamica, l'accumulo nel periodo 2000-2006 è pari a 2,8 milioni di m³. A questi vanno aggiunti 1,4 milioni di m³ sottratti dalla subsidenza. Nello stesso periodo il materiale sabbioso portato a ripascimento è stato di 2,2 milioni di m³. Il contributo dei fiumi, sarebbe stato quindi di circa 330.000 m³/anno. Per quel che riguarda la fascia esterna alle scogliere o alla batimetrica dei 2,5 m, il bilancio risulta positivo per parecchi milioni di m³ di materiale; la sua distribuzione non è però uniforme in quanto accanto a zone in cui si registra un forte accumulo ve ne sono altre in forte perdita.

Nello studio dei litorali, il **dato sedimentologico** rappresenta una importante fonte di informazioni per conoscere le caratteristiche fisiche e idrodinamiche dei sistemi costieri e le modalità di trasporto dei sedimenti.

La distribuzione granulometrica dei sedimenti è controllata dalla profondità, e quindi dall'energia delle onde, dalla presenza di foci fluviali, dalla morfologia dei fondali, dall'esistenza di manufatti e ripascimenti e dall'azione di processi erosivi.

Nel corso degli anni, la costa emiliano-romagnola è stata oggetto di tre campagne sedimentologiche, che hanno interessato l'intero litorale regionale e di numerosi studi locali, svolti nell'ambito di progetti di monitoraggio di interventi di difesa o di nuove opere.

Nel **2012**, è stata condotta la più recente **campagna sedimentologica** del litorale, in occasione della quinta campagna topo-batimetrica della costa regionale. Si è trattato della seconda campagna di misura, nella storia del rilievo delle reti di monitoraggio costiero, gestite da ArpaER.

Gli **obiettivi** dello studio sedimentologico sono stati:

- la caratterizzazione tessiturale dei sedimenti presenti (al 2012) sulla spiaggia emersa e sommersa lungo la costa regionale;
- l'individuazione delle modificazioni tessiturali avvenute nei vari tratti costieri attraverso il confronto con i dati acquisiti nelle campagne precedenti (nel 1993 per il Piano Costa 1996 e nel 1971-1972 effettuate dall'Università di Ferrara).

Sono stati analizzati **oltre 300 campioni di sedimento**: 130 raccolti alle stesse coordinate del 1993 unitamente a 170 campioni integrativi scelti in base a criteri specifici.

I risultati hanno evidenziato che, al 2012, il litorale emiliano-romagnolo è composto da sabbie prevalenti e, in misura minore e solo sulla spiaggia sommersa, da sabbie siltose e da silt, come evidenziato in *Figura 6.3*.

Distribuzione percentuale del diametro medio dei campioni di sedimento prelevati nel litorale emiliano-romagnolo (al 2012).

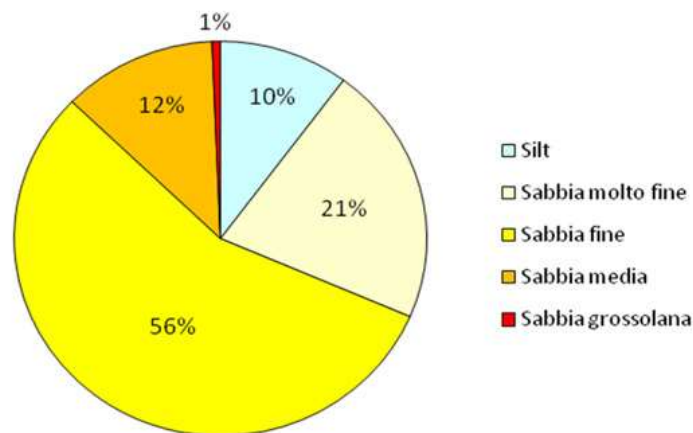


Figura 6.3 – ArpaE.it, 2012 [30]

Esaminando il **diametro medio dei sedimenti** (vedi figura) emerge che il 56% dei campioni è rappresentato dalla classe di sabbia fine (0.25-0.125 mm), il 21% da quella molto fine (0.125-0.063 mm), il 12% da quella media (0.5-0.25 mm) e il 10% ha le dimensioni del silt (0.063-0.002 mm).

Il grado di selezione dei campioni, nella maggior parte dei casi, tende a peggiorare con la profondità. Diversamente, in corrispondenza di spiagge vicine a foci e protette da opere (ad esempio Savio), i sedimenti prossimi alla riva risultano meno selezionati di quelli più profondi.

Sulla spiaggia emersa, e nei primi fondali, i sedimenti sono ben selezionati a differenza di quanto accade verso il largo.

Lungo il litorale regionale la maggior parte delle spiagge emerse e dei primi fondali (fino a -2,5 m e -3 m) è composta da sedimenti con diametro medio delle dimensioni della sabbia fine. Esistono tuttavia vari tratti costieri caratterizzati da depositi più grossolani, con granulo medio dell'ordine della sabbia media: da Cesenatico a Cervia, le spiagge vicino al Bevano, la zona a ridosso dei Fiumi Uniti, la spiaggia nord di Punta Marina a sud del pennello del Ruvido, il tratto tra Marina Romea e Lido degli Estensi e lo Scanno di Goro. Ad eccezione delle ultime due spiagge elencate, le altre sono accomunate da forti fenomeni erosivi.

Il diametro medio sui fondali, tra i 3 e i 7 metri di profondità, è molto variabile da zona a zona. I depositi più grossolani, con granulo medio delle dimensioni della sabbia fine, sono stati individuati nei tratti tra Cattolica e Rimini e tra Casal Borsetti e Porto Garibaldi.

- *Evoluzione della linea di riva*

La variazione della linea di riva, da sempre primo parametro di riferimento per l'analisi del trend evolutivo di una spiaggia, non può più essere considerata tale lungo il litorale emiliano-romagnolo a causa dei numerosi interventi di movimentazione di sabbia effettuati negli ultimi 10 anni.

Ad esempio la linea di riva rilevata nel 2006, rispetto a quella del 1998, risente in maniera determinante degli oltre 2,2 milioni di m³ di sabbia, provenienti da fonti esterne al sistema, portati a ripascimento su decine di chilometri di spiaggia in erosione e che il mare ha ridistribuito su altre decine di chilometri di litorale garantendone così l'equilibrio e in diversi casi anche l'avanzamento. In ogni caso la variazione della linea di riva resta un parametro molto importante perché consente di riscontrare, nel medio e lungo termine, gli effetti dell'azione combinata dei processi naturali e dell'intervento antropico.

A tal fine la linea di riva è stata rilevata nel corso della 4^a campagna topo-batimetrica in 2 modi: il primo, tramite interpretazione delle foto aeree del volo del 26 Luglio 2006, il secondo, mediante rilievo diretto con GPS differenziale. Il forte miglioramento della situazione riscontrata nel periodo 1998-2006, rispetto a quello 1991-1998 (i tratti in erosione sono passati da 37 km a 15 km), va quindi ricondotto in primo luogo agli interventi di ripascimento.

Si è visto che, in assenza di ripascimenti o movimentazioni di sabbia all'interno del sistema, solamente 30 km del litorale regionale, su un totale di 130 km, sarebbero attualmente in equilibrio o in leggero avanzamento, nei restanti 100 km la spiaggia sarebbe in erosione, anche se protetta da scogliere. Infine, dettagliate analisi hanno permesso di individuare nella linea di riva rilevata nel 2006, il riferimento di base per la gestione futura del litorale.

Classe	Definizione
Avanzamento	Avanzamento della linea di riva superiore ai 10 m per tratti di litorale lunghi almeno 100 m
Stabile	Variazioni della linea di riva inferiori ai 10 m per tratti lunghi almeno 100 m
Arretramento	Arretramenti della linea di riva superiori ai 10 m per tratti di litorale lunghi almeno 100 m

Figura 6.4: Classi della linea di riva – Arpae.it, 2019 [30]

Il rilievo della linea di riva può essere effettuato con diversi metodi, i più comuni sono il tracciamento da foto - interpretazione e la misura diretta con GPS differenziale.

ArpaER ha tracciato la linea di riva di tutto il litorale regionale (circa 130 km) partendo dai fotogrammi eseguiti con voli aerei del 1982, 1991, 1998 e 2005. Altre linee di riva dell'intero litorale emiliano-romagnolo sono state tracciate da altri Enti Regionali tra queste quella ottenuta dal volo RAF del 1943 (le foto aeree scattate durante la seconda guerra mondiale).

La bontà della linea di riva ottenuta tramite foto - interpretazione è funzione di numerosi fattori quali il livello di marea, la pendenza della spiaggia e l'interpretazione stessa dell'operatore. Questi elementi possono determinare errori di interpretazione anche dell'ordine di diversi metri.

Per questo motivo ArpaER effettua dal 2006 un rilievo diretto e continuo di tutta la linea di riva tramite **GPS differenziale**, definendola come la linea congiungente i punti di spiaggia a quota zero sul livello medio mare.

Nel 2012, nel corso della 5^a campagna topo-batimetrica è stato effettuato anche il rilievo diretto e continuo con DGPS della linea di riva.

- Opere rigide di difesa dall'erosione

L'avvio della difesa dei litorali dal mare in Italia viene normalmente fatto coincidere con l'approvazione della legge n. 542 del 1907 per la difesa degli abitati. In Emilia-Romagna, il primo intervento di cui si ha notizia è del 1918 e riguarda alcuni pennelli realizzati a Viserba. Le prime 3 scogliere parallele emerse vengono invece realizzate nel 1931 davanti a Porto Garibaldi. Le ultime due a Lido Adriano Sud nel 2005. Per tutto il '900 quindi l'intreccio tra l'espansione a macchia d'olio dell'urbanizzazione lungo il litorale da un lato e l'estendersi dei processi erosivi sugli arenili dall'altro, ha portato ad un continuo ricorso alla legge del 1907 sopracitata e, conseguentemente, alla realizzazione di decine di chilometri di opere di difesa rigida. Visto che allo stato attuale non vi sono né progetti né previsioni di interventi di difesa con opere rigide, si è fatto l'inventario di tutte le tipologie di opere di difesa fino ad ora impiegate e di quelle presenti.

È risultato così che il litorale emiliano-romagnolo è attualmente protetto da:

- scogliere parallele emerse km 38,0
- scogliere radenti km 19,0
- scogliere semisommerse km 6,7
- pennelli km 2,6 totale km 66,3

In realtà i pennelli in roccia o in pali di legno, esclusi i moli dei porti e quelli ai lati delle foci fluviali, sono 91, ma, la maggior parte di essi è associato ad altri tipi di difesa. La difesa con opere rigide ha subito in Emilia-Romagna un forte rallentamento a partire dal 1981, per il forte impatto paesaggistico-ambientale. Tra il 1995 e il 2006 sono state realizzate soprattutto scogliere parallele semisommerse, cioè con la cresta a quota medio mare, ma la loro efficacia è risultata fino ad ora parzialmente soddisfacente.

Attualmente, la costruzione di strutture rigide per proteggere la costa, la realizzazione di opere portuali e l'urbanizzazione a ridosso delle spiagge hanno prodotto un irrigidimento della costa e la riduzione degli spazi di azione dei processi costieri.

L'erosione costiera è contrastata con:

- **difese rigide**, prevalentemente scogliere in massi di vario tipo e pennelli (opere rigide perpendicolari alla costa);
- **difese morbide**, costituite da ripascimenti artificiali.

Oltre la metà delle spiagge regionali (circa 74 km) sono protette da opere rigide di vario tipo. Le più diffuse sono scogliere parallele emerse che difendono circa 40 km di costa (vedi figura). I restanti 30 km sono protetti da scogliere radenti (opere parallele ed aderenti alla riva), scogliere a cresta bassa, barriere sommerse in sacchi e pennelli.

A queste strutture si aggiungono le opere portuali e le darsene che occupano circa 2,5 km di fronte mare.

Nella *Figura 6.5* si possono verificare le attuali linee difensive dall'erosione:

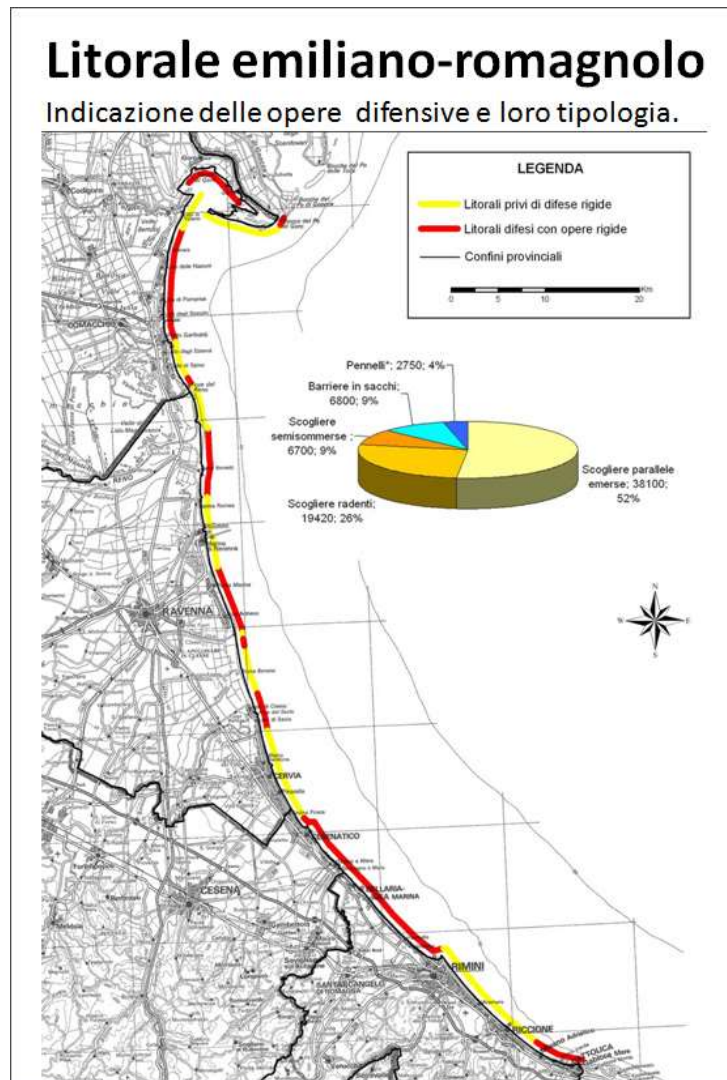


Figura 6.5: Opere difensive litorale emiliano-romagnolo - modificata da Arpae.it, 2019 [30]

- Ripascimenti

Il Piano Costa 1981 ha posto la necessità di abbandonare la difesa con scogliere e in alternativa di ricorrere al ripascimento. Di fatto, per quegli anni si trattava di un'innovazione culturale, metodologica e tecnica molto profonda, del tutto nuova in Italia.

La Regione ha deciso comunque di percorrere questa strada e nel 1983 ha realizzato il primo intervento di questo tipo portando mezzo milione di m³ di sabbia su 4 spiagge distinte. Nei 10 anni successivi, questi interventi sono stati ripetuti su queste ed altre

spiagge, portando a 2,1 milioni di m³ il materiale utilizzato e a 14 km i tratti di litorale interessati.

La sabbia proveniva da cave a terra. Per tutti gli anni '80-'90, gli interventi sono stati associati alla realizzazione di barriere sommerse in sacchi pieni di sabbia (2 m³), realizzate su un fondale di circa 2,5 m, per il contenimento della sabbia portata a ripascimento. Visti i buoni risultati forniti dagli interventi di ripascimento, nel 2000, la Regione ha finanziato il 1° intervento con sabbie prelevate dai corpi sabbiosi sottomarini scoperti da Idroser nel corso degli anni '80. Nei primi mesi del 2002, 800.000 m³ di sabbia provenienti da un dosso posto a 40 m di profondità, 55 km al largo della costa, sono stati così portati su 8 spiagge distinte, lunghe complessivamente 9 km.

A partire dal 1996 è via via aumentato anche il ricorso a tutte le fonti di sabbia disponibili lungo il litorale. Sono state utilizzate sabbie provenienti dai dragaggi portuali, da spiagge o litorali emersi in costante accumulo, dallo scavo di fondazioni di fabbricati (Riccione) e dalla pulizia delle spiagge dopo la vagliatura. Complessivamente tra il 1983 e il 2006 sono stati portati a ripascimento 6,6 milioni di m³ di materiale sabbioso, di cui 5,3 milioni da fonti esterne al sistema.

Di questi ben 3 milioni di m³ sono stati prelevati da cave a terra. Se si aggiungono i 13 mesi che vanno dall'aprile 2006 al maggio 2007 si arriva ad un totale di 8,1 milioni di m³. Nei primi mesi del 2007 la Regione ha realizzato infatti molti interventi di ripascimento tra cui il 2° intervento con sabbie sottomarine (815.000 m³).



Figura 6.6: Esempio di ripascimento del litorale ravennate – www.ravennanotizie.it [33]

- Opere di difesa dall'acqua alta

A causa della bassa giacitura rispetto al livello del mare, il territorio retrostante il litorale emiliano-romagnolo è molto esposto all'ingressione di acqua marina. Questo rischio è

particolarmente elevato nell'area centro- settentrionale dove più di 100.000 ha di territorio sono al di sotto del livello del mare e vengono mantenuti costantemente all'asciutto grazie all'azione congiunta esercitata dalla bonifica idraulica e dal sottile rilevato costiero che funziona da argine a mare.

Queste caratteristiche morfologiche vanno correlate con la configurazione del Mare Adriatico che è poco profondo e chiuso su tre lati. Pertanto in occasione di eventi di bassa pressione atmosferica sul Mar Tirreno, il vento da sud sospinge le acque verso Venezia, determinando innalzamenti del livello marino che in casi eccezionali possono raggiungere anche i 2 m.

A queste caratteristiche naturali dell'area, bisogna aggiungere alcuni effetti dovuti all'attività antropica sul litorale nell'ultimo secolo e cioè la demolizione di quasi tutti i cordoni dunosi e l'abbassamento del terreno di circa 1 m dovuto all'estrazione di acqua e metano dal sottosuolo.

La conseguenza di tutto ciò è che attualmente i 4/5 del litorale emiliano-romagnolo sono fortemente esposti al rischio di ingressione marina. Nel presente lavoro è stato effettuato una ricostruzione degli interventi realizzati per contenere questo rischio, stimando in linea di massima i costi sostenuti. Si è visto che le prime difese di questo tipo sono state realizzate nei primi anni '50 nella zona più a nord e che col passare dei decenni la necessità di intervento si è estesa sempre più verso sud, arrivando a coprire più di 80 km di litorale, fino a raggiungere, negli anni 2000, il comune di Cesenatico.

Se non si blocca la subsidenza, è logico ritenere che nel giro di qualche decennio saranno da proteggere anche i litorali di Bellaria e Rimini (che si è abbassata di 70 cm in 55 anni). L'elevato grado di vulnerabilità dell'intero litorale regionale è confermato dalla realizzazione di argini di difesa invernale in corrispondenza di molte decine di chilometri di litorale.

Da alcuni decenni infatti, per contenere il mare e ridurre i danni, i concessionari realizzano nel mese di ottobre un argine davanti agli stabilimenti balneari accumulando con ruspe la sabbia dalla spiaggia antistante. Ad aprile la sabbia residua viene di nuovo stesa sulla spiaggia. L'operazione è ovviamente negativa per quanto riguarda la stabilità della spiaggia, ma la sua necessità è talmente sentita da impedire ogni tipo di opposizione.

- *Piano di gestione decennale del litorale emiliano-romagnolo*

Nel decennio 1996-2006 la difesa della costa emiliano romagnola è stata interessata da un forte processo di sviluppo che ha riguardato i volumi di materiale movimentati, la diversificazione delle fonti di prelievo, le tecniche di dragaggio, trasporto e scarico della

sabbia e, più in generale, le conoscenze del sistema litoraneo e delle sue dinamiche. Si può dire inoltre che negli ultimi anni, pur in assenza di un flusso finanziario continuo, la difesa del litorale emiliano-romagnolo è stata attuata con criteri molto prossimi a quelli della gestione.

Pertanto, visto che il ripascimento viene ormai considerato, anche dalla vasta platea dei fruitori, come la miglior tecnica di intervento e che in mare sono stati scoperti nel corso degli anni '80 e '90 importanti giacimenti di sabbia, per passare dalla politica di difesa dei tratti critici a quella degli interventi preventivi o di gestione mancano due condizioni: il piano di gestione e i finanziamenti necessari. Durante la stesura della presente relazione si è pensato quindi che la base dei dati e delle esperienze acquisite era sufficientemente ampia da supportare, per la prima volta, la definizione di un piano di gestione.

Dopo aver valutato, sulla base di diverse considerazioni, che non è opportuno salpare nel breve e medio periodo i circa 45 km di scogliere parallele esistenti, si è proceduto al calcolo dei volumi di sabbia necessari per garantire non solo l'equilibrio, ma anche un leggero miglioramento delle condizioni attuali del litorale regionale.

Per tener conto della forte riduzione del fabbisogno che si potrà ottenere se verranno prese misure in grado di diminuire la subsidenza antropica, la durata del piano è stata limitata a un periodo di 10 anni. Con un'analisi di dettaglio del fabbisogno di sabbia in ogni singolo tratto di costa in erosione, si è potuto stabilire che, per conseguire gli obiettivi sopra riportati, occorre portare a ripascimento nel decennio 2010-2019 circa 6.000.000 di m³ di sabbia.

Stabilito che, per ragioni di impatto ambientale, il prelievo da cave a terra andrà drasticamente ridotto e che, in primo luogo, occorrerà valorizzare la sabbia delle fonti litoranee, si è proceduto poi alla stima di quanto materiale potrà essere ricavato da ogni singola fonte. È risultato che, nell'arco di circa un decennio, dalle fonti litoranee potranno essere prelevati 1.600.000 m³ di sabbia, e da altre fonti a terra altri 800.000 m³.

Conseguentemente i restanti 3.600.000 m³ necessari per soddisfare il fabbisogno dovranno essere prelevati negli accumuli sottomarini.

Tenuto conto dei costi omnicomprensivi di prelievo, trasporto e scarico della sabbia delle diverse fonti, il costo relativo al solo programma di movimentazione del materiale è stato stimato in 74,3 milioni di €. Dopo aver individuato i tratti di litorale in stato di forte criticità e stabilito il costo per la loro messa in sicurezza, sono state definite tutte le altre voci di spesa (manutenzione opere esistenti, studi, monitoraggi, opere di difesa dall'acqua alta, ecc.) necessarie per garantire la piena rispondenza del litorale alle esigenze della

difesa del territorio, dell'ambiente e dell'economia turistica. È risultato così che per attuare il piano di gestione 2010-2019 del litorale emiliano-romagnolo serviranno in totale 100,3 milioni di €, in pratica 10 milioni di €/a.

6.4) Metodi di rilievo della fascia costiera

Ai fini di inquadrare, nel contesto odierno, la metodologia adottata per il rilievo di Lido Adriano e descritta al capitolo 9, si riportano due articoli molto recenti riguardanti dei monitoraggi condotti su spiagge europee, simili a quello discusso nella tesi, che evidenziano delle analogie ed alcuni spunti per poter implementare il rilievo svolto. Il controllo delle coste con metodologie speditive a basso costo è un tema attuale e centrale e si pone, ora come non mai, come strumento principe di informazione per la pianificazione efficiente degli interventi sui litorali.

6.4.1) Sistemi UAV a basso costo per il monitoraggio del cambiamento delle dune costiere su larga scala e ad alta risoluzione

Si porta all'attenzione il controllo della costa svolto nel 2019 dall'Université de Bordeaux nelle figure di Quentin Laporte-Fauret et al. in collaborazione con l'Office National de Forêts, utile per avvalorare la metodologia di rilievo in situ adottata nel caso di Lido Adriano.

Tale lavoro prende in considerazione il monitoraggio della spiaggia di Truc Vert, presso la costa di Gironde che si affaccia sull'Oceano Atlantico, caratterizzata da range di marea media annua di 3,70 m e onde alte fino a 1,70 m. In particolare il rilievo si sviluppa per una lunghezza di 1 km e una superficie di 1 km².

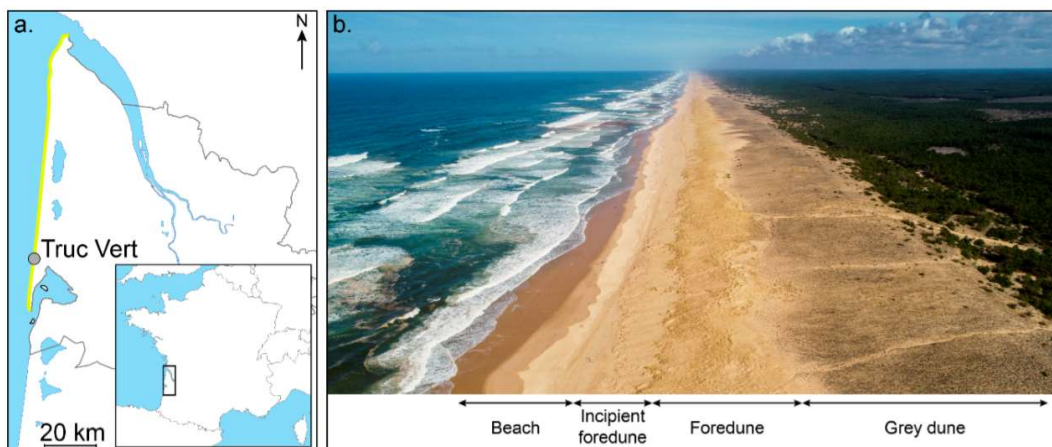


Figura 6.7: Inquadramento e panoramica della spiaggia di Truc Vert - Quentin Laporte-Fauret et al., 2019

Analogamente ai fotogrammi scattati per Lido Adriano, è stato impiegato un drone DJI che presenta i vantaggi descritti nel paragrafo dedicato ai droni, quali la leggerezza di

trasporto ed un ridotto costo. Il processing dei dati è stato condotto con Agisoft Metashape, software Structure From Motion impiegato anche per la produzione dei modelli tridimensionali e le ortofoto di Lido Adriano.

Il monitoraggio continuativo (su base mensile, ma eseguibile anche settimanalmente) necessario per evidenziare i fenomeni di modellazione dinamica da parte dei processi marini ed eolici è stato in questo caso implementato grazie all'utilizzo di un piano di volo automatico del drone, quindi ripetibile e più affidabile, ponendo particolare attenzione a come la flessibilità di questa tecnologia possa essere impiegata soprattutto nelle Regioni del mondo in via di sviluppo ancora carenti di informazioni geomatiche digitali, utili per una corretta gestione del patrimonio costiero.

Si riportano a confronto le caratteristiche del piano di volo con quello adottato per il rilievo di Lido Adriano.

Parametri del volo	Truc Vert	Lido Adriano
Drone impiegato	DJI Phantom4	DJI spark alleggerito
Peso	1700 g	<300 g
Camera	GoPro Hero 4	DJI FC1102
Lunghezza focale	4,2 mm	4,49
GSD (Ground Sampling Distance)	4,5 cm/pix	1,56 cm/pix
Altezza programmata di volo	65 m	45 m
Ricoprimento longitudinale fotogrammi	80%	80%
Ricoprimento trasversale fotogrammi	50%	70%
N° di strisciate	8	3

Tabella 6.1: Confronto delle caratteristiche dei droni e del volo di Truc Vert e di Lido Adriano

Al contrario di quanto svolto per il rilievo di Lido Adriano, si impiegano dei punti fotogrammetrici d'appoggio in questo caso stabili e fissi per poter ripeterne il rilievo con tecniche di posizionamento differenziale anche a distanza di tempo.

Si riportano i risultati evidenziati nell'articolo, che rispecchiano e avvalorano quelli ricercati nella presente tesi.

- **Elevazione relativa tra i PFA e il DSM (Digital Surface Model):**

Sono messe a confronto le quote altimetriche dei punti di interesse ottenute direttamente da rilievo con tecniche GPS differenziali (DGPS) con quelle prodotte da Agisoft Metashape nel DSM, ovvero nel modello tridimensionale del terreno.

In particolare, sono stati presi in considerazione lo scarto quadratico medio (σ_z) e lo scostamento ($bias_z$) per esprimere l'accuratezza raggiunta dal modello, definiti dalle seguenti formule:

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum_n (z_{DGPS} - z_{DSM})^2}{n}} \quad (6.1)$$

$$bias_z = \frac{\sum_n (z_{DGPS} - z_{DSM})}{n} \quad (6.2)$$

Dove n è il numero di punti di validazione presi in considerazione.

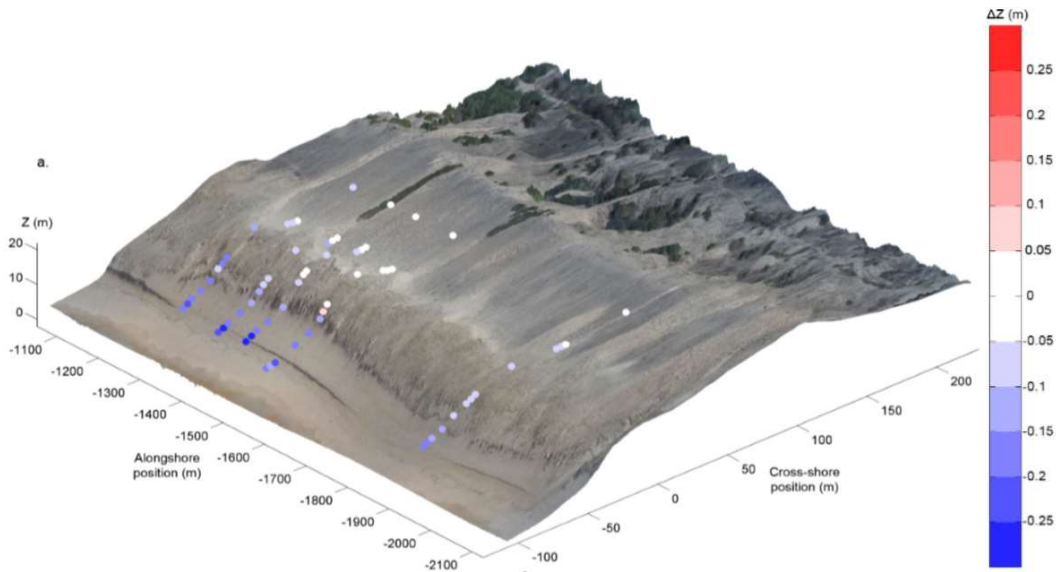


Figura 6.8: Errori relativi altimetrici tra i punti di controllo rilevati e i punti ottenuti da DSM - Quentin Laporte-Fauret et al., 2019

Si può notare come, all'aumentare dei punti fotogrammetrici introdotti nel software per la definizione del DSM (attraverso l'apposizione di marker nei fotogrammi usati) aumenta la precisione del modello, come riscontrato anche nel caso di Lido Adriano.

Number of GCP	RMS_Z Error (m)		Bias_Z (m)	
	DP2	DP4P	DP2	DP4P
3	0.67	1.44	-0.65	-1.41
4	0.50	1.12	-0.49	-1.10
5	0.14	0.05	-0.11	-0.03
6	0.14	0.05	-0.10	-0.03
7	0.14	0.05	-0.09	-0.03
8	0.15	0.05	-0.11	-0.02
9	0.15	0.05	-0.11	-0.02
10	0.13	0.05	-0.10	-0.02

Figura 6.9: Parametri statistici calcolati in corrispondenza dei punti di validazione aumentando il numero di punti di controllo - Quentin Laporte-Fauret et al., 2019

- Studio delle dune costiere in rapida evoluzione

Oltre a individuare le precisioni raggiungibili affinando il modello (a discapito però di tempo e risorse), uno degli obiettivi principali della tesi è quello di individuare una metodologia ripetibile ai fini di monitorare l'evoluzione altimetrica delle dune sabbiose. Dal modello ottenuto è possibile infatti ricavare le opportune sezioni verticali che mostrano, come da figura, i profili caratteristici della spiaggia, avendo anche l'opportunità di metterli a confronto sia a livello temporale che spaziale ai fini di

pianificare consapevolmente sia operazioni di prevenzione sull'erosione che eventuali interventi di ripascimento.

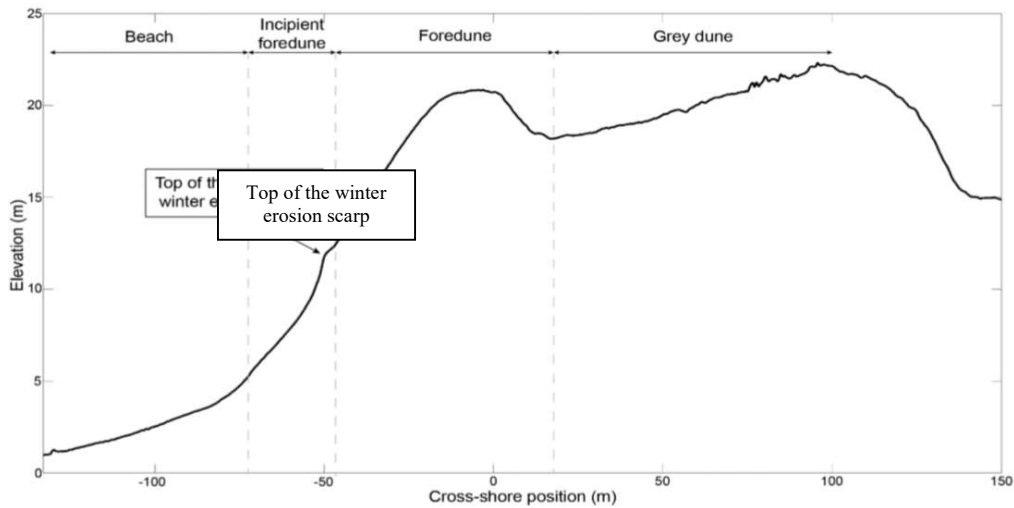


Figura 6.10: Sezione tipologica della spiaggia di Truc Vert con indicazione della scarpata di erosione durante la stagione invernale - modificata da Quentin Laporte-Fauret et al., 2019

Dalla figura si evidenzia l'attività nel periodo invernale delle onde ad alto contenuto energetico che hanno causato l'arretramento della linea di costa di 10-20 m ed un conseguente abbassamento medio di 1,50 m

- **Monitoraggio continuativo dell'evoluzione**

Istituendo delle basette permanenti (ragionevolmente salde tenendo in considerazione la mobilità del terreno sabbioso), a cui si possano riapplicare i marker dei PFA, e programmando automaticamente il volo dei droni, è possibile redigere l'evoluzione temporale della morfologia.

Nel caso di Truc Vert si è proceduto ad un controllo nell'arco di sei mesi, permettendo di evidenziare con l'avanzare della stagione invernale l'erosione della linea di costa ed un innalzamento delle dune retrostanti.

La seguente figura mostra le variazioni al 19/12/17, 23/01/18 e 13/03/18.

L'ortofoto più a destra mostra le differenze tra l'ultimo rilievo e la situazione di partenza datata 9/10/2017.

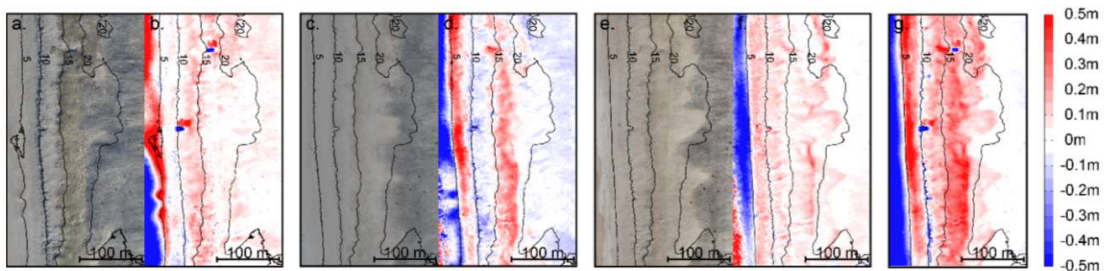


Figura 6.11: Cambiamento della morfologia delle dune - Quentin Laporte-Fauret et al., 2019

6.4.2) UAV per il monitoraggio della costa con la Structure from Motion in presenza di un corso d'acqua

Rimanendo nell'ambito della riviera adriatica, risulta interessante riportare l'attività interdipartimentale dell'Università di Ferrara svolta da Yuri Taddia et al. nel 2019.

Il caso di studio prende in considerazione l'evoluzione di un complesso sistema di dune embrionali vicino al delta del Po, nell'arco temporale di due anni. L'attualità dell'articolo consente di trarre per il lavoro di tesi alcune interessanti considerazioni in merito al monitoraggio continuo. Questo metodo non è stato seguito ma potrebbe essere attuato nel caso di Lido Adriano. Lo studio risulta altresì interessante per inquadrare l'approccio usato per descrivere le dune, presenti anche a Lido Adriano seppur in quantità meno significativa, ma non meno suscettibili di evoluzione nel tempo.

Gli ambienti costieri sono solitamente caratterizzati da un equilibrio fragile, soprattutto in termini di trasporto di sedimenti. La formazione di dune, così come la loro distruzione improvvisa a causa di violente tempeste, colpisce questo equilibrio in modo significativo. Inoltre, la crescita della vegetazione sulla cima delle dune influenza fortemente la conseguente crescita delle dune stesse. L'articolo affronta quindi in maniera innovativa il monitoraggio in un ambiente marino influenzato dall'interazione dinamica con la foce del Po nel litorale di Rosolina Mare (RO).

Le dune vegetate svolgono una varietà di funzioni preziose per l'ecosistema, in particolare:

- Protezione contro l'ingresso di acqua marina durante le tempeste
- Riserva di sabbia per il ripascimento di sabbia erosa da acqua, vento, spruzzi salini
- Nicchia ecologica per fauna e flora

Le dune costiere possono essere classificate in tre grandi famiglie:

- Embrionali, o incipienti
- Stabilizzate
- Pianori

Quelle embrionali sono dune basse formate dalla deposizione di sabbia per l'azione del vento all'interno delle comunità di piante pioniere retrostanti le spiagge. La loro formazione è dovuta ad un aumento della rugosità della superficie a causa della presenza di vegetazione retrostante la spiaggia, responsabile di una riduzione delle velocità del flusso del vento, con conseguente deposizione dei sedimenti.

Da un punto di vista geomorfologico, le dune embrionali sono le più interessanti da studiare poiché sensibili alle variazioni di qualsiasi fattore ambientale costiero e pertanto possono crearsi tanto velocemente quanto scomparire.

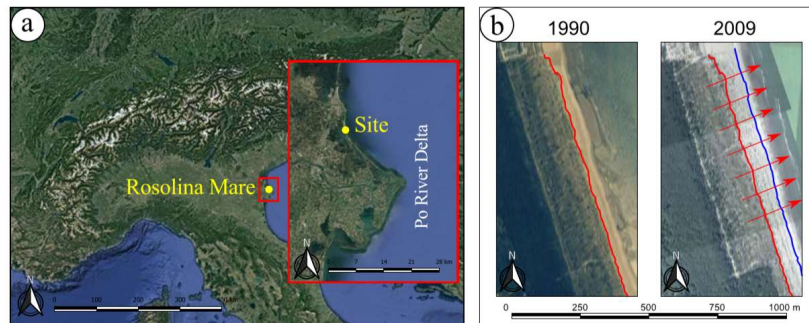


Figura 6.12: Inquadramento del sito studiato e progressione delle dune embrionali nell'arco di 19 anni -
Yuri Taddia et al., 2019

Come si vede nell'immagine soprastante, nelle ultime decadi il sito è stato soggetto alla progradazione della fascia sabbiosa parimenti ad altre porzioni della costa adriatica.

Per progradazione si intende una modalità di deposizione dei sedimenti, che si realizza quando in tempi successivi si depongono corpi sedimentari parzialmente sovrapposti in posizione sempre più lontana rispetto alla sorgente dei sedimenti stessi. In ambiente litorale, la progradazione si manifesta quando i sedimenti di spiaggia tendono ad avanzare verso il mare, sopra i sedimenti più fini di piattaforma continentale.

Per descrivere in maniera rapida ed esauriente tale processo, sono stati prodotti i DTM come strumento di identificazione della morfologia delle dune, permettendo un rapido confronto spaziale e temporale a basso costo e ad alta risoluzione.

Analogamente al rilievo di Lido Adriano, ogni modello generato utilizzando la Structure from Motion è stato inquadrato nel sistema europeo di riferimento terrestre (ETRS89) utilizzando ricevitori geodetici GNSS in Network Real Time Kinematic (NRTK) per la determinazione delle coordinate dei PFA.

Si riporta il piano di volo e la posizione dei PFA, relativamente simile alla disposizione adottata a Lido Adriano, assieme ai parametri di volo a confronto con quelli impiegati nel lavoro della tesi.

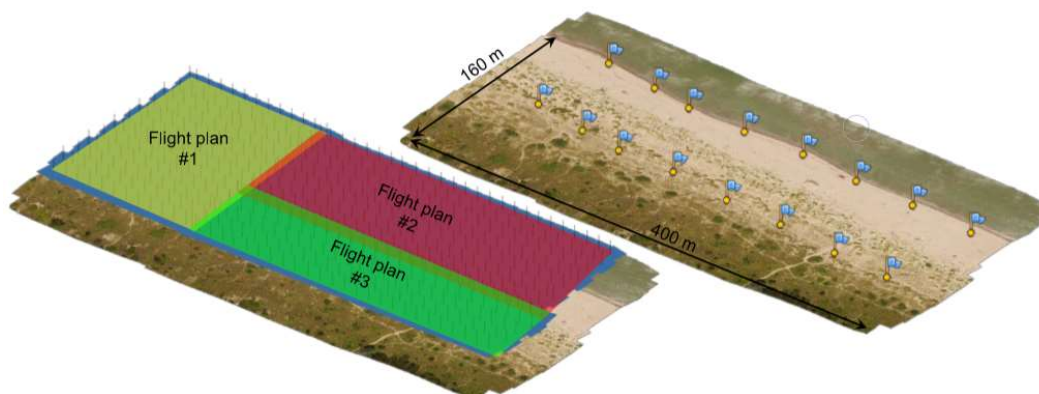


Figura 6.13: Piano di volo e disposizione dei PFA nel sito di Rosolina Mare - Yuri Taddia et al., 2019

Parametri del volo	Rosolina Mare	Lido Adriano
Drone impiegato	DJI Phantom3	DJI spark alleggerito
Peso	1280 g	<300 g
Camera	DJI FC300X	DJI FC1102
Lunghezza focale	3,6 mm	4,49 mm
GSD (Ground Sampling Distance)	1,8 cm/pix	1,56 cm/pix
Altezza programmata di volo	40 m	45 m
Ricoprimento longitudinale fotogrammi	80%	80%
Ricoprimento trasversale fotogrammi	60%	70%
N° di strisciate	8	3

Tabella 6.2: Confronto delle caratteristiche dei droni e del volo di Rosolina Mare e di Lido Adriano

Per ottenere la massima accuratezza del modello, un primo allineamento dei fotogrammi è stato condotto prendendo in considerazione le informazioni relative ai parametri di orientamento esterno ed interno raccolti negli Exif file delle foto.

Questo processo è stato adottato anche per i modelli di Lido Adriano perché consente di individuare con più facilità i marker dei PFA da specificare manualmente nelle foto. Senza un primo allineamento, il lavoro sarebbe completamente a carico dell'utente ma grazie a questo passaggio il software permette una molto più veloce validazione dei marker, che vengono direttamente posizionati nell'intorno dei pixel di interesse e pertanto occorre semplicemente spostarli di poco senza dover ricercare manualmente i target nelle foto.

Mentre per il progetto di Lido Adriano gli Exif file non sono stati cancellati per sfruttare al massimo i dati provenienti anche dalle fotografie, per il caso di Rosolina Mare sono stati direttamente eliminati ai fini di utilizzare esclusivamente le coordinate, più affidabili, rilevate in NRTK.

La nuvola densa generata rappresenta però un modello che include la vegetazione che cresce sulle dune, pertanto per creare un corretto modello delle dune non si procede alla rimozione manuale dei punti non significativi (lavoro molto lungo che comporterebbe

anche una restituzione fallace del terreno) bensì attraverso un filtro basato sul rilevamento della pendenza della superficie.

Questo algoritmo è presente nel software Agisoft Metashape Professional utilizzato anche per Lido Adriano e sostanzialmente lavora in due step: nel primo, l'intera nuvola densa viene suddivisa in celle quadrate di dimensione definita dall'utente (in tal caso 5m x 5m). Il punto a quota più bassa di ciascuna cella è assunto come appartenente alla superficie del terreno, pertanto un primo modello può essere ottenuto da questi punti caratteristici. Nel secondo step, i rimanenti punti sono classificati in base alla loro posizione e pendenza rispetto ai primi individuati, imponendo dei valori limite per discernarli tra appartenenti al terreno e non (valori di soglia adottati 0,15m e 15°).

Si riporta quindi l'individuazione dei punti appartenenti al terreno esclusi quelli che rappresentano porzioni vegetali.



Figura 6.14: Nuvola densa dopo l'individuazione dei punti appartenenti al terreno - modificata da Yuri Taddia et al., 2019

Per la corretta rappresentazione delle dune, le informazioni eliminate dal modello sono stata reintegrate impiegando punti monitorati con strumentazione in NRTK.

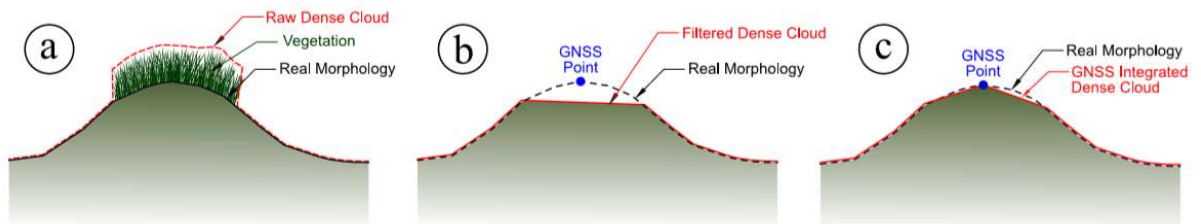


Figura 6.15: Integrazione delle informazioni mancanti con punti rilevati GNSS - Yuri Taddia et al., 2019

Per una validazione più completa e per testare l'affidabilità, è stata estratta la sezione verticale tipologica del litorale dal DTM, confrontandola con il profilo ricavato in NRTK muovendo manualmente l'antenna lungo il percorso scelto.

Ad eccezione di alcuni tratti in cui si risente ancora degli outliers provenienti dalla vegetazione residua, l'accuratezza del modello si evince dalla ridotta differenza media dello scostamento altimetrico, pari a -1,2 cm.

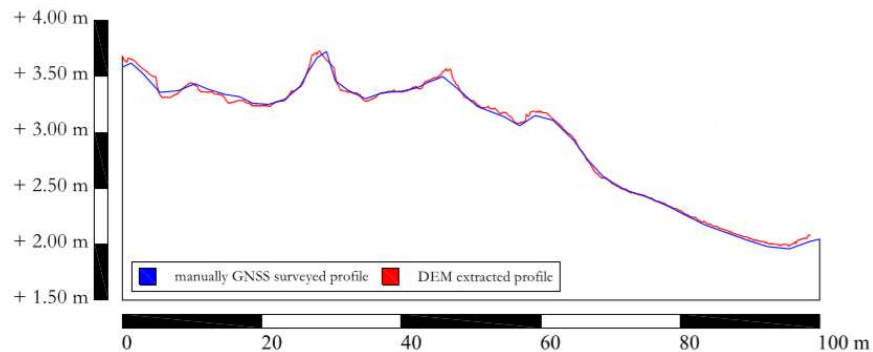


Figura 6.16: Profili ricavati da rilievo manuale GNSS e da DTM a confronto - modificata da Yuri Taddia et al., 2019

Grazie quindi alla modellazione tridimensionale, l'estrazione di sezioni può essere condotta in qualsiasi regione richiesta nel software, vantaggio enorme rispetto alla rilevazione in NRTK, che risulterebbe più lunga ed esclusivamente lineare.

Per l'estrazione di profili, sono state prese in considerazione tre sezioni longitudinali e 10 sezioni trasversali:

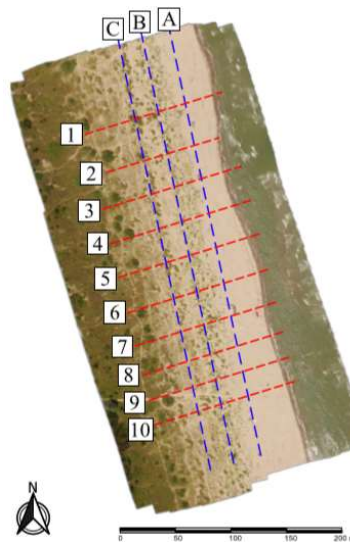


Figura 6.17: Individuazione delle sezioni significative - Yuri Taddia et al., 2019

Lungo le sezioni si possono effettuare interessanti considerazioni a livello temporale: prendendo in esame la sezione 2, si può vedere come durante il periodo da novembre 2015 a marzo 2016 il profilo altimetrico varia (a causa delle tempeste della stagione invernale). Infatti le dune 2 e 3 sono soggette ad erosione e contemporaneamente si assiste all'accumulo di sabbia nel loro deposito di interduna: è quindi possibile discernere le dune

embrionali dalle restanti, che si presentano più stabilizzate. Allo stesso modo si nota l'erosione della battigia.

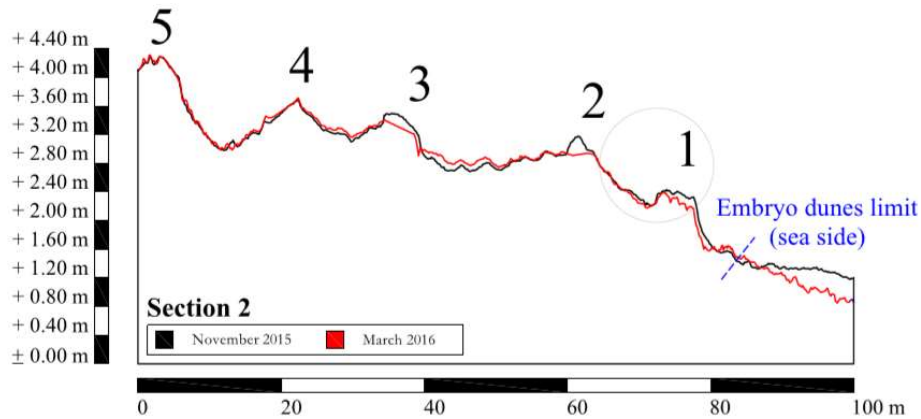


Figura 6.18: Evoluzione morfologica delle dune nella sezione 2 - modificata da Yuri Taddia et al., 2019
 Attraverso un monitoraggio più protratto nel tempo, si riporta la sezione 8 che mostra il cambiamento morfologico delle dune nell'arco di due anni, da novembre 2015 a dicembre 2017, in cui si osserva un generale innalzamento dei depositi (con picchi di 40 cm) che mantiene indicativamente inalterata la struttura originaria, salvo per l'unione delle due dune più esposte e vicine a riva.

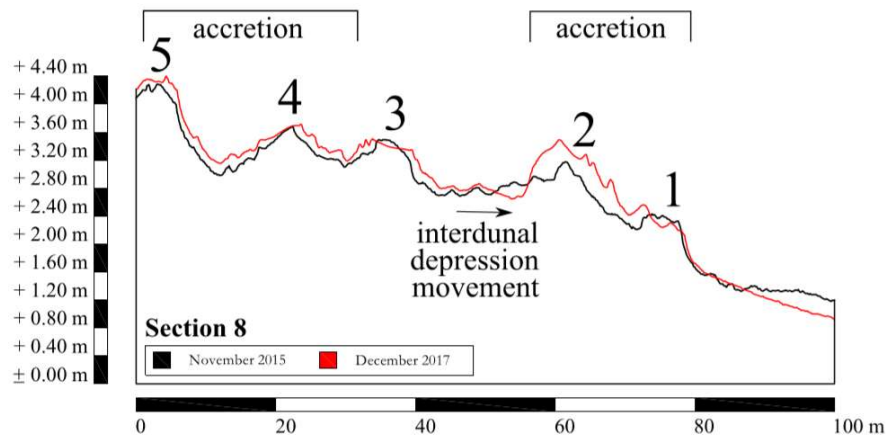


Figura 6.19: Evoluzione morfologica delle dune nella sezione 8, modificata da Yuri Taddia et al., 2019
 Pertanto nell'arco di due anni il fenomeno della progradazione che si manifesta con l'innalzamento delle dune è facilmente individuabile e stimabile, così come il movimento della zona di depressione tra le dune 2 e 3.

E' possibile inoltre effettuare direttamente un'analisi bidimensionale confrontando direttamente i modelli di elevazione digitale (DEM) ricavati a inizio e fine periodo, per individuare agevolmente le zone più stabili e quelle che hanno subito maggiori

cambiamenti. L'operazione è eseguita semplicemente sottraendo la quota di ciascun punto del modello al 2015 con quelle del modello al 2017.

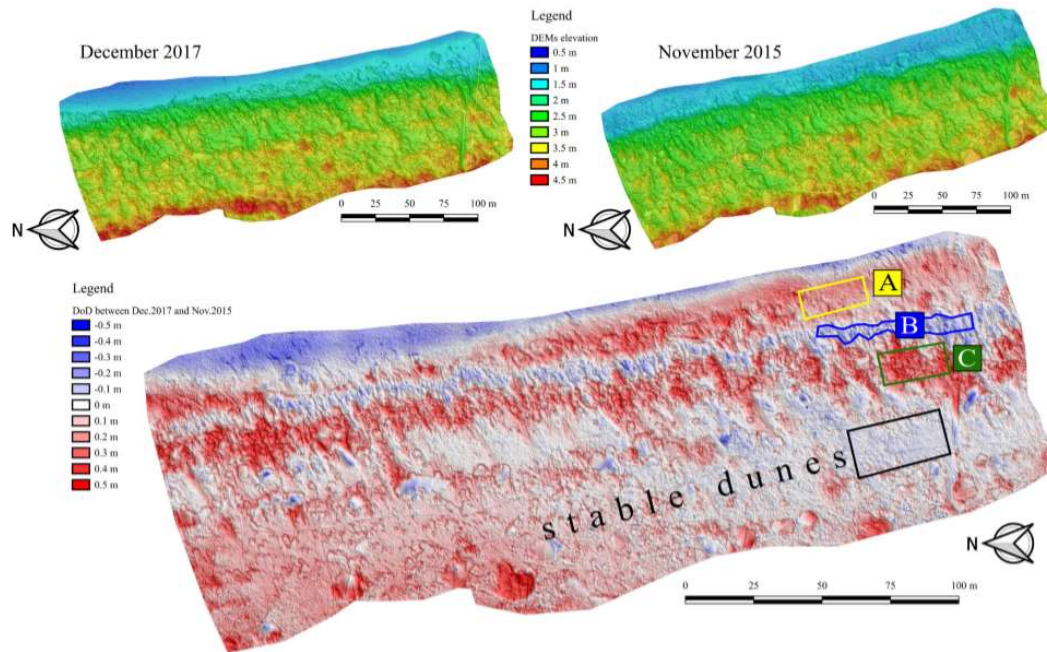


Figura 6.20: Evoluzione morfologica delle dune a livello bidimensionale - modificata da Yuri Taddia et al., 2019

Come confermato anche da questo lavoro, l'uso dell'approccio Structure-from-Motion a partire da fotogrammi scattati con UAV si dimostra piuttosto affidabile e consente di risparmiare tempo grazie a operazioni in situ più rapide per l'acquisizione dei dati e a una ricostruzione accurata dei modelli di elevazione ad alta risoluzione.

7) INQUADRAMENTO DELLA ZONA DI RILIEVO

LIDO ADRIANO (RA)

La zona di interesse della sperimentazione condotta è costituita da un tratto costiero in località Lido Adriano, frazione del Comune di Ravenna. L'inquadratura dell'area è evidenziato nelle *Figura 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4* mentre in *Figura 7.5* sono mostrate le attuali strutture di protezione della spiaggia contro i fenomeni erosivi, costituite da frangiflutti sommersi e semi-sommersi.



Figura 7.1: Inquadratura dell'area di studio – www.earth.google.com, 2019 [31]



Figura 7.2: Inquadratura dell'area di studio – www.earth.google.com, 2019 [31]

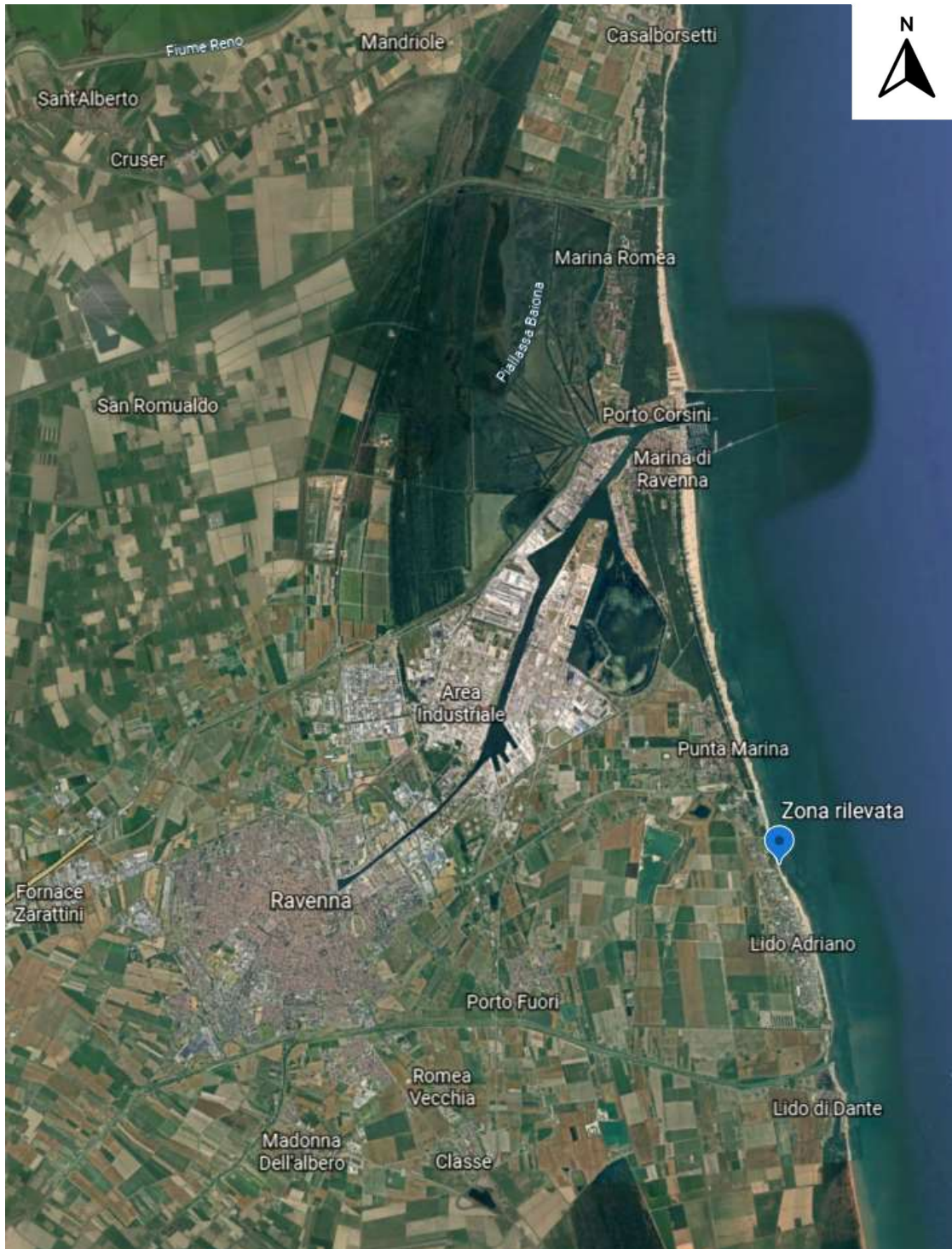


Figura 7.3: Inquadramento dell'area di studio – www.earth.google.com, 2019 [31]

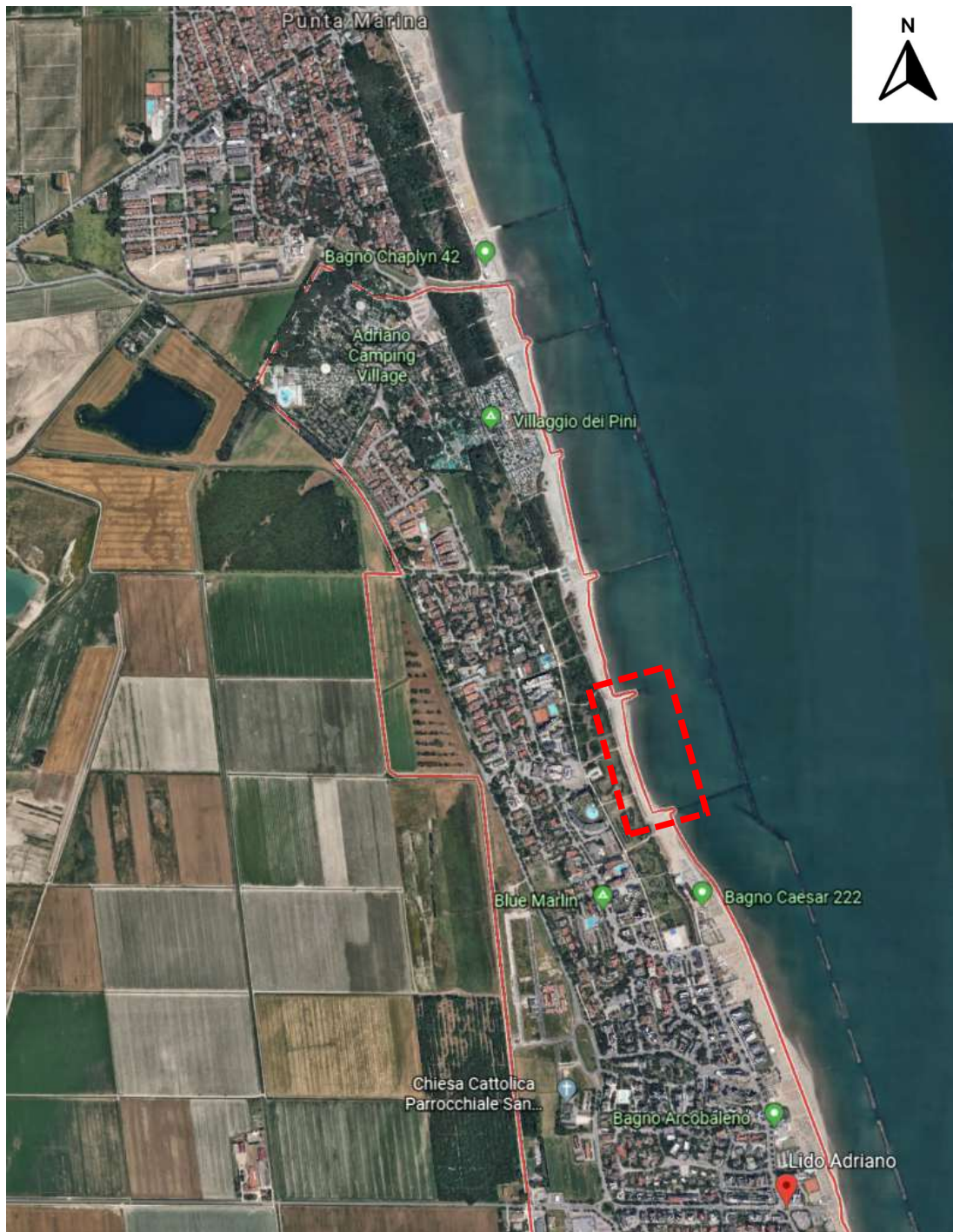


Figura 7.4: Inquadramento dell'area di studio – www.earth.google.com, 2019 [31]



Figura 7.5: Porzione rilevata con individuazione dei frangiflutti – www.earth.google.com, 2019 [31]

In Figura 7.6 si riporta una panoramica del sito.



Figura 7.6: Vista panoramica del sito acquisita da drone durante il rilievo eseguito il 24/05/19 – Prof. L.

Vittuari, 2019

La campagna di rilievo dei punti fotogrammetrici d'appoggio e di scatto dei fotogrammi con drone è stata condotta in data 24 Maggio 2019 e la successiva elaborazione della rete di punti nel mese di Agosto 2019.

Psi riporta nei paragrafi successivi un inquadramento dell'area di studio, che individua i processi fisici e socio-economici che interessano il tratto di costa rilevato. In particolare, le informazioni principali sono state estratte all'interno del progetto europeo 'Eurosion' sviluppato per lo studio dell'erosione delle coste europee.

7.1) Descrizione generale dell'area

La zona considerata, lunga circa 350 metri, ricade all'interno dell'area costiera di Ravenna racchiusa tra la foce del Fiumi Uniti e il molo sud del porto di Ravenna (*Figura 7.7*). Durante l'ultimo secolo l'intera linea costiera è stata fortemente influenzata da tre principali fattori:

- La costruzione e la progressiva estensione dei moli del porto di Ravenna, che presentano una lunghezza di circa 2800 metri
- La mancanza di depositi di ripascimento, precedentemente garantiti dal fiume e dal fenomeno di deriva litorale a sud della foce.
- Gli effetti negativi causati dalla subsidenza e dall'alto impatto antropico generato dalla gestione del turismo balneare



Figura 7.7: Area costiera di Ravenna – www.earth.google.com, 2019 [31]

7.1.1) Inquadramento geologico dell'area

La costa ravennate si è formata a partire dall'interazione tra il delta del fiume ed i processi costieri marini.

Dal tardo Olocene fino agli inizi del '900, la linea di costa ha sottolineato un progressivo accrescimento: questo trend si è concretizzato attraverso una barriera dunale che lavora come confine naturale tra l'area paludosa retrostante e le aree di acqua stagnante, come da *Figura 7.8*.



Figura 7.8: Particolare della spiaggia ravennate, con dune e laguna retrostante. La pineta è stata piantumata artificialmente sull'antica formazione dunale - Gabbianelli, 2007

Le dettagliate informazioni stratigrafiche disponibili per l'area di studio (Regione Emilia Romagna, 1999) mostrano che la costa è caratterizzata da spiagge di sabbia fine ricoprenti materiali argilloso-limosi derivanti da depositi alluvionali e paludosi più antichi. Genericamente, lo spessore delle sabbie moderne non eccede 4-6 metri. Questo strato, che mostra una classica geometria a cuneo, scompare completamente ad una profondità dell'acqua di circa 4-6 metri.

La costa ha registrato una subsidenza superiore a 1 metro negli ultimi 40-50 anni: il naturale range di 2-3 millimetri/anno è stato infatti fortemente accelerato nell'ultimo mezzo secolo a causa dell'estrazione di fluidi (acqua e gas) dal sottosuolo. Ad oggi, lungo le aree costiere, i valori di subsidenza sono in media di 9 millimetri /anno, con picchi di circa 15 millimetri/anno (ARPAE, 2018).

7.1.2) Morfologia della costa

Nelle ultime decadi, come risultato degli effetti combinati di subsidenza, costruzione del porto, urbanizzazione e prelievo di sedimenti dal fiume, la linea di costa ha subito un enorme tasso di erosione nella zona meridionale (dal delta del fiume Fiumi Uniti fino a Punta Marina) ed un significativo accrescimento nella parte settentrionale, prossima al porto (*Figura 7.9*).



Figura 7.9: Zona litoranea compresa tra l'area portuale Sud di Ravenna e la foce del fiume Fiumi Uniti, con individuazione schematica delle zone di erosione e di accrescimento – www.earth.google.com [31]

In seguito ad una tempesta estrema, verificatasi nel 1966, la maggior parte delle aree costiere del Nord Adriatico furono allagate: a partire da allora molte opere di protezione furono costruite lungo la costa.

Tali strutture sono:

- Frangiflutti e scogli ravvicinati, realizzati alla fine degli anni Sessanta, al largo della costa di Lido Adriano
- Argini rocciosi e aree di ripascimento, realizzati alla fine degli anni Ottanta al largo della costa di Punta Marina

In questa area, il litorale mostra le seguenti caratteristiche:

- Orientamento: circa 330°
- Cella sedimentaria di 10,5 chilometri consistente in:
 - Circa 4,5 chilometri di aree di accrescimento non protette, nel settore settentrionale
 - Circa 6,0 chilometri di costa caratterizzata da pattern erosionali, nel settore centro-meridionale: questa corrisponde all'area protetta dalle barriere artificiali, che sono quindi realizzate sia da argini sommersi che da frangiflutti affioranti per uno sviluppo complessivo di 3,0 chilometri; si fa notare che in quest'area vengono svolti annualmente dei ripascimenti parziali
- Larghezza della spiaggia: variabile da pochi metri nel settore meridionale fino a più di 150 metri nella zona settentrionale
- Pendenza della spiaggia: da meno di 1° (zona emersa) fino a 2,5° (zona sommersa)

7.1.3) Processi fisici

Basandosi sulle sue caratteristiche, la spiaggia rilevata può essere assegnata al tipo "dissipativo", caratterizzato cioè da fondali con basse inclinazioni e sedimenti fini.

Il litorale è caratterizzato da un leggero gradiente topografico ed il regime di marea presenta una variazione media diurna di 80 centimetri per la marea sizigiale e di 30 centimetri per la marea di quadratura.

Livelli di acqua alta del Mare Adriatico settentrionale possono essere causati da tempeste provenienti da Sud-Est e generate dal vento di Scirocco associato a campi depressionali che si muovono verso Est. Questi eventi possono determinare oscillazioni con periodi di 22 ore e di ampiezze massime che superano spesso 1 metro.

Le onde e i venti prevalenti, che determinano il principale trasporto solido costiero dell'area, sono provenienti da Nord-Est (Bora) e Sud-Est (Scirocco), come da *Figura 7.10*.

Di seguito si sintetizzano le caratteristiche tipiche del moto ondoso:

- Direzione delle onde: 30-45° e 120-145°
- Altezza significativa dell'onda: 4 metri, con un periodo di onda pari a 8-9 secondi.
Per altezza significativa si intende l'altezza media del terzo di onde più alto.
- Altezza media dell'onda: 1,5-2 metri, con un periodo d'onda pari a 5-6 secondi



Figura 7.10: Mapa schematica mostrandole direzioni principali del trasporto solido - Idroser, 1996

7.1.4) Erosione della costa

Il litorale mostra quindi un'erosione nella porzione studiata, contrariamente a quella poco più a nord. ed un accrescimento in differenti zone: questi processi di erosione e sedimentazione cambiano nel tempo.

L'evoluzione altimetrica del fondale, ottenuta dai monitoraggi batimetrici dal 1968 al 2000, è sintetizzata nella *Figura 7.11*.

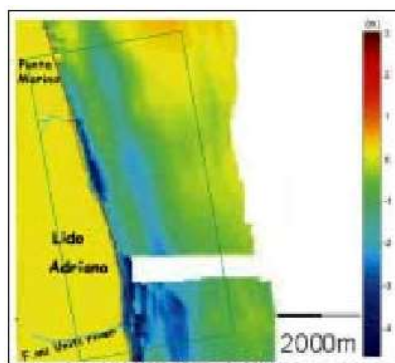


Figura 7.11: Mapa della variazione altimetrica del fondale dal 1968 al 2000 (in m) - Gabbianelli, 2007

A Lido Adriano, la perdita di sedimento si stanza sui 13 milioni di metri cubi fino a 27,5 nella zona più a sud verso la foce del Fiumi Uniti.

7.1.5) Cause dell'erosione

La causa principale dell'erosione è imputabile principalmente alla mancanza di affluenza dei sedimenti fluviali: le attività estrattive svolte fino al 1978 lungo i letti fluviali, gli interventi di arginamento, la mancanza di attività di pulizia dei letti fluviali, hanno concorso alla forte riduzione della produzione di depositi di sedimenti idonei al ripascimento della costa, determinando un sentito deficit del bilancio sedimentario (Idroser, 1984).

In aggiunta, negli ultimi 30-40 anni, un intensivo aumento dell'attività antropica (legato principalmente allo sviluppo del turismo) ha condotto ad una completa alterazione della morfologia costiera e delle sue dinamiche, associate ad un incremento della subsidenza.

La subsidenza produce un grande impatto nel processo erosivo: per esempio, a Lido Adriano, è stato registrato un abbassamento medio del terreno di 45 centimetri tra il 1957 ed il 1977, che ha causato la regressione del litorale di circa 126 metri (Carbognin et al., 1982).

Inoltre, il fenomeno irreversibile della subsidenza non concorre soltanto alla accelerazione dei processi erosivi ma, nelle piane costiere basse, comporta una definitiva riduzione della elevazione sopra il livello del mare e quindi un rischio crescente di ingresso delle acque marine (Cenas, 1977).

La crisi maggiore che ha riguardato l'intera costa nord-adriatica è stata raggiunta alla fine degli anni Settanta, durante cui le attività antropiche sul litorale avevano raggiunto la loro massima espansione incontrollata.

Questa espansione è stata parzialmente ridotta dall'inizio degli anni Ottanta come conseguenza dell'adozione della L.R. 35/1984, più stringente della nazionale Legge Galasso 431/1985 sulla protezione del territorio.



Figura 7.12: Chiaro esempio dell'urbanizzazione incontrollata presso Lido Adriano - Gabbianelli, 2007

7.2) Aspetti socio-economici

Le principali funzioni dell'area costiera sono il turismo e lo svago. Gli edifici industriali sono, invece, localizzati solamente nell'area del porto. Più di 100 stabilimenti balneari sono disposti sui 10,5 chilometri di spiaggia: alcuni di questi sono ampi poiché includono bar, ristoranti e infrastrutture di intrattenimento vario.

Come da *Figura 7.13*, queste strutture hanno danneggiato, se non distrutto, la barriera dunale e, a causa dell'uso incontrollato della spiaggia, sono stati causati seri e continui impatti sulla rimanente formazione dunale e sulla pineta.

Alcuni settori della foresta, assieme alla retrostante laguna Pialassa di Piombone sono inclusi nel Parco Regionale del Delta del Po e classificati come SIC/ZPS (Siti di Importanza Comunitaria e Zone di Protezione Speciale) conformemente alle direttive UE sugli habitat. Per la relativa carta tematica '*Parchi e Riserve*' si rimanda al paragrafo 13.3.

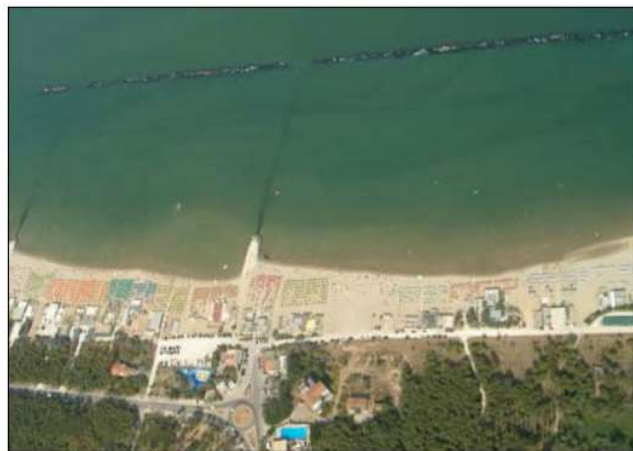


Figura 7.13: Esempio di come una stazione balneare di Punta Marina impatti sulla pineta e sulle dune rimaste - Gabbianelli, 2007

7.3) Soluzioni e misure di protezione

L'attuale strategia di gestione della spiaggia, in accordo alle normative vigenti, è iniziata nel 1997 con il progetto di una nuova struttura di protezione semisommersa (Figura 7.12). Questo intervento è stato realizzato a causa dell'inefficacia degli interventi precedentemente esposti, che in alcuni tratti risultavano addirittura dannosi velocizzando l'erosione.

A partire quindi dal 1997 una serie successiva di progetti è stata sviluppata, e poi iniziata nel 1999, per proteggere l'area urbana e per mantenere una larghezza della spiaggia ragionevole, in modo da permettere lo sviluppo del turismo che, come evidenziato nel paragrafo precedente, rappresenta il maggiore afflusso economico della zona.

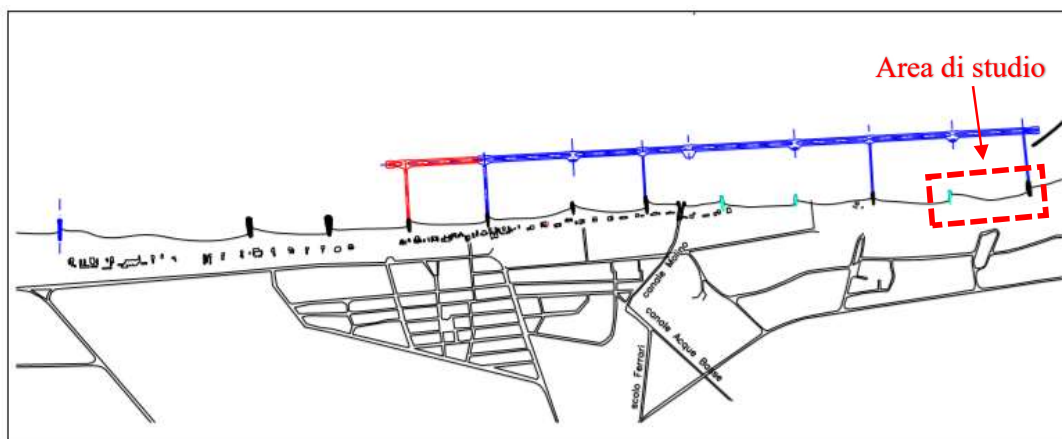


Figura 7.12: Area di interesse raffigurante le strutture di protezione esistenti (in blu i frangiflutti realizzati tra il 1999 e il 2000, in rosso il loro prolungamento di 420 m – modificata da Gabbianelli, 2007). Ad oggi la spiaggia è totalmente protetta dai frangiflutti sommersi realizzati, e la strategia principale di tutela del litorale ad opera del Comune è basata su ripascimenti stagionali. L'argine disposto in quest'area è risultato una buona soluzione per prevenire problemi di erosione estesa e a tutt'oggi lavora come riferimento fisso per la pianificazione di interventi di ripascimento.

8) DATASET E SOFTWARES IMPIEGATI

Nel presente capitolo si illustrano brevemente i dati utilizzati nel lavoro di tesi, che vengono ampiamente richiamati nei successivi capitoli ad essi dedicati.

Per la produzione degli elaborati fotogrammetrici, si sono presi in considerazione:

- Dataset di 296 fotogrammi, scattati in data 24/05/2019 con la fotocamera a 12 Mpixel integrata nel drone DJI Spark. Sono stati esclusi gli scatti in fase di decollo ed atterraggio, quelli panoramici e quelli con la più bassa risoluzione
- Coordinate dei punti fotogrammetrici d'appoggio, rilevati con ricevitore GPS in NRTK, forniti sia nel sistema di riferimento ETRS89 (EPSG 4258) che nel sistema di riferimento ED50/UTM32N (EPSG 23032)
- Carta Tecnica Regionale dell'Emilia Romagna, in scala 1:5000, redatta nel 1999 sulla base dei voli fotogrammetrici svolti a partire dal 1977
- Ortofoto ottenuta all'interno del progetto Agea 2011

Per quanto riguarda le elaborazioni dei dati, sono stati utilizzati i seguenti software:

- Agisoft Metashape
- VisualSFM
- ConvER3
- QuantumGIS
- CloudCompare

9) STRUMENTI UTILIZZATI PER IL RILIEVO

Per il rilievo della zona oggetto di studio sono stati impiegati, rispettivamente, le seguenti strumentazioni:

- Drone DJI Spark per lo scatto dei fotogrammi
- Ricevitore compatto TOPCON GRS-1 NRTK con antenna esterna PGA-1 per il rilievo dei punti fotogrammetrici d'appoggio.

Si riportano di seguito le caratteristiche tecniche nonché l'impegno economico dell'attrezzatura.

9.1) Drone DJI Spark



Figura 9.1: Il drone DJI Spark utilizzato per il rilievo – www.dji.com, 2019 [5]

Le caratteristiche, riportate direttamente dalla scheda tecnica, sono di seguito riassunte (www.dji.com):

Velivolo

Peso al decollo	< 300 g
Dimensioni	143 x 143 x 55 mm
Diagonale (eliche escluse)	170 mm
Massima velocità ascensionale	3 m/s in modalità Sport e in assenza di vento
Massima velocità di discesa	3 m/s in modalità Auto Landing (atterraggio automatico)
Velocità massima	50 km/h in modalità Sport e in assenza di vento
Quota massima di tangenza operativa sul livello del mare	4000 m
Autonomia di volo	16 minuti (a 20 km/h costanti e in assenza di vento)
Autonomia in volo stazionario	15 minuti (in assenza di vento)
Temperatura operativa	0° – 40° C
Sistemi di posizionamento satellitare	GPS / GLONASS
Accuratezza di stazionamento in volo	Verticale: ± 0,1 m
	Orizzontale: ± 0,3 m

Fotocamera

Sensore	1/2.3" (CMOS), pixel effettivi: 12 Mpixel
Obiettivo	FOV 81,9° 25 mm (35 mm equivalente) f/2.8
	Distanza di scatto: da 2 m a ∞
Intervallo ISO	Video: 100-3200
	Foto: 100-1600
Velocità dell'otturatore elettronico	2s -1/8000 s
Dimensione dell'immagine	3968×2976
Modalità fotografiche	Scatto singolo
	HDR
	Scatto a raffica: 3 fotogrammi
	Bracketing automatico dell'esposizione (AEB): 3 fotogrammi con esposizione variata a 0.7 EV bias
Risoluzione video	Full HD: 1920×1080 30p
Bit-rate massimo del video	24 Mbps
File system supportati	FAT32 (≤ 32 GB); exFAT (> 32 GB)
Formato foto	JPEG
Formato video	MP4/MOV (H.264/MPEG-4 AVC)
Temperatura operativa	0° – 40° C

Sistema di visione

Sistema di visione	In avanti
	Verso il basso
Ambiente operativo	Superfici definite, in condizioni di luce adeguata (lux > 15) e riflettività diffusa (>20 %)
Intervallo di velocità	≤36 km/h a 2 m di altezza
Intervallo di quota	0 – 8 m
Distanza operativa	0 – 30 m

Wi-Fi

Frequenza operativa	2,4 GHz / 5,8 GHz
Distanza massima di trasmissione	100 m (distanza), 50 m (altezza) (senza ostacoli e interferenze)

E', inoltre dotato di batteria di volo intelligente e relativo carica batteria, radiocomando e gimbal a 2 assi.

Quest'ultimo è un giunto cardanico (o un sistema di giunti) che permette la stabilizzazione di un oggetto su uno o più assi:

- In una configurazione senza gimbal la camera è agganciata in maniera solidale al corpo del drone, e ne segue quindi tutti i movimenti e le oscillazioni, a discapito ovviamente della stabilità delle immagini. Questa configurazione risulta preferibile nel caso di pilotaggio in prima persona (FPV, first person view), in quanto permette di avere feedback visivo diretto ed immediato delle manovre effettuate.
- Un gimbal a 2 assi stabilizza la camera e annulla, entro certi limiti, il "rumore" sugli assi X e Y, compensa cioè, limitatamente a questi 2 assi, sia le oscillazioni indesiderate dovute per esempio alle turbolenze e al vento, sia le rotazioni che si

generano naturalmente durante gli spostamenti destra-sinistra e avanti-dietro del drone, e cioè, rispettivamente, il roll ("rollio" sull'asse X) e il pitch ("beccheggio" sull'asse Y): per dirla in parole povere, nei nostri video l'orizzonte rimarrà sempre "in bolla" e alla stessa altezza, ma l'inquadratura sarà invece libera di "ballare" a destra e a sinistra;

Spesso in un gimbal, alla semplice funzione di stabilizzazione dell'immagine, sono affiancate funzioni di controllo remoto della rotazione della camera per mezzo di motori (in generale risulta controllabile il "tilt" della camera, cioè la rotazione su/giù attorno all'asse Y).

Gimbal

Intervallo di controllo	Inclinazione: da -85° a 0°
Stabilizzazione	Meccanica 2 assi (inclinazione, rollio)
Distanza di rilevamento ostacoli	0,2 - 5 m
Ambiente operativo	Superfici con riflettività diffusa ($>20\%$) e dimensioni superiori a 20x20 cm (muri, alberi, persone ecc.)

9.2) Ricevitore compatto TOPCON GRS-1 NRTK con antenna esterna PGA-1



Figura 9.2: TOPCON GRS-1 NRTK e relativo uso con antenna esterna PGA-1 – www.gpsworld.com; www.diemmstrumenti.it, 2019 [35]

Il GRS-1 di TOPCON è il primo sistema rover RTK completamente integrato doppia frequenza, doppia costellazione e abilitato per connessioni in rete.

Si tratta di un ricevitore GNSS palmare "all-in-one" e controller da campo dotato di modem GSM interno, processore ad alta velocità, fotocamera integrata, bussola e lettore di codici a barre. Si riportano le principali caratteristiche integrate nel sistema:

- slot per schede di memoria SD
- connettività wireless tramite WiFi, Bluetooth o dispositivo radio UHF opzionale

Il GRS-1 (Geodetic Rover System) è stato progettato con due obiettivi principali: dimensioni e peso più contenuti e costo inferiore alle aspettative.

Il GRS-1 integra tutta la potenza di un ricevitore completo GPS + GLONASS doppia frequenza, un modem cellulare ed un PC Windows, in un dispositivo molto piccolo ed estremamente versatile, adatto per tutte le applicazioni.

Il ricevitore è dotato di funzionalità DGPS con l'antenna interna L1 GPS e Glonass per GIS e navigazione e, aggiungendo l'antenna esterna PGA-1, si collega alla rete locale GNSS tramite il modem interno, ricevendo immediatamente su doppia frequenza, doppia costellazione GNSS RTK con precisione centimetrica.

Oltre alla configurazione rover per le reti, il GRS-1 è dotato anche di un modulo radio RH-1 opzionale per operare in modalità integrata con i ricevitori delle stazioni base Topcon GNSS già esistenti sul mercato.

In tal modo, il GRS-1 è in grado di funzionare in tutte le aree e i siti, anche quando la copertura GSM non è disponibile.

Il GRS-1 può essere collegato in modalità wireless al dispositivo Topcon BR-1 per il servizio di correzione laddove la rete non è presente, oppure, collegando un'antenna esterna con una semplice operazione, è possibile ottenere immediatamente una precisione centimetrica.

9.3) Targets per la materializzazione dei PFA

I punti rilevati dal ricevitore TOPCON sono stati materializzati attraverso dei target che presentano le seguenti caratteristiche:

- Diametro esterno $\phi = 50 \text{ cm}$
- Sono realizzati in compensato, ottimo per il trasporto di numerosi target grazie alla bassa densità
- Ogni target è individuato da un numero per il riconoscimento univoco in post-processing
- Foro centrale per il vincolamento a terra

Si riportano nella pagina successiva i targets nelle *Figure 9.3 e 9.4.*

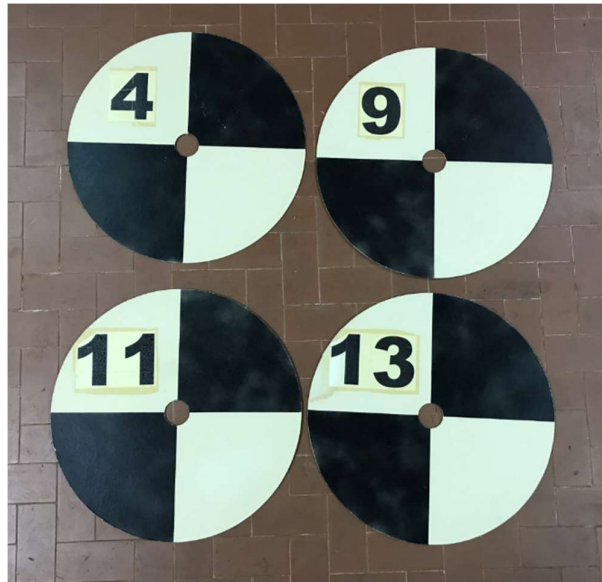


Figura 9.3: Targets di compensato impiegati



Figura 9.4: Target di compensato impiegato

10) PROCEDURA DI RILIEVO IN SITU

Il rilievo del tratto di costa di Lido Adriano è composto da due operazioni, svolte entrambe in data 24 Maggio 2019.

10.1) Rilievo della rete topografica in NRTK

La rete topografica atta alla determinazione delle coordinate dei punti fotogrammetrici d'appoggio è stata condotta con tecnica GNSS impiegando il ricevitore compatto TOPCON GRS-1 NRTK con antenna esterna PGA-1 in modalità NRTK.

Si rimanda al paragrafo 2.9.3 per la descrizione dei principi della tecnica.

Si riporta la rete adottata, costituita da 9 punti identificati da marker successivamente impiegati per il riconoscimento dei punti fotogrammetrici d'appoggio.

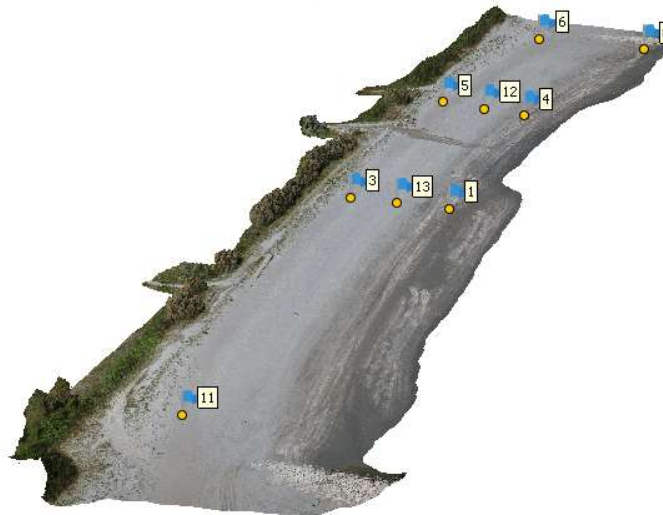


Figura 10.1: Distribuzione dei punti rilevati, sovrapposti all'ortofoto (si veda capitolo 12)

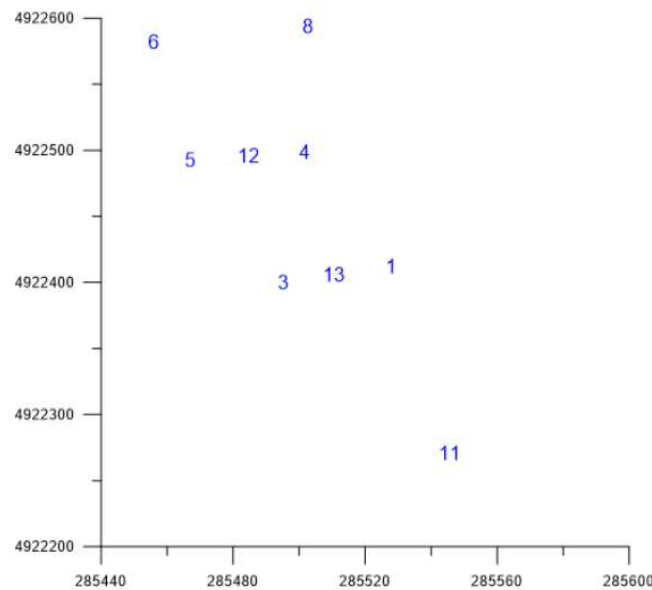


Figura 10.2: Distribuzione planimetrica dei punti rilevati, in coordinate ED50/UTM32N (EPSG 23032)

I punti sono inquadrati sia nel sistema di riferimento ETRS89 WGS84, datum ufficiale europeo istituito ufficialmente alla riunione del 1990 di EUREF a Firenze, che nella rappresentazione cartografica ED50/UTM32N (EPSG 23032).

Inizialmente la rete era composta da altri due punti, battezzati 7 e 10, che sono stati successivamente eliminati perché spostati durante il rilievo, quindi non più visibili nei fotogrammi.

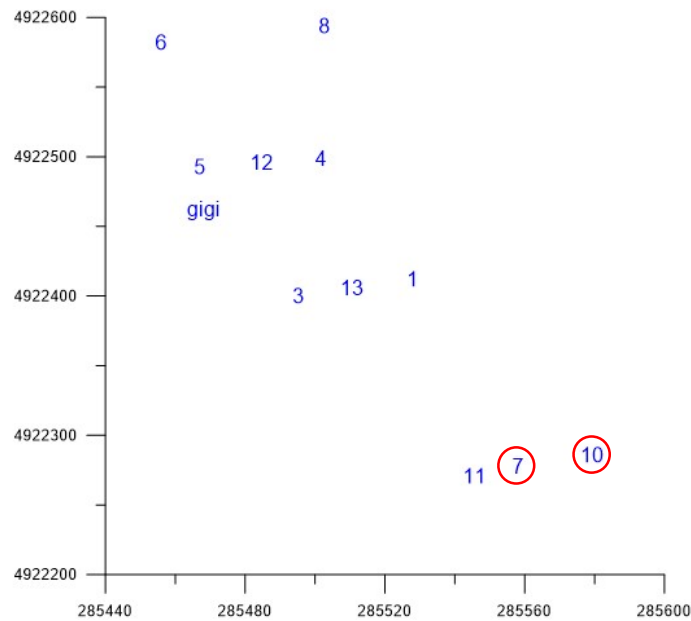


Figura 10.3: Distribuzione planimetrica dei punti rilevati, inclusi i punti 7 e 10 rimossi, in coordinate ED50/UTM32N (EPSG 23032)

Per quanto concerne la determinazione delle coordinate, si riporta direttamente il foglio riassuntivo dei valori ottenuti:

11	44°25'18,76123"N	12°18'21,611	4922261.857	285545.826	40.865	0.015	0.024
3	44°25'22,89343"N	12°18'19,140	4922391.156	285495.399	40.938	0.015	0.023
13	44°25'23,09467"N	12°18'19,825	4922396.867	285510.732	40.072	0.015	0.023
1	44°25'23,31692"N	12°18'20,600	4922403.16	285528.105	39.355	0.014	0.021
10	44°25'19,28139"N	12°18'23,105	4922276.819	285579.39	39.324	0.016	0.025
7	44°25'18,99818"N	12°18'22,160	4922268.768	285558.211	40.244	0.016	0.025
12	44°25'25,98191"N	12°18'18,524	4922486.901	285484.906	40.212	0.017	0.028
4	44°25'26,09557"N	12°18'19,282	4922489.856	285501.78	39.453	0.017	0.028
5	44°25'25,86170"N	12°18'17,728	4922483.772	285467.179	40.946	0.017	0.027
6	44°25'28,74357"N	12°18'17,097	4922573.152	285456.156	40.755	0.017	0.028
8	44°25'29,17349"N	12°18'19,186	4922584.896	285502.781	39.362	0.017	0.028

Tabella 10.1: Coordinate dei punti fotogrammetrici d'appoggio e relative precisioni

La tabella riporta rispettivamente:

- Prima colonna: codice identificativo di ogni PFA
- Seconda colonna: latitudine in gradi sessagesimali
- Terza colonna: longitudine in gradi sessagesimali

- Quarta colonna: distanza Nord dall'equatore nel sistema di riferimento UTM 32N
- Quinta colonna: distanza Est dal 9° meridiano nel sistema di riferimento UTM 32N
- Sesta colonna: quota ellissoidica (altezza rispetto all'ellissoide di riferimento) in metri
- Settima colonna: precisione delle misure orizzontali in metri
- Ottava colonna: precisione delle misure verticali in metri

10.2) Rilievo fotogrammetrico

I fotogrammi sono stati scattati col drone DJI Spark le cui caratteristiche tecniche sono riportate al paragrafo 9.1, interessando una porzione di $38.000 m^2$ ed uno sviluppo lineare di circa $400 m$.

Seguendo la tecnica della fotogrammetria aerea, si sono acquisite delle strisciate pseudo nadirali (che abbiano una determinata sovrapposizione) cercando di mantenere per ognuna di esse un'altezza costante e l'asse della camera il più possibile perpendicolare.

Per il rilievo fotogrammetrico è stata impiegata la fotocamera integrata nel drone che ospita un sensore CMOS da 1/2,3 pollici, che permette di scattare foto a 12 MegaPixel ad una risoluzione di 72 dpi e video a 1080p.

In particolare si riportano i parametri di progetto con cui è stato improntato il rilievo:

- Numero di pixel del sensore: $.3968 \times 2976$
- Dimensioni del sensore: $l_x = 6,17 mm$; $l_y = 4,56 mm$

Pertanto la dimensione del singolo pixel vale:

$$dim. pixel = \frac{n^\circ pixel lato}{lunghezza sensore} = \frac{3968 pixel}{6,17 mm} = \mathbf{1,56 \mu m} \quad (10.1)$$

Si determina il fattore di scala m_b come:

$$m_b = \frac{Z}{c} = \frac{distanza di presa}{focale} = \frac{45 m}{0,00449 m} \approx \mathbf{10.000} \quad (10.2)$$

Il fattore di scala della carta S_c che si può ottenere è assunto empiricamente come:

$$S_c = \frac{m_b}{4} = \mathbf{2.500} \quad (10.3)$$

A partire dalla distanza di presa, ossia la quota di volo pari a $45 m$, si calcola il Ground Sampling Distance (GSD), ovvero il valore metrico del singolo pixel nello spazio oggetto:

$$GSD = dim. pixel \times m_b = 1,56 \mu m \times 10.000 = \mathbf{1,55 cm} \quad (10.4)$$

Analogamente le dimensioni del singolo fotogramma nello spazio oggetto sono:

$$L_x = l_x \times m_b = \mathbf{61,70 m} \quad (10.5)$$

$$L_Y = l_y \times m_b = \mathbf{45,60\ m} \quad (10.6)$$

Si ipotizzano i ricoprimenti longitudinale e trasversale dei fotogrammi rispettivamente dell'80% e del 70%, in modo da definire la fotobase B e la distanza tra strisciate a , da rispettare poi in sede di esecuzione del rilievo:

$$B = L_Y \times (1 - 80\%) = \mathbf{9,12\ m} \quad (10.7)$$

$$a = L_X \times (1 - 70\%) = \mathbf{18,51\ m} \quad (10.8)$$

Dal modello sviluppato nel capitolo successivo, noto l'allineamento delle camere, è stato possibile ottenere il report finale di Agisoft Metashape dei parametri effettivi impiegati in situ, di seguito riportati.

Fattore di scala m_b come:

$$m_b = \frac{Z}{c} = \frac{\text{distanza di presa}}{\text{focale}} = \frac{53,1\ m}{0,00449\ m} = \mathbf{11.826} \quad (10.9)$$

Il fattore di scala della carta S_c che si può ottenere è assunto empiricamente come:

$$S_c = \frac{m_b}{4} = \mathbf{2.957} \quad (10.10)$$

A partire dalla distanza di presa, ossia la quota di volo pari a 45 m, si calcola il Ground Sampling Distance (GSD), ovvero il valore metrico del singolo pixel nello spazio oggetto:

$$GSD = \text{dim. pixel} \times m_b = 1,56\ \mu\text{m} \times 11.826 = \mathbf{1,84\ cm} \quad (10.11)$$

Analogamente le dimensioni del singolo fotogramma nello spazio oggetto sono:

$$L_X = l_x \times m_b = \mathbf{72,97\ m} \quad (10.12)$$

$$L_Y = l_y \times m_b = \mathbf{53,93\ m} \quad (10.13)$$

Avendo usato un ricoprimento longitudinale e trasversale dei fotogrammi rispettivamente dell'80% e del 70%, in modo da definire la fotobase B e la distanza tra strisciate a , da rispettare poi in sede di esecuzione del rilievo:

$$B = L_Y \times (1 - 80\%) = \mathbf{14,59\ m} \quad (10.14)$$

$$a = L_X \times (1 - 70\%) = \mathbf{16,18\ m} \quad (10.15)$$

Si mostra la posizione degli scatti nello spazio nella *Figura 10.4*.

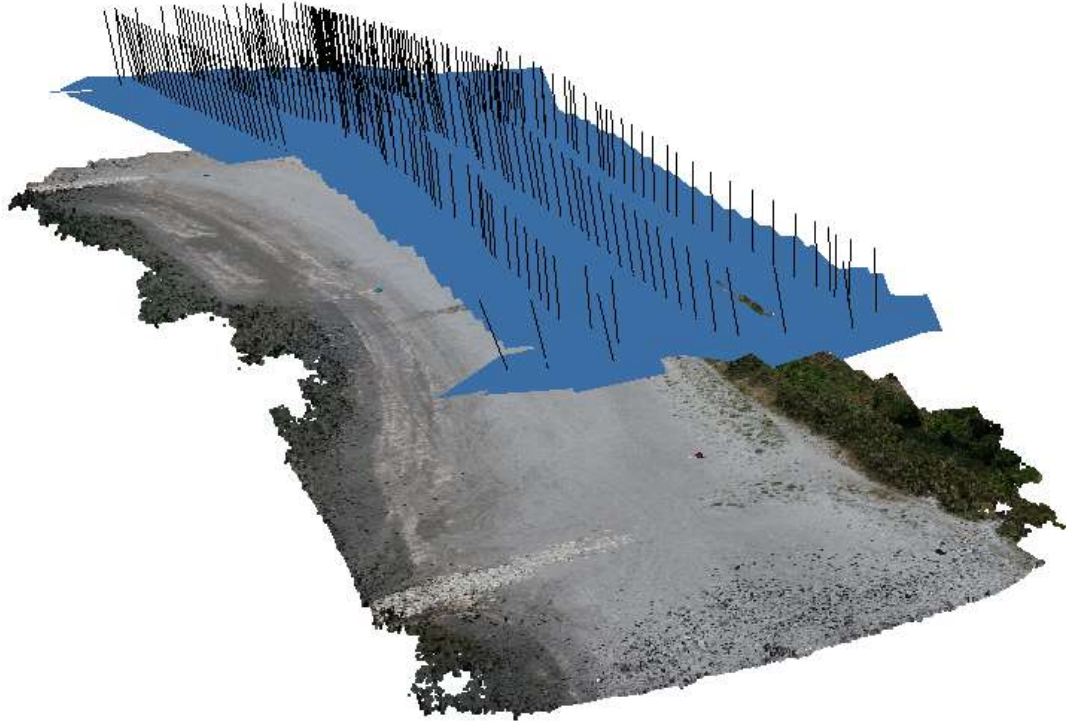


Figura 10.4: Posizione delle camere nel modello senza impiego PFA

Si riportano due ulteriori viste, che mostrano sia il percorso in pianta che la quota effettiva di volo di 45 metri, che non comporta variazioni significative in termini di risoluzione delle immagini.

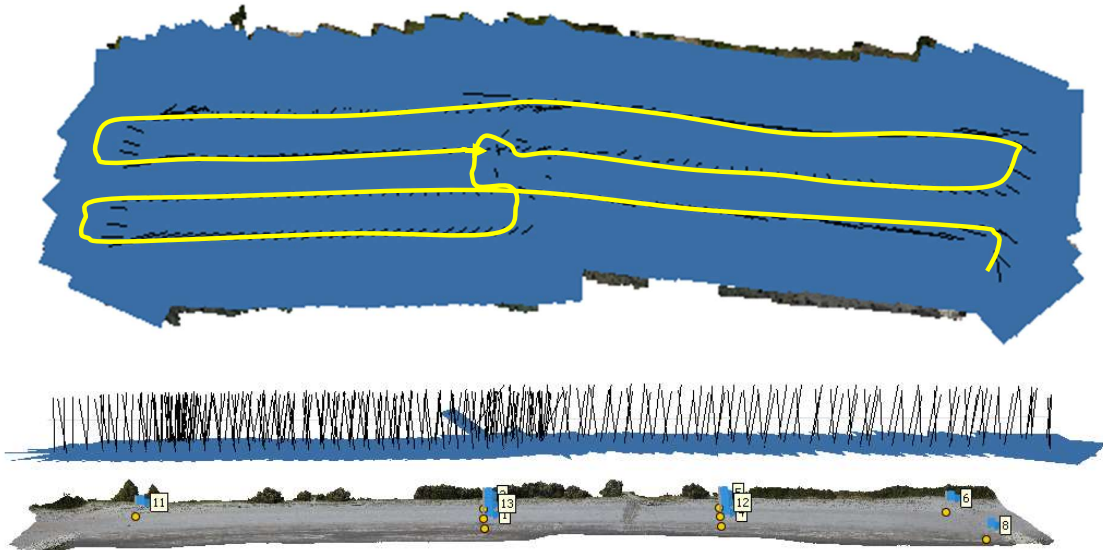


Figura 10.5: Percorso del drone e quota rispetto al terreno, in pianta e in prospettiva

Si riporta in *Tabella 10.2* una sintesi dei parametri impiegati.

Sintesi del report di Metashape	
Modello camera	FC1102
Risoluzione [pixel]	3968 x 2976
Dimensione del sensore [mm]	6,17 x 4,56
Lunghezza focale [mm]	4,49
Dimensione pixel [μm]	1,56
N° immagini	296
Altezza relativa di volo [m]	53,1
Scala media del fotogramma	11.826
GSD [cm/pixel]	1,84
Side overlap [m]	16,18
Fotobase [m]	14,59
N° PFA	9

Tabella 10.2: Sintesi dei parametri impiegati

11) ELABORAZIONE DI PRODOTTI A VALENZA METRICA

Si espongono nel presente capitolo i programmi e le metodologie adottate per ottenere modelli a valenza metrica caratterizzati da precisioni centimetriche, descrivendone le relative tempistiche di elaborazione e le caratteristiche a confronto.

Per le successive elaborazioni, è stata impiegata una workstation assemblata ad hoc, le cui caratteristiche salienti sono:

- Processore: Intel CORE i7-7820x3,6 GHz
- Scheda video: Nvidia GeForce GTX 1080 Ti
- RAM: 128 Gb

11.1) Elaborazione in VisualSfM

Inizialmente si è pensato di poter utilizzare VisualSfM, un software progettato da Changchang Wu che, contrariamente a Metashape, è opensource.

Il programma è costituito da una interfaccia grafica strutturata in algoritmi di Structure from Motion (SfM), descritti nel paragrafo 1.4, ed è caratterizzato dall'aver una efficace interfaccia grafica ma, per contro, una parametrizzazione alquanto complessa.

VisualSfM utilizza un estrattore di features chiamato SIFTGPU e un algoritmo di Bundle Adjustment Multicore, integrando gli algoritmi sviluppati da Furukawa PMVS2 (Furukawa, Ponce, 2010) e CMVS (Furukawa et. al, 2010) per il calcolo della ricostruzione della nuvola densa attraverso la scomposizione del problema in cluster ragionati.

L'algoritmo CMVS, acronimo di Clustering Views for Multi-view Stereo, prende il prodotto di un software SfM come input, e ne scompone le immagini in blocchi di dimensioni gestibili. Questo tipo di software MVS può essere usato per processare ogni cluster in modo indipendente ma parallelamente, e in modo tale che non avvenga la perdita di dati ottenibile dall'intero set di immagini. Questo software è accoppiato all'algoritmo PMVS2, acronimo di Patch-based Multi-View Stereo versione 2, che è il vero e proprio dense matcher.

L'interfaccia del programma è molto intuitiva e, una volta importato il dataset di fotogrammi, si sono seguiti i pochi semplici passaggi di seguito elencati:



Figura 9.1: Workflow di VisualSfM

1) Loading images:

Dopo aver aperto un nuovo progetto in VSfM si sono caricate le immagini. Le foto devono essere realizzate con tipologia di presa il più possibile normale (in questo caso nadirale), con assi paralleli tra loro. In generale è opportuno che le strisciate di fotogrammi analizzati non abbiano assi della camera ortogonali tra loro, altrimenti occorre suddividere il processo. L'operazione, per il dataset utilizzato che risulta composta da 296 fotogrammi, richiede 1 minuto e 30 secondi

2) Compute missing image matches:

Il programma ha eseguito l'elaborazione dei SIFT (Scale Invariant Feature Transform) per il calcolo dei punti omologhi tra le immagini. Questa operazione richiede, a seconda del numero delle immagini e della risoluzione utilizzata, un tempo di calcolo non indifferente.

Infatti il tempo di elaborazione è risultato di 255 minuti (4 ore e 15 minuti)

3) Compute the 3D sparse reconstruction:

Il passaggio successivo è stato quello di ottenere una sparse reconstruction, ossia una nuvola ottenuta attraverso la ricostruzione, nello spazio oggetto, dei punti individuati dal sistema per il calcolo delle features necessarie alla risoluzione del problema dell'orientamento interno ed esterno. Durante l'elaborazione il sistema ha visualizzato in tempo reale i risultati della ricostruzione della posizione delle camere fotografiche nello spazio e i relativi punti che sono stati generati. Questa prima ricostruzione è risultata affetta da una serie di errori che sono stati corretti mediante l'algoritmo matematico di Bundle Adjustment che raffina il calcolo eliminando i punti sbagliati. Questa operazione ha richiesto un periodo di calcolo di 14 minuti e 40 secondi.

Si è ottenuta la nuvola sparsa di *Figura 11.2*, in cui si riportano anche i centri di presa delle camere e la posizione dei fotogrammi nello spazio.

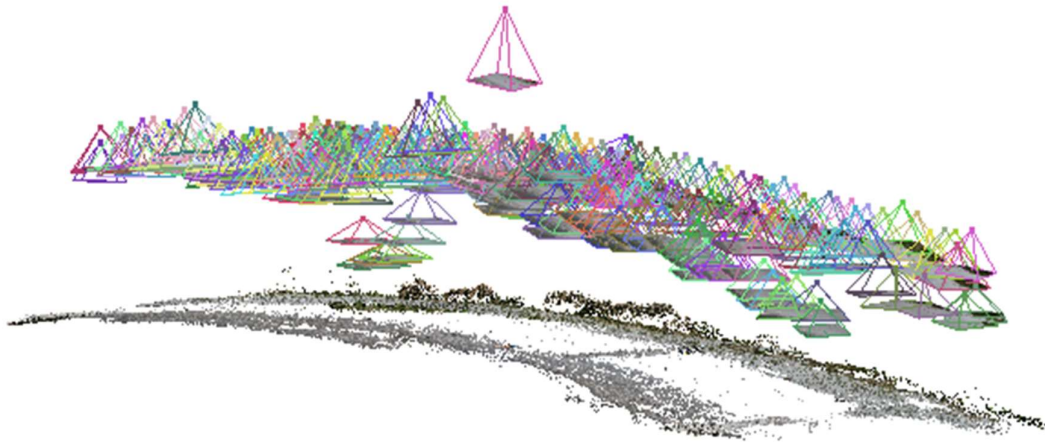


Figura 11.2: Nuvola sparsa ottenuta in VisualSfM

Conclusi questi step, è stato possibile continuare:



Figura 11.3: Workflow di VisualSfM

4) Compute the dense reconstruction:

La ricostruzione ottenuta è stata densificata lanciando gli algoritmi CMVS/PMVS2 di Furukawa che scompongono il problema in sotto-cluster e lo ricompongono in un unico file in formato .ply (Polygon File Format, formato di file, testuale o binario, per la definizione di oggetti 3D) evitando di appesantire le risorse hardware a disposizione.

Il tempo di elaborazione è risultato di 80 minuti (1 ora e 20 minuti)

Si riporta in *Figura 11.4* il modello ottenuto.



Figura 11.4: Nuvola densa ottenuta in VisualSfM

Si è evidenziata la scarsa qualità del prodotto ottenuto, che presenta numerose aree mancanti che esprimono la bassa densità di punti rispetto ai modelli ottenuti con Metashape.

Si è osservato che, comunque, si potrebbe procedere a trattare la nuvola di punti con comuni programmi di analisi di dati tridimensionali, per risolvere problemi di interpolazione, filtraggio, e realizzare lo studio geometrico del modello tridimensionale ottenuto.

Tra questi programmi esistenti in commercio, si riporta CloudCompare, software di tipo open source largamente impiegato anche in ambiente scientifico. Inserendo il progetto in formato .ply (Python Lex-Yacc), si può ricavare un modello 3D e poterne effettuare profili e sezioni.

Osservando la nuvola generata da VisualSFM, però, il software sfortunatamente non è riuscito a ricostruire ed identificare punti caratteristici in ampie porzioni. CloudCompare, come altri software, è in grado di ricostruire le aree mancanti che risulterebbero fittizie e quindi non corrispondenti allo stato di fatto, soprattutto relativamente alle precisioni centimetriche che si vogliono ottenere.

Sarebbe stato possibile ottimizzare il risultato introducendo i marker, in ciascun fotogramma, sui PFA. Tale operazione, in VisualSFM, sarebbe stata completamente manuale e quindi affetta da errori, in quanto, per la risoluzione del dataset fornito, non è possibile leggere univocamente i numeri sopra i target, come da *Figura 11.5*. Si adotta quindi Metashape anche per questa ragione, poiché dopo il primo allineamento degli scatti e l'introduzione (in una singola foto) del primo marker per ogni PFA, consente un posizionamento automatico approssimativo di ogni marker su ciascuna foto.



Figura 11.5: La risoluzione del dataset non permette di distinguere il numero del marker

Oltre alle aree omesse, si fa notare visivamente che l'intero modello di VisualSFM è caratterizzato da una curvatura innaturale e troppo accentuata, non corrispondente alla realtà, come si può evincere nel paragrafo 12.3.



Figura 11.6: Curvatura della nuvola densa ottenuta in VisualSFM

Da quanto osservato e sperimentato da questa analisi, si sono analizzati i vantaggi e gli svantaggi del programma.

Il tempo complessivo di calcolo, fino alla costruzione della nuvola densa, è risultato di 350 minuti (5 ore e 50 minuti). Tale tempistica è inadeguata, se si tiene in considerazione della qualità abbastanza bassa del risultato.

Pertanto, in generale, la sequenza delle operazioni è relativamente semplice poiché il software si presta bene alle applicazioni amatoriali.

Si imputa quindi il matching approssimativo ed inesatto al numero molto elevato di fotogrammi.

Occorre pertanto **avvalersi di un software più performante** per ricavare i risultati prefissati.

11.2) Elaborazione in Agisoft Metashape

Questo programma commerciale, prodotto da Agisoft LLC, utilizzato ampiamente a livello interdisciplinare, consente di generare ortofoto georeferenziate ad alta risoluzione e DEM (Digital Elevation Model) molto dettagliati, attraverso la ricostruzione con mesh poligonali fornite di texture. Il flusso di lavoro, completamente automatizzato, consente di generare prodotti fotogrammetrici di classe professionale, esaminando anche migliaia di immagini, ottenendo le precisioni centimetriche richieste dall'obiettivo di questa tesi.

Agisoft Metashape supporta numerosi formati di input dei fotogrammi tra cui JPEG, TIFF, PNG e formati output come GeoTiff, Wavefront OBJ, PDF, ai fini di importare i modelli e gli altri prodotti in qualsiasi sistema GIS per l'analisi fotogrammetrica.

Le caratteristiche principali di Metashape sono:

- Triangolazione fotogrammetrica: processamento di dataset sia aerei (nadirali ed oblique) che in close range
- Generazione di modelli tridimensionali corredati di texture: in particolare di terreni, siti archeologici, edifici, artefatti, persone

- Importazione di Punti Fotogrammetrici di Appoggio: per garantire un monitoraggio ad alta accuratezza, nel sistema di riferimento scelto
- Generazione di modelli DEM georeferenziati
- Generazione di ortofoto georeferenziate
- Misura di distanze, aree e volumi

Si illustrano nei seguenti paragrafi gli step di lavoro seguiti.

11.2.1) Operazioni preliminari al processing delle immagini

Innanzitutto si sono caricati i fotogrammi, 296 in tutto, ad esclusione di tre scatti non nadirali, attraverso il comando *Add Photos*.



Figura 11.7: Fotogrammi esclusi a priori dal dataset

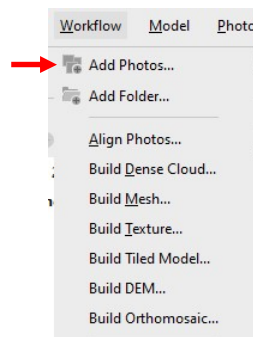


Figura 11.8: Primo step del workflow

Prima di continuare con i passaggi successivi, nel Photo Panel presente nella barra di comando inferiore sono state analizzate le caratteristiche delle singole foto: nome, dimensioni, focale, modello della fotocamera, informazioni relative all'acquisizione (ISO, tempo di scatto, apertura del diaframma), *image quality* e *patch* dell'immagine.

L'*image quality* è un valore che indica la qualità dell'immagine e **varia tra 0 ed 1**.

In generale è consigliabile scartare tutte le fotografie con valore minore a 0,5 (sempre valutando la ridondanza di informazioni, a rischio di perderne) ma poiché nel progetto di Lido Adriano presentavano tutte un'elevata qualità, per perfezionare l'allineamento si sono escluse quelle con valore minore di 0,75.

Label	Size	Aligned	Quality	Date & time	Make	Model	Focal length	F-stop	ISO	Shutter
DJI_0514	3968x2976	✓	0.870474	2019:05:24 11:55...	DJI	FC1102	4.49	F/2.6	101	1/2000
DJI_0515	3968x2976	✓	0.861071	2019:05:24 11:55...	DJI	FC1102	4.49	F/2.6	101	1/1600
DJI_0516	3968x2976	✓	0.862936	2019:05:24 11:55...	DJI	FC1102	4.49	F/2.6	101	1/1600
DJI_0517	3968x2976	✓	0.873558	2019:05:24 11:55...	DJI	FC1102	4.49	F/2.6	101	1/1600
DJI_0518	3968x2976	✓	0.867984	2019:05:24 11:55...	DJI	FC1102	4.49	F/2.6	101	1/1600
DJI_0519	3968x2976	✓	0.864259	2019:05:24 11:55...	DJI	FC1102	4.49	F/2.6	101	1/1600
DJI_0520	3968x2976	✓	0.866854	2019:05:24 11:55...	DJI	FC1102	4.49	F/2.6	101	1/1600
DJI_0521	3968x2976	✓	0.873325	2019:05:24 11:55...	DJI	FC1102	4.49	F/2.6	101	1/1600
DJI_0522	3968x2976	✓	0.868762	2019:05:24 11:55...	DJI	FC1102	4.49	F/2.6	101	1/1600
DJI_0523	3968x2976	✓	0.873128	2019:05:24 11:55...	DJI	FC1102	4.49	F/2.6	101	1/1600
DJI_0524	3968x2976	✓	0.876047	2019:05:24 11:55...	DJI	FC1102	4.49	F/2.6	101	1/1600

Figura 11.9: Photo Panel con informazioni dei fotogrammi

Nel progetto non sono state impiegate maschere: la loro applicazione consiste nell'identificare e selezionare una porzione dell'immagine, escludendone il resto dalle successive fasi di processing. Non sono state applicate poiché risulta interessante, ai fini del monitoraggio, includere sia la porzione di verde retrostante la spiaggia vera e propria che una porzione di mare per delimitare, successivamente, la linea di riva.

11.2.2) Primo allineamento delle immagini

Per sperimentare il miglior bilanciamento tra precisioni raggiunte e velocità del rilievo, sono stati generati tre distinti modelli, partendo innanzitutto da un primo allineamento comune.

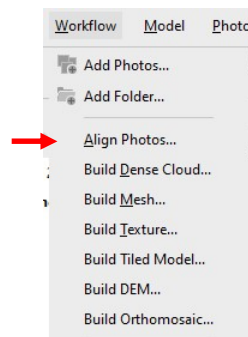


Figura 11.10: Secondo step del workflow

L'allineamento serve a posizionare correttamente le immagini le une rispetto alle altre o, se sono già geolocalizzate, a calcolarne l'esatta posizione nello spazio oggetto.

Nel caso di impiego di droni, come in questo caso, le immagini sono caratterizzate al momento dello scatto dal posizionamento satellitare che viene definito nel sistema di riferimento satellitare WGS84 (in particolare nella forma ETRS89).

Questa informazione, contenuta nell'EXIF file di metadati, presentava un grado di precisione minore rispetto a quello che si voleva ottenere (dell'ordine della decina di metri). Si è preferito, quindi, non prendere in considerazione i metadati.

Le uniche caratteristiche che si sono mantenute dei fotogrammi sono il modello ed i settaggi della fotocamera, la lunghezza focale e le dimensioni del sensore.

Per il matching fra immagini, su ciascuna di queste, ha lavorato un **algoritmo** di *features detection* (*Scale Invariant Features Transform* o similari) che ha permesso di **identificare punti notevoli e caratteristici**.

Un punto notevole, o *descriptor* (descrittore), per essere tale, deve essere **stabile**, rimanere **identificabile** e **distinguibile al variare della scala di acquisizione, direzione di presa e condizioni di illuminazione**.

Si è osservato che gli algoritmi di *features detection* sono il vero punto innovativo e chiave delle *SfM* e permettono di identificare in modo automatico migliaia di descrittori per ogni immagine, che costituiscono i punti di legame.

Per ogni immagine è stato salvato un database contenente tutti i descrittori trovati. Ogni descrittore è univoco poiché caratterizzato dal comportamento radiometrico dell'immagine (e quindi della scena reale) nel suo intorno. I descrittori delle varie immagini sono stati confrontati tra loro e quelli omologhi sono risultati un legame tra le immagini, permettendone il posizionamento reciproco. Nel programma sono facilmente visibili le analogie tra coppie di immagini, con linee che rappresentano i *matches*: in blu se corretti e in rosso se errati, come da *Figura 11.11*.

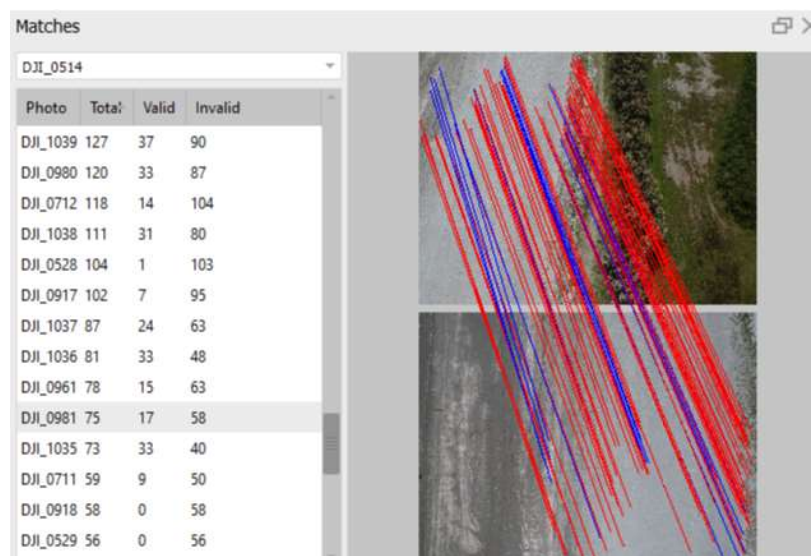


Figura 11.11: Esempio di matching tra una coppia di fotogrammi del dataset

La trattazione delle equazioni di collinearità alla base del processo fotogrammetrico, che consentono di passare dallo spazio bidimensionale dei fotogrammi a quello tridimensionale dell'oggetto e viceversa, è contenuta nel paragrafo 2.1.

La descrizione della fotogrammetria digitale e delle tecniche di image matching, è contenuta nel paragrafo 2.2.

Le fasi descritte si riassumono nel comando *Align Photo* di Metashape, in cui si sono settati i parametri in *Figura 11.12*.

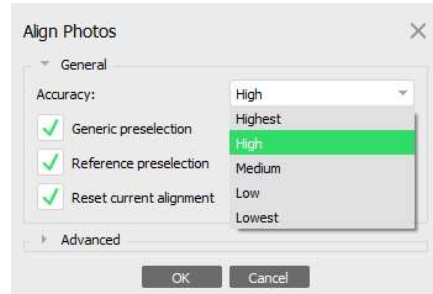


Figura 11.12: Finestra dei setting di allineamento

Accuracy è l'accuratezza nella stima della posizione delle camere e ricostruzione: da *low* ad *highest* si aumentano i tempi richiesti dal processing perché aumenta la risoluzione delle immagini analizzate. Questa voce fa riferimento alle dimensioni delle immagini in cui ricercare i descrittori:

- High: immagini a scala originale
- Highest: immagini a scala aumentata di un fattore pari a 4 (2 per lato)
- Medium: immagini a scala ridotta di un fattore pari a 4
- Low: immagini a scala ridotta di un fattore pari a 16 (4 per lato).

Per quanto concerne le impostazioni più avanzate, si sono mantenuti i settaggi standard di Metashape relativi ai *keypoint limit* e *tie point limit*: rispettivamente sono i limiti della numerosità di punti notevoli da identificare in ciascuna immagine e sui punti di legame da usare nell'allineamento. Sostanzialmente in ciascuna foto il software, di default, riconosce al massimo 10.000 possibili punti, impiegando i migliori 4.000 per il matching con l'altro fotogramma.

Avviando il processo, il sistema di equazioni è stato risolto nel bundle adjustment, dove si sono ottimizzate le soluzioni ottenute. In output si sono ottenuti:

- **Posizione e assetto delle fotocamere**
- Parametri di **calibrazione e distorsione della camera**
- **Nuvola sparsa**, ovvero le coordinate 3D dei punti di legame

Gli output sono stati restituiti nel sistema di riferimento delle immagini importate, che sono geolocalizzate nel sistema di riferimento ETRS89.

Si riporta in *Figura 11.13* la nuvola ottenuta, confrontata con quella ricavata in VisualSFM:

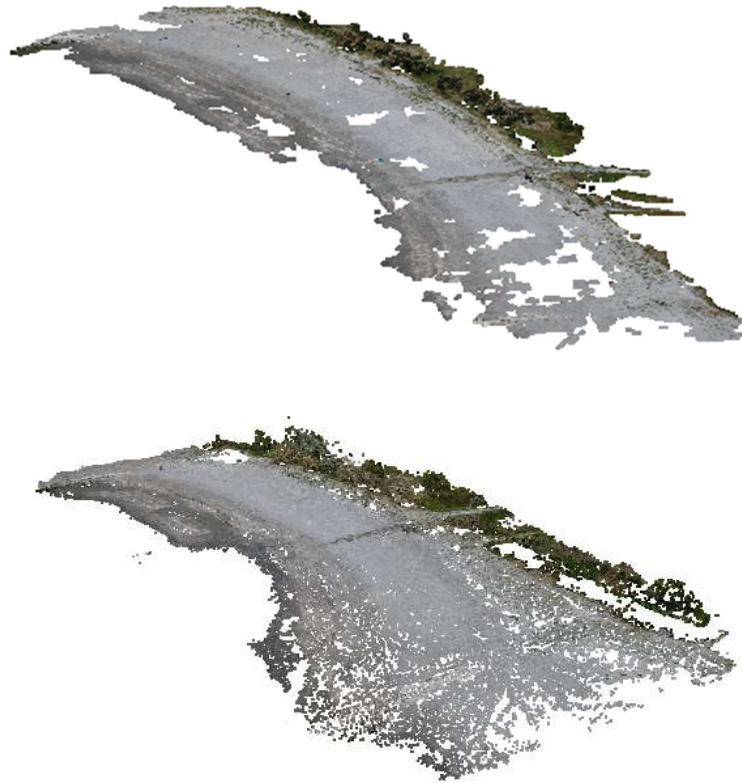


Figura 11.13: In alto la nuvola sparsa ricavata da VisualSFM, sotto la nuvola sparsa di partenza ricavata in Metashape

Si è potuto notare come la nuvola sparsa sia più ricca di punti di legame nelle aree, mentre VisualSFM (Figura 11.2) non era riuscito a trovare sufficienti matching: per lo stesso dataset, Metashape ha individuato 138.572 punti, al contrario di VisualSFM che ne aveva individuati solamente 87.364 punti.

Prima di procedere con i successivi step, è stata condotta un'analisi sulle fotografie, scartando quelle che non sono risultate allineate e quelle che presentavano un errore significativo in termini di pixel, maggiore di 2,20: nonostante presentassero un buon indice di qualità, ad una seconda analisi queste immagini sono risultate infatti più sfocate e mosse delle altre.



Figura 11.14: Fotogrammi scartati dal dataset

Per migliorare il risultato ottenuto, si è proceduto all'ottimizzazione dei parametri delle camere allineate.

Questo processo, realizzato con il comando *Optimize Camera Alignment*, ha permesso di raffinare ulteriormente i parametri stimati ed in particolare:

- f lunghezza focale (pix)
- cx, cy coordinate del punto principale (pix)
- $b1, b2$ coefficienti di skew tra asse x e y ($adim$)
- $k1, k2, k3, k4$ coefficienti di distorsione radiale ($adim$)
- $p1, p2, p3, p4$ coefficienti di distorsione tangenziale ($adim$)

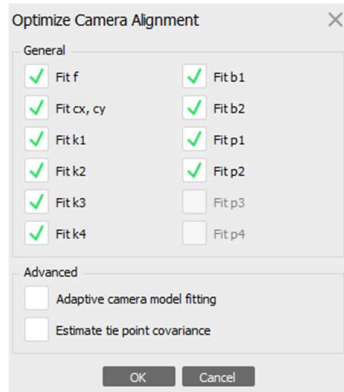


Figura 11.15: Schermata di ottimizzazione dei parametri delle camere

Nelle Figure 11.16 e 11.17, si riportano a confronto i valori iniziali di default, provenienti dall'EXIF file, e quelli finali dopo l'allineamento e la successiva ottimizzazione.

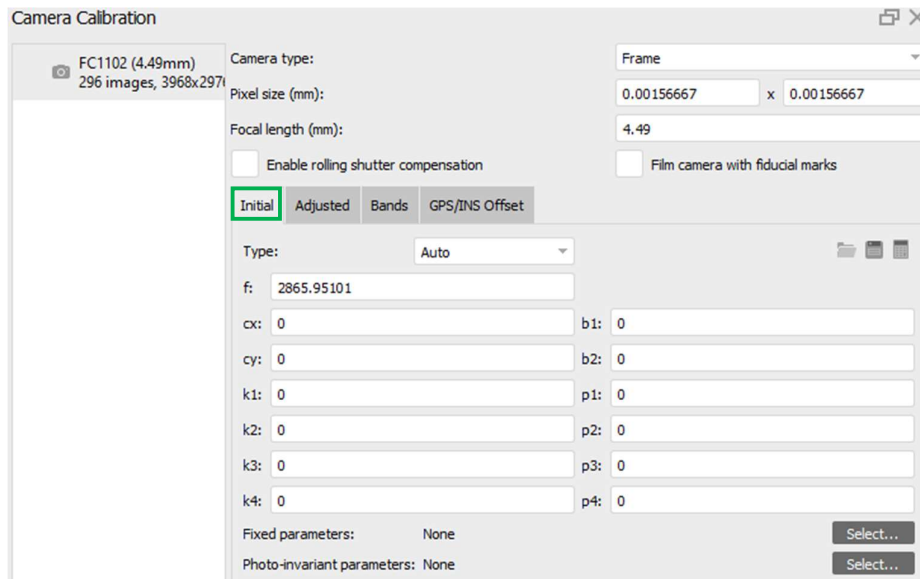


Figura 11.16: Parametri interni iniziali delle camere

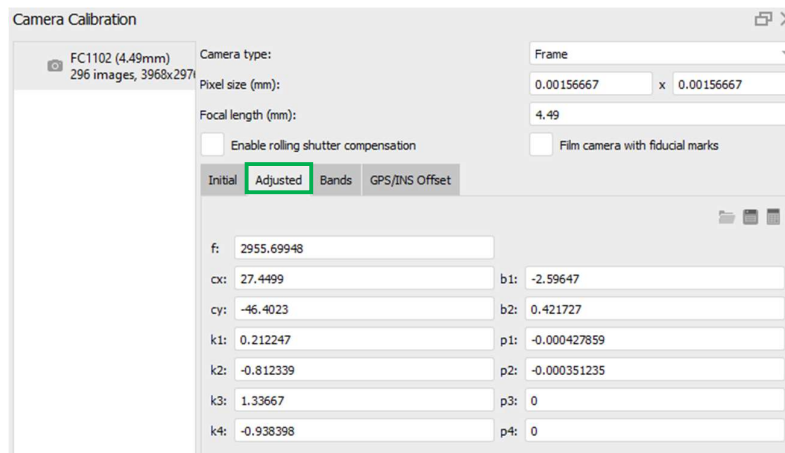


Figura 11.17: Parametri interni finali delle camere

Da questo punto sono stati presi in esame tre modelli, differenziati dal tempo di lavoro richiesto:

- Modello senza Punti Fotogrammetrici d'Appoggio
- Modello con 4 Punti Fotogrammetrici d'Appoggio
- Modello con 9 Punti Fotogrammetrici d'Appoggio

11.2.3) Modello senza PFA

Un primo modello è stato generato senza prendere in considerazione i dati provenienti dalla campagna di misurazione con il ricevitore compatto TOPCON GRS-1 NRTK: naturalmente, si è considerato che il rilievo in campagna richiede delle tempistiche non trascurabili e può quindi risultare interessante determinare la precisione raggiunta dall' algoritmo senza introdurre le coordinate dei marker.

Pertanto, necessariamente, sono state utilizzate le coordinate dei fotogrammi per inquadrare il progetto nel sistema di riferimento ETRS89, reincludendole in un secondo allineamento, che è risultato più veloce del primo. Si riportano in sintesi i passaggi seguiti, seguendo il workflow del programma, illustrati di seguito:

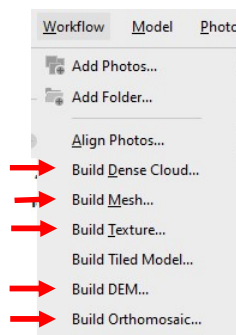


Figura 11.18: Successivi step del workflow

1) *Build Dense Cloud*: è stata ricostruita una nuvola di punti molto più densa rispetto a quella sparsa, a partire da questa, con una densità di punti simile all'acquisizione con LIDAR (Light Detection And Ranging), una tecnica di telerilevamento che permette di determinare la distanza di un oggetto utilizzando un impulso laser. Questa nuvola di punti è risultata fondamentale per definire accuratamente il modello, poiché i punti costituiscono i vertici degli elementi che definiscono una mesh continua.

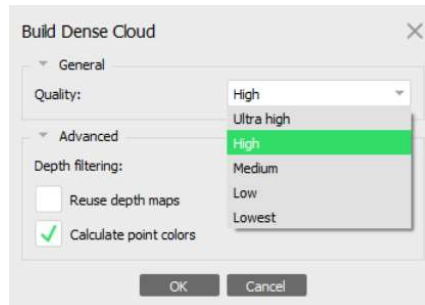


Figura 11.19: Finestra dei setting della nuvola densa

Quality è il parametro che specifica la qualità della nuvola: da *low* ad *highest* si aumentano i tempi richiesti dal *processing* perché aumenta la risoluzione delle immagini analizzate. Questa voce fa riferimento alle dimensioni delle immagini in cui ricercare i punti caratteristici:

- High: immagini a scala originale
- Highest: immagini a scala aumentata di un fattore pari a 4 (2 per lato)
- Medium: immagini a scala ridotta di un fattore pari a 4
- Low: immagini a scala ridotta di un fattore pari a 16 (4 per lato)

Depth filtering è il comando che ha permesso di eliminare in automatico e preventivamente alcuni outliers, ovvero punti che il software genera casualmente che non sono appartenenti all'oggetto da rappresentare. Nel caso del rilievo in esame, essendo una porzione di spiaggia che non presenta dettagli estremamente piccoli di significato rilevante, come potrebbe, invece, accadere per un sito archeologico o un monumento, si è adottato un filtraggio *Aggressive*, raccomandato per il processamento di dataset aerei. Si riporta, nella pagina successiva, la nuvola densa in *Figura 11.20*.



Figura 11.20: Nuvola densa, con e senza posizione degli scatti, senza impiego di PFA

Una volta ottenuta la nuvola, è risultato fondamentale pulirla dagli outliers. Nell'ottica, però, di ottenere il più velocemente possibile i prodotti finali (mesh, DEM e ortofoto), la pulizia è stata condotta solo sugli outliers più evidenti, contrariamente a quella molto più accurata eseguita, invece, per gli altri due modelli.

2) *Build Mesh*: il comando ha permesso di passare al vero e proprio modello tridimensionale, partendo dalla nuvola sparsa o da quella densa. Per una maggiore precisione, è stata scelta la nuvola densa come input. La mesh ottenuta è costituita da una maglia più o meno regolare (a seconda della regolarità della nuvola di partenza) di elementi triangolari e quadrangolari, che definiscono la superficie dell'oggetto.

3) *Build Texture*: il comando ha permesso di determinare con maggiore accuratezza il colore della mesh, estraendo direttamente il contenuto radiometrico delle fotografie.

Per questa tesi sono stati mantenuti inalterati i settaggi di default.

Si riporta la mesh texturizzata in *Figura 11.21*.



Figura 11.21: Mesh texturizzata, senza impiego di PFA

4) *Build DEM*: il DEM (Digital Elevation Model) rappresenta la superficie del modello come una maglia regolare di valori altimetrici. Per la presente tesi è stato rasterizzato direttamente dalla mesh.

Prima di produrlo, il software ha richiesto il sistema di riferimento, in modo tale da esportare il prodotto in ambiente GIS al fine di interfacciarlo in ultimo con i prodotti cartografici della Regione Emilia-Romagna. Si è scelto pertanto il sistema ETRS89.

5) *Build Orthomosaic*: l'ortomosaico è l'ortofoto ad alta risoluzione del modello, caratterizzato quindi da una scala di rappresentazione uniforme, al contrario di un singolo fotogramma. L'ortofoto, avendo valenza metrica, può quindi essere usata a tutti gli effetti come carta geografica.

Considerazioni sulla qualità dei DEM e degli ortomosaici sono state sviluppate nel capitolo successivo.

Sfortunatamente da una prima analisi visiva del modello si è notato come, nonostante l'ottimizzazione dell'allineamento delle camere, presenti una curvatura accentuata.

E' stato fondamentale introdurre un numero minimo di PFA a cui vincolare il modello.

Le tempistiche elaborate dal software nel caso senza PFA sono state raccolte e confrontate con le altre nel paragrafo 11.2.6.

11.2.4) Modello con 4 PFA (report di Metashape nel paragrafo 10.2)

Il primo allineamento, comune a ciascun modello, è indispensabile per posizionare sui fotogrammi i marker corrispondenti ai punti rilevati con il ricevitore TOPCON GRS-1 NRTK con antenna esterna PGA-1.

I punti sono stati rilevati prima del volo del drone e pre-segnalizzati attraverso dei target di compensato numerati, su cui viene fatta stazione con lo strumento.



Figura 11.22: Materializzazione dei PFA

E' occorso convertire i valori di longitudine e latitudine in un formato leggibile dal software: si è trasformato da gradi sessagesimali a sessadecimali come riportato in *Tabella 11.1*.

Per importare le coordinate e le relative precisioni, le informazioni sono state memorizzate ed importate in un file di testo.

PFA	Gradi sessagesimali		Gradi sessadecimali		Quota ellissoidica
11	44°25'18,76123" N	12°18'21,611" E	44°,42188 N	12°,30600 E	40,865 m
3	44°25'22,89343" N	12°18'19,140" E	44°,42303 N	12°,30532 E	40,938 m
13	44°25'23,09467" N	12°18'19,825" E	44°,42308 N	12°,30551 E	40,072 m
1	44°25'23,31692" N	12°18'20,600" E	44°,42314 N	12°,30572 E	39,355 m
12	44°25'25,98191" N	12°18'18,524" E	44°,42388 N	12°,30515 E	40,212 m
4	44°25'26,09557" N	12°18'19,282" E	44°,42392 N	12°,30536 E	39,453 m
5	44°25'25,86170" N	12°18'17,728" E	44°,42385 N	12°,30492 E	40,946 m
6	44°25'28,74357" N	12°18'17,097" E	44°,42465 N	12°,30475 E	40,755 m
8	44°25'29,17349" N	12°18'19,186" E	44°,42477 N	12°,30533 E	39,362 m

Tabella 11.1: Conversione dei valori di latitudine e longitudine

1	44.42314	12.30572	39.355	0.014	0.021
3	44.42303	12.30532	40.938	0.015	0.023
4	44.42392	12.30536	39.453	0.017	0.028
5	44.42385	12.30492	40.946	0.017	0.027
6	44.42465	12.30475	40.755	0.017	0.028
8	44.42477	12.30533	39.362	0.017	0.028
11	44.42188	12.30600	40.865	0.015	0.024
12	44.42388	12.30515	40.212	0.017	0.028
13	44.42308	12.30551	40.072	0.015	0.023

Figura 11.23: File di testo con i PFA riportanti latitudine, longitudine, quota, precisione orizzontale e verticale

Le precisioni centimetriche che si sono raggiunte con l'impiego dell'antenna, sono le medesime che si vogliono ottenere nella sperimentazione dei modelli.

Si sono scelti i **marker 3,5 6 e 11**, che si sviluppano lungo una linea: l'obiettivo di questo modello, consiste nel determinare la qualità dei prodotti, a partire da un rilievo dei punti disposti lungo una asse lineare anziché essere distribuiti su tutto l'areale della spiaggia.

Il grado di accuratezza nel posizionamento dei marker è stato posto pari a 2,5 cm, per due motivi:

- Non è possibile posizionare il marker perfettamente al centro del target, a causa dell'incertezza legata alle distorsioni intrinseche di ciascuna immagine, seppur ottimizzata
- Si è definita una precisione simile a quella raggiunta nel rilievo con antenna TOPCON, con precisione media di 2,5 cm

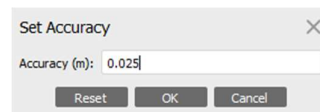


Figura 11.24: Impostazione dell'accuratezza nel posizionamento dei marker

Poiché per il progetto sono stati usati marker relativamente piccoli rispetto alla quota di volo del drone (53,1 m), è risultato fondamentale eseguire il primo allineamento riportato al paragrafo 11.2.2: in tal modo, applicato il primo marker, il software ha riconosciuto approssimativamente la posizione dei medesimi nelle altre fotografie, consentendo di validarne esclusivamente la posizione.

Per il basso grado di risoluzione che mostrano, il tempo richiesto per il posizionamento di ciascun marker è compreso tra i 30 e i 40 secondi.

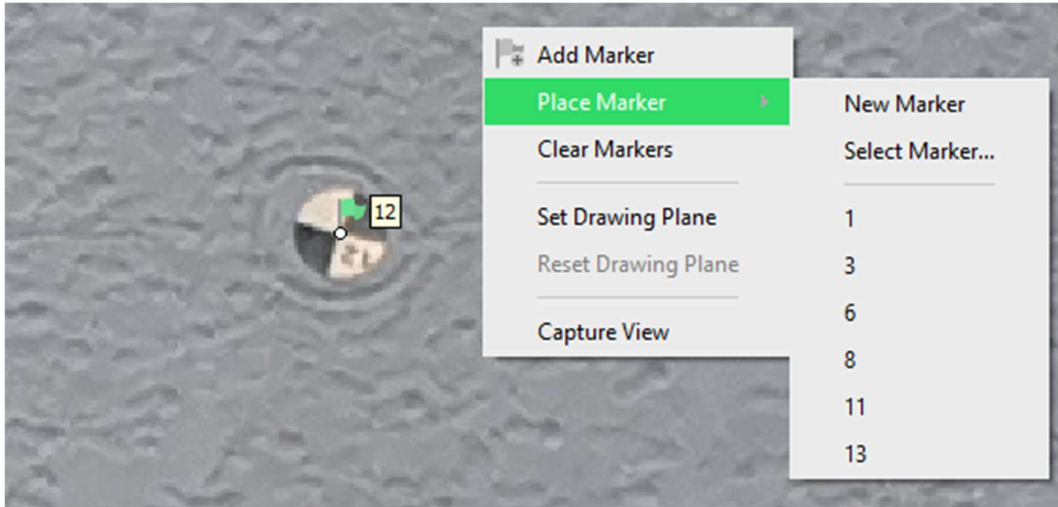


Figura 11.25: Applicazione del marker su un PFA

L'operazione di riconoscimento e posizionamento dei marker è stata condotta per ciascun PFA scelto e per ogni fotogramma in cui compaiono, con successiva selezione attraverso la spunta verde nella finestra *Markers*.

Markers	▲	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Accuracy (m)
<input type="checkbox"/>	1	12.305720	44.423140	39.355000	0.025000
<input checked="" type="checkbox"/>	3	12.305320	44.423030	40.938000	0.025000
<input type="checkbox"/>	4	12.305360	44.423920	39.453000	0.025000
<input checked="" type="checkbox"/>	5	12.304920	44.423850	40.946000	0.025000
<input checked="" type="checkbox"/>	6	12.304750	44.424650	40.755000	0.025000
<input type="checkbox"/>	8	12.305330	44.424770	39.362000	0.025000
<input checked="" type="checkbox"/>	11	12.306000	44.421880	40.865000	0.025000
<input type="checkbox"/>	12	12.305150	44.423880	40.212000	0.025000
<input type="checkbox"/>	13	12.305510	44.423080	40.072000	0.025000

Figura 11.26: Finestra di selezione dei PFA 3,5,6 e 11

Si è condotto un nuovo allineamento, basato non più sulle coordinate approssimative memorizzate negli EXIF file delle foto, ma bensì su quelle di precisione centimetrica dei marker.

Una volta realizzata la nuvola sparsa, l'ampia pulizia dagli outlier è stata svolta in due modi:

- 1) Eliminandoli manualmente, attraverso lo strumento di selezione
- 2) Eseguendo un processo iterativo, composto da:
 - *Gradual selection*: processo che individua in automatico i punti di legame più deboli
 - *Optimize Camera Alignment*: comando (già illustrato) per ottimizzare i parametri interni delle camere, da ripetere ogni volta che si eliminano dei punti di legame

Il processo è stato iterativo poiché un valore accettabile nella gradual selection, minore di 2, si può raggiungere dopo 5-6 cicli. Per entrambi i modelli con PFA il valore di *Gradual selection* è stato ridotto a meno di 1,5.

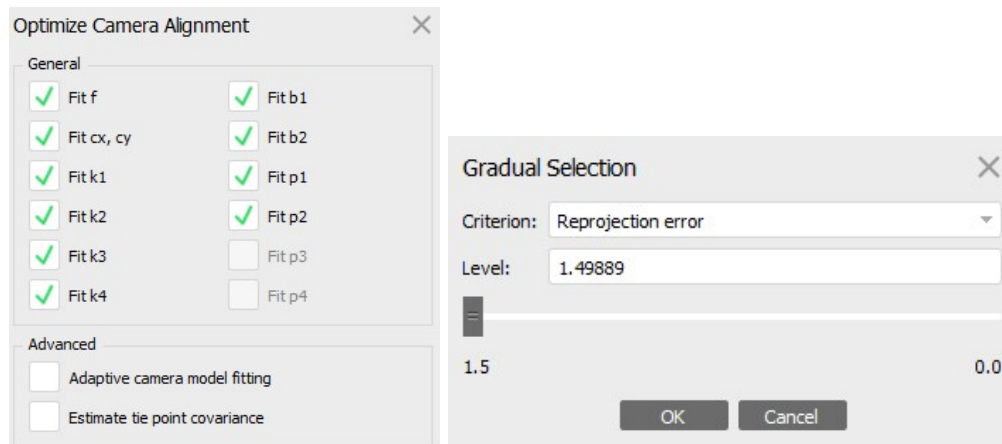


Figura 11.27: Schermate di ottimizzazione e rimozione graduale degli outliers

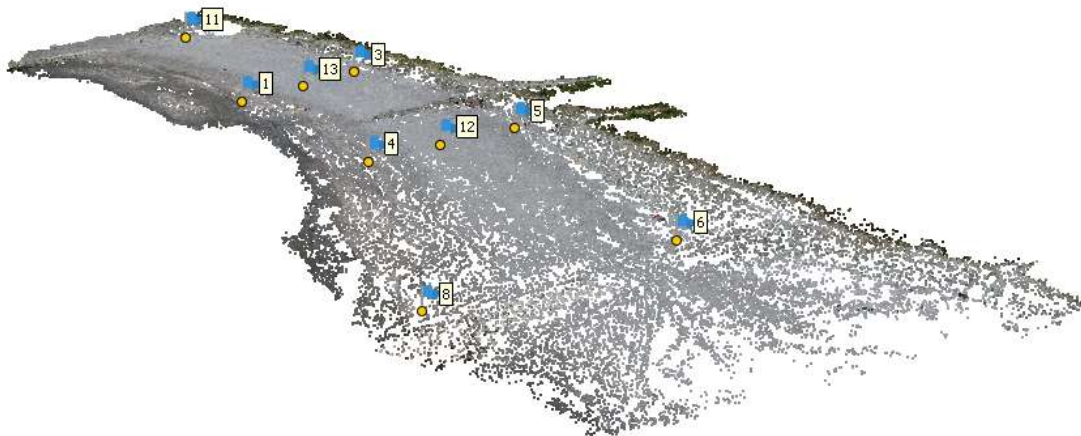


Figura 11.28: Nuvola sparsa pulita, impiegando 4 PFA

La nuvola densa ottenuta è stata poi pulita manualmente degli outliers residui. Successivamente, si è proceduto ad effettuare la medesima pulizia anche per la mesh, al fine di renderla più regolare, ma soprattutto per eliminare le zone perimetrali, che

vengono definite con un numero estremamente minore di fotogrammi di partenza e che quindi risultano affette da errori.

Si può notare come l'effetto di curvatura è sparito, grazie all'impiego dei PFA.

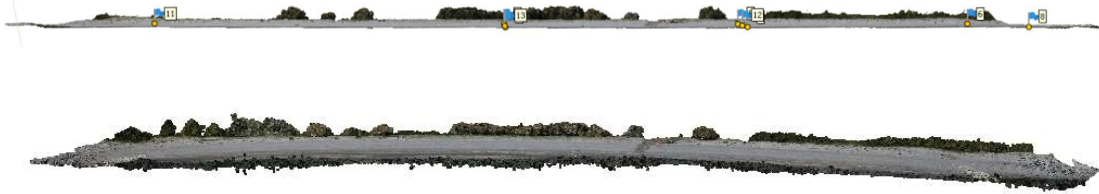


Figura 11.29: La curvatura risulta assente rispetto al modello senza PFA

Il processo di pulizia richiede tempo, ma risulta fondamentale per l'ottenimento di prodotti finali aventi un grado elevato di precisione.

In *Figura 11.30*, si riportano, a confronto, la nuvola densa iniziale e quella finale, pulita, impiegata per la produzione della mesh.



Figura 11.30: Nuvola densa iniziale e nuvola densa pulita

11.2.5) Modello con 9 PFA (report di Metashape nel paragrafo 10.2)

Infine, per ottenere la massima precisione come da obiettivo, si è presa in considerazione la totalità dei PFA. Sicuramente il posizionamento dei marker ha richiesto molto più tempo favorendo, però, i successivi processi che son stati agevolati dalle informazioni ridondanti.

Per i passaggi seguiti, si rimanda al paragrafo precedente.



Figura 11.31: Mesh pulita, impiegando 9 PFA

11.2.6) Confronto dei modelli

Conformemente al workflow seguito, si riporta, nella pagina successiva, una tabella riassuntiva che mostra le tempistiche e le caratteristiche di ciascun modello in Metashape.

Agisoft Metashape					
Processo	Tempistiche	Caratteristiche			
Caricamento immagini	Immediata	/			
Analisi qualità delle foto	1 min 2 s	/			
Primo allineamento foto	8 h 20 min	138.572 punti			
	Allineamento senza P.F.A.		Allineamento con 4 P.F.A.		Allineamento con 9 P.F.A.
Applicazione dei marker	/	/	Tempistiche 1 h 35 min	Caratteristiche /	Tempistiche 3 h 30 min Caratteristiche /
Secondo Allineamento	Immediata	138.572 punti	10 min 29 s	172.746 punti	10 min 29 s 172.746 punti
Pulizia Nuvola sparsa	/	/	7 min 30 s	113.651 punti	8 min 112.892 punti
Generazione Nuvola densa	9 h 23 min	55.518.264 punti	8 h 58 min	50.591.589 punti	8 h 30 min 50.321.890 punti
Pulizia Nuvola densa	/	/	45 min	35.321.622 punti	45 min 34.626.088 punti
Generazione Mesh	34 min 24 s	11.103.652 facce	19 min 49 s	9.178.462 facce	19 min 8 s 8.865.321 facce
Pulizia Mesh	/	/	22 min	7.064.323 facce	22 min 6.925.216 facce
Generazione Texture	20 min 26 s	/	8 min 28 s	/	8 min 17 s /
Generazione DEM	53 s	3,3 cm/pix	46 s	3,34 cm/pix	45 s 3,34 cm/pix
Generazione Ortofoto	5 min 17 s	1,65 cm/pix	3 min 43 s	1,67 cm/pix	3 min 45 s 1,67 cm/pix
TEMPO TOTALE	18 h 45 min		20 h 50 min		22 h 18 min
DENSITA' PUNTI	3,30 cm/m²		3,34 cm/m²		3,34 cm/m²

Tabella 11.2: tabella riassuntiva delle tempistiche e delle caratteristiche dei tre modelli Metashape

A completamento, si riporta, una tabella riassuntiva che mostra le tempistiche e le caratteristiche del modello in VisualSFM.

VisualSFM		
Processo	Tempistiche	Caratteristiche
Caricamento immagini	1 min 30 s	/
Analisi qualità delle foto	/	/
Individuazione punti omologhi	4 h 15 min	/
Generazione Nuvola sparsa	14 min e 40 s	87.324
Generazione Nuvola densa	1 h 20 min	3.633.819
TEMPO TOTALE	5 h 50 min	

Tabella 11.3: tabella riassuntiva delle tempistiche e delle caratteristiche del modello VisualSFM

Confrontando le elaborazioni dei tre modelli sviluppati su Metashape si eseguono le seguenti considerazioni:

- 1) Il tempo impiegato per la generazione della nuvola densa per il modello senza PFA ha richiesto mezz'ora in più rispetto al modello con 4 PFA e un'ora intera in più rispetto al modello con 9 PFA: le coordinate da rilievo NRTK hanno aiutato il software ad interpolare i punti costituenti le nuvole, agevolando questo step.
 - 2) L'operazione di apposizione dei marker più lunga, che ha richiesto maggiore tempo, è stata quella, naturalmente, nel modello con 9 PFA.
 - 3) A discapito del tempo necessario per pulire le nuvole dei modelli più curati (45 minuti), le mesh dei modelli con 4 e 9 PFA, sono state generate in un tempo minore risultando più regolari rispetto a quella del modello senza PFA, che non è stato pulito nell'ottica di velocizzare il più possibile le operazioni manuali. All'aumentare dei PFA impiegati, si osserva che per lo stesso dataset il numero di facce che costituiscono i poligoni della mesh si riducono, snellendo il costo computazionale e di conseguenza anche la dimensione del file.
 - 4) La stessa considerazione del punto 3 si può effettuare relativamente alla pulitura della mesh dei modelli con 9 e 4 PFA: l'operazione si è resa necessaria per escludere le zone perimetrali che, essendo inquadrare da meno fotogrammi, erano caratterizzate da un increspatura innaturale da eliminare. La texture è stata generata più velocemente rispetto al modello senza PFA.
 - 5) Il numero di PFA considerati, si riflette sulla qualità sia dei DEM che delle ortofoto, le cui considerazioni sono sviluppate nei capitoli 12 e 13.
- Inoltre, si è osservato che il primo allineamento ha richiesto un tempo di calcolo maggiore rispetto a quello di VisualSFM, in quanto vengono identificati molti più punti omologhi (138.572 contro 87.324).

12) ANALISI DEI DSM E DELLE ORTOFOTO PRODOTTE

12.1) Valutazione degli errori a priori

Sulla base dei parametri che definiscono il rilievo, si sono stimati a priori gli errori in altezza ed in planimetria che possono caratterizzare la restituzione. Infatti, misurando le coordinate immagine si potrebbe commettere un errore legato alla dimensione finita del pixel. Ci si è avvalsi delle seguenti formule basate sui parametri di progetto.

a) Formula basata sull'errore di graficismo impiegata nel close-range:

$$\sigma_z = S_c \times \text{errore graficismo} = 2.500 \times 0,2 \text{ mm} = 50 \text{ cm} \quad (12.1)$$

b) Formula basata sulla legge semplificata di propagazione della varianza (nel caso normale della restituzione stereoscopica):

$$\sigma_z = \frac{Z}{B} \frac{Z}{c} \sigma_{p\xi} = \frac{45}{9,12} \frac{45}{0,00449} 2 \times 10^{-6} = 9,8 \text{ cm} \quad (12.2)$$

Dove $\sigma_{p\xi} = 2 \mu\text{m}$ è l'errore relativo alla parallasse orizzontale.

c) Formulazione tabellare proposta dall'IGM (Nota la scala del fotogramma, si determina la scala della carta ottenibile e di conseguenza l'errore).

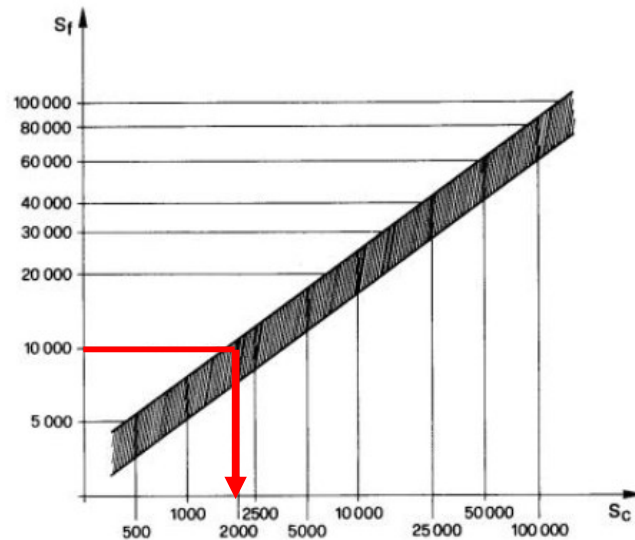


Figura 12.1: Tabella IGM di relazione tra scala del fotogramma e scala della carta – ‘Appunti di Fotogrammetria’, Zanutta, 2019

$$\sigma_z = S_c \times \text{errore graficismo} = 2.000 \times 0,2 \text{ mm} = 40 \text{ cm} \quad (12.3)$$

d) Formulazione proposta in Kraus per punti pre-segnalizzati con target visibili rispetto alla quota di volo:

$$\sigma_{xy} = \pm 6 \mu\text{m} \times m_b = \pm 6 \mu\text{m} \times 10.000 = 6 \text{ cm} \quad (12.4)$$

$$\sigma_z = 0,06 \text{ ‰ } Z = 0,06 \text{ ‰ } \times 45 \text{ m} = 2,7 \text{ cm} \quad (12.5)$$

Dove la definizione di σ_z , vale per obiettivi grandangolari (con $FOV = 90^\circ$) aventi rapporto $c/d = \text{focale/diagonale sensore} = 1:2$. Infatti:

$$\frac{c}{d} = \frac{4,49}{\sqrt{6,17^2 + 4,56^2}} = 0,58 \approx 0,50$$

12.2) Valutazione degli errori a posteriori

Per determinare la precisione effettiva ottenibile dai singoli prodotti ottenuti, si è proceduto importando le nuvole di punti su CloudCompare.

CloudCompare è un software opensource che consente di elaborare ed interpretare nuvole di punti (provenienti sia da elaborati fotogrammetrici che da scansioni laser scanner), oltre a gestire mesh ed immagini calibrate.

Si descrivono di seguito gli step di lavoro seguiti per giungere alla stima degli errori.

1) Esportazione delle nuvole da Agisoft Metashape

Per poter confrontare le coordinate dei PFA ottenute dal rilievo NRTK con quelle elaborate dal modello, si sono esportate le nuvole di punti da Agisoft Metashape, specificando come sistema di riferimento il datum **ED50/UTM32N (EPSG 23032)**.

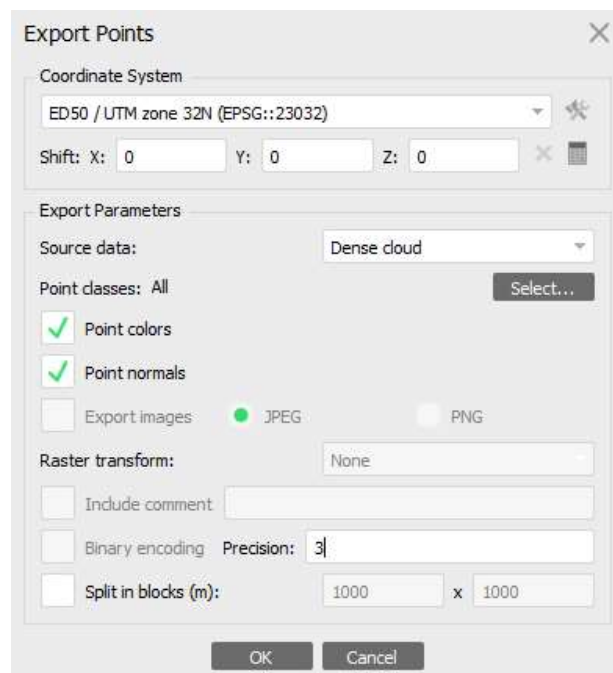


Figura 12.2: Finestra di esportazione della nuvola densa in Agisoft Metashape

2) Importazione delle nuvole e individuazione delle coordinate su CloudCompare

Una volta aperti i modelli, il programma ne ha proposto una traslazione planimetrica in un sistema locale, senza cambio di scala. Si è deciso di scartare questa opzione, per poter

determinare direttamente le coordinate dei centri dei target attraverso il comando di *Point Picking*.

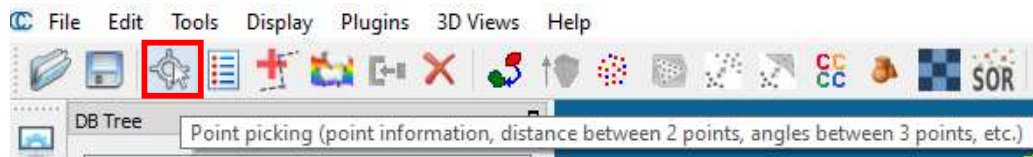


Figura 12.3: Comando di Point Picking all'interno di CloudCompare



Figura 12.4: Il Point Picking permette di visualizzare le coordinate del punto selezionato

Questo comando permette di evidenziare le coordinate del punto selezionato, che nel caso in esame è il centro dei target di ciascun PFA. Naturalmente, operando all'interno di nuvole di punti, si è individuato il punto più vicino e rappresentativo possibile del centro dei target, considerando le densità dei singoli modelli.

Densità punti Visual SFM	3,76 cm/m ²
Densità punti Metashape senza PFA	3,30 cm/m ²
Densità punti Metashape con 4 PFA	3,34 cm/m ²
Densità punti Metashape con 9 PFA	3,34 cm/m ²

Tabella 12.1: Densità dei punti di ciascuna nuvola densa

Si fa notare che il modello ottenuto in VisualSFM è stato generato in un sistema di riferimento locale in quanto, nell'ottica di ottenere un prodotto metricamente valido il più velocemente possibile, la procedura di orientamento esterno non è stata eseguita: la nuvola può essere comunque impiegata per altri scopi, come l'individuazione dello stato geomorfologico dell'area rilevata oppure, come descritto nel paragrafo successivo, istituire una rete di verifica per confrontare i modelli e stimarne eventuali deformazioni.

Il modello non sarebbe stato utilizzabile per la determinazione delle coordinate perché, pur applicando una variazione di scala, ma non avendo introdotto i PFA, sarebbe rimasto indefinito il datum.

Eseguendo alcuni tentativi di individuazione dei centri dei target, l'approccio è risultato molto grossolano in quanto zoomando sulle nuvole, si perdeva la forma del target ed il contenuto radiometrico dei punti non ha consentito di distinguere quelli rappresentanti i target da quelli rappresentanti la sabbia. CloudCompare non è stato impiegato perché ci sarebbe stata un'ulteriore incertezza legata alla densità della nuvola.

Per i tre modelli impiegati, ottenuti in Metashape, si sono interrogati direttamente i prodotti raster, in particolare le ortofoto e i DSM realizzati. In tal modo è stato possibile avere informazioni continuative su ciascun pixel ed in particolare:

- Il contenuto radiometrico e le coordinate Nord ed Est (nel sistema UTM32N), all'interno delle ortofoto
- La quota, all'interno del DSM

Per le definizioni più accurate di DSM ed ortofoto si rimanda al capitolo successivo, dedicato ad essi.

Per visualizzare le coordinate del centro di ogni target si è utilizzato QGIS, software idoneo alla visualizzazione ed elaborazione di prodotti georeferenziati, meglio descritto nel capitolo 13.

Per maggior chiarezza, si anticipa il comando *Informazioni elementi*: una volta caricati i rispettivi DSM e ortofoto di ciascun modello, tale comando ha permesso di visualizzarne le coordinate, come da *Figura 12.5*.

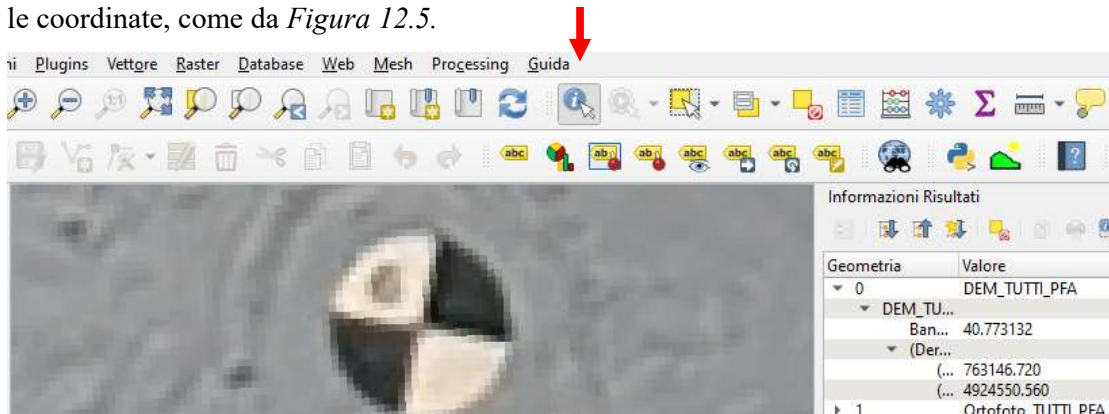


Figura 12.5: Comando *Informazioni elementi* per visualizzare le coordinate dei centri dei target

3) Lettura delle coordinate dei PFA

Si riportano le tabelle che raffrontano le coordinate ottenute nei singoli modelli di Metashape con quelle determinate con il rilievo NRTK, e le relative differenze. Per ciascuna tabella vengono riportati in grassetto i PFA vincolati.

Coordinate UTM32N Metashape senza PFA				Coordinate UTM32N NRTK			Differenze		
Punto	N [m]	E [m]	h [m]	N [m]	E [m]	h [m]	N [m]	E [m]	h [m]
1	4924368,35	763219,65	-3,66	4924387,74	763229,05	39,36	-19,39	-9,40	-43,02
13	4924360,79	763203,01	-2,56	4924380,40	763212,60	40,07	-19,61	-9,59	-42,63
3	4924354,07	763188,28	-1,38	4924374,24	763197,70	40,94	-20,17	-9,42	-42,32
4	4924451,87	763187,24	-4,58	4924473,22	763196,89	39,45	-21,35	-9,65	-44,03
12	4924447,74	763170,83	-3,48	4924468,11	763180,35	40,21	-20,37	-9,52	-43,69
5	4924443,39	763153,58	-2,45	4924464,03	763162,18	40,95	-20,64	-8,60	-43,40
6	4924530,69	763136,07	-5,52	4924552,35	763145,05	40,76	-21,66	-8,98	-46,28
8	4924545,61	763181,12	-8,01	4924567,55	763190,68	39,36	-21,93	-9,56	-47,37
11	4924230,30	763247,76	-3,71	4924248,68	763257,00	40,87	-18,38	-9,24	-44,58
Max.							-21,93	-9,59	-47,37
Min.							-18,38	-8,60	-42,32
Valori medi							-20,39	-9,33	-44,15
RSME							1,16	0,34	1,69

Tabella 12.2: Confronto tra coordinate ellissoidiche ricavate nel modello senza PFA e da rilievo NRTK

Coordinate UTM32N Metashape 4 PFA				Coordinate UTM32N NRTK			Differenze		
Punto	N [m]	E [m]	h [m]	N [m]	E [m]	h [m]	N [m]	E [m]	h [m]
1	4924386,48	763230,65	40,87	4924387,74	763229,05	39,36	-1,26	1,60	1,52
13	4924378,90	763213,83	40,83	4924380,40	763212,60	40,07	-1,50	1,23	0,76
3	4924374,18	763197,74	41,02	4924374,24	763197,70	40,94	-0,06	0,04	0,08
4	4924470,90	763198,08	40,75	4924473,22	763196,89	39,45	-2,32	1,19	1,30
12	4924466,73	763181,48	40,83	4924468,11	763180,35	40,21	-1,38	1,13	0,62
5	4924464,10	763162,02	40,88	4924464,03	763162,18	40,95	0,07	-0,16	-0,07
6	4924552,26	763145,13	40,79	4924552,35	763145,05	40,76	-0,09	0,08	0,03
8	4924565,64	763192,13	41,22	4924567,55	763190,68	39,36	-1,91	1,45	1,86
11	4924248,63	763257,01	40,83	4924248,68	763257,00	40,87	-0,05	0,01	-0,04
Max.							-2,32	1,60	1,52
Min.							-0,05	0,01	0,03
Valori medi							-0,94	0,73	0,67
RSME							0,92	0,72	0,73

Tabella 12.3: Confronto tra le coordinate ellissoidiche ricavate nel modello con 4 PFA e da rilievo NRTK

Coordinate UTM32N Metashape 9 PFA				Coordinate UTM32N NRTK			Differenze		
Punto	N [m]	E [m]	h [m]	N [m]	E [m]	h [m]	N [m]	E [m]	h [m]
1	4924387,71	763229,04	39,36	4924387,74	763229,05	39,36	-0,03	-0,01	0,00
13	4924380,43	763212,62	40,07	4924380,40	763212,60	40,07	0,03	0,02	0,00
3	4924374,24	763197,72	40,93	4924374,24	763197,70	40,94	0,00	0,02	-0,01
4	4924473,20	763196,88	39,45	4924473,22	763196,89	39,45	-0,02	-0,01	0,00
12	4924468,08	763180,35	40,22	4924468,11	763180,35	40,21	-0,03	0,00	0,01
5	4924464,02	763162,18	40,95	4924464,03	763162,18	40,95	-0,01	0,00	0,00
6	4924552,33	763145,05	40,76	4924552,35	763145,05	40,76	-0,02	0,00	0,00
8	4924567,59	763190,72	39,33	4924567,55	763190,68	39,36	0,04	0,04	-0,03
11	4924248,68	763257,02	40,87	4924248,68	763257,00	40,87	0,00	0,02	0,00
Max.							0,04	0,04	0,00
Min.							0,00	0,00	0,00
Valori medi							0,00	0,01	0,00
RSME							0,03	0,02	0,01

Tabella 12.4: Confronto tra le coordinate ellissoidiche ricavate nel modello con 9 PFA e da rilievo NRTK

In ragione dei risultati ottenuti, si effettuano le seguenti considerazioni:

➤ Per poter ottenere un modello georeferenziato, è assolutamente indispensabile eseguire un rilievo topografico di appoggio, in quanto il software non è stato in grado di elaborare un posizionamento efficiente a partire dai soli metadati dei fotogrammi. Dal modello senza PFA si sono riscontrati infatti i seguenti discostamenti medi, non accettabili:

- $-20,40\text{ m}$ in direzione Nord
- $-9,30$ in direzione Est
- $-44,15\text{ m}$ in quota

Come si è notato, l'errore in quota è significativo ed è visualizzabile, in coordinate ellissoidiche. Le distorsioni del modello sono evidenziate nel paragrafo 12.3.

➤ Come anticipato, nel modello con 4 PFA si è ottenuta una precisione più alta in corrispondenza dei punti di vincolo, caratterizzati dalla stessa precisione con cui sono stati rilevati i punti con posizionamento in NRTK. I discostamenti degli altri punti non vincolati ed interpolati dal software sono risultati nettamente più alti e presentavano valori metrici: il modello è soggetto sia alle distorsioni descritte nel paragrafo 12.3 che a una rotazione individuata in dettaglio nel paragrafo 13.5.4, dedicato al confronto di sezioni trasversali.

➤ Come previsto, il modello con 9 PFA presentava in ogni punto la stessa precisione che caratterizza il rilievo in NRTK in quanto ogni punto è stato vincolato imponendone le coordinate a monte del processo di restituzione.

Pertanto, confrontando le precisioni ricavate dalle formule del paragrafo 12.1 con quelle ottenute a posteriori, si è stimato un errore di restituzione in altezza e in planimetria di 5 cm: valori di misura inferiori non sono stati ritenuti significativi.

4) Report di Agisoft Metashape

Ad integrazione delle considerazioni analitiche svolte, si è reputato interessante aggiungere alle precisioni determinate, quelle estratte dal report di Metashape: questo documento di output, per i modelli che impiegano PFA, definisce a posteriori della restituzione, un'ellisse di errore per ciascun punto. L'insieme delle ellissi possono essere prese in considerazione come indice di qualità dell'algoritmo.

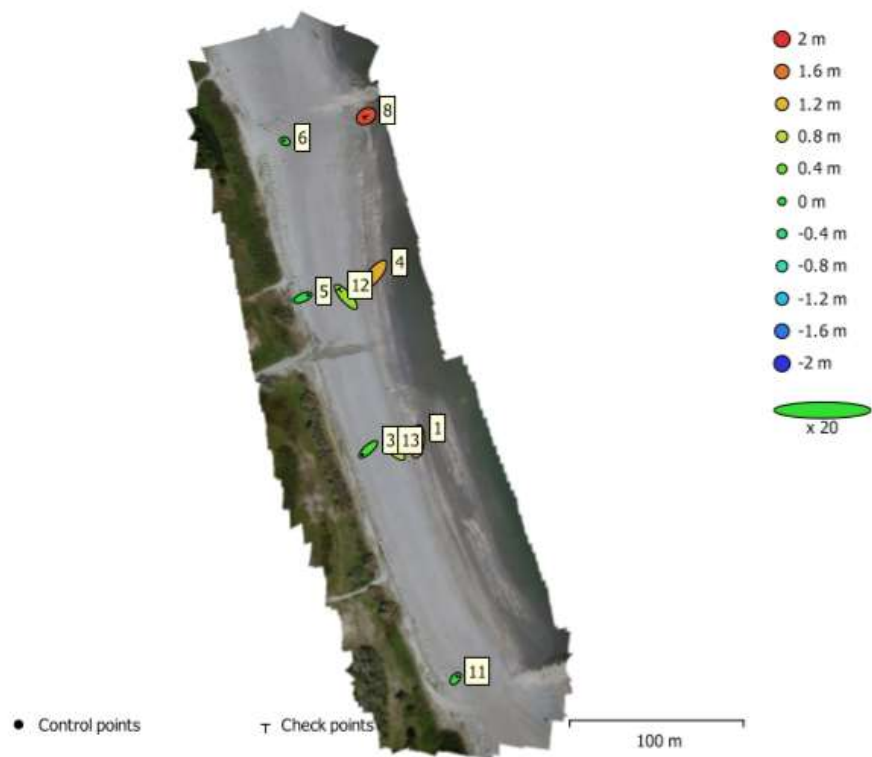


Figura 12.6: Ellissi di errore nel modello con 4 PFA



Figura 12.7: Ellissi di errore nel modello con 9 PFA

Compatibilmente con quanto ottenuto a livello analitico, le precisioni raggiunte nel modello con 4 PFA sono dell'ordine di 40 cm in corrispondenza dei 4 target adottati, mentre raggiungono valori metrici nei restanti 5: gli effetti di distorsione e basculamento del modello vengono descritti e giustificati rispettivamente nel paragrafo 12.3 e nel paragrafo 13.5.4.

Per quanto concerne il modello con 9 PFA, l'errore più alto attribuito è pari a 6 cm, che si è assestato nel range individuato sia nella stima degli errori a priori che nella validazione analitica discussa al punto 3.

12.3) Confronto tra le nuvole dense

Allo scopo di validare i DSM ottenuti, prescindendo dai problemi connessi ai sistemi di riferimento differenti utilizzati, si sono misurate le coordinate dei PFA in ogni modello e calcolate le distanze reciproche.

Le distanze sono invarianti rispetto al sistema di riferimento utilizzato.

Per confrontare i modelli fra di loro, in particolare per determinare le deformazioni che caratterizzano quelli meno accurati (senza PFA e con 4 PFA), si è redatta una rete di controllo costituita da segmenti che collegano i PFA, come da schema di *Figura 12.8*.

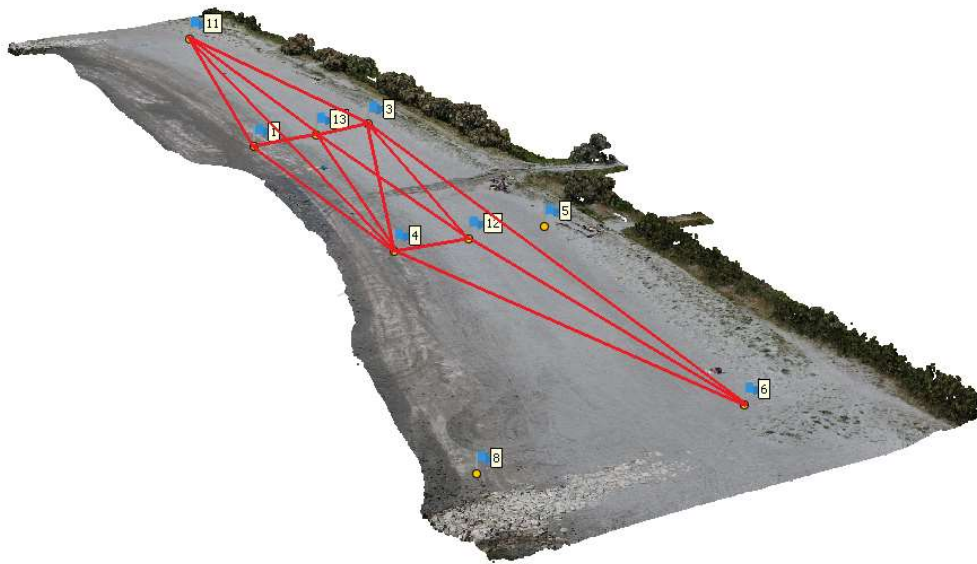


Figura 12.8: Rete di controllo adottata

Tale rete è stata costituita, per 7 punti presi in esame, da 15 segmenti ed il punto 4 è stato collegato a tutti gli altri. In particolare i punti 5 e 8 sono stati esclusi perché non visibili nella nuvola estratta da VisualSFM.

Per questo obiettivo, la nuvola di VisualSFM è stata nuovamente inclusa, in quanto, per questo scopo, non era necessario che le misure (trattandosi di distanze tra punti) fossero riferite ad un datum geodetico.

Per omogeneizzarsi al sistema locale della nuvola di VisualSFM, le nuvole estratte da Agisoft Metashape sono state nuovamente importate in CloudCompare, applicando la traslazione suggerita dal software, come da *Figura 12.9*.

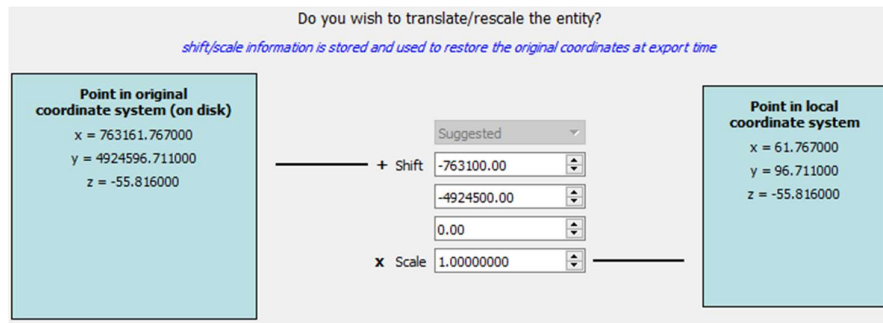


Figura 12.9: Valori di traslazione planimetrica suggeriti dal software

Impiegando il *Point Picking* esposto al paragrafo 12.2, si sono determinate le coordinate mancanti dei centri dei PFA, sempre individuando i punti che a loro si avvicinano il più possibile.

Per la determinazione della distanza si è applicato semplicemente, note le coordinate, il Teorema di Pitagora esteso allo spazio tridimensionale.

Di seguito si riporta la tabella delle distanze calcolate, per ciascuna nuvola.

Dist. VisualSFM		Dist. Metashape senza PFA		Dist. Metashape 4 PFA		Dist. Metashape 9 PFA	
1-4	108,34	1-4	89,61	1-4	90,54	1-4	90,59
1-11	169,41	1-11	184,68	1-11	173,17	1-11	173,40
1-13	22,19	1-13	18,26	1-13	18,45	1-13	18,47
3-6	223,31	3-6	137,38	3-6	138,59	3-6	138,68
3-11	165,31	3-11	177,02	3-11	161,80	3-11	161,95
3-12	115,13	3-12	95,29	3-12	96,24	3-12	96,28
3-13	19,62	3-13	16,19	3-13	16,34	3-13	16,34
4-3	118,40	4-3	97,86	4-3	98,86	4-3	98,88
4-6	114,31	4-6	229,77	4-6	231,97	4-6	232,09
4-11	276,80	4-11	111,72	4-11	102,43	4-11	102,67
4-12	20,49	4-12	16,98	4-12	17,16	4-12	17,11
4-13	111,74	4-13	92,43	4-13	93,36	4-13	93,41
6-12	109,50	6-12	230,69	6-12	232,88	6-12	233,00
13-11	166,06	13-11	179,81	13-11	166,25	13-11	166,45
13-12	111,86	13-12	92,67	13-12	93,58	13-12	93,63
Max.	276,80	Max.	230,69	Max.	232,88	Max.	233,00
Min.	19,62	Min.	16,19	Min.	16,34	Min.	16,34
Medio	123,50	Medio	118,02	Medio	115,44	Medio	115,53
RSME	71,55	RSME	71,16	RSME	69,31	RSME	69,37

Tabella 12.5: Valori delle distanze prese in esame per ciascuna nuvola di punti

Dal confronto sulle distanze ottenute è emerso quanto segue:

- Il modello senza PFA, rispetto ai restanti realizzati in Metashape, ha presentato una significativa dilatazione delle distanze che coinvolgono il punto 11 (lato destro della spiaggia): ciò è stato causato dalla forte curvatura già riscontrata nel capitolo 11.
- Le distanze nel modello con 4 PFA, non hanno mostrato bias eccessivi da quelle con 9 PFA, al massimo di 23 cm (distanza 1-11): sostanzialmente il modello è risultato affetto da una modesta contrazione, ma in particolare da una forte rotazione, meglio descritta nel paragrafo 13.5.4.
- La nuvola estratta da VisualSFM non ha valenza metrica, poiché non avendo introdotto alcun PFA, il software non è riuscito a svolgere correttamente la procedura di orientamento esterno. Questa problematica, nota in letteratura, è parzialmente risolvibile re-importando la nuvola e applicando un fattore di scala medio λ . Tale fattore è stato ricavato dalla media dei singoli rapporti tra le distanze ricavate nella nuvola con 9 PFA e quelle ricavate nella nuvola di VisualSFM. Si riporta il calcolo del fattore, le distanze di partenza misurate e quelle finali.

Distanze	Dist. Misurate	Fattore di scala λ	Dist. Elaborate con λ
1-4	26,17	3,42	108,34
1-11	40,92	4,51	169,41
1-13	5,36	3,41	22,19
3-6	53,94	2,55	223,31
3-11	39,93	4,43	165,31
3-12	27,81	3,43	115,13
3-13	4,74	3,41	19,62
4-3	28,60	3,42	118,40
4-6	27,61	8,32	114,31
4-11	66,86	1,67	276,80
4-12	4,95	3,43	20,49
4-13	26,99	3,42	111,74
6-12	26,45	8,72	109,50
13-11	40,11	4,48	166,06
13-12	27,02	3,43	111,86
λ_{medio}		4,14	

Tabella 12.6: Fattore di scala tra le distanze della nuvola con 9 PFA e della nuvola di VisualSFM

La nuvola è risultata affetta da errori significativi, in quanto le distorsioni locali, pur potendo confrontare più agevolmente i prodotti, sono rimaste.

12.4) Confronto tra i DSM (Digital Surface Model)

La valutazione dell'accuratezza del modello ottenuto utilizzando 4 PFA, è stata valutata anche mediante il confronto diretto tra DSM opportunamente trasformati in formato raster.

Ogni raster, georeferenziato, è risultato caratterizzato da una dimensione pixel di 3,34 cm.

Il contenuto informativo di ogni pixel è la quota.

Per poter essere eseguito il confronto, i DSM dei modelli sono stati esportati da Metashape in coordinate ED50/UTM32N (EPSG 23032) e successivamente sono state importate in un ambiente di lavoro adatto all'elaborazione di prodotti a valenza metrica: QuantumGIS. Per i relativi approfondimenti del programma, si rimanda al capitolo successivo.

Sono stati raffrontati i soli DSM che presentano una co-registrazione, ovvero quelli dei modelli a 4 e 9 PFA: come osservato infatti nel paragrafo 11.3, il modello senza PFA non poteva essere utilizzato perché presentava una traslazione sia planimetrica che altimetrica significativa rispetto agli altri due.

Una volta importati i DSM in formato .geoTIFF (acronimo di geo Tagged Image File Format), è stata eseguita un'operazione nella finestra *Raster* → *Raster Calculator*. Attraverso una striga di testo, si è richiesto al programma di generare il DSM ottenuto come sottrazione del DSM con 4 PFA a quello con 9 PFA, specificando il nome del nuovo file ed il sistema di riferimento adottato.

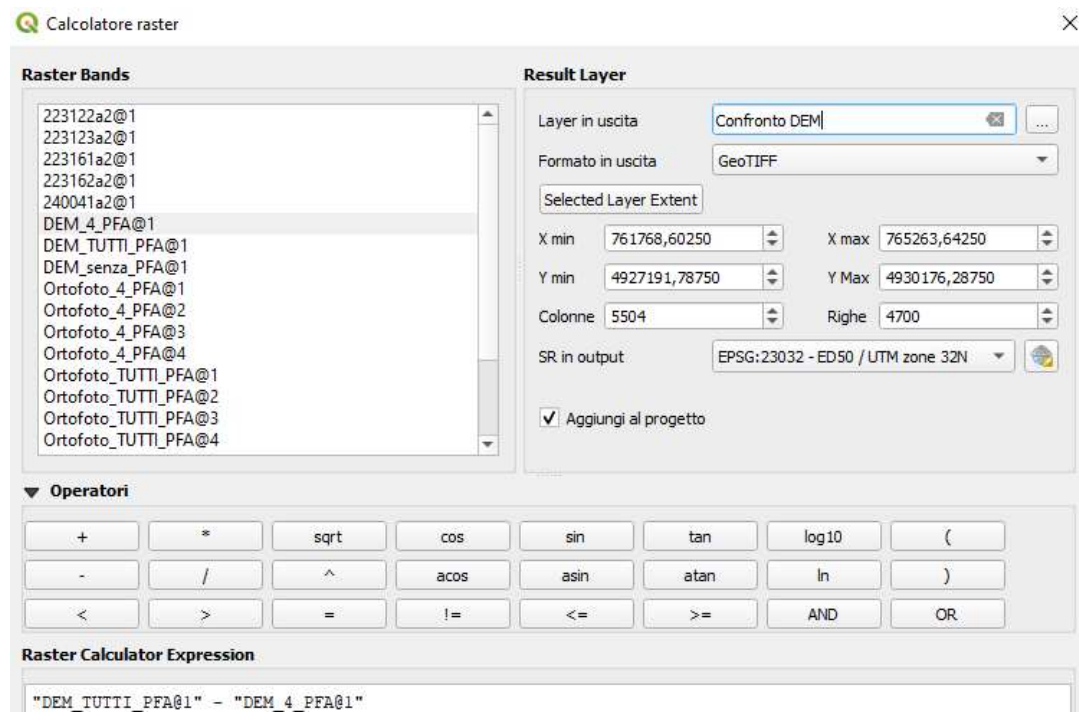


Figura 12.11: Schermata del calcolatore raster per ottenere il confronto tra DSM

Per consentire una migliore visualizzazione del prodotto, è stata modificata la scala di colori proposta per evidenziare al meglio le differenze tra i due DSM nella finestra delle *Proprietà* del layer creato, come da *Figura 12.12* e *12.13*.

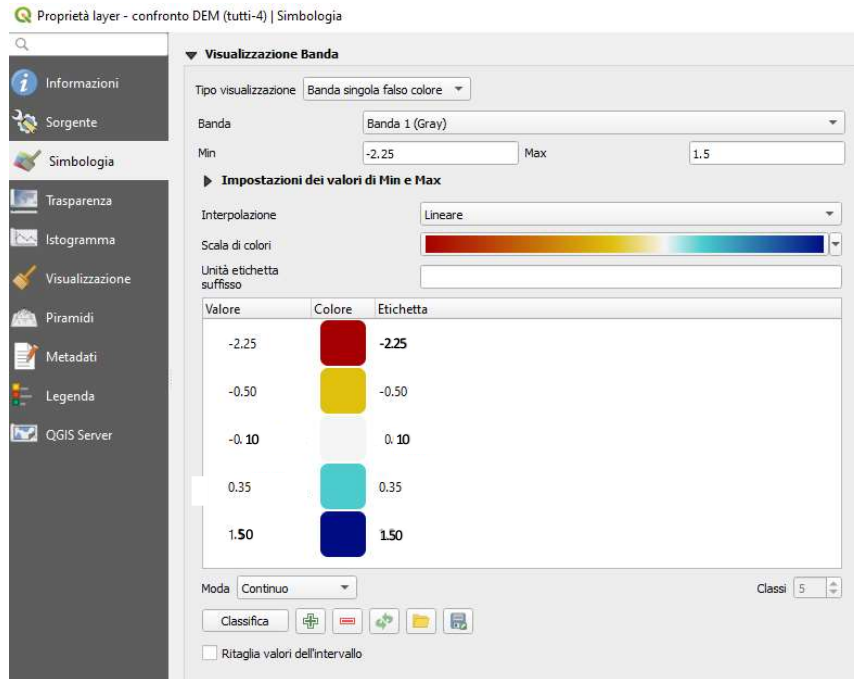


Figura 12.12: Schermata delle proprietà del layer in QGIS

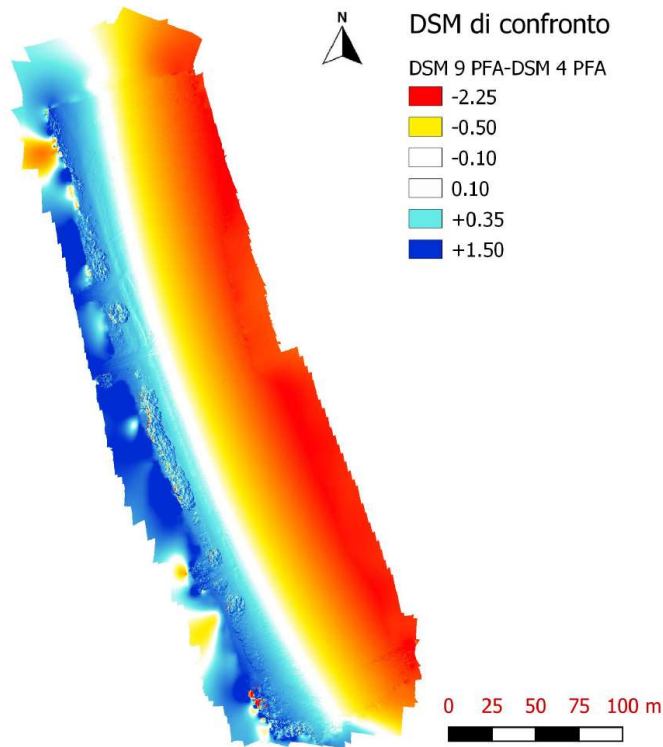


Figura 12.13: DSM di differenza ottenuto come DSM da 9 PFA – DSM da 4 PFA

Dal confronto generato si è notato come i due modelli coincidevano quasi perfettamente in corrispondenza dei punti di vincolo del modello a 4 PFA, mentre una rotazione globale interessava le zone più esterne. Questo fenomeno è meglio descritto confrontando le sezioni trasversali nel paragrafo 13.5.4.

13) LA GESTIONE IN AMBIENTE GIS

La gestione in ambiente GIS è stata condotta confrontando le informazioni raccolte con i prodotti già esistenti e distribuiti dalla Regione Emilia Romagna. Di seguito se ne riassumono brevemente le varie caratteristiche.

13.1) GIS (Geographic Information System)

I dati raccolti sono stati gestiti all'interno di un ambiente in cui potessero essere interfacciabili nello stesso sistema di riferimento di altri prodotti topografici, in tempi e costi ragionevoli. Le informazioni [36] sono lo strumento principale alla base delle valutazioni decisionali e delle operazioni da eseguire sul territorio, come:

- Individuazione di un problema
- Formulazione di obiettivi
- Identificazione e comparazione delle possibili linee di azione
- Attuazione delle decisioni prese
- Verifica dei risultati ottenuti con eventuali revisioni

Si è scelto di utilizzare un ambiente informativo computerizzato rispondente a tali esigenze, denominato "GIS" (Geographic Information System), le cui caratteristiche tecniche consentono di:

- Acquisire
- Registrare
- Analizzare
- Visualizzare
- Restituire
- Condividere
- Presentare

le informazioni derivanti da dati geografici (geo-riferiti), strutturandole per livelli.

Il sistema informatico è in grado di associare dei dati alla loro posizione geografica sulla superficie terrestre e di elaborarli per estrarne informazioni.

Nel caso preso in esame, il sistema informativo ha fornito le risposte specifiche per attuare una politica di difesa del territorio basata sul monitoraggio e sugli interventi civili connessi alla protezione della costa.

Per tali ragioni, i dati disponibili sulla zona in esame sono stati inseriti in un progetto GIS costituito appositamente per poter trattare ordinatamente le informazioni georeferenziate, avendo la possibilità di associare a ciascun elemento una o più descrizioni.

Le strutture di memorizzazione scaturite sono di tipo DBMS (Database Management System).

Per il caso di studio è stato impiegato il sistema open source QuantumGIS (QGIS), atto alla trattazione di dati vettoriali e raster:

- I dati vettoriali rappresentano punti, linee e poligoni che vengono codificati e memorizzati in base alle coordinate
- I dati raster rappresentano lo spazio reale tramite una matrice di pixel

Il software ha consentito di unire e mettere in relazione differenti dati in un unico progetto di analisi territoriale e ha consentito di organizzare i dati su vari livelli (Layers) che sono stati analizzati, consentendo la realizzazione di una mappa con elementi personalizzati ed editabili. In particolare sono stati introdotti:

- I DSM prodotti con Metashape
- Le ortofoto prodotte con Metashape
- La linea di costa media
- Le sezioni tipologiche
- Le coordinate dei PFA

Il sistema di riferimento adottato è l'ED50/UTM32N: per importare i file in QGIS si è utilizzato l'algoritmo interno di trasformazione di coordinate provenienti dal sistema ETRS89 usato fino al momento dell'elaborazione, come da *Figura 13.1*.

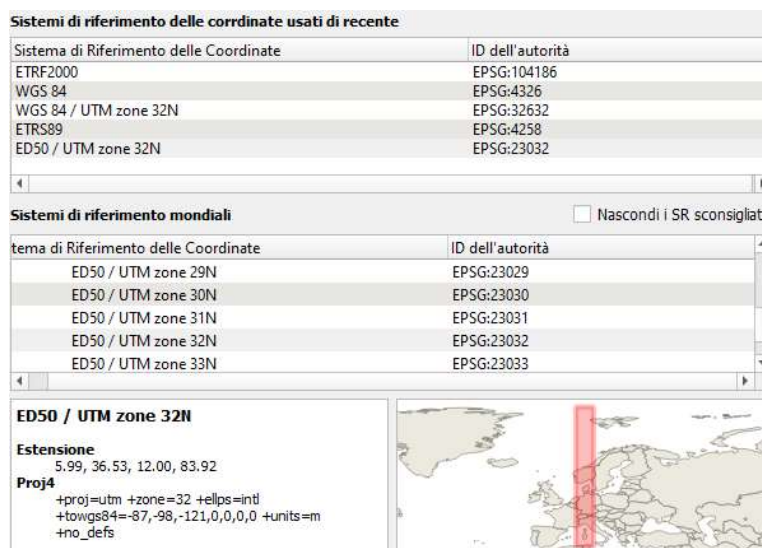


Figura 13.1: Scelta del sistema di riferimento nella schermata iniziale di QGIS

13.2) Carta Tecnica Regionale dell'Emilia Romagna

La Carta Tecnica Regionale (abbreviato CTR) è un sistema di carte topografiche prodotto dalle regioni d'Italia per rappresentare il proprio territorio, in sostanza sono carte tecniche che rappresentano gli elementi senza modificarne dimensioni e posizione, ma mostrandone l'effettiva proiezione ortorettificata. Oggetti come edifici e strade sono rappresentati con l'effettiva forma del loro perimetro da vista nadirale, quindi senza una sostituzione con simboli convenzionali.

La CTR è stata realizzata alla scala 1:5000 sulla base di un rilievo fotogrammetrico eseguito nel 1977, consente la consultazione dettagliata con una precisione dell'ordine di 50 centimetri, rendendola adatta alle attività di progettazione di opere civili sul territorio e di pianificazione urbanistica.

Gli aggiornamenti successivi sono avvenuti fino al 1998, data della sua pubblicazione.

L'errore formale di graficismo teorico è pari a $0,2 \text{ mm} \times Sc=1 \text{ m}$.

La CTR è il principale supporto per vari tipi di carte tematiche, come riportato nel paragrafo 13.3.

L'inquadramento delle CTR, ovvero il reticolo utilizzato per suddividere il territorio italiano in singole tavole cartografiche, si basa sulla Carta d'Italia ufficiale, prodotta dall'Istituto Geografico Militare. In particolare, la serie 50 della Carta d'Italia è costituita da 652 fogli in scala 1:50.000, numerati progressivamente a partire da nord e da ovest e che rappresentano ciascuno un rettangolo di $20' \times 12'$ (in primi di longitudine e latitudine). I bordi delle singole CTR sono determinati dai fogli in scala 1:50.000 nazionali suddivisi in 4×4 , da cui si ricavano 16 sezioni in scala 1:10.000, che costituiscono aree di $5' \times 3'$ allineate con meridiani e paralleli.

Le sezioni sono ulteriormente suddivise in 2×2 da cui si ottengono 4 elementi in scala 1:5.000, ovvero aree di $2'30'' \times 1'30''$.

Si riporta, nella pagina seguente, la porzione di CTR che inquadra l'area di interesse della presente tesi (*Figura 13.2*).

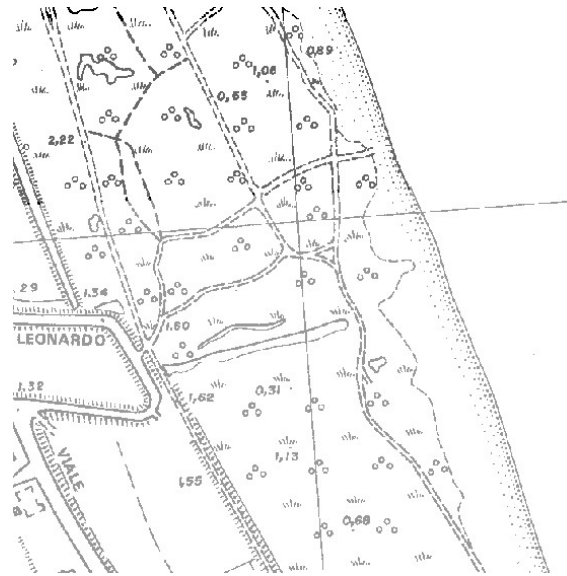


Figura 13.2: Estratto della Carta Tecnica Regionale – geoportale.regione.emilia-romagna.it, 2019 [37]

13.3) Geoportale della Regione Emilia-Romagna

Il Geoportale [37] è il canale di diffusione delle informazioni geografiche prodotte dalla Regione Emilia-Romagna.

Rappresenta il punto di riferimento, di scambio e di condivisione del patrimonio di conoscenza geografica regionale sia a supporto delle attività istituzionali che dei singoli cittadini, con l'obiettivo di garantire divulgazione, fruizione e distribuzione dei dati, delle informazioni e dei servizi di tipo geografico sia al pubblico che al personale delle pubbliche amministrazioni locali e nazionali.

Il Geoportale è conforme alle più recenti direttive regionali, nazionali (CNIPA, Intesa GIS) ed internazionali (INSPIRE, OGC), che individuano e propongono l'applicazione del principio dell'interoperabilità. Le informazioni geografiche devono essere esposte e quindi condivise secondo standard internazionali (Open Geospatial Consortium) al fine da consentire a tutti i soggetti interessati pubblici e privati l'accesso ai dati cartografici con strumenti e protocolli standard.

La scelta di basare il sistema di pubblicazione dei dati geospaziali della Regione Emilia-Romagna su standard aperti, Open Geospatial Consortium (OGC) e International Standardization Organization (ISO), consente all'amministrazione regionale di divulgare una piattaforma interoperabile sia internamente che con soggetti terzi in maniera conforme a quanto richiesto dalla direttiva INSPIRE.

E' possibile consultare direttamente le ortofoto, tramite l'applicazione Moka "Consultazione ortofoto Regione Emilia-Romagna" che permette di navigare sulla mappa visualizzando **foto dettagliate** scattate dall'alto di tutto il territorio regionale. Si possono

utilizzare **diverse scale** e distinguere dettagli con uno **scarto fino a 50 centimetri (scala 1:5.000)**. Il rilievo svolto nel lavoro di tesi è stato condotto con una precisione centimetrica, risultando quindi interessante e appetibile per l'integrazione della cartografia disponibile.

Il sito mette a disposizione **le ortofoto prodotte negli anni 2008, 2011 e 2014**. Grazie allo strumento delle trasparenze, è stato possibile visualizzare contemporaneamente diversi strati (che includono informazioni topografiche di vario tipo) per confrontarli tra loro e, sovrapponendo le foto di diversi anni, individuare differenze o analogie. Per il lavoro di tesi si è impiegata l'ortofoto risalente al 2011.

I prodotti sono stati scaricati, in modo tale da essere interfacciati con quelli creati per la tesi, attraverso la sezione di Download.

Di seguito si riportano i prodotti direttamente consultabili forniti dalla Regione ritenuti interessanti per l'inquadramento dell'area in esame.

DBTR full

La carta, proveniente dal DataBase Topografico Regionale (DBTR), contiene la quasi totalità delle classi del DBTR 2013, tematizzate singolarmente sull'attributo geometrico principale. La mappa ha come scopo principale una visione di dettaglio sulle singole classi. Come per le successive, si riporta la mappa nella zona di dettaglio.

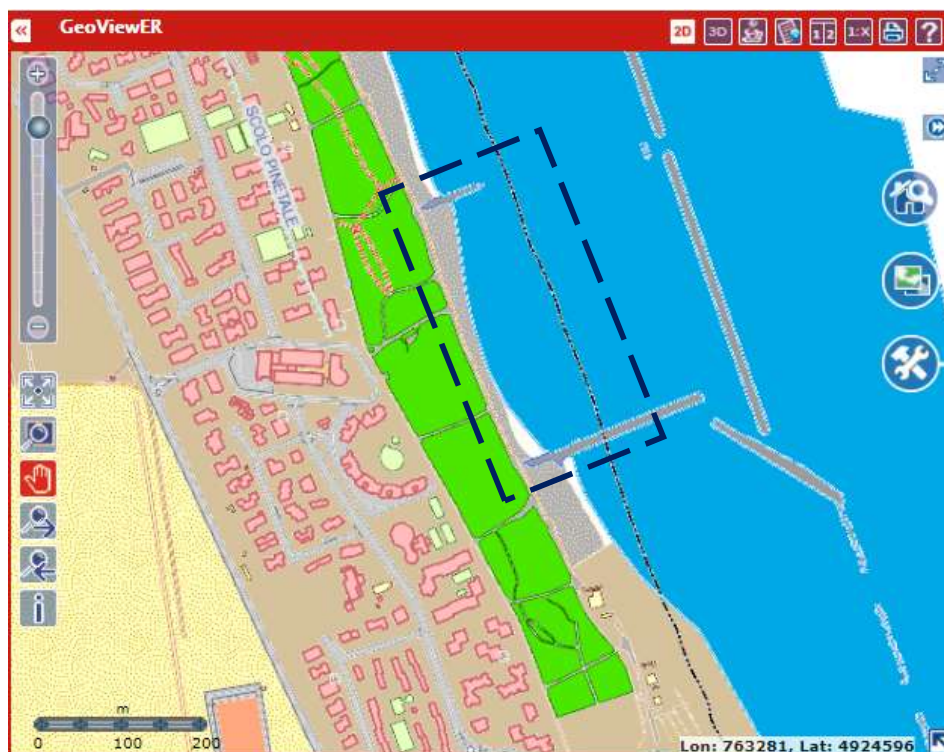


Figura 13.3: DBTR full della zona del rilievo – geoportale.regione.emilia-romagna.it, 2019 [37]

DBTR - Area di mare

Questa carta rappresenta porzioni di aree di mare, adiacenti alla linea di costa marina, la cui acquisizione risulta significativa per la presenza di opere di difesa o altri manufatti, di isole o scogli, di impianti produttivi, di attrezzature per la navigazione e opere non palificate. La fonte primaria per l'acquisizione degli oggetti è costituita dalla Carta Tecnica Regionale CTR5, con aggiornamenti speditivi basati sulle campagne di aggiornamento Quikbird 2002-2003, Agea 2005-06, Agea 2007, Agea 2008 e Agea2011. L'aggiornamento dei contenuti di CTR5 avviene per tutti gli oggetti nuovi e in tutti i casi in cui l'oggetto presente in CTR5 sia chiaramente riconoscibile sulla fonte di aggiornamento più recente ma risulti "fuori tolleranza" per variazione di forma. Altre fonti primarie alternative a CTR5 sono costituite da strati vettoriali o cartografia numerica, che rispettino i requisiti necessari per il DBT, disponibili presso i SIT comunali.

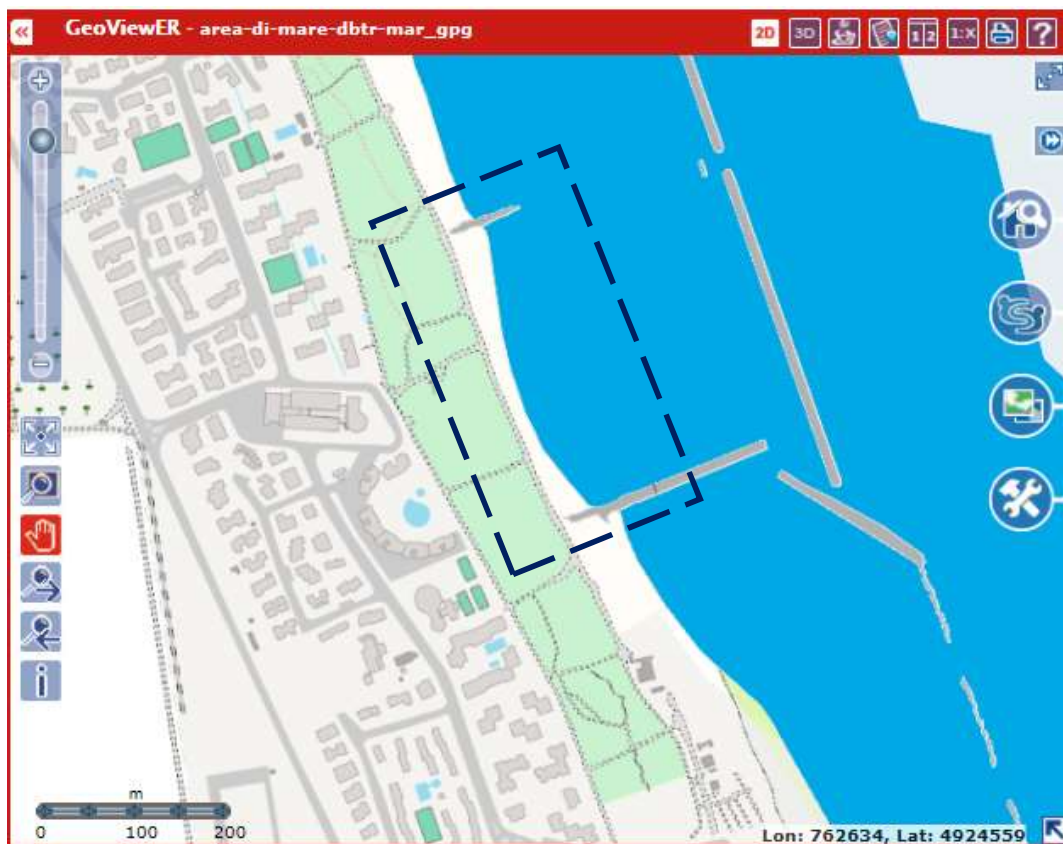


Figura 13.4: DBTR – Area di mare della zona del rilievo – geoportale.regione.emilia-romagna.it [37]
L'ortofoto Agea 2011 (pubblicata nel 2012), impiegata per il progetto in QGIS, è in scala 1:5.000 e presenta un'accuratezza teorica pari a $0,2\text{mm} \times \text{Sc} = 1 \text{ m}$.

DBTR – Linea di costa marina

Analoga alla mappa precedente, in questa è contenuto un vettore che materializza la linea di costa attraverso la rappresentazione in blu. In questo caso, la fonte primaria per l'acquisizione degli oggetti è costituita dal database dell'Uso del Suolo nella versione 2008, utilizzando le regole di congruenza richieste per il Database Territoriale. Il DB dell'Uso del Suolo versione 2008 ha come fonte principale l'ortofoto Agea 2008 e Agea 2011.

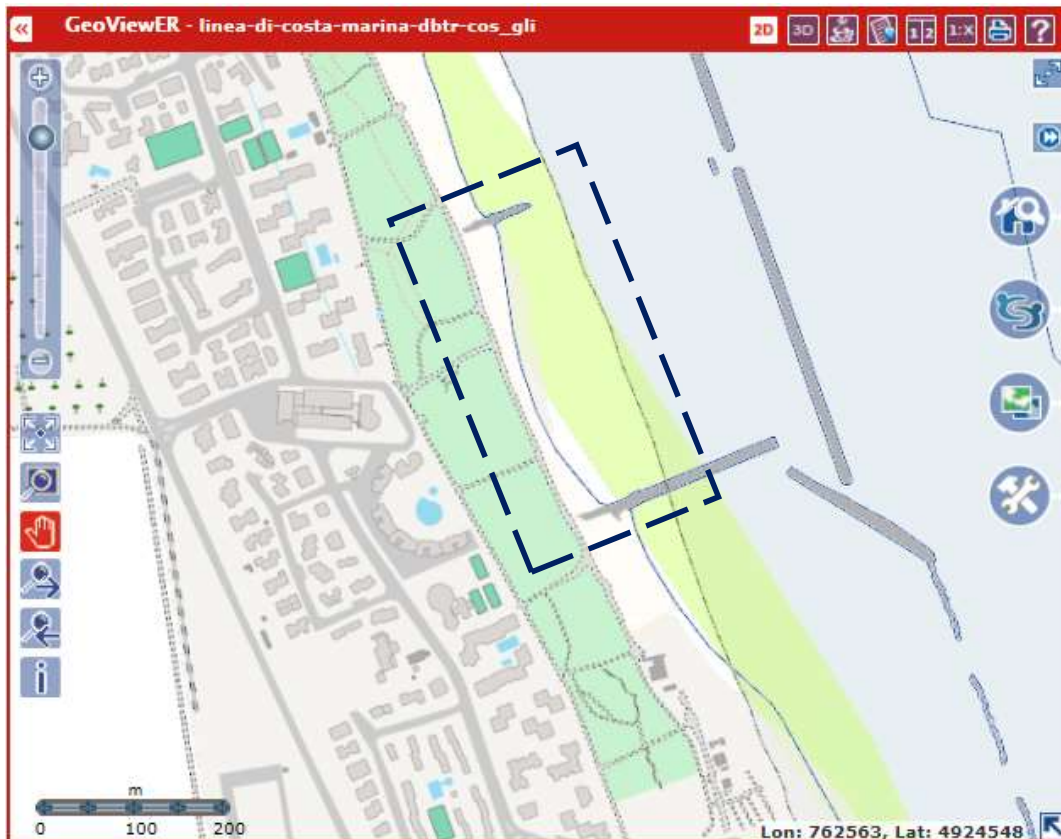


Figura 13.5: DBTR – Linea di costa marina della zona del rilievo – geoportale.regione.emilia-romagna.it, 2019 [37]

La linea di costa attuale è stata confrontata con quella del 2011, nel paragrafo 13.4.2.

Uso del suolo

La mappa è costituita da una base di dati georeferenziata di tipo vettoriale contenente raggruppamenti omogenei di dati riferiti alle varie tipologie di uso del suolo di dettaglio 2014, nella scala di riferimento 1:10.000.

La necessità di provvedere all'aggiornamento delle informazioni per un tematismo soggetto a rapidi mutamenti nel corso del tempo, ha portato alla predisposizione di questa edizione che è stata realizzata mediante l'utilizzo di ortofoto TeA 2014 a colori (RGB). Questa edizione è stata prodotta attraverso l'aggiornamento della copertura poligonale del 2008 di dettaglio: si è mantenuto lo stesso sistema di classificazione e le stesse caratteristiche dimensionali di dettaglio, permettendo di poter effettuare con precisione i vari tipi di confronto fra le due edizioni.



Figura 13.6: DBTR – Uso del suolo della zona del rilievo – geoportale.regione.emilia-romagna.it, [37]

La zona del rilievo è classificata nella categoria 3.3.1.0 – *Spiagge, dune e sabbie* e risulta adiacente:

- A Sud alla 1.4.2.8 – *Aree adibite alla balneazione*
- A Ovest alla 1.4.1.1 – *Parchi*
- A Nord alla 3.2.3.1 – *Vegetazione arbustiva e arborea in evoluzione*

Tematismi dei suoli e carte derivate

La carta descrive i suoli e la loro distribuzione geografica nella pianura e in parte della collina emiliano-romagnola, in scala 1:50.000. Ogni singolo poligono (delineazione) della carta dei suoli è identificato da un codice numerico.

Sono descritti complessivamente 396 tipi di suolo (210 in pianura, 148 nel basso Appennino, 38 in medio Appennino), classificati in base alla Soil Taxonomy (2010) e WRB (1998, 2007). L'edizione 2015 amplia la copertura collinare all'87%.

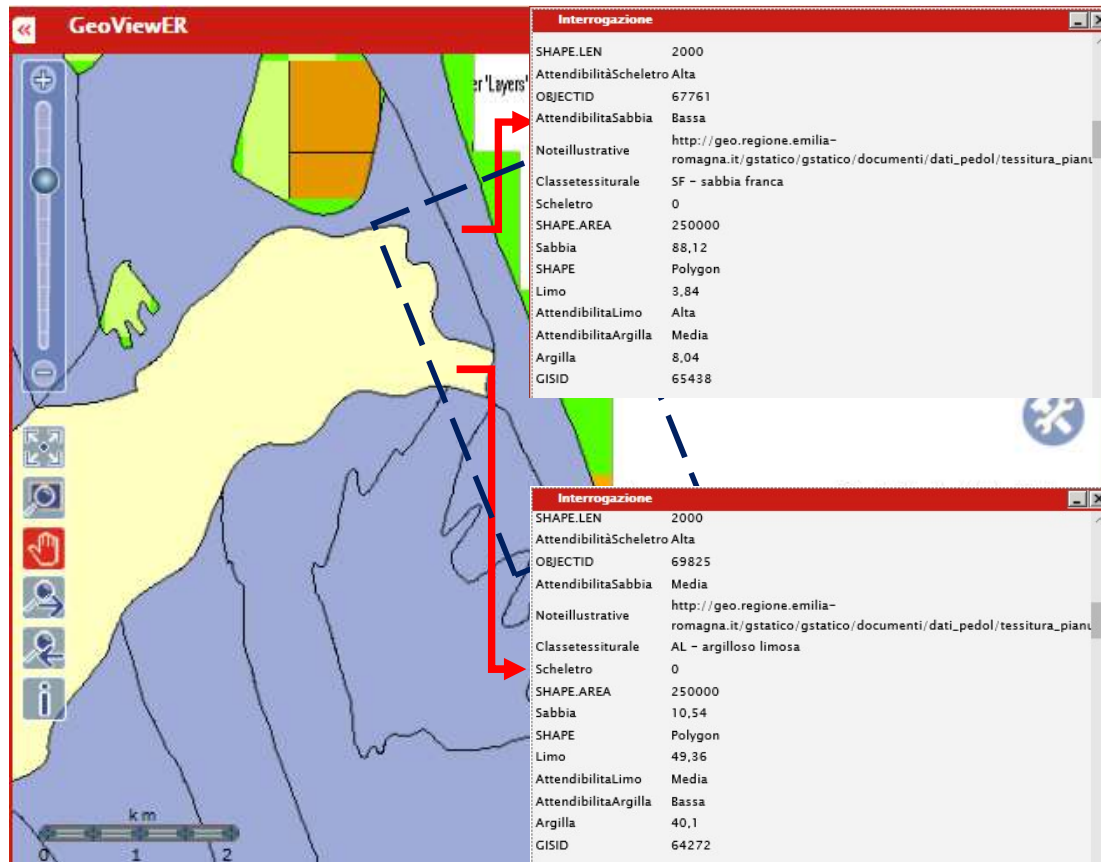


Figura 13.7: DBTR – Tematismi dei suoli e carte derivate– geoportale.regione.emilia-romagna.it, [37]

Conformemente alle osservazioni del capitolo 7, l'area di interesse è composta da sabbia franca ricoprente materiale argilloso-limoso, derivante da depositi alluvionali e paludosi più antichi.

Parchi e riserve

Il layer rappresenta la zonizzazione dei Parchi nazionali e regionali, delle Riserve naturali regionali e delle Riserve statali.

I Parchi nazionali vengono rappresentati per la sola area ricadente nel territorio della Regione Emilia-Romagna. La delimitazione delle Aree protette viene definita al momento dell'istituzione dei Parchi e delle Riserve e, per i Parchi, può essere successivamente perfezionata o ampliata in fase di redazione dei relativi Piani Territoriali (PTP).

In questo layer informativo viene rappresentata la zonizzazione dell'area protetta così come è definita nel documento corrispondente allo stadio più avanzato dell'iter di pianificazione territoriale di ogni singola area protetta.

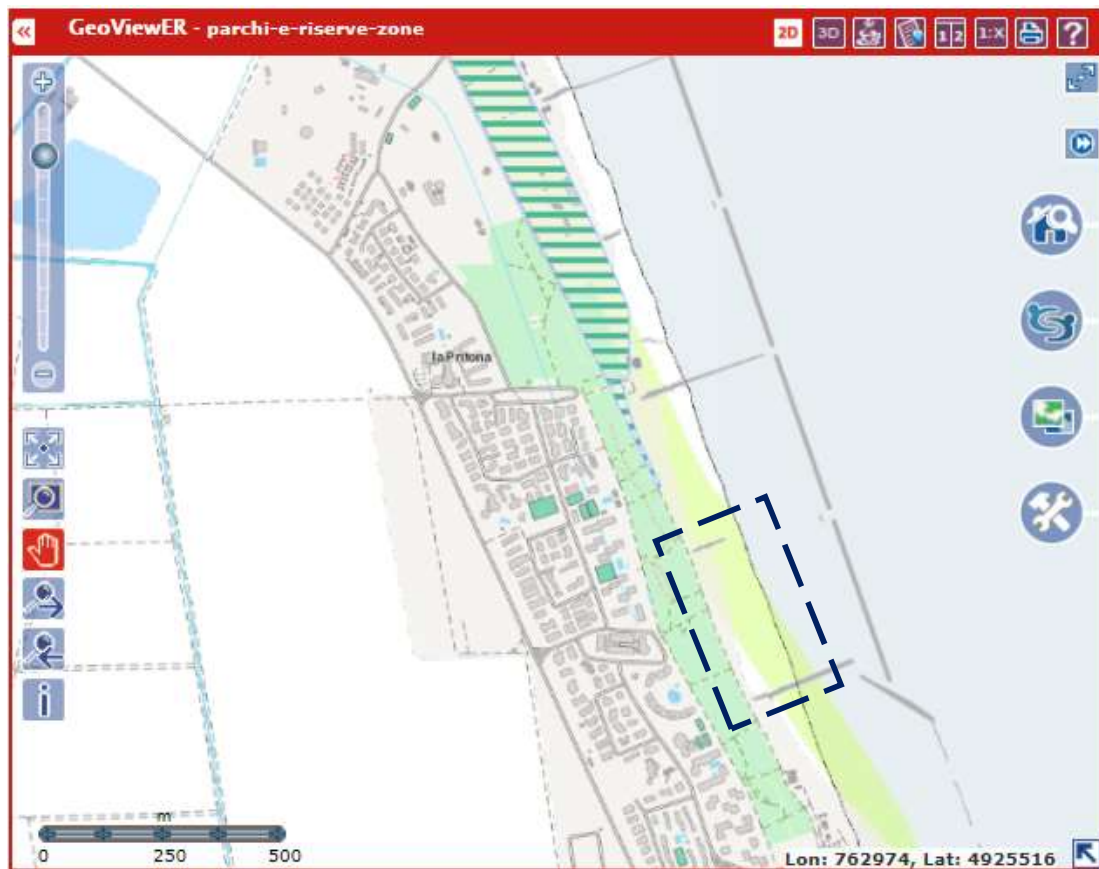


Figura 13.8: DBTR – Parchi e Riserve della zona del rilievo – geoportale.regione.emilia-romagna.it,

[37]

In questa carta si può rilevare la Riserva Statale Pineta di Ravenna a Nord dell'area in esame.

Interventi della Protezione Civile

Recentemente è nato il nuovo servizio cartografico online dell'Agencia per la Sicurezza territoriale e la Protezione civile, in cui è possibile visualizzare **lo stato dei più recenti interventi urgenti di messa in sicurezza di argini, sponde, strade e dissesti sul territorio emiliano-romagnolo**. La nuova applicazione consente la visualizzazione su mappa georeferenziata dei cantieri aperti, dei lavori conclusi e di quelli programmati, ma ancora da eseguire, in tutta l'Emilia-Romagna.

Sono monitorati e rappresentati gli interventi disposti e finanziati a seguito di eccezionali eventi di maltempo, avvenuti dal 2013 in poi, oggetto di dichiarazioni di stati d'emergenza nazionale da parte del Consiglio dei Ministri e di specifiche ordinanze del Capo del Dipartimento della Protezione civile. Sono inoltre inseriti gli interventi finanziati dal Fondo di solidarietà dell'Unione europea per i gravi eventi di maltempo.

La mappa integra le azioni urgenti per la mitigazione del rischio idrogeologico finanziate dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, lavori finanziati dallo Stato e seguiti a livello territoriale dai Servizi d'Area dell'Agencia regionale.

Si riporta un esempio di intervento occorso in data 5 Giugno 2015 nella località di studio, con informazioni riguardo al lavoro eseguito e al relativo importo.

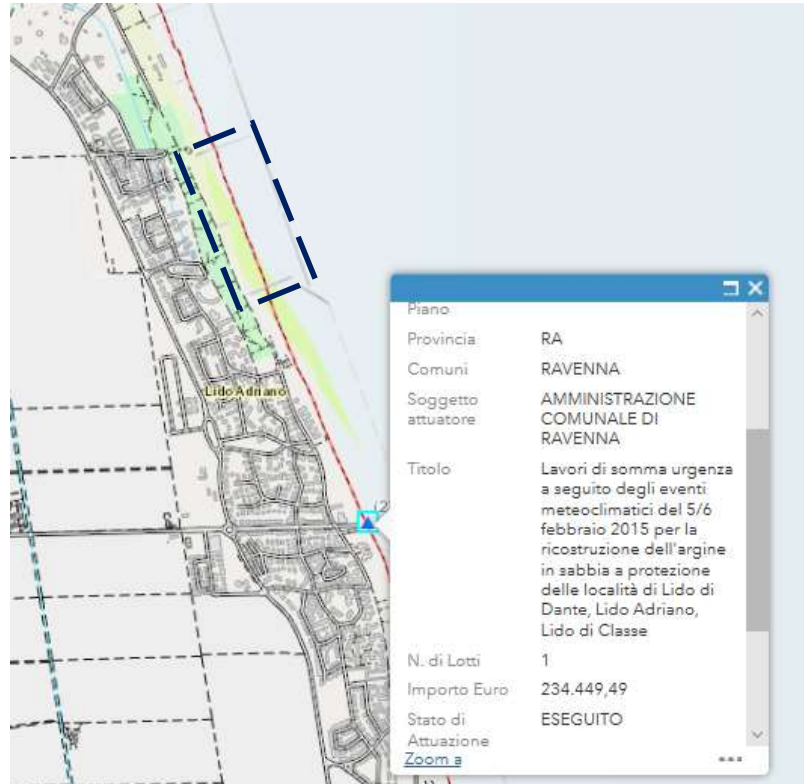


Figura 13.9: DBTR – Interventi della Protezione Civile della zona del rilievo – geoportale.regione.emilia-romagna.it, 2019 [37]

13.4) Studio dell'area oggetto di tesi in ambiente QGIS

Si procede alla descrizione delle operazioni che sono state eseguite in ambiente QGIS.

13.4.1) Individuazione della linea di costa

Allo scopo di valutare le variazioni multi-temporali della linea di costa, intesa come confine ultimo tra terraferma e mare, si è proceduto a vettorializzare tali linee sui prodotti disponibili in rete (CTR98 e AGEA2011) e sulla migliore ortofoto ricavata dalle procedure di Metashape.

La linea di costa è stata realizzata in QGIS con il comando *Crea vettore* → *Nuovo Shapefile*, che consente di disegnare sulle ortofoto punti, linee ed aree nel sistema di riferimento scelto.

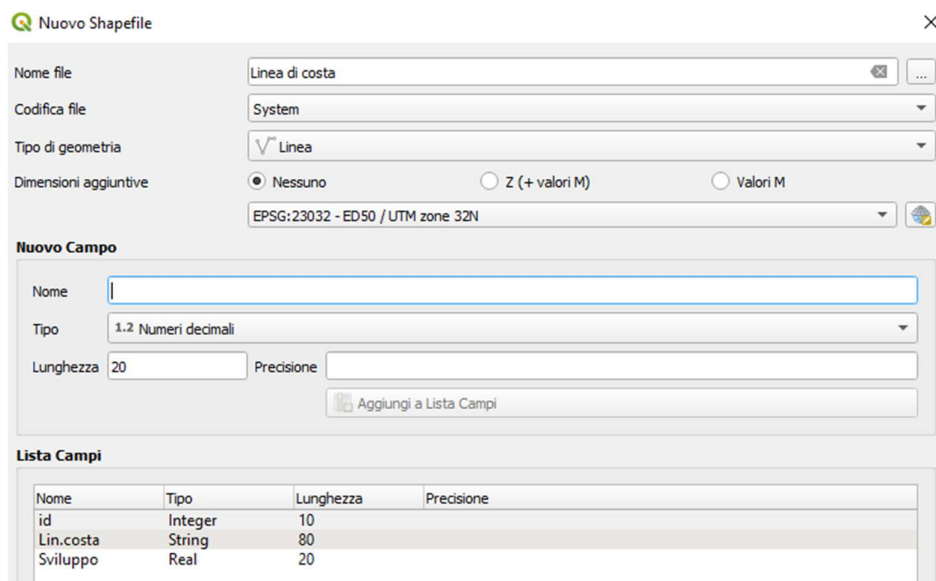


Figura 13.10: Finestra di comando "Nuovo Shapefile" per la realizzazione di elementi georeferenziati

La linea, individuata in rosso sulla ortofoto (ottenuta dall'ortofoto con tutti i PFA), è stata tracciata tenendo qualitativamente in considerazione la variabilità della marea e del moto ondoso nel periodo di riferimento del rilievo, compreso tra le 12:00 e le 13:00 di venerdì 24 maggio 2019.

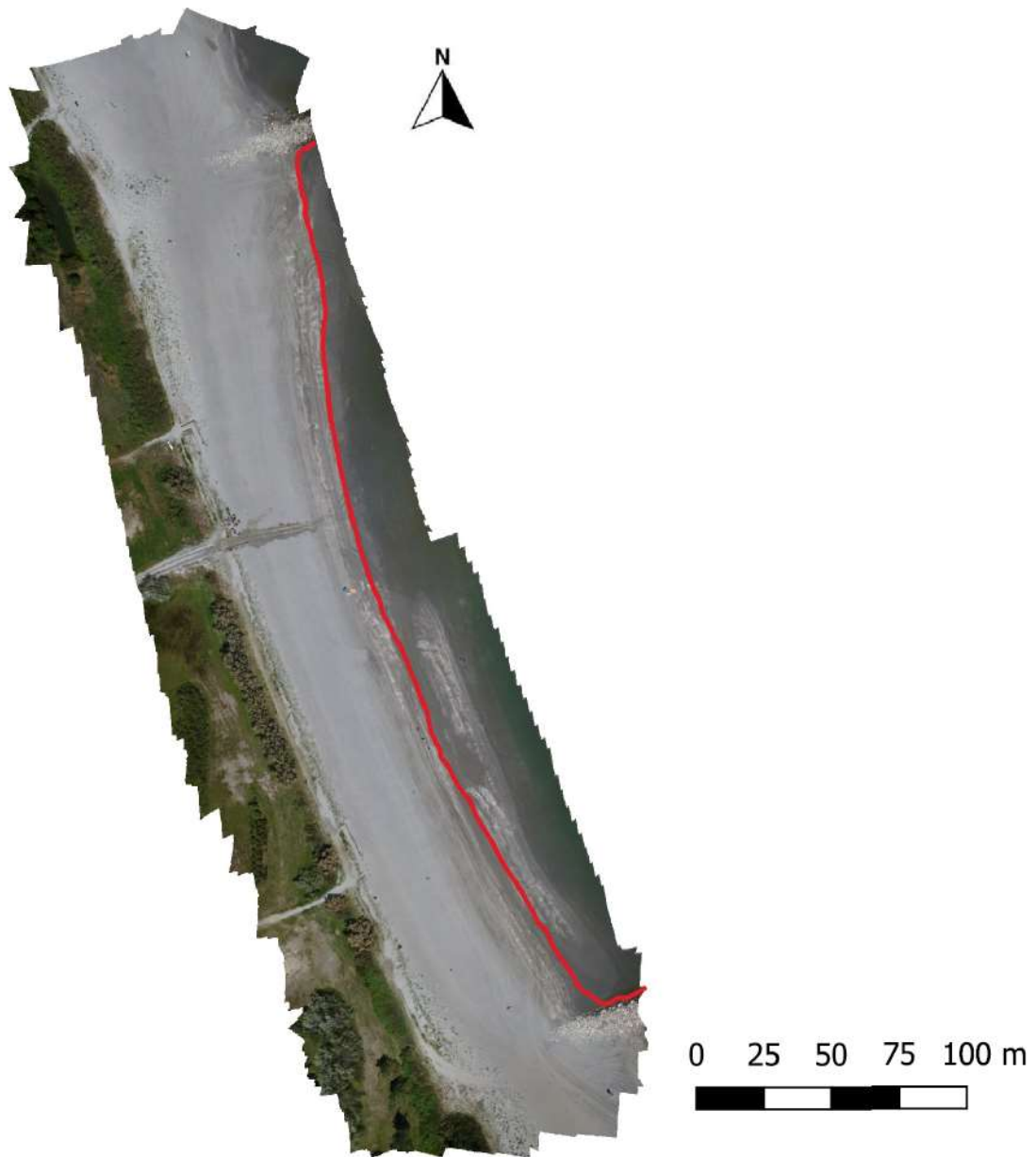


Figura 13.11: Linea di riva estratta dall'ortofoto con tutti i PFA

E' stato possibile confrontare lo stato al momento del rilievo con gli altri dati a disposizione.

13.4.1.1) Confronto con CTR del 1998

In *Figura 13.11* si riporta la linea ottenuta, confrontandola con la Carta Tecnica Regionale redatta nel 1998, basata sul rilievo aereo del 1977.



Figura 13.12: Linea di riva estratta dall'ortofoto con tutti i PFA a confronto con la CTR 1998

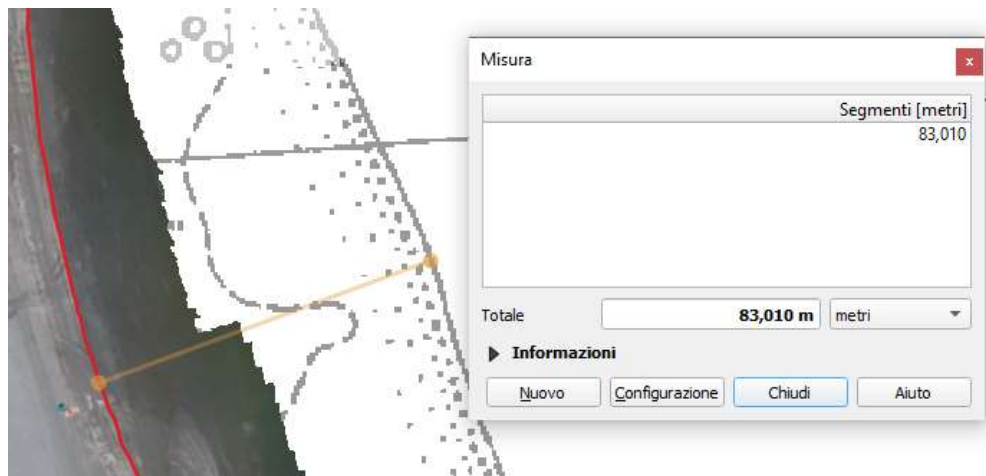


Figura 13.13: Distanza massima tra la linea di costa attuale (in rosso) e quella del 1998

Il valore massimo di erosione è risultato compreso tra **83 m ± 0,50m**. La deviazione standard è derivata direttamente dalla propagazione della varianza, legata alla precisione della CTR, pari a:

$$\sigma_{XY} = \text{errore graficismo} \times S_c = 0,2 \mu\text{m} \times 5.000 = 1 \text{ m} \quad (13.1)$$

Il valore ricavato si attesta nel range di arretramento della costa evidenziato nel capitolo 7 e ricavato da Gabbianelli (2007) presso Lido Adriano: questo fenomeno, come precedentemente specificato, dipende da numerosi fattori di interazione, ma in particolar modo, dalla subsidenza registrata a causa dell'estrazione di fluidi condotta fino al 1978 e al consumo di spiaggia legato all'urbanizzazione, nonché alle attività balneari.

Si è proceduto all'identificazione delle distanze relative tra le due linee di costa lungo la spiaggia, poste ad un interasse medio di 12 metri e per un totale di 26, per determinarne il valore medio di arretramento e la deviazione standard.

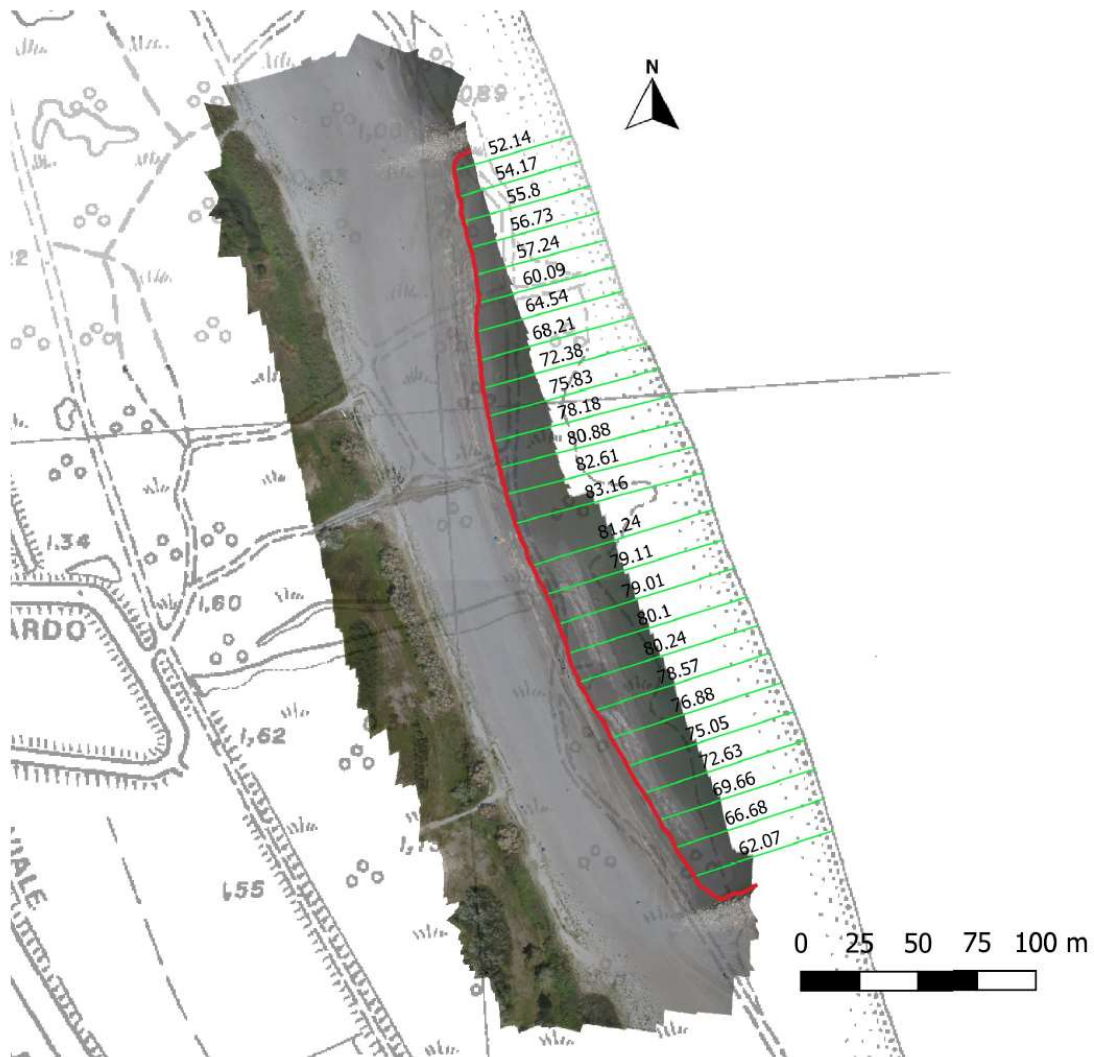


Figura 13.14: Distanze tra la linea di riva di maggio 2019 e la linea di riva del 1998

Distanza	Valore [m]	Distanza	Valore [m]
1	-52,14	14	-83,16
2	-54,17	15	-81,24
3	-55,8	16	-79,11
4	-56,73	17	-79,01
5	-57,24	18	-80,01
6	-60,09	19	-80,24
7	-64,54	20	-78,57
8	-68,21	21	-76,88
9	-72,38	22	-75,05
10	-75,83	23	-72,63
11	-78,18	24	-69,66
12	-80,88	25	-66,68
13	-82,61	26	-62,07

Tabella 13.1: Distanze tra la linea di riva di maggio 2019 e la linea di riva del 1998

L'arretramento medio vale **70,90 m ± 9,80 m**. Si è rilevato che la deviazione standard è elevata a causa dell'erosione eterogenea, rilevata a partire dal 1977 sino ad oggi, come confermato dalle osservazioni del capitolo 7.

13.4.1.2) Confronto con ortofoto progetto Agea 2011

Il progetto Agea è stato condotto tra i mesi di maggio e giugno 2011, esattamente 8 anni prima rispetto al rilievo. Si è prevista, di conseguenza, una variazione meno significativa della linea di riva, con un eventuale accrescimento legato alla politica sostenibile di ripascimento adottata a partire dagli interventi del 1999.

Nella pagina seguente, vengono illustrate nelle *Figure 13.13 e 13.14* rispettivamente, le linee a confronto e il massimo avanzamento registrato.

Per poter consentire una contemporanea visione delle due ortofoto, quella realizzata nell'ambito della tesi è stata sovrapposta con quella Agea con una trasparenza al 40%.



Figura 13.15: Linea di riva estratta dall'ortofoto con tutti i PFA (in rosso) a confronto con la linea di riva estratta dall'ortofoto Agea 2011 (in blu)

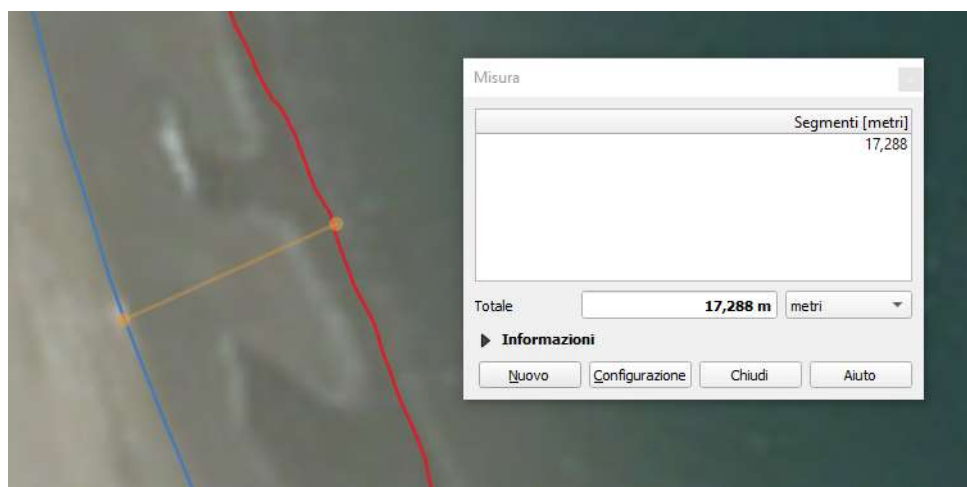


Figura 13.16: Distanza massima tra la linea di costa attuale (in rosso) e quella del 2011 (in blu)

Il valore medio di accrescimento è risultato di **17,30 m ± 50 cm**. La deviazione standard adottata corrisponde direttamente al *GSD* dell'ortofoto, ovvero la dimensione del pixel nello spazio reale: al di sotto di questo valore le misure avrebbero perso di significato, non risultando attendibili.

Come ipotizzato, la costa ha osservato un accrescimento positivo che manifesta l'efficacia dei frangiflutti realizzati, i quali hanno permesso e tuttora permettono un ripascimento costante, gestito attraverso la manutenzione annuale degli stessi.

Si è proceduto all'identificazione di punti significativi, disposti ad una distanza di circa 12 metri su entrambe le linee di costa, per determinare la distanza media di avanzamento e la dispersione dei valori.



Figura 13.17: Distanze tra la linea di riva di maggio 2019 (in rosso) e la linea di riva di maggio 2011 (in blu)

Distanza	Valore [m]	Distanza	Valore [m]
1	7,95	14	12,72
2	9,56	15	13,97
3	9,47	16	16,45
4	12,98	17	17,04
5	15,26	18	15,55
6	17,33	19	13,34
7	15,03	20	13,6
8	14,75	21	13,61
9	15,01	22	13,81
10	14,5	23	13,22
11	14,55	24	11,3
12	13,63	25	7,72
13	12,93	26	3,72

Tabella 13.2: Distanze tra la linea di riva di maggio 2019 e la linea di riva del 2011

L'accrescimento medio vale $13\text{ m} \pm 3\text{ m}$. In questo caso la deviazione standard è minore, a testimonianza della manutenzione e del ripascimento controllati che vengono svolti regolarmente in seguito all'attuazione di una politica di sviluppo sostenibile del litorale, come confermato dalle osservazioni del capitolo 7, mantenendo costante la conformazione della linea di costa.

13.4.2) Estrazione e confronto di sezioni

I DEM (Digital Elevation Model) importati in ambiente QGIS sono a tutti gli effetti dei DSM, in quanto includono la vegetazione dell'area.

Per tracciare le sezioni sui DSM si impiega il plug-in *Profile Tool*, come mostrato in *Figura 13.18*.



Figura 13.18: Icona di Profile Tool per l'estrazione di sezioni trasversali

Per confrontare l'andamento tipologico della spiaggia, si realizzano 4 sezioni trasversali e 2 sezioni longitudinali.

13.4.2.1) Trasformazione in quote ortometriche con il software ConvER3

Le coordinate dei PFA nel progetto di partenza sviluppato in Metashape sono state rilevate nel sistema di riferimento ETRS89 in coordinate ellissoidiche: la quota delle coordinate è espressa rispetto all'ellissoide WGS84.

Al fine di confrontare i modelli con le maree che interessano la zona in esame, si è passati dalle coordinate ellissoidiche alle coordinate geografiche ortometriche, riferendo le quote altimetriche al geoide (superficie equipotenziale del campo gravitazionale terrestre).

Per poter trasformare i DEM e le ortofoto passando dalle quote ellissoidiche a quelle geoidiche in QGIS, sono stati realizzati i seguenti passaggi su ConvER3, per la cui illustrazione generale, si rimanda al paragrafo 2.6.

ConvER3 è in grado di elaborare in modalità “batch” i file della cartografia vettoriale nei formati Shapefile e DXF, i file con le informazioni per la georeferenziazione (world file, es. TFW) e file di testo con elenchi di punti. Nel caso in esame, le coordinate ETRS89 dei PFA sono state importate con estensione .txt (file di testo), seguendo il workflow esposto.

Nella parte sinistra della finestra di dialogo principale (input) si è selezionato:

- Il sistema geodetico di riferimento “ETRF89”, sotto alla colonna “Geografiche”
- Il tipo di quota “Ellissoidica E89”

Si è usato il comando “Formato file con liste di coordinate”, posto sotto alla scelta del sistema nella cornice di input e nella finestra di dialogo per la descrizione dei campi presenti nel file, eseguendo le operazioni sotto descritte:

- Selezione della casella “Numero del punto”, che esprime il dato di input
- Scelta dell’ordine in cui sono scritte le coordinate, quindi “Lat Lon”
- Selezione della casella “Quota”, che esprime il dato editabile di input delle quote
- Scelta del tipo di separatore usato nel file di input, ovvero “tabulazione”
- Selezione della corretta unità di misura degli angoli, quindi “Sessadecimali”.

Nella parte destra della finestra di dialogo principale (output) si è scelto:

- Il sistema geodetico di riferimento “UTM-ETRF89”, sotto alla colonna “Piane”
- Il tipo di quota “Geoidica”
- Il fuso desiderato

L’output ottenuto è anch’esso un file di testo, di cui si riportano, in *Tabella 13.3*, le coordinate fornite come input in ETRS89 (sistema EPSG 4258) e le coordinate di output nel sistema UTM32N (sistema UTM32N) con quote geoidiche:

PFA	EPSG: 4258			EPSG: 23032		
	N [m]	E [m]	h [m]	N [m]	E [m]	H [m]
1	4924188	763145,4	39,355	4924388	763229,1	0,235
3	4924175	763114,1	40,938	4924374	763197,7	1,819
4	4924274	763113,3	39,453	4924473	763196,9	0,332
5	4924265	763078,6	40,946	4924464	763162,2	1,826
6	4924353	763061,4	40,755	4924552	763145,1	1,633
8	4924368	763107,1	39,362	4924568	763190,7	0,239
11	4924049	763173,4	40,865	4924249	763257	1,747
12	4924269	763096,7	40,212	4924468	763180,4	1,091
13	4924181	763129	40,072	4924380	763212,6	0,953

Tabella 13.3: Passaggio dalle coordinate ETRS89 alle coordinate UTM32N

A completamento, si riportano in Tabella 13.4 le differenze tra i due sistemi, sottraendo alle coordinate in EPSG 4258 quelle in EPSG 23032.

PFA	ΔN [m]	ΔE [m]	ΔH [m]
1	-199,467	-83,617	39,12
3	-199,467	-83,616	39,119
4	-199,466	-83,614	39,121
5	-199,467	-83,613	39,12
6	-199,467	-83,612	39,122
8	-199,466	-83,612	39,123
11	-199,468	-83,619	39,118
12	-199,466	-83,614	39,121
13	-199,467	-83,616	39,119
Media	-199,467	-83,615	39,120

Tabella 13.4: Differenze tra i due sistemi di riferimento

Si è notato che a livello planimetrico i due sistemi di riferimento risultano traslati rispettivamente di 199,47 m in direzione Nord e 83,62 m in direzione Est.

Per le precisioni volute, dell'ordine di 5 cm, è risultato lecito approssimare le correzioni di ciascun punto direttamente con i valori medi in quanto si ha un discostamento massimo di 3 cm, sia a livello planimetrico che altimetrico.

Le sezioni sono state traslate di $-39,12$ m per ricondursi alle quote ortometriche.

13.4.2.2) Sezioni trasversali

Impiegando il DSM relativo al modello ottenuto con tutti i PFA, si è effettuato uno studio geometrico da cui si sono estratte 4 sezioni trasversali tipologiche, poste ad un interasse di 80 metri, che individuano il profilo altimetrico della spiaggia, di cui alla Figura 13.19.

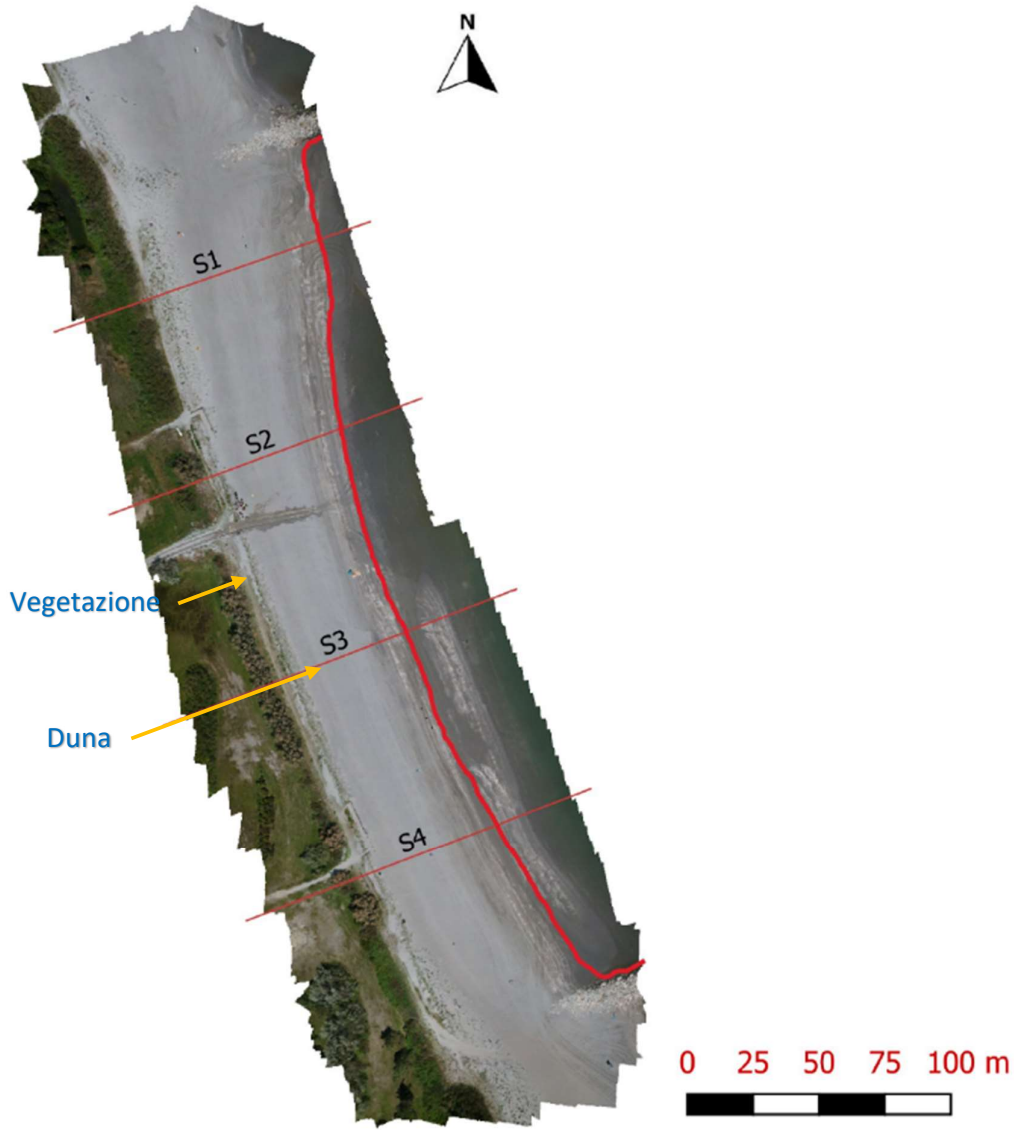


Figura 13.19: Posizione delle sezioni trasversali

L'estrazione è stata eseguita con il plug-in *Terrain Profile* che, una volta caricato il layer di interesse, ha mostrato le sezioni tracciate, come da *Figura 13.20*.

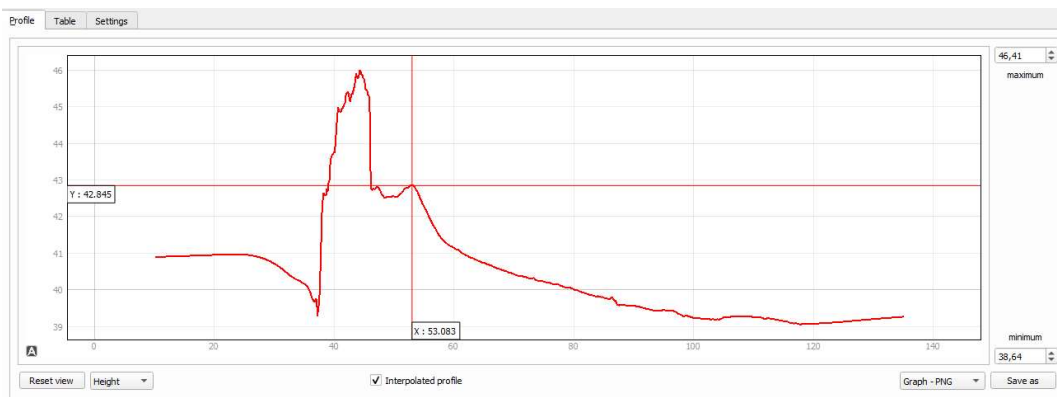


Figura 13.20: Interfaccia di *Terrain Profile*

Leggendo la sezione da sinistra a destra, da un primo esame, si è rilevato:

- Un effetto di bordo, legato al minore ricoprimento di fotogrammi
- La presenza di vegetazione ad alto fusto
- Il sistema dunale
- La spiaggia

Le sezioni sono state esportate con estensione .dxf (acronimo di Drawing Interchange Format) in modo tale da poter essere elaborate in Excel per:

- Traslare le sezioni da quote ellissoidiche a geodiche
- Includere informazioni mareografiche

Per individuare rapidamente l'arretramento subito dal litorale, si reputa interessante inserire anche le quote mareografiche:

- 1) Quota ideale del mare, posta a 0 m s. l. m
- 2) Quota della marea massima del 24/05/19 compresa tra le 12:00 e le 13:00
- 3) Quota della marea massima annuale

Per estrarre le quote di cui ai punti 2) e 3), si è fatto riferimento ai dati del mareografo di Porto Corsini della Rete Mareografica Nazionale, distante 7,52 chilometri dalla zona monitorata.

Il Servizio Mareografico Nazionale ha assunto la gestione della Rete Ondametrica Nazionale (RON), realizzata a suo tempo dal Ministero dei Lavori Pubblici, ed ha provveduto allo sviluppo e potenziamento della nuova Rete Mareografica Nazionale (RMN). La Rete Mareografica Nazionale è composta da 36 stazioni di misura uniformemente distribuite sul territorio nazionale ed ubicate prevalentemente all'interno delle strutture portuali. Questa rete sostituisce integralmente il sistema di rilevazione mareografico preesistente e dal mese di gennaio 2010, il parametro di livello idrometrico pubblicato viene monitorato con un nuovo sensore di livello a microonde (radar) con precisione millimetrica. Le informazioni, consultabili e scaricabili gratuitamente, sono fornite al sito www.mareografico.it.

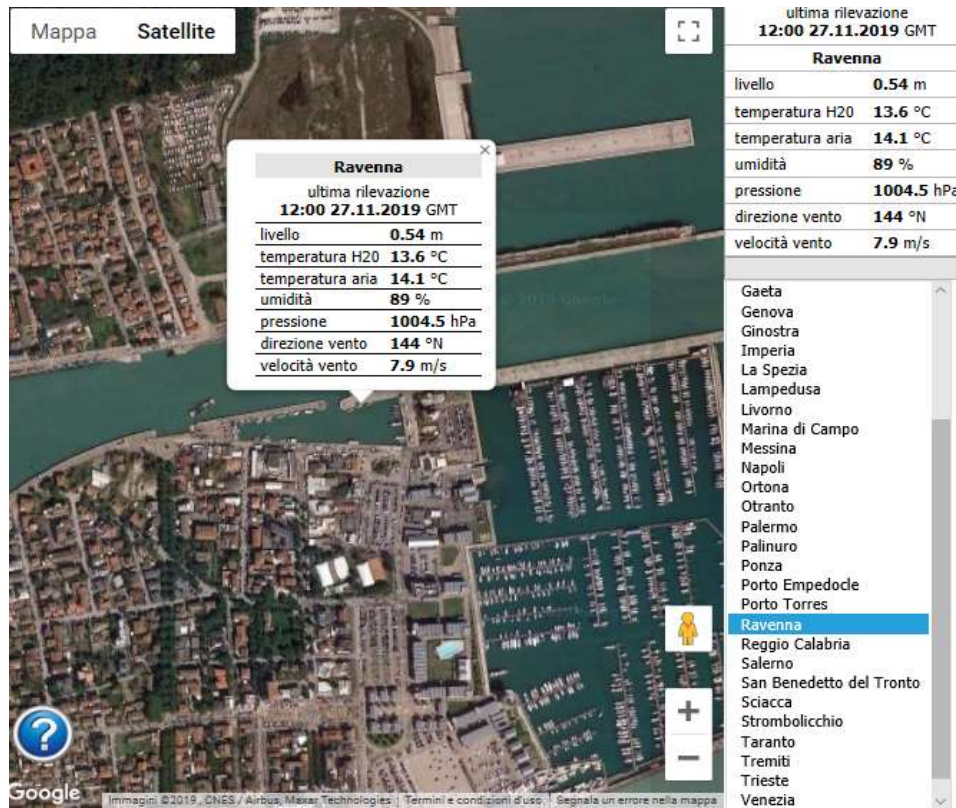


Figura 13.21: Individuazione della stazione mareografica di Ravenna – *www.mareografico.it*, 2019 [38]
 All'interno della voce *Livello Idrometrico* (Figura 13.22) si è individuato il periodo di riferimento preso in considerazione, come da Figure 13.23 e 13.24, rispettivamente per la marea massima nel periodo di rilievo e la marea massima annuale, riportate nelle pagine seguenti.

RAVENNA PORTO CORSINI
 LATITUDINE 44° 29' 31,47"
 LONGITUDINE 12° 16' 58,57"

descrizione della stazione

- ▶ livello idrometrico
- ▶ temperatura acqua
- ▶ temperatura aria
- ▶ umidità relativa
- ▶ pressione atmosferica
- ▶ velocità e direzione vento
- ▶ confronto tra parametri

Livello idrometrico

Seleziona l'intervallo temporale

inizio 12 : 00 24 05 2019
 fine 13 : 00 24 05 2019 **PROCEDI**

Figura 13.22: Definizione del periodo di riferimento – *www.mareografico.it*, 2019 [38]

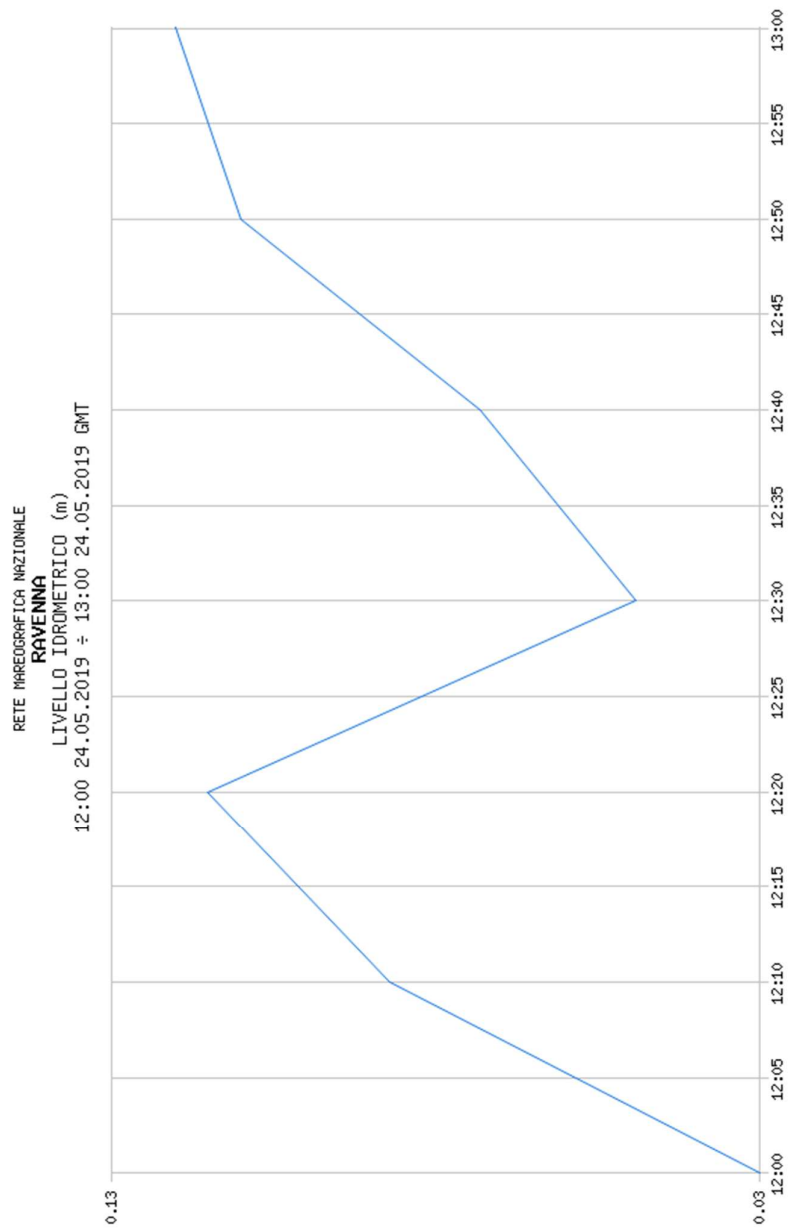


Figura 13.23: Oscillazione della marea dalle 12:00 alle 13:00 del 24/05/19 – www.mareografico.it, [38]
Il valore di marea, ricavato nella tabella annessa al grafico in cui si visualizzano i dati ad intervalli di 5 minuti, è risultato pari a **0,11 m**.

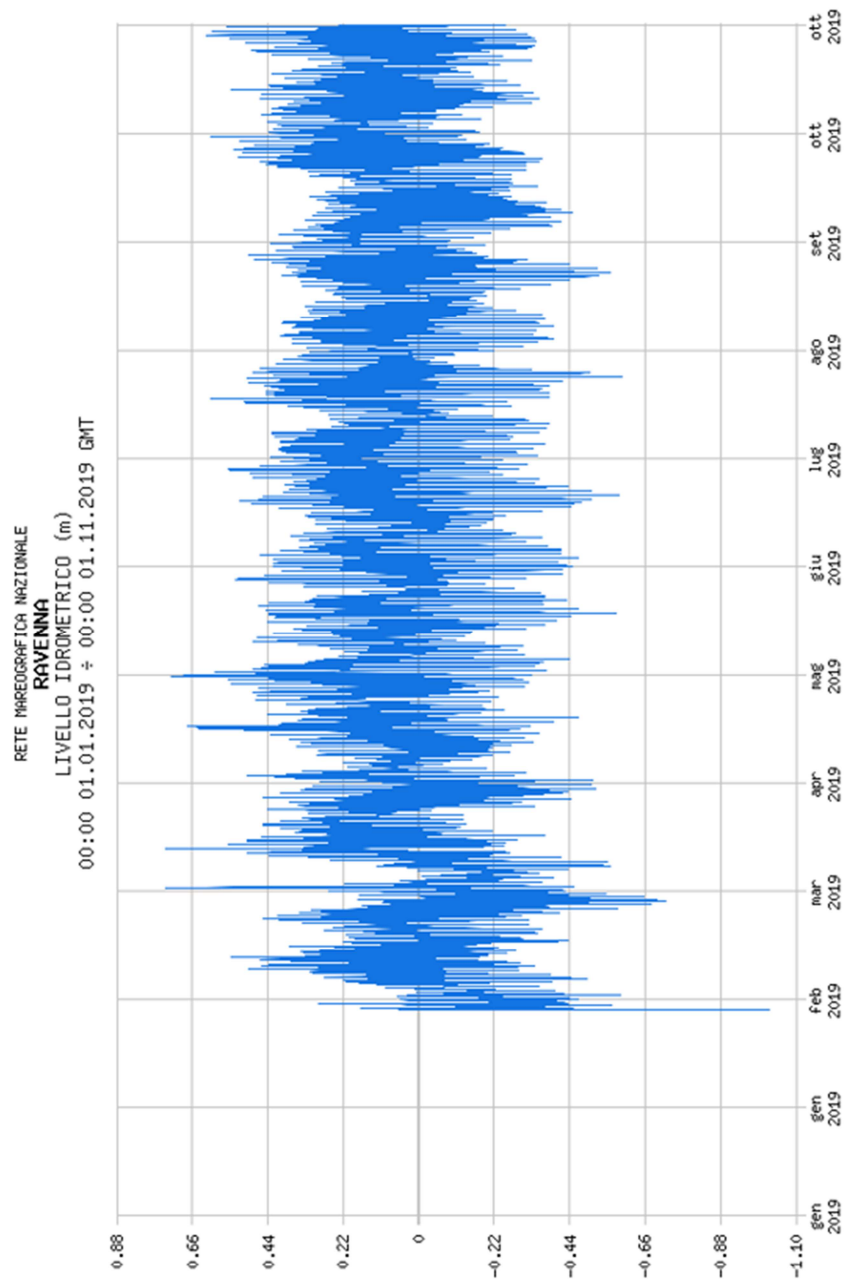


Figura 13.24: Oscillazione della marea dal 1/02/19 al 1/11/19 – www.mareografico.it, [38]

Il valore di marea, ricavato nella tabella annessa al grafico in cui si visualizzano i dati ad intervalli giornalieri, è risultato pari a **0,73 m**.

Nelle pagine seguenti si riportano nelle *Figure 13.25* e *13.26* le sezioni ottenute, evidenziando lo sviluppo delle porzioni di:

- Vegetazione retrostante
- Sistema dunale
- Spiaggia
- Porzione sommersa del litorale

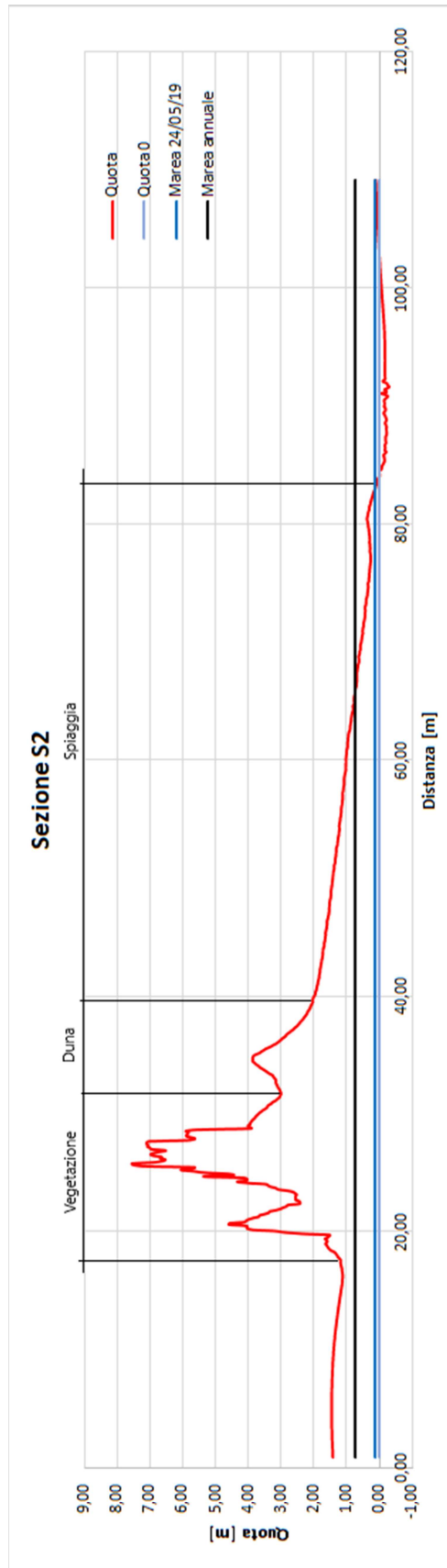
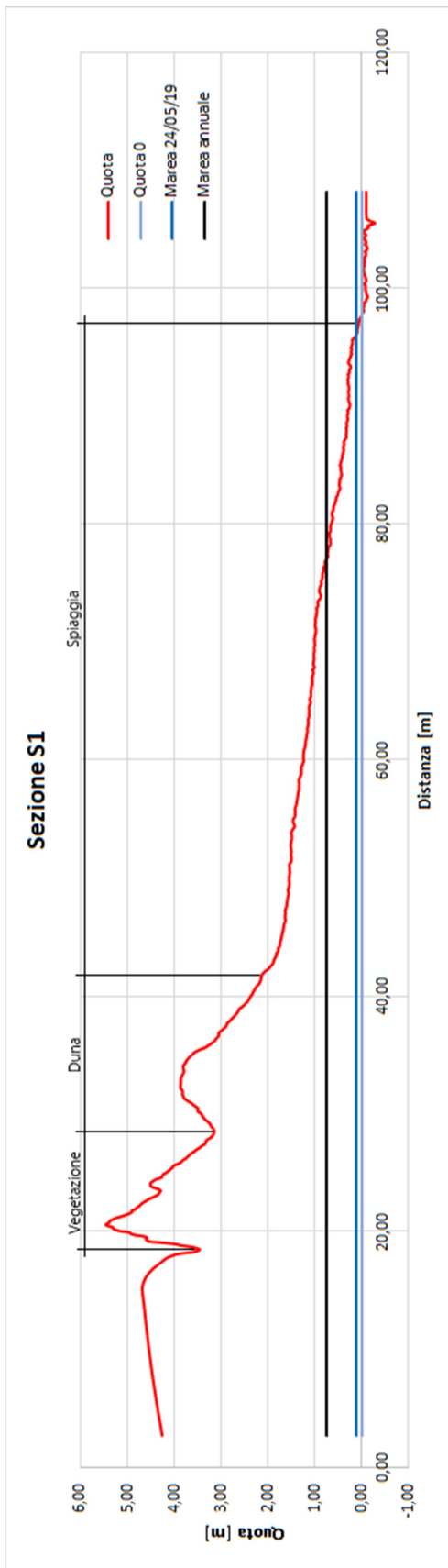


Figura 13.25: Sezione S1 e Sezione S2

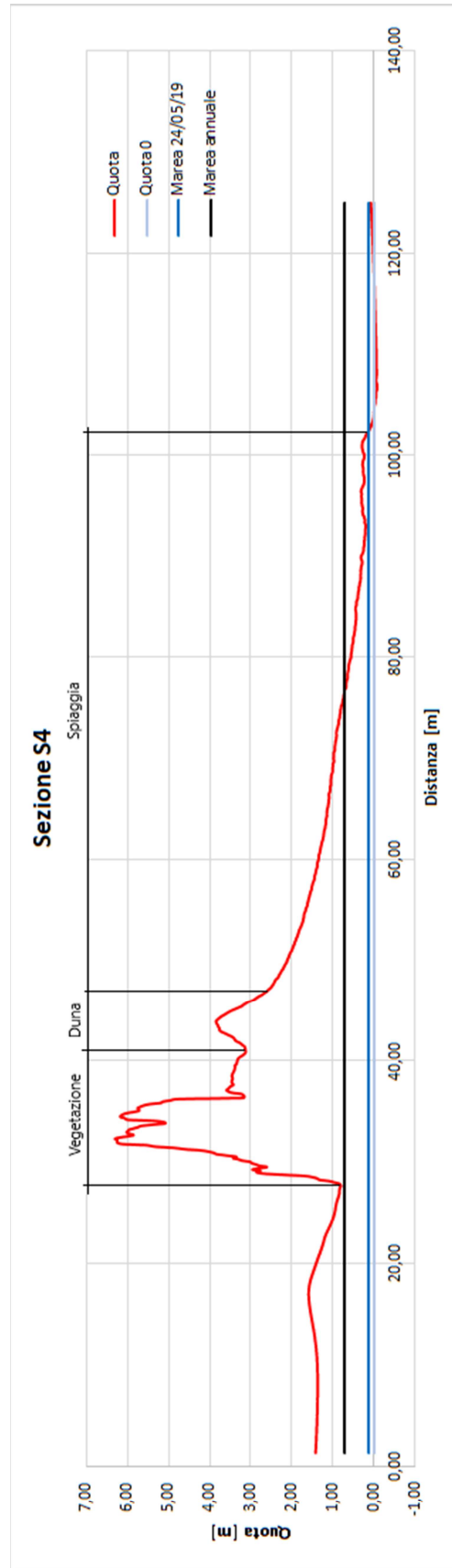
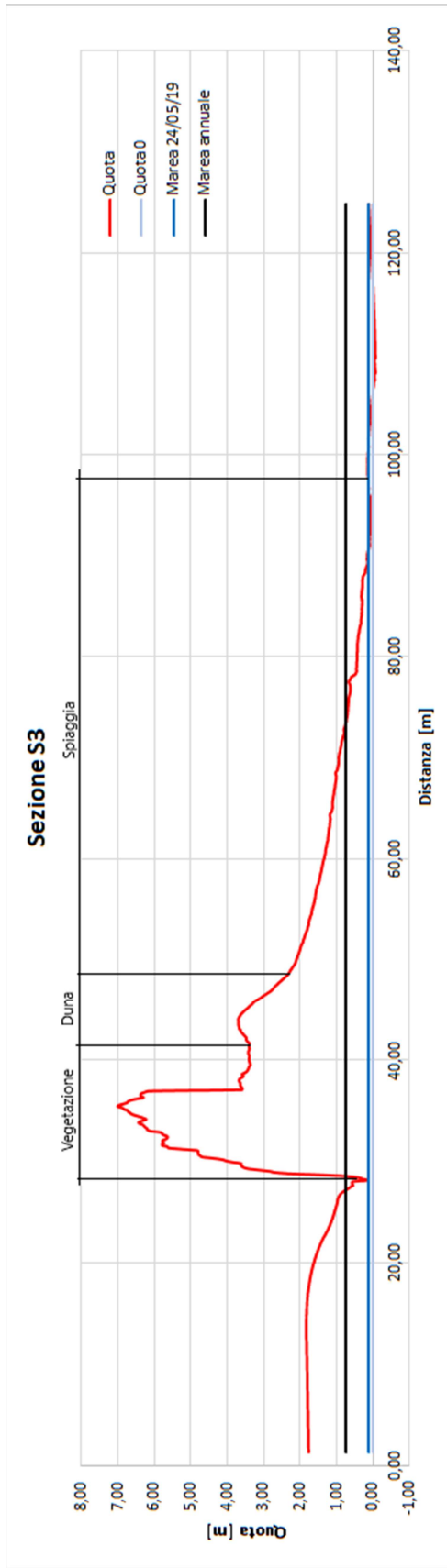


Figura 13.26: Sezione S1 e Sezione S2

Sulla base delle sezioni estratte, si sono ricavate le seguenti informazioni:

- Regressione della spiaggia in corrispondenza delle maree, ai fini di monitorare il rischio di ingresso delle acque marine nel territorio. Per le due maree considerate, si sono individuati i seguenti arretramenti medi:
 - **10 cm**, in concomitanza della marea durante il periodo di rilievo
 - **23,05 m** in concomitanza della massima marea annuale
- Individuazione del sistema dunale che, a causa dell'assenza di afflusso di materiale deposizionale come esposto nel capitolo 7, funge da principale fonte di sedimento per il ripascimento del litorale. Preservarne l'esistenza è, quindi, fondamentale non solo per la riduzione dei costi legati al trasporto di materiale, ma anche perché funge da elemento protettivo dell'area retrostante la spiaggia e garantisce un microhabitat per numerose specie animali e vegetali, come riscontrato negli studi riportati al paragrafo 6.4.2.
- Pendenza media della spiaggia, pari a **4,5°**. La pendenza è risultata di poco maggiore rispetto a quella individuata nel capitolo 7 in quanto, nel caso in esame, è stata inclusa la prima porzione di duna.

13.4.2.3) Sezioni longitudinali

Impiegando il DSM relativo al modello ottenuto con tutti i PFA, si sono estratte 2 sezioni longitudinali tipologiche, poste ad un interasse di 30 metri, che individuavano il profilo altimetrico della spiaggia. La sezione L2 è stata tracciata senza superare la linea di costa, poiché altrimenti sarebbe stata influenzata dalla presenza di informazioni batimetriche errate, non ricostruibili a partire dalle fotografie aeree.

In *Figura 13.27* si evidenzia la tipica forma a conca della spiaggia, più accentuata verso riva.

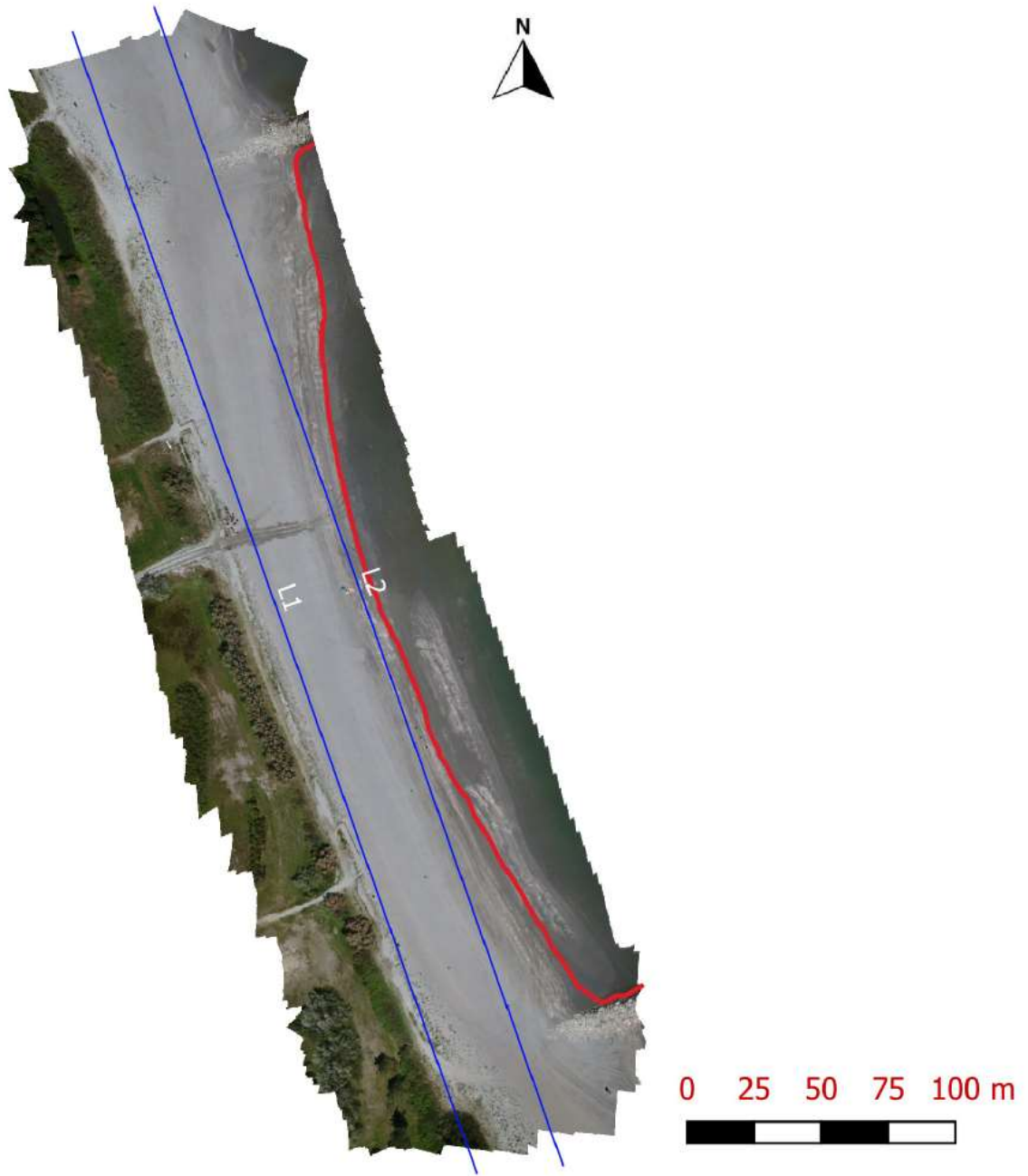


Figura 13.27: Posizione delle sezioni longitudinali

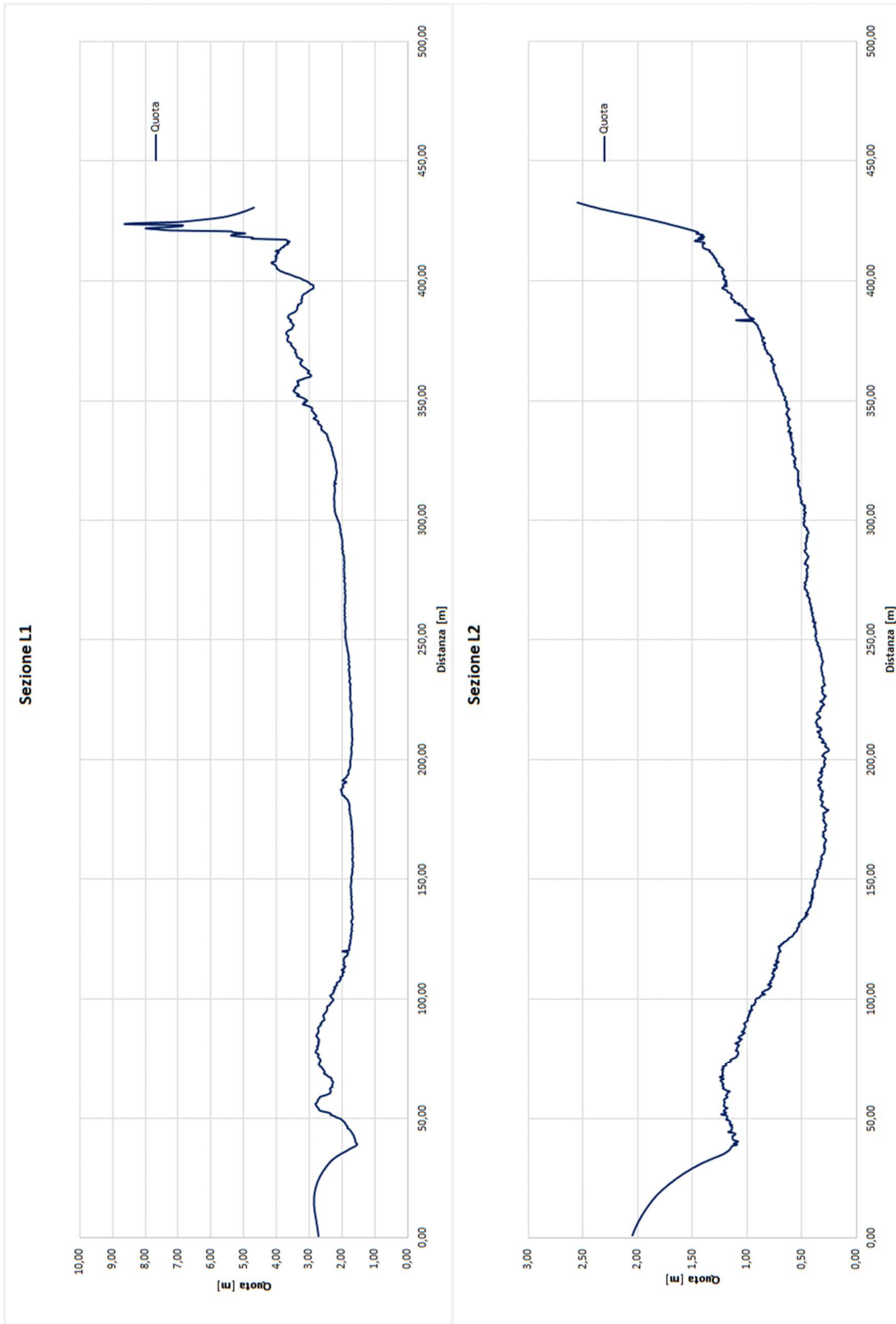


Figura 13.28: Sezione L1 e Sezione L2

13.4.2.4) Confronto tra sezioni trasversali

Si riportano nelle *Figure 13.29 e 13.30* le sezioni trasversali ottenute, come di seguito descritte:

- Dal DSM con tutti i PFA, in rosso
- Dal DSM con 4 PFA, in blu

Si è preferito non riportare quello ottenuto senza PFA poiché non essendo stato co-registrato perchè eseguendo una traslazione planimetrica, si presentava a quote molto inferiori come riscontrato nel capitolo 12.

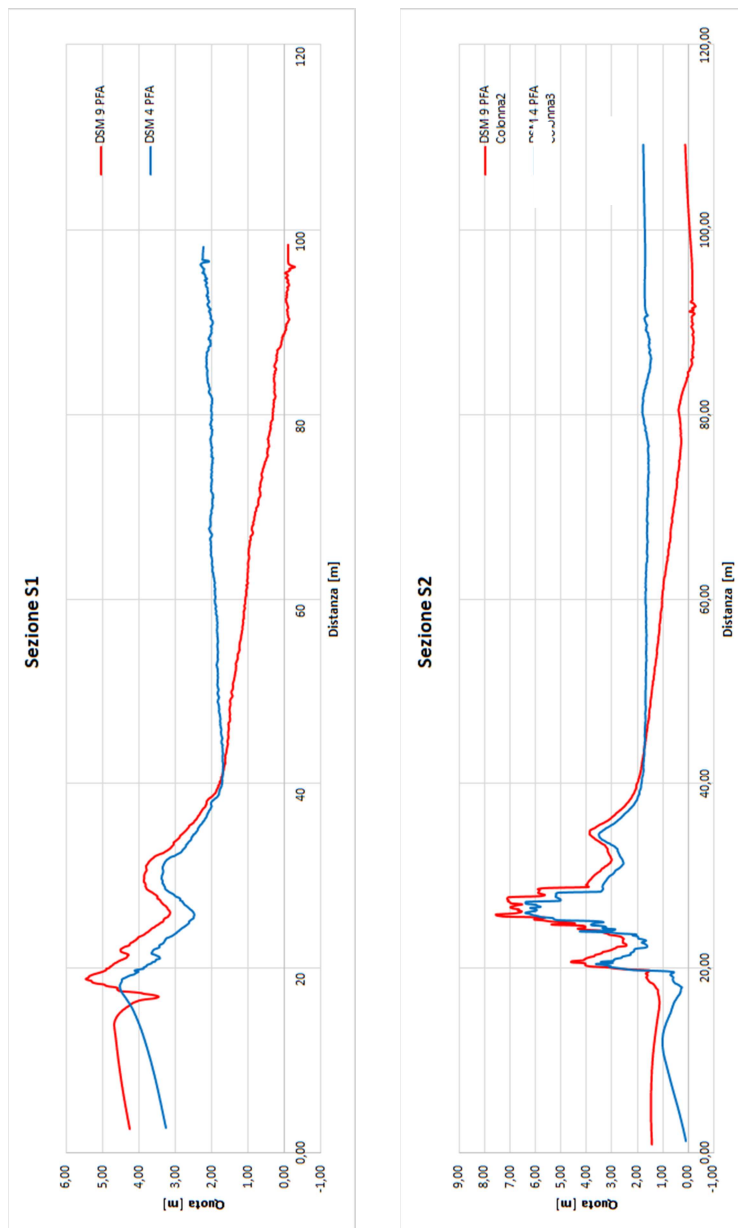


Figura 13.29: Sezione S1 e Sezione S2

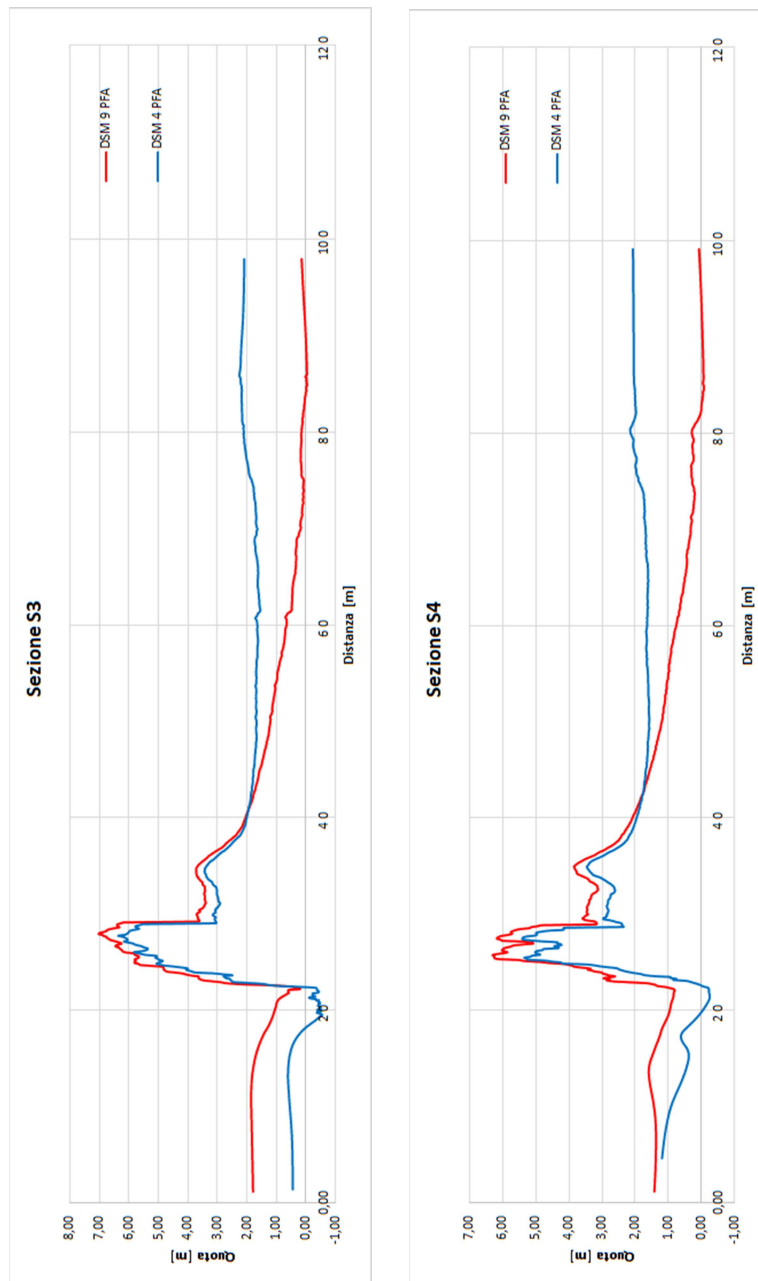


Figura 13.30: Sezione S3 e Sezione S4

Il profilo estratto dal modello con 4 PFA ha presentato in tutte e quattro le sezioni un forte basculamento attorno ai punti di vincolo impiegati, evidenziando una contropendenza irreali.

Sottraendo il profilo estratto dal modello con 9 PFA a quello estratto dal modello con 4 PFA si sono ottenuti i seguenti valori medi, per ciascuna sezione, a cui si è associata la relativa deviazione standard:

- Sezione S1: $0,50\text{ m} \pm 1,10\text{ m}$
- Sezione S2: $0,48\text{ m} \pm 1,05\text{ m}$

- Sezione S3: $0,45\ m \pm 1,30\ m$
- Sezione S4: $0,50\ m \pm 1,15\ m$

Si è notato come la deviazione standard sia molto elevata se confrontata con la precisione del modello, a testimonianza della sensibile variazione trasversale indotta dal basculamento.

Questo fenomeno è giustificabile dal fatto che in questo modello le coordinate dei restanti 5 PFA non sono state fornite e Metashape le ha ricavate a valle del processo di restituzione.

Con questo test si è voluto sperimentare l'efficacia di un rilievo NRTK costituito da punti disposti linearmente piuttosto che arealmente, nell'ottica di dover svolgere un rilievo più esteso lungo la costa.

Considerando che ciascun punto della rete topografica può essere rilevato in un quarto d'ora, le operazioni sul campo si ridurrebbero drasticamente, così come quelle di post-processing, in particolare per l'identificazione dei marker descritta al paragrafo 11.3.4.

13.4.2.5) Confronto tra sezioni longitudinali

Si riportano in *Figura 13.31* le sezioni longitudinali ottenute, come di seguito descritte:

- Dal DSM con tutti i PFA, in rosso
- Dal DSM con 4 PFA, in blu

Si è preferito non riportare quello ottenuto senza PFA poiché non essendo stato co-registrato perché eseguendo una traslazione planimetrica, si presentava a quote molto inferiori come riscontrato nel capitolo 12.

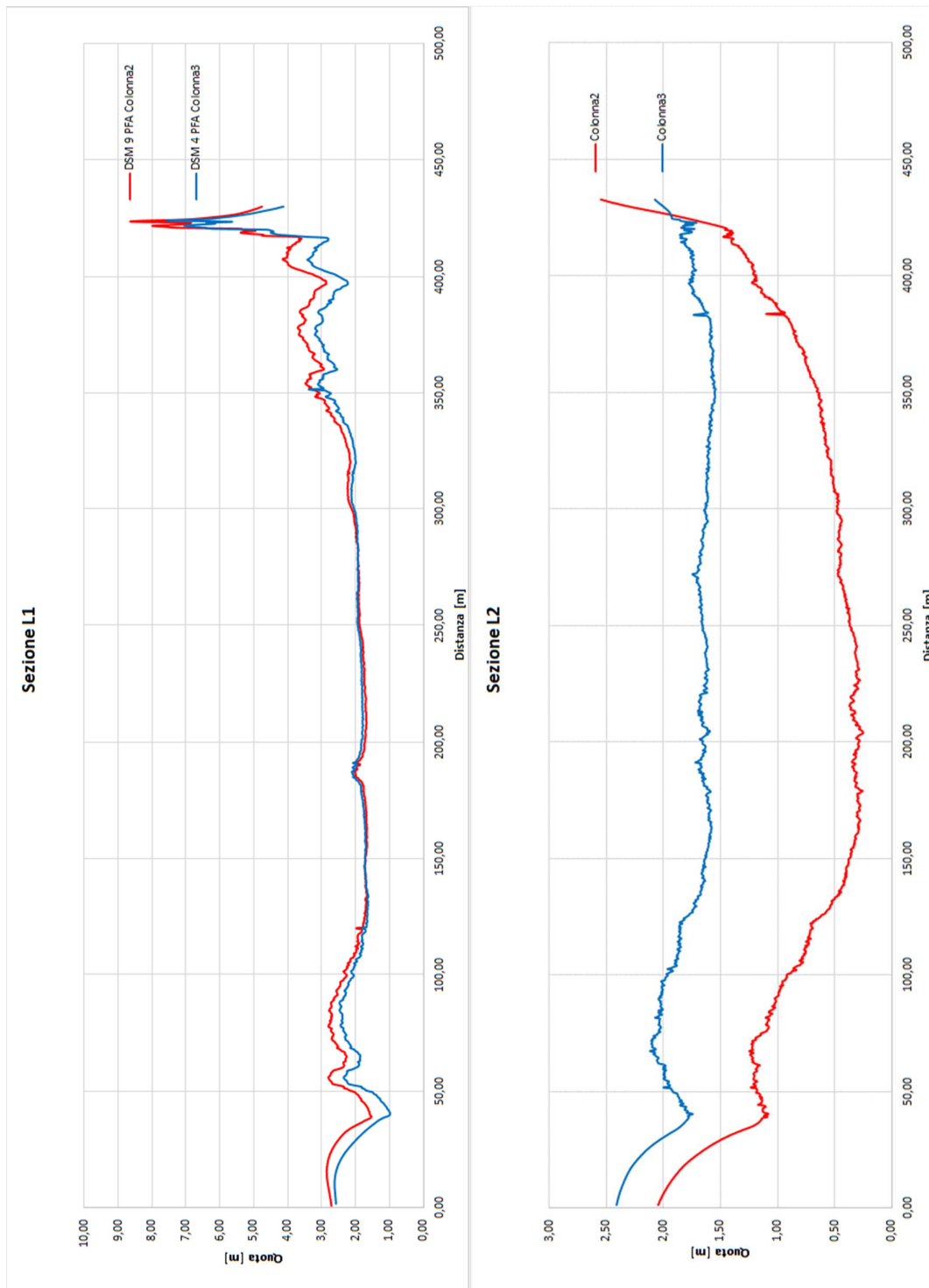


Figura 13.31: Sezione L1 e Sezione L2

A conferma di quanto osservato nel precedente paragrafo, i profili in corrispondenza della sezione L1 sono molto più ravvicinati perché quest'ultima è stata realizzata in prossimità dei 4 PFA provenienti dal rilievo NRTK, che non sono stati ricostruiti da interpolazioni nel modello.

Sottraendo il profilo estratto dal modello con 9 PFA a quello estratto dal modello con 4 PFA si sono ottenuti i seguenti valori medi, per ciascuna sezione, a cui si è associata la relativa deviazione standard:

- Sezione L1: $-0,22\text{ m} \pm 0,30\text{ m}$
- Sezione L2: $1,00\text{ m} \pm 0,35\text{ m}$

La differenza media della sezione L1 è risultata minore rispetto alle restanti, a supporto delle considerazioni fatte.

Infine, relativamente a tale sezione, il valore di discostamento medio si sarebbe potuto ridurre ulteriormente se si fosse considerata solo la porzione centrale. In corrispondenza della zona più perimetrale del modello, si sono riscontrati errori più elevati: questo fenomeno non è vincolato dal numero di PFA adottati quanto piuttosto da un minore numero di fotogrammi che inquadrano l'area più esterna rispetto a quella centrale, come evidenziato in *Figura 13.32*. Il software, per le porzioni esterne, ha impiegato meno punti di legame e la robustezza del bundler è minore, presentando come conseguenza un'interpolazione più approssimativa.

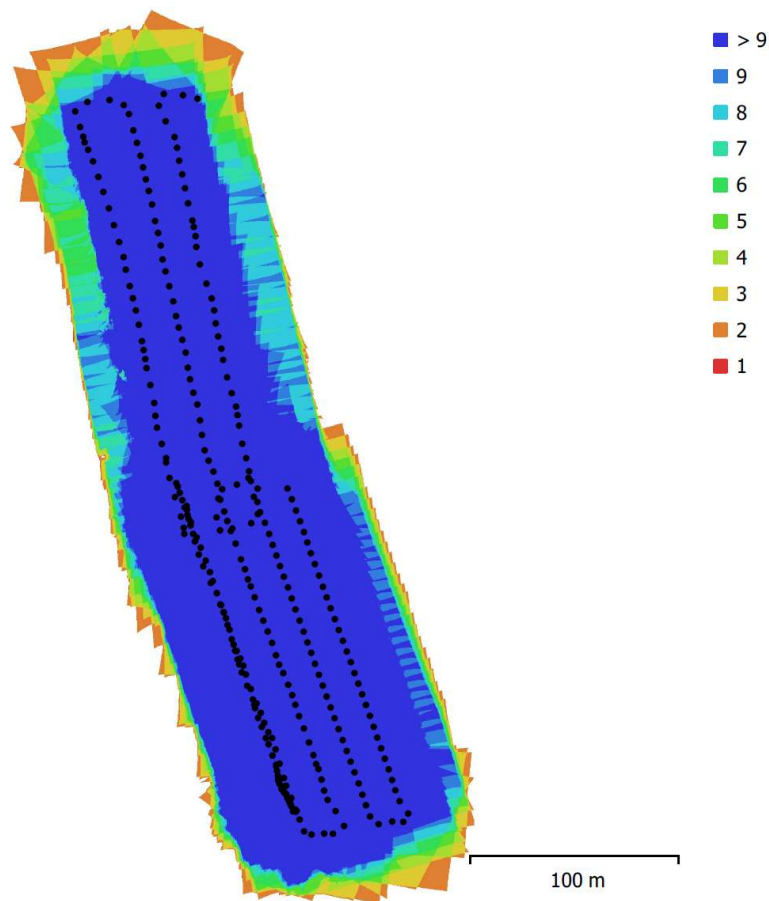


Figura 13.32: Schema che mostra il numero di sovrapposizioni delle camere

CONCLUSIONI

Come dibattuto e dimostrato all'interno della tesi, il rilievo fotogrammetrico per mezzo di droni si presta efficacemente alla generazione di prodotti con valenza metrica, utilizzabili per stimare l'evoluzione spaziale e temporale dei litorali.

Attraverso l'istituzione di una rete di punti d'appoggio, la situazione della fascia costiera è stata essere monitorata con un'ottima precisione, utile per individuare i migliori interventi da eseguire, a tutela della costa e del territorio, da parte del Servizio di Difesa del Suolo, della Costa e Bonifica della Regione Emilia-Romagna, dall'ARPAE, nonché dalla Protezione Civile e dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco.

La prima parte di tesi è stata impostata appositamente come un manuale, dedicata in particolare agli amatori che si apprestano al rilievo per mezzo di drone per la prima volta, ma anche a tutti i professionisti che vogliono ripassare gli aspetti teorici alla base del processo fotogrammetrico, in modo tale da valutare criticamente le informazioni che si estraggono, in quanto possono essere condivisibili con gli Enti Pubblici sopra citati.

Alla tesi si sono allegate le normative di riferimento, in particolare il futuro Regolamento Europeo e la circolare transitoria ATM, attualmente vigente, rilasciata dall'ENAC, preferendo ridurle all'interno della tesi ad un conciso focus, in merito all'adeguamento delle omologazioni e alle future restrizioni sul volo dei droni.

A supporto del lavoro svolto, il rilievo di Lido Adriano è stato introdotto con alcuni esempi di attività ad esso conformi o simili svolti in ambito nazionale ed europeo, giustificandone l'attualità e l'urgenza sempre più impellente di preservare il patrimonio delle spiagge da fenomeni di erosione, che risultano il più delle volte determinati dall'azione marina e del vento, ma soprattutto dalle attività antropiche quali l'estrazione di gas e fluidi dal sottosuolo, nonché l'urbanizzazione incontrollata del passato.

In base al dataset e alle informazioni a disposizione, sono stati redatti quattro distinti modelli ai fini di testarne la precisione e capire le peculiarità di ciascuno.

Dopo la descrizione degli step seguiti, si è giunti alla conclusione che, per ottenere le precisioni prefissate, è risultato di fondamentale importanza condurre un rilievo di punti fotogrammetrici d'appoggio (PFA) con posizionamento satellitare in NRTK.

In tal modo, questi punti sono stati individuati su ciascun fotogramma per poter ottimizzare il processo di restituzione realizzato in modalità pressoché automatica.

L'identificazione di questi punti ha richiesto del tempo e pertanto, nell'ottica di poter fornire dei prodotti validi a supporto delle attività di primo soccorso, ogni modello realizzato è stato redatto prediligendo le soluzioni maggiormente economiche e dalle tempistiche ridotte, affinandone progressivamente la qualità a discapito, però, dei tempi di elaborazione necessari.

Si è, pertanto, utilizzato in un primo test un software opensource, VisualSFM. Questo software, basandosi sui soli metadati delle fotografie ha escluso vaste zone e generato un modello la cui curvatura è accentuata. Ciononostante, è stato possibile analizzare la nuvola densa ottenuta, istituendo una rete di segmenti tra i PFA visibili, i quali sono stati successivamente confrontati con gli altri modelli. Il modello, oltre a non essere inquadrato nello stesso sistema di riferimento in cui sono inquadrati gli altri, presenta fortissime contrazioni che ne pregiudicano l'impiego in assenza di PFA. L'inserimento dei PFA nella procedura di orientamento è interamente manuale, a discapito della velocità di produzione.

Si è impiegato un software commerciale per la creazione dei restanti modelli, che risulta più performante. Il software sperimentato, oltre a generare modelli meglio definiti, presenta il grande vantaggio di posizionare automaticamente ogni marker su ciascuna foto, dopo un primo allineamento, e di sviluppare nuvole più omogenee, prive di vuoti molto estesi come nel caso di VisualSFM. L'assenza di queste aree è sintomo di migliore qualità, poiché non ha richiesto l'adozione di una fase aggiuntiva di interpolazione che avrebbe comportato l'introduzione di artefatti difficili da distinguere nel modello finale, che avrebbero inficiato l'accuratezza sia locale che complessiva del risultato.

Un secondo test è stato realizzato senza l'impiego di PFA, riducendo drasticamente anche l'aspetto economico del rilievo in quanto non è richiesto l'impiego del ricevitore TOPCON in NRTK. Dai risultati ottenuti, presenta una significativa traslazione planimetrica ed altimetrica rispetto ai due modelli ad esso migliori. In confronto al modello di VisualSFM, però, è georeferenziato e presenta deformazioni meno significative: nell'ottica di dover eseguire un intervento locale, in cui non sia necessaria una georeferenziazione fornisce, con una precisione metrica, lo stato di fatto del litorale. Può essere impiegato a supporto di attività minori che non richiedono particolari precisioni e che non necessitano di un inquadramento globale.

Un terzo test è stato realizzato per comprendere l'effetto che può avere adottare PFA distribuiti in maniera non uniforme lungo una linea parallela al litorale, per un totale di 4, nell'ottica di rilevare in continuo una porzione di spiaggia molto più estesa, quindi, per

ridurre le tempistiche delle operazioni di campagna: questo modello presenta delle dilatazioni modeste, ed essendo co-registrato a quello migliore (in cui sono stati presi in considerazione tutti i PFA), si sono potuti eseguire numerosi confronti tra i due. In particolare, attorno ai 4 punti vincolati, le sezioni trasversali evidenziano un importante basculamento, evidenziando quanto riscontrato nell'analisi delle coordinate dei 5 PFA non impiegati e necessariamente ricostruiti dal software.

Come quarto ed ultimo test, è stato realizzato un modello basandosi su tutti i 9 PFA acquisiti in sede di rilievo.

Successivamente è stata condotta un'analisi di qualità sperimentale dei modelli, riscontrando che i valori ottenuti per il modello con 9 PFA sono simili a quelli teorici postulati nel paragrafo 12.1.

Per un confronto diretto tra i vari modelli, per ovviare alla presenza di sistemi di coordinate diversi, si sono confrontate direttamente le distanze tra i PFA (invarianti rispetto al sistema di riferimento), in sintesi:

- Il modello di VisualSFM, presenta forti distorsioni
- Il modello di Metashape senza PFA, presenta distorsioni metriche
- Il modello di Metashape con 4 PFA, presenta moderate distorsioni e forte rotazione attorno ai PFA vincolati
- Il modello di Metashape con 9 PFA, presenta minime distorsioni

Il modello migliore è quello in cui sono stati forniti tutti i PFA, che presenta le precisioni centimetriche di poco maggiori a quelle caratterizzanti il rilievo NRTK.

Non presentando deformazioni macroscopiche, dalle sezioni è possibile estrarre numerose informazioni quali l'estensione della spiaggia e della vegetazione retrostante, nonché del sistema dunale, che gioca un ruolo fondamentale per la tutela della costa, svolgendo il duplice ruolo di barriera contro l'ingresso di acqua nel territorio e di fonte principale di ripascimento. Inoltre, consultando le informazioni mareografiche, è stato possibile definire l'arretramento medio della spiaggia sia su scala giornaliera durante il periodo di rilievo che su scala annuale.

L'ortofoto è stata altresì impiegata per tracciare la linea di costa e confrontarne la posizione rispetto a quelle del passato, descrivendone così l'evoluzione temporale. Impiegando il software gratuito QGIS, come per la misura delle coordinate e l'estrazione di sezioni, è stato possibile scaricare dal Geoportale dell'Emilia Romagna la Carta Territoriale della Regione ed il suo aggiornamento eseguito con il progetto Agea 2011.

QGIS, come descritto nel capitolo ad esso dedicato, permette il confronto diretto dei prodotti fotogrammetrici, all'interno dello stesso datum.

Si è pertanto potuto osservare un significativo arretramento rispetto al 1998, a causa della fortissima urbanizzazione occorsa e della mancanza di afflusso di sedimenti; mentre dal 2011, grazie agli ingenti investimenti della Regione Emilia-Romagna, legati alla realizzazione di opere di protezione quali frangiflutti ed attività periodiche di ripascimento, si è assistito ad un avanzamento omogeneo, indispensabile per la tutela e la fruibilità della spiaggia stessa.

Rispetto alle altre tecniche di rilievo, i droni presentano numerosi vantaggi: la flessibilità, le dimensioni ridotte, la loro economicità, permettono e permetteranno sempre di più di essere impiegati in contesti diversi, grazie ad una tecnologia in costante evoluzione che mira a migliorarne le caratteristiche tecniche di anno in anno.

Il futuro del Nostro Paese passa e dovrà passare soprattutto dalla tutela del Patrimonio naturalistico ed architettonico: preservarlo e riqualificarlo, attraverso una metodologia di monitoraggio coscienziosa, è un dovere imprescindibile per la salvaguardia delle future generazioni, nel rispetto della propria identità. Sempre più frequenti episodi di ingresso di acqua alta nel territorio e la peggiore qualità dell'acqua sono un chiaro esempio dell'irreversibile crisi che l'ambiente sta subendo.

In particolare per quanto riguarda Lido Adriano, il sistema di protezione attualmente presente, prevede un continuo piano di gestione e monitoraggio ai fini di mantenere l'impatto antropico in limiti accettabili, in modo tale da non modificare radicalmente le caratteristiche ambientali della costa. Questo territorio era una volta caratterizzato da ampie spiagge, dune, pinete e lagune salmastre ma durante le ultime decadi è stato fortemente deteriorato come conseguenza di un immediato profitto economico. Perciò, le risorse naturali sono state consumate ad un tasso incompatibile con una politica sostenibile.

Dall'analisi qualitativa svolta nel lavoro di tesi si è, infine, riscontrato che:

- I frangiflutti sommersi hanno limitato l'erosione locale del litorale, ma necessitano di continua manutenzione. I ripascimenti si sono dimostrati efficaci principalmente quando accoppiati con argini rocciosi.
- Una profonda conoscenza del sistema costiero è assolutamente necessaria per la tutela del litorale.

Le opere di tutela sino ad oggi realizzate sono risultate positive; l'obiettivo dovrebbe essere quello di incentivare e continuare la strada di politica sostenibile percorsa sino ad oggi.

BIBLIOGRAFIA

- ZANUTTA A., 2019, “Dispense, esercitazioni ed Appunti del Corso di Fotogrammetria Applicata M”, Dipartimento di Ingegneria, Università di Bologna
- HARRIS C. & STEPHENS M., 1988, “A combined corner and edge detector”, Alvey Vision Conference Manchester
- FORLANIA G., REMONDINO F., RONCELLA R., 2005, “Structure and Motion Reconstruction of short mobile mapping image sequences”, Proc. of the 7th Conf. on Optical 3D Measurement Techniques
- CANNAROZZO, CUCCHIARINI, MESCHIERI, 2012, “Misure, rilievo, progetto”,
- STOPPINI A., RADICIONI F., 2013, “Corso di Topografia I”, Dipartimento di Ingegneria, Università di Perugia
- Regolamento ENAC, 2018
- Circolare ATM-09, Aeromobili a pilotaggio remoto - criteri di utilizzo dello spazio aereo, 2019
- Regolamento delegato (UE) 2019/945 della Commissione del 12 Marzo 2019 relativo ai sistemi aeromobili senza equipaggio e agli operatori di paesi terzi di sistemi aeromobili senza equipaggio, 2019
- Regolamento di esecuzione (UE) 2019/947 della Commissione del 24 Maggio 2019 relativo a norme e procedure per l’esercizio di aeromobili senza equipaggio, 2019
- FICHERA C.R., 2016, “Rilievo e rappresentazione del territorio”, Università Mediterranea di Reggio Calabria
- ZANUTTA A., 2008, “Datum Geodetici”, Dipartimento di Ingegneria, Università di Bologna
- DALL’ALBA C., 2012, “Sensori d’immagine CCD e CMOS”, Dipartimento di Ingegneria dell’Informazione, Università di Padova
- WU C., AGARWAL S., CURLESS B., SEITZ S., “Multicore Bundle Adjustment Manual”, University of Washington
- ConvER3, 2013, “Software per la trasformazione di coordinate sul territorio della Regione Emilia Romagna”, Regione Emilia Romagna, Servizio Statistica ed Informazione Geografica
- PIEMONTE A., 2009, “Geomatica – laser scanner”, Dipartimento di Ingegneria dell’Informazione, Università di Pisa
- BERTI C., 2010, “Topografia e cartografia”, Università di Firenze

- DE AGOSTINO M., MANZINO A., ROGGERO M., 2007, “Repertorio delle stazioni GNSS in Italia, controllo di qualità e monitoraggio dei dati”, Atti del Convegno Nazionale SIFET Arezzo
- BARBARELLA M., 2009, “Rilievo di precisione Real Time e Reti NRTK”, Dipartimento di Ingegneria, Università di Bologna
- J. VAN SICKLE, 2015, “GPS for Land Surveyour”
- Legge n. 225/92, 1992, “Istituzione del Servizio Nazionale della Protezione Civile”
- Regione Emilia Romagna, 2005, “Legge Regionale n. 1/2005 - Piano Regionale di protezione Civile della Regione Emilia Romagna”
- Regione Emilia Romagna, 2004, “D.G. n. 1166/2004 - Approvazione del protocollo d’intesa e delle linee guida regionali per la pianificazione di emergenza in materia di Protezione Civile”
- Regione Emilia Romagna, 2009, “D.G. n. 962/2009 - Disposizioni organizzative finalizzate all’attivazione del sistema di allertamento di Protezione Civile sul territorio regionale per il rischio idrogeologico-idraulico”
- Regione Emilia Romagna, 2008, “D.G. n. 2320/2008 - Istituzione della Colonna Mobile Regionale del Volontariato”
- Regione Emilia Romagna, 2015, “Legge Regionale n. 13/2015 - Riforma del Sistema di Governo Regionale e Locale e disposizioni su Città Metropolitana di Bologna, Provincie, Comuni e loro Unioni”
- Regione Emilia Romagna, 2005, “Delibera C.R. n. 645/05 - Linee guida per la Gestione Integrata della Zona Costiera”
- Arpa, 2002, “Stato del Litorale Emiliano-Romagnolo all’anno 2000”,
- Regione Emilia Romagna, 2007, “Stato del Litorale Emiliano-Romagnolo all’anno 2007 e Piano decennale di gestione”,
- LAPORTE-FAURET Q., MARIEU V., CASTELLE B., MICHALET R., BUJAN S., ROSEBERY D., 2019, “Low Cost UAV for High-Resolution and Large Scale Coastal Dune Change Monitoring Using Photogrammetry”, Journal of Marine Science and Engineering, vol. 7 issue 3. DOI: 10.3390/jmse7030063
- TADDIA Y., CORBAU C., ZAMBELLO E., PELLEGRINELLI A., 2019, “UAVs for Structure From Motion Coastal Monitoring: A Case Study to Evolution of Embryo Dunes over a Two-Year Time Frame in the Po River Delta, Italy”, Sensors (Basel, Switzerland). DOI: 10.3390/s19071717

- PUGLIANO G., ROBUSTELLI U., DI LUCCIO D., MUCERINO L., BENASSAI G., MONTELLA R., 2019, “Statistical Deviations in Shoreline Detection Obtained with Direct and Remote Observations”, *Journal of Marine Science and Engineering*. DOI: 10.3390/jmse7050137
- GABBIANELLI G., 2007 “Marina di Ravenna, Lido Adriano (Italy) – EUROSION Case Study”
- ANGELI A., RIZZINI A., VEGGIANI A., 1970, “I sedimenti recenti della costa adriatica romagnola. Mineralogia e Stratigrafia del Sottosuolo Ravennate”
- Arpa, 2018, “Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola – Seconda fase”
- CENAS Project, 1997, “Study on the Coastline Evolution of the Eastern Po Pline due to Sea Level Change by Climate Variation and to Natural and Antropic Subsidence”,
- IDROSER, 1996, “Progetto di piano per la difesa del mare e la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia-Romagna”
- MLAMBO R., WOOHOUSE I.H., GERARD F., ANDERSON K., 2017, “Structure from Motion (SfM) Photogrammetry with Drone Data: A Low Cost Method for Monitoring Greenhouse Gas Emission from Forests in Developing Countries”, *Journal of Forests*, vol.8 issue 3. DOI: 10.3390/f8030068
- PARDAL P.C.P.M., KUGA H.K., VILHENA DE MORAES R., 2009, “Implication of the application of recursive least squares algorithms to satellite orbit determination using GPS measurements”, vol. 8, issue 3, ISSN: 1109-2777
- Regione Emilia-Romagna”, 2017, “Progetto di piano per la difesa del mare e la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia Romagna
- BARBANO A., CORSINI S., PAONE M., LA MANTIA C., 2005, “Definizione della linea di costa e delle opere di difesa”, *Atti dell’Asita 2005*
- User manual CloudCompare, v. 2.6.1, 2018
- User manual Agisoft Metashape, v. 1.5, 2019

SITOGRAFIA

Tutti i siti sotto riportati sono stati consultati tra Settembre e Dicembre 2019.

- [1] www.3deffe.com, “GSD, Ground Sample Distance: tutta questione di geometria”
- [2] www.icvbc.cnr.it, “Seminario dalla diagnostica al monitoraggio per la progettazione degli interventi e la programmazione della manutenzione”, L. Chiarantini
- [3] www.dronezine.it
- [4] www.dronerush.com
- [5] www.dji.com
- [6] www.repubblica.it, “La base dell’Aeronautica che ospita anche i sistemi Predator è ai piedi del Promontorio del Gargano”, Pino Bruno, Roberto Buonanno
- [7] www.droniworld.net
- [8] www.peake.com, “Drones in disaster recovery”, Yunhong Liu
- [9] www.rietinvetrina.it, VVF
- [10] www.ansa.it
- [11] www.redattoresociale.it, “Dai droni ai robot: le nuove frontiere tecnologiche degli interventi umanitari”, L. Menghi
- [12] www.droni.it, “Droni bagnino in arrivo sulle spiagge italiane”
- [13] www.droni.it,
- [14] www.geometricit.it, “Rilievo aerofotogrammetrico con SAPR”
- [15] www.attiliocallegari.it
- [16] www.rgdroni.it
- [17] www.arpat.it
- [18] www.archedigital.it, “Rilievi aerofotogrammetrici in Archeologia: il caso di Nora”, Archeostaff
- [19] www.ninjamarketing.it, “I droni vengono usati contro il rischio estinzioni delle antilopi in Niger”, M. Fiori Andreoni
- [20] www.mondogeo.it, “I Datum Geodetici”
- [21] www.3dmetrica.it, “I sistemi di riferimento”, P. Corradeghini
- [22] www.3dmetrica.it, “Fotogrammetria con Metashape”, P. Corradeghini
- [23] www.geomappando.com, “Le coordinate GPS (WGS 84)”
- [24] www.archematica.it
- [25] www.researchgate.net, “Implications of the application of recursive least squares algorithms to satellite orbit determination using GPS measurements, P.C.P.M. Pardal

- [26] www.gpsemiliaromagna.it
- [27] www.protezionecivile.regione.emilia-romagna.it
- [28] www.ambiente.regione.emilia-romagna.it, “Servizio Difesa del Suolo, della Costa e Bonifica”
- [29] www.ravennatoday.it, “Lotta alla subsidenza, 6 milioni per arginature e impianti idrovori”, Redazione
- [30] www.arpae.it, “Distribuzione percentuale del diametro medio dei campioni di sedimento prelevati nel litorale Emiliano-Romagnolo”
- [31] www.earth.google.com
- [32] www.arpae.it, “Linea di riva”
- [33] www.ravennanotizie.it, “I primi interventi di ripascimento sulle spiagge di Marina Romea”, Redazione
- [34] www.gpsworld.com
- [35] www.diemmstrumenti.it
- [36] www.wikipedia.it, “Geographic information system”
- [37] www.geoportale.regione.emilia-romagna.it
- [38] www.mareografico.it

RINGRAZIAMENTI

Ho sempre pensato al percorso scolastico, in particolare a quello universitario, come una montagna da scalare: ogni esame, sempre più vicino alla cima, alcuni proprio come delle pareti ripide e scivolose, altri come delle meravigliose passeggiate panoramiche. Ma se adesso sono arrivato in fondo e posso osservare con entusiasmo e passione alle prossime vette da conquistare, e non vedere l'ora di scrivere i prossimi capitoli della mia vita, è grazie alle persone a cui dedico queste righe.

Grazie, mamma Stefania e papà Giuseppe. Voi mi avete dato la vita, una vita meravigliosa, sempre piena di gioia e positività, di cui condividiamo ogni aspetto. Grazie perché mi avete sempre sostenuto, seguito, incoraggiato le mie scelte ed aiutato con l'amore ed un rispetto reciproco infinito. Siete i miei punti di riferimento ed il mio esempio di impegno, sacrificio, dedizione ma anche di felicità e armonia. Sin da piccolo, con incredibili e indimenticabili viaggi, mi avete aperto gli occhi su quanto questo mondo possa essere meraviglioso, sulle opportunità che offre, ricordandosi sempre di affrontare le difficoltà a testa alta, con responsabilità e sicurezza nei propri mezzi, perché c'è sempre una soluzione ad ogni problema.

A volte vorrei avere la macchina del tempo per poter di nuovo 'cotruire' e cercare i cubotti di Winnie the Pooh nascosti in giro per casa con te, mamma o per potermi addormentare sul seggiolino davanti della tua bicicletta, papà.

Ma con uno sguardo al futuro voglio ringraziarvi perché ho imparato e imparo da voi l'arte di essere genitori, che è la cosa più bella del mondo, ed è per questo che non vedo l'ora di esserlo anch'io.

Grazie Mamma, per avermi insegnato a scrivere bene in italiano, attraverso le favole che mi hai sempre raccontato, ai testi che mi hai sempre aiutato a scrivere alle elementari, e a farmi appassionare alla lettura, per avermi insegnato la cucina, la matematica, il disegno tecnico a computer, la progettazione sia di massima che di dettaglio, molto più di tanti insegnanti, seguendomi e aiutandomi enormemente in tanti esami ed innumerevoli situazioni, con un grandissimo senso di praticità e concretezza, che mi conduce nella Vita. Grazie Papà, per essere sempre stato il mio primo e più grande amico, di avermi insegnato come difendermi e pretendere di essere ricambiato con lo stesso rispetto che dobbiamo provare per le altre persone, indipendentemente dalle loro idee, con cui ci dobbiamo confrontare e mai scontrare.

Mi avete insegnato tutto quello che so e ciò che ammiro di più è che continuate a farlo entusiasti ogni giorno come dal primo in cui ci siamo visti, quando vi sbirciavo incuriosito appena nato con un occhietto ancora socchiuso.

Vi amo tantissimo, siete unici e insostituibili. Grandissimi amici, compagni di viaggio, maestri di Vita, Papà e Mamma.

Grazie nonna Rosanna, per essere sempre stata la mia seconda mamma, per esserci sempre al nostro fianco e per avermi sempre fatto sentire colmato il vuoto lasciato dalle persone che nei nostri anni bui non ci sono state. Per me sei sempre Ro, come quando da piccolino ti facevo impazzire facendo le capriole sul tuo lettone e passavamo insieme i mesi estivi al mare. Grazie perché non mi hai mai fatto mancare nulla, incentivando con entusiasmo e curiosità le mie passioni, come mamma e papà.

Grazie nonno Primo. Ci si dice sempre che non ho mai avuto modo di conoscerti, perché sei scomparso quando non ero ancora nato. Ma noi ci conosciamo bene, lo sai anche tu, perché osservare la mamma è come osservare te e per la mamma è lo stesso quando guarda me: è come uno specchio nel tempo, non ci lasceremo mai.

Grazie per essere, da sempre, il mio eroe. Per aver dimostrato un coraggio immenso ma soprattutto per essere stato una meravigliosa persona, di aver trasmesso alla mamma un'etica di vita e di lavoro inossidabile che è la tua più grande eredità, a cui mi ispiro e faccio riferimento ogni giorno. Sei la mia guida, nei momenti di difficoltà ti ho sempre trovato, proprio come Virgilio per Dante, come scrissi in un tema delle superiori. Nelle nostre vene scorre quell'acqua d'argento, la terra in cui hai imparato a vivere da solo, che ti ha poi permesso di crescere una donna incredibile. Sarebbero state infinite le cose che avremmo potuto fare insieme, ma in tutto ciò che ho fatto e sono riuscito a conquistare, tu ci sei sempre stato e sempre ci sarai.

Grazie Francesca, amore mio. Ho sempre saputo di avere un grande amore da donare e tu sei la persona che mi ha scelto e che mi ha dato l'opportunità di essere amato con gli stessi valori e lo stesso bisogno primordiale di amare. Mi sono innamorato di te dal primo momento in cui ti ho parlato al capodanno di quasi due anni fa, e da allora ogni giorno mi sveglio pensando a quanto sono fortunato. Ti amo tanto, perché ogni giorno mi regali ciò che ho cercato per tanti anni, l'Amore.

Un grande grazie ai miei prozii: lo zio Gianni e la zia Carla per lo sconfinato affetto che mi hanno sempre dimostrato, per le divertentissime lezioni di pesca e soprattutto del supporto dello zio che mi ha sempre visto come il suo 'marzianino'. Lo zio Ezio, che mi pensa sempre fin da quando mi portava da piccolo ai Giardini Margherita e con cui mi

diverto sempre, ogni volta che ci vediamo, come allora. La zia Sara, per la sua incredibile gentilezza ed interesse che mostra sempre nei miei confronti, con una menzione particolare alla sua fantastica pasta fresca che in questi anni è sempre stato un carburante pazzesco.

Grazie Lorenzo. Grande amico mio, ti aspetto in fondo a questo tunnel che finirai anche tu tra pochi mesi, convinto che finirai brillantemente. Ti ringrazio per il divertimento, per la condivisione della stessa mentalità con cui abbiamo affrontato l'università e per la capacità di ascoltarmi come nessun altro amico abbia mai avuto, con la certezza che potremo sempre trovarci, anche se lontani, quando avremo bisogno l'uno dell'altro.

Grazie, Silvia ed Enrico. Fin da quando ci siamo conosciuti mi avete fatto sentire parte del nucleo sereno che formate con me e Francesca.

Grazie agli amici di più o meno vecchia data che ho avuto la fortuna di trovare in questi ultimi anni: in primis i fantastici Diego e Ilaria, con cui non vedo sempre l'ora di fare la nostra prossima 'super-missione da warrior'. Per me è stato veramente difficile, sin da piccolo, incontrare due cari amici come voi, e avervi come tali è un gradissimo onore e soprattutto un gran divertimento. In questi ultimi mesi di sacrifici e stress mi avete regalato momenti di gioia e relax impagabili. Grazie naturalmente agli altri ragazzi, Davide e Gaia per le nostre epiche battaglie a Twenty Questions e alla possibilità di trovarvi per giocare come per parlare di qualsiasi cosa, grazie Giovanni per le ore di lezione volate via con il sorriso e con più leggerezza, anche se eri veramente molesto come compagno di banco, grazie ad Alessandro, Martina, Gianluca, Davide, Eric e Manuel che mi hanno accolto in un gruppo calorosissimo in cui mi sono sentito inserito fin da subito.

Grazie alla chitarra, grandissima e inseparabile amica degli anni in cui sono stato isolato, in cui non avevo amici e c'eri tu, strumento di vita e trascinatrice della mia infinta passione per la musica, trasmessa sin da quando ero nella culla da mamma e papà.

Grazie Virtus Bologna. Forse sembra strano ringraziare una squadra di basket, ma questo sport c'è sempre stato per la nostra famiglia: in questi mesi è una boccata di divertimento sportivo incredibile per distrarmi dai numerosi impegni universitari e dallo stress che ho accumulato, come per la mia famiglia quando stavano affrontando gli anni terribili che hanno straziato le nostre vite. Ghiaccio in testa, fuoco nel cuore.

Grazie ai partigiani, soprattutto a Luciano Michelini che ho avuto l'onore di conoscere: ragazzi e ragazze della mia età, se non più piccoli, che hanno dato la vita per lasciare a

tutti noi un futuro migliore del loro terribile destino. Luciano, grazie, mi hai spiegato con il sorriso e con parole semplici ma profonde, la libertà nella sua forma più alta.

Un grandissimo grazie al Professore Antonio Zanutta, che in questi mesi, terminato l'attuale ed interessantissimo corso di Fotogrammetria Applicata, mi ha supportato ed ha seguito con entusiasmo il mio percorso, sia di tesi che di tirocinio, e nel quale ho trovato una persona sempre disponibile e gentile, come tutte le persone del Dipartimento di Topografia con cui ho collaborato, in particolare la Dottoressa Valentina e le tutor Maria Alessandra e Chiara.

Ultimi ma non ultimi, voglio ringraziare i Professori Zanutta, Vittuari, Gandolfi, Semprini, Di Federico e De Miranda in particolar modo, che mi hanno insegnato le rispettive materie indirizzandole alla professione: ciò che apprezzo più di questi Professori è la loro lungimiranza e la capacità di trasmettermi con passione i loro insegnamenti pensando al mondo lavorativo, senza fermarsi meramente a quello accademico come purtroppo ho riscontrato in tanti altri.

Infine un piccolo pensiero per me: vorrei ringraziare quel piccolo ragazzino che ha deciso a tredici anni di diventare Ingegnere Civile e che finalmente può coronare il suo sogno, a cui ha sempre creduto senza mollare mai, con la voglia di vivere e la solarità che lo hanno sempre alimentato e che molte persone hanno cercato di sopire, inutilmente. Ringrazio anche queste persone, perché anche le loro azioni sono sempre e solo state benzina per il mio motore, fortificandomi e mostrandomi l'altra parte della realtà.

E' la fine di un lunghissimo capitolo pieno di vita ed esperienze incredibili, adesso è tempo di scriverne uno nuovo.

Grazie a tutti.