

**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**

**TESI DI LAUREA**

In

**FOTOGRAMMETRIA APPLICATA M**

**RILIEVO FOTOGRAMMETRICO DA DRONE PER LA  
GENERAZIONE DI MODELLI TERMICI DI PORZIONI DI  
TERRITORIO**

CANDIDATO

Marco Pinto

RELATORE:

Prof. Antonio Zanutta

CORRELATORE:

Prof. Ing. Marco Dubbini

Anno Accademico 2015/16

Sessione I



*Alla mia famiglia*



# ABSTRACT

In questo elaborato viene sperimentato un iter processuale che consenta di utilizzare i sensori termici affiancati a fotocamere digitale in ambito fotogrammetrico al fine di ottenere prodotto dal quale sono estrapolabili informazioni geometriche e termiche dell'oggetto di studio.

Il rilievo fotogrammetrico è stato svolto mediante l'utilizzo di un drone con equipaggiamento multisensoriale, termico e digitale, su una porzione di territorio soggetto ad anomalie termiche nei pressi di Medolla (MO). Per l'analisi termica e geometrica sono stati posizionati sul campo 5 target termici di cui ne sono state misurate le coordinate per la georeferenziazione delle nuvole dense di punti e la temperatura.

In particolare sono state eseguite due riprese aeree dalle quali sono stati estratti i frame necessari per i processi di restituzione fotogrammetrica. Le immagini sono state sottoposte ad una fase di trattamento che ha prodotto immagini rettificate prive di delle distorsioni impresse dall'obbiettivo.

Per la creazione degli elaborati vettoriali e raster a colori e termici sono stati impiegati inizialmente software di fotogrammetria digitale in grado di fornire scene tridimensionali georeferenziate dell'oggetto. Sono state sviluppate sia in un ambiente *open-source*, sia sfruttando programmi commerciali. Le nuvole dense sono state successivamente trattate su una piattaforma gratuita ad interfaccia grafica.

In questo modo è stato possibile effettuare dei confronti tra i diversi prodotti e valutare le potenzialità dei software stessi.

Viene mostrato come creare un modello tridimensionale, contenente sia informazioni geometriche che informazioni termiche, partendo dalla nuvola termica e da quella a colori. Entrambe georeferenziate utilizzando gli stessi punti fotogrammetrici d'appoggio.

Infine i prodotti ottenuti sono stati analizzati in un ambiente GIS realizzando sovrapposizioni grafiche, confronti numerici, interpolazioni, sezioni e profili.

# PAROLE CHIAVE

DRONE

TERMOCAMERA

FOTOGRAMMETRIA DIGITALE

STRUCTURE FROM MOTION

RILEVAMENTO MULTISENSORIALE

ANALISI GEOMETRICO-TERMICA

# SOMMARIO

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>1 GEOMATICA.....</b>	<b>5</b>
1.1 DATUM GEODETICO .....	5
1.1.1 DEFINIZIONE DATUM IN GEODESIA CLASSICA.....	5
1.1.2 DEFINIZIONE DATUM IN GEODESIA SATELLITARE.....	7
1.2 SISTEMI DI COORDINATE.....	9
1.2.1 COORDINATE CARTESIANE LOCALI.....	9
1.2.2 COORDINATE GEODETICHE LOCALI .....	10
1.2.3 COORDINATE GEOGRAFICHE ELLISSOIDICHE .....	10
1.2.4 COORDINATE PIANE CARTOGRAFICHE.....	11
1.3 IL RILIEVO TOPOGRAFICO.....	12
1.3.1 STRUMENTAZIONE TOPOGRAFICA.....	12
1.3.1.1 Misure di angoli .....	13
1.3.1.2 Misure di distanze .....	14
1.3.1.3 Misure di angoli e distanze.....	14
1.3.1.4 Misura assoluta di coordinate tridimensionali .....	15
<b>2 LA FOTOGRAMMETRIA .....</b>	<b>19</b>
2.1 FONDAMENTI ANALITICI.....	21
2.1.1 ORIENTAMENTO INTERNO DI UNA CAMERA METRICA.....	24
2.1.2 ORIENTAMENTO ESTERNO E RESTITUZIONE.....	31

2.1.3	TRIANGOLAZIONE AEREA FOTOGRAMMETRICA .....	32
2.2	FOTOGRAMMETRIA DIGITALE .....	34
2.2.1	STRUTTURA DI UN IMMAGINE DIGITALE .....	34
2.2.2	RISOLUZIONE DI UN IMMAGINE DIGITALE .....	35
2.2.3	TRATTAMENTO DELLE IMMAGINI DIGITALI .....	38
2.2.4	FORMATI DI MEMORIZZAZIONE.....	43
2.2.5	ACQUISIZIONE DI IMMAGINI DIGITALI .....	44
2.2.6	LA CORRELAZIONE AUTOMATICA .....	47
2.2.6.1	Correlazione AREA BASED .....	50
2.2.6.2	Correlazione Feature based matching .....	51
2.2.6.3	Structure from motion .....	52
<b>3</b>	<b>PROCEDURE INNOVATIVE DI RILEVAMENTO: I DRONI .....</b>	<b>59</b>
3.1	REGOLAMENTAZIONE PREVISTA .....	59
3.2	SVILUPPO STORICO DEI DRONI.....	62
3.3	IMPIEGO IN AMBITO CIVILE.....	67
3.4	MICRODRONE PER RILEVAMENTO .....	69
3.5	DRONI IN COMMERCIO .....	70
<b>4</b>	<b>RILEVAMENTO AEREO MULTISENSORIALE .....</b>	<b>77</b>
4.1	LA TERMOGRAFIA .....	78
4.1.1	LE TERMOCAMERE.....	79
4.1.2	ALCUNE TERMOCAMERE IN COMMERCIO .....	82
4.2	CARATTERISTICHE DEI RILIEVI IPERSPETTRALI .....	85

4.2.1	AGRICOLTURA DI PRECISIONE .....	85
4.2.2	MONITORAGGIO IMPIANTI FOTOVOLTAICI .....	87
4.2.3	SALVAGUARDIA DELLE FORESTE .....	88
<b>5</b>	<b>CASO DI STUDIO: CAMPO AGRICOLO CON ANOMALIE TERMICHE</b>	<b>89</b>
5.1	FENOMENI INUSUALI GEOLOGICI .....	91
5.2	DESCRIZIONE AREA DI STUDIO .....	93
5.3	IL RILEVAMENTO AEREO E IL SUO EQUIPAGGIAMENTO .....	95
5.3.1	DRONE UTILIZZATO PER IL RILIEVO - UAV ESAFLY A2500....	97
5.3.2	ACTION CAM GOPRO HERO 2 .....	99
5.3.3	Termocamera Optris Pi450.....	101
5.3.4	TARGET TERMICO .....	102
<b>6</b>	<b>TRATTAMENTO DEL DATO.....</b>	<b>109</b>
6.1	FILMATO A COLORI OTTENUTO CON GOPRO HERO 2.....	109
6.1.1	OBBIETTIVO CON GRANDANGOLO.....	109
6.1.2	ELABORAZIONE DEL DATO – ELIMINAZIONE DISTORSIONE 110	
6.1.3	ELABORAZIONE DEL DATO – ESTRAPOLAZIONE SINGOLI FRAME114	
6.2	IMMAGINI TERMICHE OTTENUTE CON TERMOCAMERA AD INFRAROSSI OPTRIS PI450 .....	116
6.2.1	CONVERSIONE FORMATO IMMAGINE – DA CSV A TXT CON VALORI DELIMITATI DA TABULAZIONI.....	116

6.2.2	CONVERSIONE FORMATO IMMAGINE – DA TXT CON VALORI DELIMITATI DA TABULAZIONI A ; .....	118
6.2.3	CONVERSIONE FORMATO IMMAGINE – DA TXT A JPG .....	119
6.2.4	CALIBRAZIONE IMMAGINI TERMICHE .....	124
6.2.4.1	Camera Calibration Toolbox for MatLab.....	124
6.2.4.2	Processo di calibrazione con Calib 3V.....	130
<b>7</b>	<b>PROCEDURA DI RESTITUZIONE FOTOGRAMMETRICA AUTOMATICA.....</b>	<b>135</b>
7.1	SOFTWARE OPEN-SOURCE VISUALSFM.....	135
7.1.1	CREAZIONE SCENA CON IMMAGINI GOPRO.....	136
7.1.1.1	Miglioramento della qualità .....	148
7.1.2	CREAZIONE SCENA CON IMMAGINI TERMICHE.....	150
7.1.2.1	Miglioramento della qualità .....	156
7.1.3	CREAZIONE SCENA CON IMMAGINI TERMICHE CON VARIAZIONE DELLA TEMPERATURA.....	158
<b>8</b>	<b>TRATTAMENTO DELLE NUVOLE DENSE DI PUNTI .....</b>	<b>163</b>
8.1	ELABORAZIONE CON CLOUDCOMPARE .....	163
8.1.1	TRATTAMENTO NUVOLA GOPRO.....	165
8.1.2	TRATTAMENTO NUVOLA TERMICA .....	175
8.1.3	TRATTAMENTO NUVOLA TERMICA TERMICO-TEMPERATURE 178	
8.2	CONVERSIONE VALORE RADIOMETRICO CON TEMPERATURA	181
8.3	CREAZIONE ORTOFOTO .....	184

8.3.1	REALIZZAZIONE ORTOFOTO GOPRO.....	184
8.3.2	REALIZZAZIONE ORTOFOTO TERMICO .....	190
<b>9</b>	<b>REALIZZAZIONE DEM CON SOFTWARE LOW COST.....</b>	<b>191</b>
9.1	ALLINEAMENTO DEL CHUNK.....	192
9.2	REALIZZAZIONE SCENA TRIDIMENSIONALE .....	196
<b>10</b>	<b>CONFRONTO ED ANALISI DEL DSM RGB E TERMICO .....</b>	<b>201</b>
10.1	ANALISI GEOMETRICA MODELLO RGB .....	205
10.2	ANALISI GEO-TERMICA DEI DATI OTTENUTI .....	218
	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>225</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>229</b>
	<b>RINGRAZIAMENTI .....</b>	<b>234</b>

# INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1 - Relazione tra geoide, ellissoide orientato localmente in P ed ellissoide globale. .....	6
Fig. 2 - Raffronto tra superficie fisica, geoide e ellissoide di riferimento.....	6
Fig. 3 - Rappresentazione della terna geocentrica relativa al sistema WGS84. ....	8
Fig. 4 - Terna euleriana di coordinate cartesiane locali.....	9
Fig. 5 - Coordinate geodetiche polari e ortogonali.....	10
Fig. 6 - Teodolite. ....	13
Fig. 7 - Livello.....	13
Fig. 8 - Distanziometro laser. ....	14
Fig. 9 - Stazione totale.....	15
Fig. 10 - Funzionamento GPS, misurazione contemporanea della posizione da tre satelliti. ....	16
Fig. 11 - Posizione individuata univocamente da tre sfere.....	17
Fig. 12 - Relazione fra coordinate immagine (x,y) e coordinate 3D oggetto (X,Y,Z). 20	
Fig. 13 - Centro di proiezione O (modificata da Kraus).....	24
Fig. 14 - Geometria di formazione dell'immagine in un sistema ottico ideale. I punti nodali N, N' coincidono con i centri di prospettiva O, O' (modificata da Kraus). ....	25
Fig. 15 - Definizione del centro di prospettiva O'M (modificata da Kraus).....	27
Fig. 16 - Schema semplificato di foto-goniometro (modificata da Kraus).....	28
Fig. 17 - Assi della camera convergenti (a), paralleli (b) (modificata da Zanutta). ....	33
Fig. 18 - Formazione dell'immagine digitale (modificata da Zanutta).....	35

Fig. 19 - Gradazione scala grigio, in alto a destra DN=0 e in basso a sinistra DN=255. .....	36
Fig. 20 - Istogramma dei valori radiometrici di un'immagine RGB con aumento di contrasto. A sinistra l'immagine originale. ....	42
Fig. 21 - Istogramma dei valori radiometrici di un'immagine RGB diminuendo e aumentando la luminosità. ....	42
Fig. 22 - parti principali sensore CCD. ....	45
Fig. 23 - Parti principali sensore CMOS. ....	46
Fig. 24 - Confronto tra sensore CCD e CMOS. ....	47
Fig. 25 - Geometria epipolare (Wikipedia modificata). ....	48
Fig. 26 - Vertical Line Locus (modificata da Zanutta). ....	49
Fig. 27 - Approccio gerarchico: ogni livello ha dimensioni pari ad un quarto rispetto al precedente (modificata da Zanutta). ....	49
Fig. 28 - Andamento del coefficiente di correlazione lungo una linea epipolare: il valore massimo della curva interpolatrice individua la posizione del punto omologo (modificata da Zanutta). ....	51
Fig. 29 - Schema generale per un problema di Structure from Motion. ....	53
Fig. 30 - a) regione omogenea (non ci sono variazioni in tutte le direzioni), b) edge (non ci sono variazioni lungo la direzione dell'edge), c) corner (ci sono variazioni significative in tutte le direzioni) (modificata da Zanutta). ....	54
Fig. 31 - Ottava (modificata da Zanutta). ....	56
Fig. 32 - Formazione istogramma di gradienti (modificata da Zanutta). ....	56
Fig. 33 - Logo ENAC. ....	60
Fig. 34 - Rara foto scattata circa nel 1917 di un prototipo di un Aerial Targer in un hangar del Royal Fliying corps (Davide Migliore, 2013, modificata). ....	62

Fig. 35 - Esercitazione di un idrovolante Curtiss N9 (ceticowboy, modificata). .....	63
Fig. 36 - Abbattimento della corazzata Roma dopo il bombardamento della Fritz X (L'impronta). .....	63
Fig. 37 - Foto del Henschel 293/294 presa dall'archivio dell'aviazione tedesca (luftarchiv). .....	64
Fig. 38 - Un pattugliatore Consolidated PB4Y-2 Privateer della U.S. Navy in atterraggio su una base nel Pacifico mostra due velivoli da attacco teleguidati Bat appesi sotto le ali. (Migliore, 2013, modificata). .....	65
Fig. 39 - 1975, Aereo da trasporto DC-130° in volo equipaggiato con 4 droni da ricognizione AQM- Firebee. ....	66
Fig. 40 - Telaio in fibra di carbonio di un quadricottero. ....	69
Fig. 41 - Italdron - Highone 4HSE Pro (vanillamagazine, modificata).....	70
Fig. 42 - Walkera Qr X350 pro (youtube, modificata). .....	71
Fig. 43 - Aibotix X6 (uavinsider, modificata). .....	72
Fig. 44 - 3D Robotics Iris+ (dronionline, modificata).....	73
Fig. 45 - Udi U818a (ddroni, modificata). .....	73
Fig. 46 - Drone Spia Militare PD-100 Black Hornet (startmag, modificata). .....	74
Fig. 47 - RQ-4 Global Hawk (dailyairforce). .....	75
Fig. 48 - Rilevamento termico per agricoltura di precisione. ....	77
Fig. 49 - Esperimento che portò alla scoperta dell'infrarosso da parte di William Herschel (1738-1822). .....	78
Fig. 50 - Accostamento tra immagine a colori e immagine termica del Bode Museum di Berlino. ....	79
Fig. 51 - Confronto tra immagini a differente risoluzione termica. A sinistra lo strumento apprezza una variazione di 0,05°C, a destra di 0,1°C. ....	81

Fig. 52 - Confronto tra immagini scattate da termocamere con frequenze diverse nel quale si apprezza la differenza di nitidezza della mano in movimento. A sinistra la frequenza di acquisizione è 20 Hz e a destra 50 Hz. ....	82
Fig. 53 - FLIR MR 176 (flirshop, modificata). ....	82
Fig. 54 - Testo 875 - 1i (elcoteam, modificata). ....	83
Fig. 55 - NEC Termo Gear R300 (edilportale, modificata).....	84
Fig. 56 - Drone equipaggiato con camera termica che sorvola un campo agricolo. ....	86
Fig. 57 - Vista infrarossi di un impianto fotovoltaico. In rosa gli elementi difettosi. ...	88
Fig. 58 - Posizione Geografica di Medolla all'interno della cartina nazionale (wikipedia, modificata).....	89
Fig. 59 - Posizionamento territoriale all'interno della provincia di Modena (wikipedia, modificata).....	89
Fig. 60 - Crollo della chiesa di Villafranca (emmeweb). ....	90
Fig. 61 - Vigili del fuoco impegnati nelle ricerche dei dispersi dopo il crollo alla Haemotronic di Medolla (Il Resto del Carlino).....	91
Fig. 62 - Esempi di fenomeni geologici inusuali, a sinistra eruzione di un pozzo di idrocarburi, a destra una fuoriuscita di gas metano infiammabile (ambiente.regione-emiliaRomagna, modificata). ....	92
Fig. 63 - Visione aerea dell'intera area oggetto di studio (Google maps).....	93
Fig. 64 - Logo Sal Engineering. ....	94
Fig. 65 - Schematizzazione traiettoria di volo. In rosso è riportato il punto di decollo e atterraggio. ....	95
Fig. 66 - Accostamento di due fotogrammi successivi esportati dal filmato RGB. ....	96
Fig. 67 - Drone utilizzato per effettuare il rilievo della porzione di territorio. ....	97
Fig. 68 - Ground Control Station Bag (Sal Engineering site, modificata). ....	98

Fig. 69 - Rappresentazione della GoPro Hero 2 con e senza custodia protettrice (wired, modificata).....	99
Fig. 70 - Diverse possibilità di acquisizione di foto e video (GoPro site).....	100
Fig. 71 - Termocamera OPTRIS Pi 450. ....	101
Fig. 72 - Scheda tecnica OPTRIS Pi 450. ....	102
Fig. 73 - Target termico posizionato sul campo agricolo. ....	103
Fig. 74 - Ricevitore GPS-GLONASS TOPCON GB500 (pnceo).....	103
Fig. 75 -Antenna TOPCON PG-A1 (geoinstruments, modificata). ....	104
Fig. 76 - Rilevamento della posizione del target attraverso il ricevitore e l'antenna satellitare TOPCON.....	105
Fig. 77 - Vista satellitare del campo. In giallo sono indicati i target termici e in rosso il punto di decollo/atterraggio.....	106
Fig. 78 - Immagine scattata con una GoPro in cui si nota molto bene la distorsione radiale. ....	110
Fig. 79 - Schermata video della fase importazione e conversione di GoPro Studio. .	112
Fig. 80 - Differenza tra frame originale (in alto) e calibrato (in basso). ....	114
Fig. 81 - Schermata video della fase EDIT di GoPro Studio. È stato posizionato il cursore romboidale in corrispondenza del secondo nel quale si vuole esportare il frame. A destra la finestra <i>Export Still Image</i> permette di scegliere la qualità dell'immagine esportata.....	115
Fig. 82 - Schermata di visualizzazione iniziale di Total CSV Converter. In alto sono riportati tutti i tipi di formato che il software è in grado di trattare e convertire. Sono presenti due finestre principali, a sinistra bisogna selezionare il percorso nel quale sono contenuti i dati da analizzare, i quali vengono evidenziati nella finestra di selezione a destra che consente di scegliere i singoli file da convertire. ....	117
Fig. 83 - Schermata di visualizzazione iniziale di Ecobyte Replace Text.....	118

Fig. 84 - Finestra principale di ImageJ. ....	120
Fig. 85 - Barra degli strumenti ImageJ. ....	120
Fig. 86 - Processo di importazione di immagine testo. ....	121
Fig. 87 - Visualizzazione in scala di grigi di un immagine testo importata su ImageJ. .....	122
Fig. 88 - Conversione formato immagine.....	123
Fig. 89 - Schermata principale della toolbox di calibrazione. ....	125
Fig. 90 - Schermata di selezione della modalità di calibrazione standard.....	125
Fig. 91 - Tecnica corretta per fotografie al reticolo calibrato.....	126
Fig. 92 - Mosaico contenente tutte gli scatti effettuati sul reticolo. ....	127
Fig. 93 - Corner da individuare. ....	127
Fig. 94 - individuazione dei corner del reticolo.....	128
Fig. 95 - Individuazione contorno reticolo di calibrazione. ....	128
Fig. 96 - Localizzazione spigoli scacchiera.....	129
Fig. 97 - Pannello di calibrazione Calib 3V. ....	131
Fig. 98 - Schermata principale Calib3V, nello specifico è mostrato il menu “Calibration”.....	131
Fig. 99 - Costruzione polilinea. ....	132
Fig. 100 - Assegnazione posizione ai cerchi del pannello.....	132
Fig. 101 - Esempio di calibrazione immagine, a sinistra l’immagine originale e a destra quella calibrata.....	133
Fig. 102 - Calibrazione di un fotogramma aereo estrapolato dal filmato termico girato con Optris Pi450.....	134

Fig. 103 - Ricostruzione Colosseo attraverso il codice Bundler. ....	136
Fig. 104 - Comandi principali di VisualSFM. ....	137
Fig. 105 - Visualizzazione di tutte le immagini elaborate. ....	138
Fig. 106 - Confronto tra immagini per ricercare corrispondenze. Parziale del report che il software riporta durante l'elaborazione. ....	138
Fig. 107 - File SIFT. ....	139
Fig. 108 - Ricostruzione sparsa effettuata con triangolazione. ....	139
Fig. 109 - Ricostruzione automatica della struttura della scena. ....	140
Fig. 110 - Visualizzazione nuvola densa di punti. ....	141
Fig. 111 - Visualizzazione comando per la georeferenziazione. ....	142
Fig. 112 - Comando GCP-based Transformation. ....	142
Fig. 113 - Registrazione delle coordinate dei punti. Report parziale della procedura di orientamento assoluto. ....	142
Fig. 114 - Inserimento coordinate PFA. ....	144
Fig. 115 - Primo modello georeferenziato con problemi dovuti all'uso delle coordinate UTM. ....	144
Fig. 116 - Immagine nella quale sono inquadrati 4 PFA. In verde invece è rappresentato il puntatore. ....	146
Fig. 117 - Visualizzazione dei 5 PFA sulla nuvola densa di punti. ....	146
Fig. 118 - Parametri della trasformazione conforme. ....	147
Fig. 119 - Visualizzazione della nuvola densa. Sono indicati anche i PFA e la posizione e assetto delle fotografie. ....	149
Fig. 120 - Nuvola densa di punti finale georeferenziata nel sistema UTM, scalimetro espresso in metri. ....	150

Fig. 121 - Visualizzazione di tutte le immagini importate. ....	151
Fig. 122 - Ricostruzione automatica della struttura della scena. ....	152
Fig. 123 - Visualizzazione nuvola densa di punti.....	153
Fig. 124 - Visualizzazione dei 5 PFA sulla nuvola densa di punti.....	155
Fig. 125 - Visualizzazione della nuvola densa. Sono indicati anche i PFA e la posizione e assetto delle fotografie. ....	157
Fig. 126 - Nuvola densa di punti finale georeferenziata nel sistema UTM, scalimetro espresso in metri. ....	158
Fig. 127 - Visualizzazione nuvola densa di punti.....	159
Fig. 128 - Nuvola densa di punti finale georeferenziata nel sistema UTM, scalimetro espresso in metri. ....	162
Fig. 129 - Sovrapposizione modello GoPro e termico. A sinistra una vista planimetrica, a destra si denota la diversità di orientamento.....	162
Fig. 130 - schermata principale Cloude Compare. ....	164
Fig. 131 - Interfaccia Label Connected Components. ....	166
Fig. 132 - Vista dei componenti creati dall’algoritmo “Label Connected Components”. .....	167
Fig. 133 - Scomposizione in gruppi di punti. ....	167
Fig. 134 - Vista del riquadro creato con il comando “Segment”.....	168
Fig. 135 - Nuvola densa ripulita dagli outliers, scalimetro in metri.....	168
Fig. 136 - Interfaccia grafica Poisson Surface Reconstruction. ....	170
Fig. 137 - Interpolazione di Poisson con indice di "Depth" differenti: 3, 4, 6, 10. ....	170
Fig. 138 - Modello interpolato tramite l'algoritmo di Poisson, scalimetro in metri. ...	171
Fig. 139 - Modello interpolato pulito, scalimetro in metri. ....	172

Fig. 140 - Visualizzazione profilo (rosso) e sezioni (verde) estrapolate.....	173
Fig. 141 - Sezione trasversale, scalimetro in metri.....	173
Fig. 142 - Profilo longitudinale, scalimetro in metri.....	173
Fig. 143 - Visualizzazione del tragitto percorso dal drone, punti significativi evidenziati in viola.....	174
Fig. 144 - Vista dei componenti creati dall’algoritmo “Label Connected Components”. .....	176
Fig. 145 - Nuvola densa ripulita dagli outliers, scalimetro in metri.....	177
Fig. 146 - Nuvola densa ripulita dagli outliers, scalimetro in metri.....	178
Fig. 147 - Vista frontale del modello RGB sovrapposto al modello termico temperatura. .....	179
Fig. 148 - Sovrapposizione modello quota-temperatura con modello GoPro visto dall’alto, scalimetro in metri.....	179
Fig. 149 - Perdita informazione sulla temperatura, a sinistra la matrice originale con i valori di temperatura assegnati ad ogni pixel, a destra la matrice trasformata in scala di grigi.....	181
Fig. 150 - Immagine termica utilizzata per il processo di conversione.....	182
Fig. 151 - Temperature associate ai punti.....	184
Fig. 152 - Schermata "Render to file". .....	185
Fig. 153 - Individuazione coordinate dei 4 vertici della porzione di territorio. ....	186
Fig. 154 - Monografia localizzazione punto in alto a sinistra modello GoPro.....	187
Fig. 155 - Individuazione punto su Global Mapper. ....	187
Fig. 156 - File tipo, formato .tfw .....	188
Fig. 157 - Ortofoto (vista dall’alto), scalimetro in metri.....	189

Fig. 158 - Ortofoto termico (vista dall'alto), scalimetro in metri.....	190
Fig. 159 - "workflow" indica il piano di lavoro da seguire su Photoscan. ....	192
Fig. 160 - Lista fotogrammi importati su Photoscan.....	193
Fig. 161 - Retta epipolare. ....	194
Fig. 162 - Visualizzazione comando Align photos.....	195
Fig. 163 - Fase di eliminazione degli outliers. ....	197
Fig. 164 - Nuvola sparsa di punti pulita dalle fonti di disturbo.....	197
Fig. 165 - Nuvola densa di punti. ....	198
Fig. 166 - Costruzione della mesh. ....	198
Fig. 167 - Ortofoto realizzato con Agisoft Photoscan, scalimetro in metri.....	199
Fig. 168 - Contenuto .tfw .....	200
Fig. 169 - Confronto planimetrico dei tre modelli. Da sinistra a destra: modello RGB, termico quote, termico temperature.....	201
Fig. 170. - Nuvola densa del modello termico quote. A destra sono indicate le zone di interesse. ....	202
Fig. 171 - Accostamento tra il modello originale e il modello ripulito dagli outliers.	203
Fig. 172 - Accostamento del modello RGB iniziale (in basso) con quello ottimizzato di qualità (in alto). ....	203
Fig. 173 - Profilo longitudinale con quote VSfM, scalimetro in metri. ....	205
Fig. 174 - Profilo longitudinale con quote Photoscan, scalimetro in metri. ....	207
Fig. 175 - Rappresentazione Curve di livello (passo 1 m) del DSM RGB creato con VSfM, scala graduata con le tonalità del blu. A quote minori corrispondono toni di blu più scuri. ....	208

Fig. 176 - Rappresentazione delle sole Curve di livello (passo 1 m) del DSM RGB creato con VSfM. ....	210
Fig. 177 - Rappresentazione Curve di livello (passo 30 cm) del DSM RGB creato con Photoscan, scala graduata con le tonalità del blu e viola.....	211
Fig. 178 - Rappresentazione grafica dell'ondulamento della superficie e della presenza di vegetazione. ....	212
Fig. 179 - Sezione che mostra il particolare della vegetazione. ....	212
Fig. 180 - Gradino creato dalla variazione del fattore di scala.....	213
Fig. 181 - Outliers perimetrali non eliminati. ....	213
Fig. 182 - Rappresentazione delle differenze di quota tra il DSM RGB creato con Photoscan e quello creato con VSfM. ....	215
Fig. 183 - Rappresentazione del DSM termico in cui vengono in cui vengono evidenziate le differenti temperature attribuite ai valori radiometrici con classi di ampiezza 1 °C. ....	219
Fig. 184 - Istogramma delle temperature.....	221
Fig. 185 - Due Foto termiche successive che inquadrano lo stessa porzione di terreno tra le due anomalie. A sinistra (più chiara) l'immagine non contiene punti appartenenti all'anomalia termica. A destra l'immagine risulta più scura in quanto tutti i valori radiometrici di grigio sono shiftati verso il basso per la presenza dell'anomalia.....	222
Fig. 186 - Informazione tridimensionale nella quale alle curve di livello (nere) è stata sovrapposto il dato termico.....	223

# INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Vari tipi di immagine (modificata da Zanutta).....	37
Tabella 2 - Tipologie di misura .....	10707
Tabella 3 - Lista coordinate UTM dei PFA.....	10707
Tabella 4 - Corrispondenza PFA per ogni immagine.....	1433
Tabella 5 - Variazione coordinate. ....	1455
Tabella 6 - Coordinate plano-altimetrico inserite.....	1455
Tabella 7 - Calcolo dei residui e della media. ....	14848
Tabella 8 - Numero di PFA presenti in ogni immagine. ....	154
Tabella 9 - Calcolo dei residui e della media. ....	1555
Tabella 10 - Coordinate assegnate ai PFA.....	1600
Tabella 11 - Calcolo dei residui e della media. ....	1600
Tabella 12 - Quote punti significativi.....	1755
Tabella 13 - Ground Sampling Distance GoPro.....	1755
Tabella 14 - Ground Sampling Distance Optris Pi 450.....	17777
Tabella 15 - Coordinate dei punti estremi del modello. ....	18686
Tabella 16 - Coordinate dei PFA.....	1944
Tabella 17 - Coordinate e residui marker. ....	19696
Tabella 18 - Confronto numero di punti.....	2011
Tabella 19 - Confronto GSD RGB con GSD termico. ....	2044
Tabella 20 - Statistiche DSM RGB VSfM, misure in metri.....	210

Tabella 21 - Statistiche DSM RGB Photoscan, misure in metri. ....	21414
Tabella 22 - Statistiche DSM RGB Photoscan-VSfM, misure in metri. ....	21616
Tabella 23 - Statistiche DSM termico generato con VSfM, misure in gradi °C. ...	22019

# INTRODUZIONE

In questo elaborato viene sperimentata una tipologia di rilievo che negli ultimi anni sta incrementando sempre più la sua diffusione, il rilievo da drone.

I vantaggi di questa tecnica sono riscontrabili in molti aspetti, su tutti la velocità di acquisizione, la economicità del rilievo, se paragonato a quelli classici, la qualità del prodotto ottenuto e la possibilità di raggiungere facilmente aree che altrimenti risulterebbero ostiche per l'uomo.

Per questi motivi la tecnologia degli UAV (acronimo di Unmanned aerial vehicle) sta facendo passi da gigante proponendo una sempre più vasta gamma di prodotti ottimizzati per ogni genere di utilizzo. Esistono in commercio UAV di ogni tipologia e dimensione, in grado di essere equipaggiati con dispositivi di ogni genere.

In questa tesi viene eseguito uno studio su una tecnica innovativa di rilievo multisensoriale nella quale, alla classica camera digitale, è stato affiancato un sensore termico ad infrarossi.

Il monitoraggio con sensori integrati è una tecnica completamente nuova che nell'arco di un paio di anni ha rivoluzionato le metodologie classiche in quanto permette di ottenere informazioni che fino a poco tempo fa erano inimmaginabili. Il controllo della salute delle piante e l'individuazione di campi di marijuana da remoto, la valutazione delle dispersioni termiche di una struttura o l'individuazione di problematiche relative a grandi impianti fotovoltaici, sono solo alcune delle possibilità di impiego di tale metodologia che tuttavia ricoprono un'importanza enorme soprattutto se si considera il dibattito sempre più acceso sulla salvaguardia ambientale.

L'obiettivo di questa tesi è quello di sperimentare un iter processuale che consenta di utilizzare i sensori termici affiancati a fotocamere digitali in ambito fotogrammetrico al fine di ottenere prodotto dal quale sono estrapolabili informazioni geometriche e termiche dell'oggetto di studio.

Per l'analisi si è adottato un rilievo eseguito e messo a disposizione per motivi di ricerca, dalla SAL Engineering utilizzando la metodologia UAV con equipaggiamento

multisensoriale su una porzione di territorio soggetto ad anomalie termiche nei pressi di Medolla (MO). Obiettivo del rilievo è stato puramente tecnico per valutare la funzionalità del sistema.

La SAL Engineering S.r.l. è una società che progetta, produce e commercializza sistemi UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) e ROVs (Remotely Operated Vehicle) per l'acquisizione di dati in ambiente aereo, marino, terrestre e subacqueo.

Per la fase di trattamento del dato e per la creazione di modelli tridimensionali vengono utilizzati una serie di software open source e programmi commerciali in grado di generare nuvole dense di punti e ortofoto a valenza metrica.

La creazione de DSM (Digital Surface Model) viene effettuato attraverso il software gratuito VisualSfM (7.1), un programma semiautomatico che, partendo da un sistema di immagini fotografiche, è in grado di fornire nuvole dense georeferenziate.

Il trattamento del modello tridimensionale viene eseguito con l'ausilio di un software open source chiamato CloudCompare (8.1).

I prodotti ottenuti vengono confrontati con una nuvola ottenuto attraverso Agisoft Photoscan (9) un programma a basso costo in grado di generare, georeferenziare e trattare nuvole dense di punti ed infine vengono studiati in ambiente GIS realizzando sovrapposizioni grafiche, confronti numerici, interpolazioni, sezioni e profili.

Nella prima parte dell'elaborato di tesi si è cercato di fornire le nozioni e le informazioni necessarie al comprendimento degli argomenti trattati.

Nella seconda vengono spiegati i processi di trattamento ed elaborazione dei dati che portano alla creazione dei due modelli RGB e termico.

Infine sono stati eseguiti confronti e tratte le opportune considerazioni su quanto applicato.

Nello specifico la struttura è la seguente:

- Nel primo capitolo vengono date le nozione principale di geomatica, affrontando le tematiche legate al definizione del datum e dei diversi sistemi di coordinate. Inoltre si prendono in esame anche le tecniche e gli strumenti topografici.

- Nel secondo capitolo si affrontano le tematiche fotogrammetriche a partire dai fondamenti classici analitici fino ad arrivare alle tecniche digitali.
- Il capitolo terzo tratta la procedura di rilevamento eseguito con l'ausilio del drone di cui ne viene fornito un sunto della regolamentazione prevista. Si affrontano i temi riguardanti lo sviluppo storico dai primi droni costruiti per scopi militari, passando per quelli in ambito civile e finendo con i microdrone per rilevamento.
- Nel quarto capitolo viene affrontata la tematica relativa al rilevamento multisensoriale termico. Sono fornite nozioni sulla termografia e sulle caratteristiche delle termocamere e descritti i principali utilizzi di questa metodologia di rilievo.
- Nel capitolo quinto c'è l'inquadramento dell'area di studio e una breve descrizione del fenomeno relativo alle anomalie. Inoltre vengono fornite le caratteristiche e l'equipaggiamento utilizzato per il rilievo
- Nel sesto capitolo è descritta la fase di trattamento del dato a colori e termico, partendo dal filmato fino all'ottenimento delle immagini finali rettificate.
- Nel settimo capitolo è riportata la metodologia usata per la restituzione fotogrammetrica tramite VisualSfM sia per quanto riguarda il DSM RGB che per quello termico.
- Nel capitolo ottavo è descritta la fase di trattamento delle nuvole dense effettuato con l'ausilio di CloudCompare. Viene inoltre descritta la procedura per la conversione del valore radiometrico in valore termico e quella per la creazione dell'ortofoto.
- Nel nono capitolo viene descritta la procedura per la restituzione e il trattamento dei dati eseguiti sul software low cost Agisoft Photoscan.
- Infine nel capitolo decimo viene effettuato un confronto ed un'analisi geometrica e termica dei DSM ottenuti.



# 1 GEOMATICA

La geomatica è una disciplina del rilevamento il cui scopo è quello estrarre, modellizzare, elaborare e archiviare qualsiasi tipo di informazione sul territorio operando da una posizione remota rispetto al territorio stesso. I dati raccolti sono informazioni georeferenziate, ovvero caratterizzate da una posizione in un determinato sistema di riferimento chiamato datum geodetico.

## 1.1 DATUM GEODETICO

Il datum geodetico, più noto come datum, è un sistema di riferimento che consente di esprimere la posizione di punti appartenenti alla superficie fisica della Terra attraverso termini numerici.

La sua definizione si ottiene materializzando fisicamente dei punti sulla superficie terrestre e attribuendo a questi dei valori numerici rappresentanti le sue coordinate.

### 1.1.1 DEFINIZIONE DATUM IN GEODESIA CLASSICA

Nella geodesia classica il datum è definito sulla base del concetto di superficie di riferimento, ovvero una superficie matematica sulla quale possono essere definiti sistemi di coordinate e sviluppati calcoli geodetici.

Per definirlo bisogna individuare un ellissoide con parametri di dimensione e forma noti orientato localmente. Questo viene poi orientato in uno specifico punto detto “punto di emanazione imponendo tre condizioni:

- Normale ellissoidica coincidente con la verticale nel punto;
- Direzione del meridiano ellissoidico e astronomico coincidenti;
- Quota ellissoidica e ortometrica coincidenti.

Nel punto di emanazione l'ellissoide orientato in modo locale è tangente al geoide e approssima bene la superficie di riferimento in un intorno del punto in quanto la deviazione della verticale risulta trascurabile (Fig. 1).

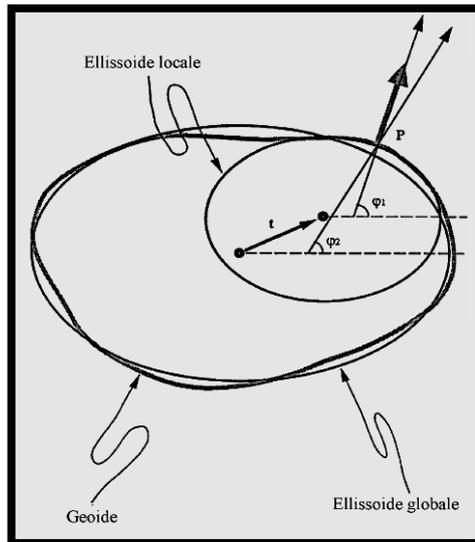


Fig. 1 - Relazione tra geoidi, ellissoide orientato localmente in P ed ellissoide globale.

È stato introdotto il termine GEOIDE, esso è una superficie equipotenziale perpendicolare alla verticale, e quindi alla forza di gravità in ogni punto che lo caratterizza.

Essendo impossibile da descrivere attraverso un'equazione matematica non può essere utilizzato per la creazione di mappe, per questo si usano gli ellissoidi di riferimento.

L'ellissoide di riferimento è una superficie definita matematicamente che approssima il geoidi alla vera forma della terra, viene sfruttato come superficie di riferimento per definire la rete geodetica e qualunque punto di cui sono note latitudine, longitudine e quota.

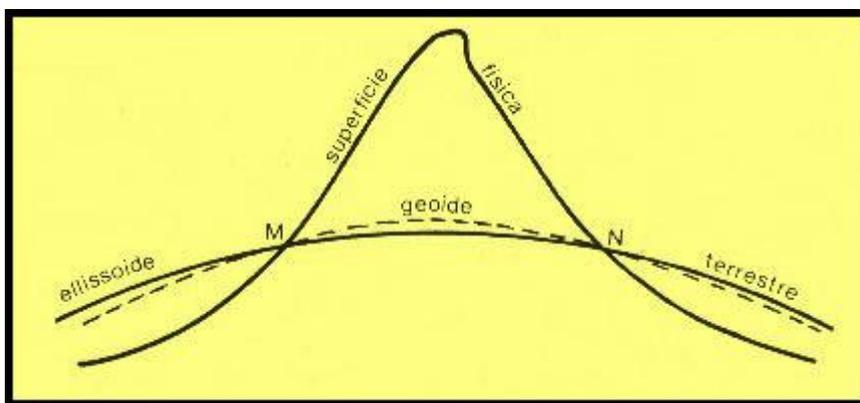


Fig. 2 - Raffronto tra superficie fisica, geoidi e ellissoide di riferimento.

Ad ogni datum deve essere associata una rete geodetica derivante da un gruppo di misure e dal successivo calcolo compensato (Radiconi; 2011). Ogni nazione ha propri datum geodetici; in Italia i principali sistemi di riferimento sono due:

- **Sistema Geodetico Nazionale ROMA 40:** si basa sull'ellissoide internazionale di Heyford orientato a Roma precisamente all'osservatorio astronomico di Monte Mario, le cui misure risalgono al 1940. Il meridiano fondamentale è quello di Roma Monte Mario e per riferire le longitudini al meridiano di Greenwich va sommata una costante (longitudine Est di M. Mario da Greenwich). Ad esso viene associata la rete geodetica di triangolazione dell'IGM (Istituto Geografico Militare).
- **Sistema Geodetico ED50:** l'ellissoide utilizzato è sempre lo stesso (Heyford) ma viene orientato in modo tale che sia valido per tutta l'Europa, infatti ED è l'acronimo di European Datum. Il meridiano fondamentale è Greenwich e la rete associata deriva da una selezione di catene di triangolo desunte dalle reti dei singoli stati, compensate poi a livello europeo.

#### 1.1.2 DEFINIZIONE DATUM IN GEODESIA SATELLITARE

La grossa differenza rispetto alla geodesia classica consiste nel fatto che i datum utilizzati non sono orientati localmente ma assumono un carattere globale e sono validi in tutto il mondo.

Sono caratterizzati da una terna geocentrica XYZ (Fig. 3) avente cioè l'origine (O) coincidente con il centro di massa della Terra così formata:

- Asse Z coincidente con l'asse di rotazione medio terrestre;
- Asse X e Y appartenenti al piano equatoriale, X diretto secondo il meridiano fondamentale e Y in modo da creare una terna destrorsa.

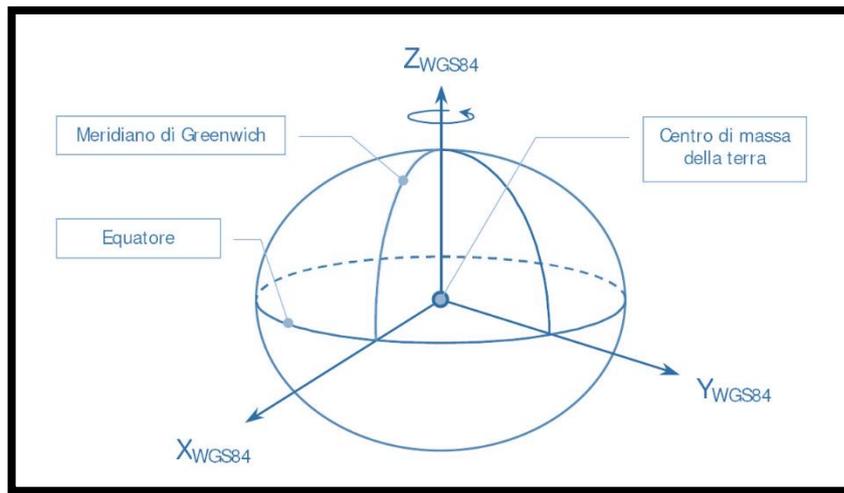


Fig. 3 - Rappresentazione della terna geocentrica relativa al sistema WGS84.

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

Anche ai datum globali deve essere associata una rete geodetica. Si parla di reti internazionali, raffittite a livello nazionale. In particolare in Italia si ha la rete IGM95 che costituisce un raffittimento di quella europea EUREF (che è a sua volta parte di quella mondiale IGS) basata sul datum europeo ETRS89 solidale alla piattaforma continentale europea. A livello locale ci saranno poi altre reti che raffittiscono ulteriormente la rete IGM95.

## 1.2 SISTEMI DI COORDINATE

Per determinare la posizione di un punto all'interno di un determinato sistema di riferimento si utilizzano, come detto in precedenza, dei valori numerici chiamate coordinate.

Esistono più sistemi di coordinate che ne forniscono valori e rappresentazioni di diverso genere.

### 1.2.1 COORDINATE CARTESIANE LOCALI

Sono le coordinate cartesiane (e, n, h) riferite a una terna euleriana che definiscono una posizione plano-altimetrica (Fig. 4). Hanno origine in un punto  $P_0$  dell'ellissoide e i tre assi così orientati:

- Asse "h" diretto secondo la normale ellissoidica per  $P_0$ ;
- Assi "e" ed "n" sul piano tangente all'ellissoide in  $P_0$  con "n" diretto secondo la tangente al meridiano verso NORD ed "e" secondo la tangente al parallelo verso EST.

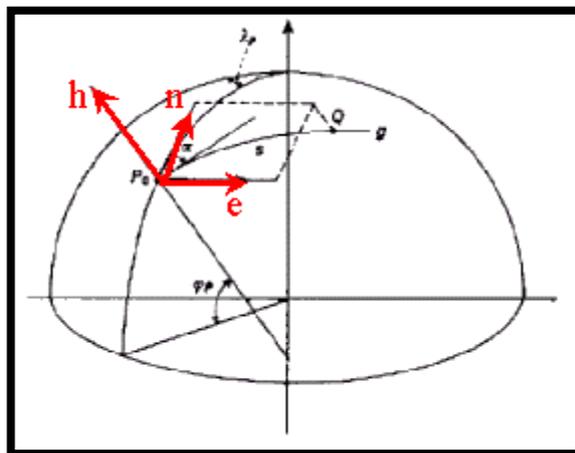


Fig. 4 - Terna euleriana di coordinate cartesiane locali.

### 1.2.2 COORDINATE GEODETICHE LOCALI

Esprimono la posizione tramite coordinate geodetiche polari ( $s, \alpha$ ) 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
- $\alpha$  (azimut) è l'angolo formato dalla geodetica con il meridiano per  $O$ , contato in senso orario partendo dal Nord

Oppure possono utilizzarsi le coordinate geodetiche ortogonali o rettangolari ( $X, Y$ ) rispetto ad un punto  $O$  assunto come origine. La  $X$  rappresenta la lunghezza dell'arco di meridiano tra  $O$  e  $Q$ ; la  $Y$  invece la lunghezza dell'arco di geodetica  $Q-P$  (Fig. 5)

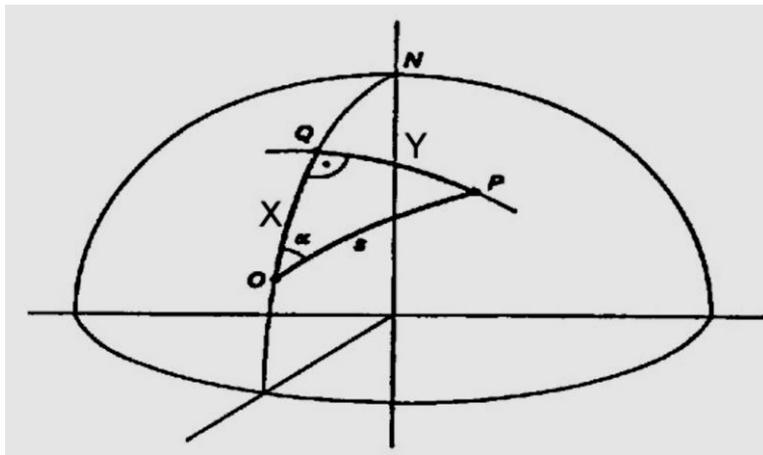


Fig. 5 - Coordinate geodetiche polari e ortogonali.

### 1.2.3 COORDINATE GEOGRAFICHE ELLISSOIDICHE

Sono costituite da una coppia di valori:

- Latitudine ( $\varphi$ ): angolo che la verticale di un punto sulla superficie della Terra forma con il piano equatoriale;
- Longitudine ( $\omega$ ): angolo in senso Est o Ovest rispetto ad un meridiano di riferimento.

Queste definiscono la posizione di un punto nel piano, ovvero la proiezione del punto sull'ellissoide.

Nel metodo classico l'altimetria viene trattata separatamente mentre nella geodesia satellitare viene associata la quota ellissoidica  $h$ . Si ottiene quindi la terna  $\varphi, \omega, h$  che definisce la posizione tridimensionale del punto.

#### 1.2.4 COORDINATE PIANE CARTOGRAFICHE

Come già detto la rappresentazione cartografica stabilisce una corrispondenza biunivoca tra ellissoide e piano della carta. In Italia sono principalmente utilizzate le coordinate Gauss-Boaga (N,E) e quelle catastali Cassini-Soldner (X,Y).

Il sistema Gauss-Boaga definisce, oltre alla proiezione cartografica, anche il sistema geodetico di riferimento Roma 40. La Carta d'Italia in scala 1:25000 dell'IGM è stata redatta in coordinate Gauss-Boaga.

La rappresentazione Cassini-Soldner è stata adottata dal Catasto per la maggior parte del territorio, in sede di formazione della propria cartografia. Si basa sull'ellissoide Bessel orientato sulla posizione dell'Osservatorio Geografico della Marina Militare a Genova.

## 1.3 IL RILIEVO TOPOGRAFICO

La topografia è una disciplina che studia i metodi, i modelli di calcolo, le strumentazioni e la loro applicazione per il rilievo di una porzione limitata della superficie terrestre. Tale porzione di territorio deve essere sufficientemente piccola da poterne trascurare la sfericità o curvatura.

Il rilievo può essere diviso in due tipologie in base al tipo di operazioni con cui viene misurato:

- **Rilievo diretto:** comporta operazioni di misurazione a diretto contatto con i manufatti da documentare, e quindi immediatamente verificabili nei loro valori metrici. Uno dei vantaggi di questo sistema è che eventuali errori di misurazione possono essere accertati in corso d'opera e quindi vi si potrà subito porre rimedio.
- **Rilievo indiretto:** le misurazioni vengono effettuate con degli strumenti ottici, meccanici o informatici di grande precisione; queste comportano una serie di calcoli più o meno complessi al fine di ottenere una traduzione grafica degli oggetti rilevati all'interno di un sistema di coordinate spaziali. Rami importati di questa tecnica sono la misurazione tramite GPS e la fotogrammetria.

### 1.3.1 STRUMENTAZIONE TOPOGRAFICA

La topografia, come detto, studia la strumentazione e la loro applicazione per effettuare il rilievo. Gli strumenti topografici sono dispositivi che consentono di misurare grandezze geometriche come angoli (orizzontali e verticali) e distanza permettendo di individuare in modo univoco la posizione di uno o più posizionati sulla superficie terrestre.

Gli strumenti si classificano in base al tipo di parametro che sono in grado di determinare.

### 1.3.1.1 Misure di angoli

- Teodolite/tacheometro (Fig. 6): è uno strumento ottico a cannocchiale che permette di misurare angoli azimutali (orizzontali) e zenitali (verticali). La parte principale del teodolite è il cannocchiale, collegato mediante due perni all'alidada, imperniata a sua volta sul basamento.



Fig. 6 - Teodolite.

- Livello (Fig. 7): serve per misurare il dislivello tra due punti usufruendo dell'aiuto di un'asta graduata detta stadia (o calcolare la quota di un punto a partire da un altro di quota nota) verificando gli scarti rispetto all'allineamento orizzontale.



Fig. 7 - Livello.

### 1.3.1.2 Misure di distanze

Il distanziometro (Fig. 8) è utilizzato per rilevare la distanza utilizzando un raggio laser che misura con alta precisione la lontananza dal dispositivo rispetto al punto indicato dal segnale luminoso. Ne esistono due tipi in base al tipo di misura. Il primo effettua la misura di fase, valutando lo sfasamento dell'onda sinusoidale riflessa da un prisma riflettente. Il secondo fa una misura ad impulsi, essendo nota la velocità di propagazione del segnale, la determinazione della distanza si basa sulla misurazione del tempo di ritorno del segnale riflesso (non necessita di prisma).



Fig. 8 - Distanziometro laser.

### 1.3.1.3 Misure di angoli e distanze

La stazione totale (Fig. 9) è lo strumento oggi comunemente utilizzato per il rilievo indiretto che consente di valutare contemporaneamente angoli e distanze. Sostanzialmente si differenzia dal tradizionale teodolite ottico-meccanico per essere dotato di un distanziometro elettronico e di un computer per la memorizzazione e il calcolo dei dati.



Fig. 9 - Stazione totale.

#### 1.3.1.4 Misura assolute di coordinate tridimensionali

L'insieme dei sistemi di posizionamento atti a fornire in tempo reale, in qualsiasi condizione meteo ed in modo continuo la posizione dell'osservatore a terra prende il nome di GNSS (Global Navigation Satellite System).

Molti rilievi al giorno d'oggi vengono effettuati attraverso il GPS. Questo può essere accostato o utilizzato come alternativa agli strumenti classici topografici per la misura di angoli e distanze.

Il GPS è un sistema di posizionamento a livello globale (Global Positioning System) in grado di rilevare la posizione assoluta di punti situati in ogni parte del pianeta, sui quali sono posizionati opportuni ricevitori che captano segnali radio emessi da una rete di satelliti posti in orbita intorno alla terra.

Il GPS individua in tempo reale la posizione del ricevitore fornendone le coordinate rispetto al sistema di riferimento WGS84.

È costituito da tre segmenti che permettono il corretto funzionamento del sistema GPS:

- Segmento spaziale: costituito da una costellazione di 24 satelliti che trasmettono agli operatori a terra vari segnali ed hanno coordinate note funzione del tempo e orbita satellitare;
- Segmento di controllo: composto da stazioni a terra (1 principale a Colorado Springs negli USA e 4 secondarie) che controllano e trasmettono dati ai satelliti (correzioni degli orologi, nuove effemeridi ovvero informazioni che consentono

il computo della posizione del satellite in base alle stelle fisse). Queste stazioni a terra sono di coordinate note e servono solo per apportare periodicamente le correzioni di posizione dei satelliti sopra descritte;

- Segmento utente: calcola la posizione del punto a terra da determinare con l'utilizzo di un'antenna (ricevitore) in base ai segnali ricevuti dai satelliti. Ciascun ricevitore è costituito da un'antenna per la ricezione e l'amplificazione del segnale satellitare, una o più schede elettroniche per l'elaborazione dei segnali ricevuti ed un dispositivo di comando per l'elaborazione e la memorizzazione dei dati.

Il principio di funzionamento del GPS (Fig. 10) si basa sulla determinazione della distanza dell'osservatore da almeno tre satelliti contemporaneamente, la cui posizione nello spazio è nota con precisione (trilaterazione).

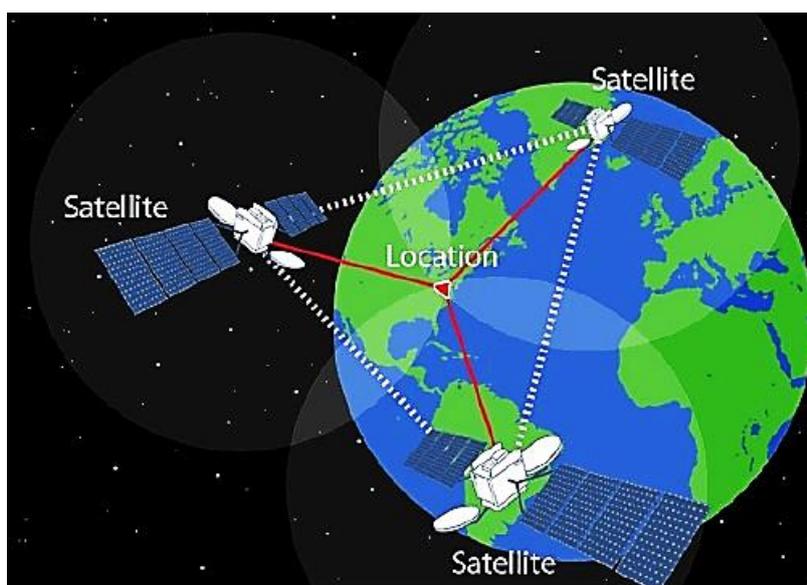


Fig. 10 - Funzionamento GPS, misurazione contemporanea della posizione da tre satelliti.

Il segnale emesso da un satellite è un'onda sferica che si propaga nello spazio. Un punto nello spazio è individuato da tre coordinate e per tale punto passano solo tre sfere (Fig. 11). E' necessario impostare un sistema di tre equazioni in tre incognite dove ciascuna equazione descrive la sfera all'istante  $t_i$ , quindi anche la posizione del suo centro (posizione del satellite), mentre le incognite rappresentano le coordinate  $x, y, z$  da rilevare.

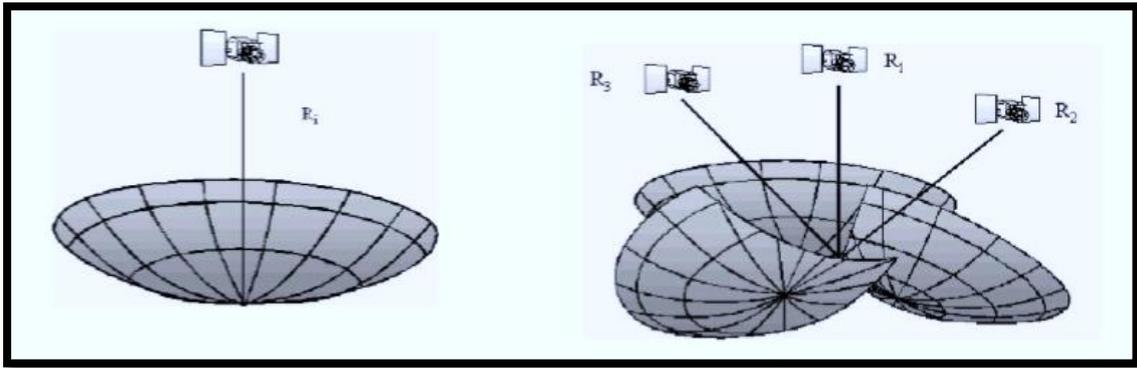


Fig. 11 - Posizione individuata univocamente da tre sfere

Il ricevitore GPS è in grado di calcolare, per ciascuno dei satelliti visibili, il tempo intercorso dall'istante di trasmissione del segnale a quello di ricezione (tempo di volo). Dato che la velocità di propagazione del segnale è pari a quella della luce ( $c = 300.000$  km/s), il riesce a risalire alla sua distanza da ciascun satellite. Ne consegue che è necessario sapere con precisione l'istante di tempo in cui il segnale viene trasmesso e misurare l'istante di arrivo del segnale al ricevitore mediante l'uso di orologi estremamente precisi ed esattamente sincronizzati.

Non potendo disporre di orologi ad altissima precisione anche a bordo dei ricevitori, per risolvere l'ambiguità nella determinazione della posizione ottenuta per trilaterazione, si utilizza una quarta misura che indica di quanto l'orologio del ricevitore devia rispetto a quelli di riferimento dei satelliti.

È necessario quindi l'utilizzo contemporaneo di un altro satellite da qui il ricevitore acquisisca il segnale radio.

Quindi la determinazione della posizione di un punto si basa sulla determinazione di 4 valori:

- Terna di coordinate  $(x, y, z)$ , punto nello spazio che può essere determinato in maniera univoca come l'intersezione di tre superfici sferiche sulla base delle pseudo-distanze (pseudo-range) da tre satelliti;
- Tempo  $(t)$ , indicazione dell'imprecisione dell'orologio del ricevitore e quelli atomici dei satelliti.

La determinazione delle pseudo-distanze avviene misurando lo sfasamento tra il segnale emesso da ciascun satellite e ricevuto dall'utente e un segnale identico e sincronizzato generato dal ricevitore.

Ciascun satellite tra quelli visibili al ricevitore invia un proprio segnale su due frequenze chiamate portanti:

- $L1 = 1575.42 \text{ MHz}$
- $L2 = 1227.60 \text{ MHz}$

Attraverso la modulazione di ampiezza, vengono generati anche diversi codici:

- Codice C/A (Coarse acquisition), modula la sola portante L1;
- Codice P (Precision), modula entrambe le portanti ed è riservato ad usi militari (criptato prende il nome di codice Y).

Ogni satellite riceve anche un messaggio D che trasmette importanti informazioni, quali le effemeridi dei satelliti (parametri orbitali), stato di salute, precisione degli orologi.

Sulla base delle caratteristiche del segnale, possono essere effettuati diversi tipi di misure con precisioni diverse, la misura in codice (meno precisa) e la misura di fase che aumenta la precisione sul posizionamento.

La prima utilizza la componente impulsiva (codice C/A o codice P se disponibile). Si basa sulla misura del "tempo di volo" e sulla correlazione tra il segnale emesso dai satelliti e quello generato dal ricevitore.

La Misura di fase invece usa la componente portante nelle frequenze L1 e L2. Si basa sulla misura delle differenze di fase tra il segnale emesso dai satelliti e quello generato dal ricevitore (Biagi).

## 2 LA FOTOGRAMMETRIA

Nel 1939, poco dopo l'invenzione della fotografia, si pensò che questo strumento potesse essere molto utile se affiancato alle normali tecniche di rilevazione per punti in modo da poter analizzare i dati comodamente in laboratorio. Nasce così la tecnica della fotogrammetria.

La fotogrammetria è una scienza che consente di ottenere informazioni metriche di oggetti fisici attraverso processi di registrazione, misura e interpretazione di immagini fotografiche. Questa scienza permette quindi di definire la forma dell'oggetto fotografato e la sua collocazione spaziale fornendo le coordinate di punti in un sistema di riferimento tridimensionale.

Fu fondata nel 1951 da Aimè Laussedat che studiò i processi di intersezione in avanti in cui le misure venivano effettuate direttamente su fotogrammi. Successivamente, l'invenzione della stereo-fotogrammetria permise di superare le difficoltà dell'ambiguo riconoscimento dei punti omologhi su due fotogrammi diversi, consentendo il tracciamento continuo di linee planimetriche e di curve di livello, di ortofoto e, grazie allo sviluppo del calcolo elettronico, negli anni '50 si sviluppò la fotogrammetria analitica. Infine negli anni 80, in seguito all'invenzione della fotografia digitale è nata la possibilità di utilizzare immagini non più fotografiche ma numeriche, in grado di essere elaborate con calcolatori specializzati nei quali sono implementati algoritmi e funzioni sempre più raffinate.

Risolvere un problema fotogrammetrico significa individuare le trasformazioni da applicare alle coordinate dello spazio immagine della fotografia in modo da relazionarlo con le grandezze dello spazio oggetto da rilevare.

La relazione (Fig. 12) da individuare è quindi tra le coordinate oggetto tridimensionali  $(X, Y, Z)$  e le coordinate bidimensionali dell'immagine fotografica  $(x, y)$

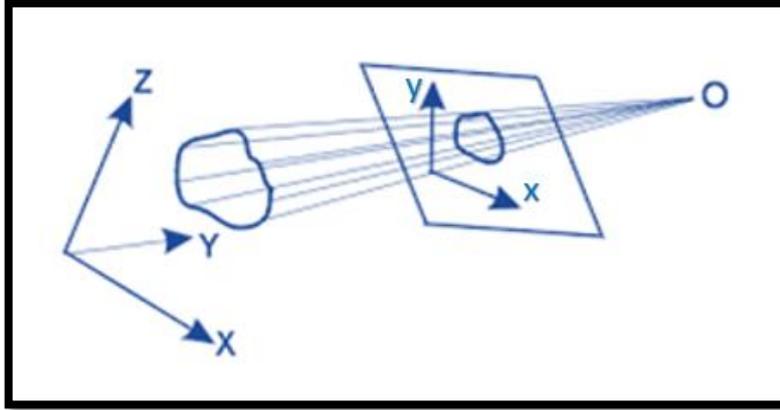


Fig. 12 - Relazione fra coordinate immagine (x,y) e coordinate 3D oggetto (X,Y,Z).

La soluzione del problema fotogrammetrico può essere riassunta in tre fasi:

- Presa: dalle coordinate tridimensionali dello spazio oggetto, noti i parametri di orientamento interno di una macchina fotografica si ottengono le coordinate bidimensionali dell'immagine;
- Orientamento: una volta individuate le coordinate oggetto e immagine, vengono valutati i parametri di orientamento esterno;
- Restituzione: tramite le coordinate immagine e i parametri di orientamento vengono determinate le coordinate spaziali dell'oggetto.

## 2.1 FONDAMENTI ANALITICI

La relazione che lega le coordinate dello spazio oggetto ( $X, Y, Z$ ) con quelle dello spazio immagine ( $x, y$ ) si chiama proiettività. La relazione tra coordinate immagine e coordinate oggetto è definita dalle equazioni di collinearità. Tali relazioni si ottengono dalla formulazione di una trasformazione conforme (o di Helmert):

$$\bar{X} - \bar{X}_0 = \lambda R(\bar{x} - \bar{x}_0) \quad (1)$$

Dove:

- $\bar{X}$  vettore delle coordinate oggetto;
- $\bar{X}_0$  vettore delle coordinate oggetto del centro di proiettività;
- $R$  matrice di rotazione spaziale (funzione delle rotazioni elementari  $\omega, \varphi, \kappa$ , rispettivamente chiamati rollio, beccheggio e deriva, attorno ai tre assi coordinati);
- $\lambda$  fattore di scala;
- $\bar{x}$  vettore delle coordinate immagine;
- $\bar{x}_0$  vettore delle coordinate immagine del centro di proiettività.

Nella formulazione si ipotizza un sistema di riferimento cartesiano ortogonale ( $X, Y, Z$ ) e che solidale alle immagini sia stato definito un sistema cartesiano bidimensionale ( $x, y$ ). La trasformazione conforme è a 7 parametri (le rotazioni sono incluse nella matrice di rotazione  $R$ ).

Parametri della trasformazione sono:

$$\begin{cases} X_0, Y_0, Z_0 \\ \varphi, \omega, \kappa \\ \lambda \end{cases}$$

La matrice di rotazione  $R$  è ottenuta dalla combinazione delle tre rotazioni elementari attorno agli assi cartesiani, considerando positive le rotazioni antiorarie, cioè:

$$R_{\omega\varphi\kappa} = R_{\omega}R_{\varphi}R_{\kappa}$$

In forma matriciale si avrà:

$$\begin{matrix} R_\omega & R_\varphi & R_K \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \cos k & -\sin k & 0 \\ \sin k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \quad (2)$$

$$\rightarrow R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Dove la prima matrice è  $R_\omega$  , la seconda  $R_\varphi$  e la terza  $R_K$

In conseguenza delle condizioni di ortogonalità, la matrice  $R$ , è una matrice ortogonale che gode della proprietà  $R^{-1} = R^T$

La trasformazione può essere scritta in forma compatta come:

$$\begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{bmatrix} \quad (3)$$

La soluzione analitica della forma compatta è:

$$\begin{aligned}
 X - X_0 &= \lambda[r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) - r_{13}c] \\
 Y - Y_0 &= \lambda[r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) - r_{23}c] \\
 Z - Z_0 &= \lambda[r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}c]
 \end{aligned} \quad (4)$$

Il fattore di scala non è uniforme nei fotogrammi ed è quindi necessario esprimere la relazione tra coordinate immagine e coordinate oggetto priva di tale fattore.

Dividendo la prima equazione per la terza e la seconda per la terza si ottengono le equazioni di collinearità:

$$\begin{cases} X - X_0 = (Z - Z_0) \frac{[r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) - r_{13}c]}{[r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}c]} \\ Y - Y_0 = (Z - Z_0) \frac{[r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) - r_{23}c]}{[r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}c]} \end{cases} \quad (5)$$

Le relazioni inverse si ottengono in base alla proprietà  $R^{-1} = R^T$  della matrice di rotazione.

$$\begin{aligned} R^T(\bar{X} - \bar{X}_0) &= \lambda R^{-1}R(\bar{x} - \bar{x}_0) \rightarrow R^T(\bar{X} - \bar{X}_0) = \lambda(\bar{x} - \bar{x}_0) \rightarrow \\ &\rightarrow (\bar{x} - \bar{x}_0) = \frac{1}{\lambda} R^T(\bar{X} - \bar{X}_0) \end{aligned} \quad (6)$$

Dividendo allo stesso modo la prima per la terza e la seconda per la terza si ottengono le corrispondenti relazioni inverse:

$$\begin{cases} (x - x_0) = -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) - r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ (y - y_0) = -c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) - r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{cases} \quad (7)$$

Queste espressioni mostrano che ad ogni punto oggetto corrisponde un punto immagine.

Dalla forma precedente invece si vede che ad un punto immagine corrispondono infiniti punti oggetto, comparando al secondo membro il valore  $Z$  (da un solo fotogramma, in assenza di assunzioni, è impossibile ricostruire la geometria spaziale di un oggetto). È necessario un secondo fotogramma dello stesso oggetto oppure avere informazioni su  $Z$ .

Per definire la trasformazione tra coordinate immagine e coordinate oggetto, sono richiesti 9 parametri che si distinguono in:

- 3 Parametri di Orientamento Interno (P.O.I.)  $x_0, y_0, c$ : la posizione del punto principale  $(x_0, y_0)$  e la lunghezza focale  $c$ ;

- 6 Parametri dell'Orientamento Esterno (P.O.E.)  $X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, k$ : le 3 coordinate  $(X_0, Y_0, Z_0)$  del centro di proiezione O e i 3 angoli di rotazione  $(\varphi, \omega, k)$  di assetto della camera.

La conoscenza di tali parametri è fondamentale per la ricostruzione metrica dell'oggetto rappresentato nei fotogrammi. La posizione e l'assetto dei fotogrammi al momento dello scatto viene ricostruita applicando le procedure di orientamento basate sull'individuazione, sui fotogrammi, delle immagini di Punti Fotogrammetrici d'Appoggio (punti a coordinate oggetto note). Il problema è analogo a quello noto come intersezione indietro topografica. La Restituzione fotogrammetrica, obiettivo primario del rilievo, consiste nella ricostruzione geometrica dell'oggetto noti i parametri della trasformazione, mediante la misura delle corrispondenti coordinate immagine. Il problema della Restituzione fotogrammetrica è analogo a quello topografico noto come intersezione in avanti.

### 2.1.1 ORIENTAMENTO INTERNO DI UNA CAMERA METRICA

Il modello teorico proiettivo costituito dalle Equazioni di Collinearità, definisce rettilinea la corrispondenza tra i punti oggetto e i punti immagine. Le rette proiettive, nel modello, si intersecano in un punto, noto come il centro di proiezione "O" (Fig. 13).

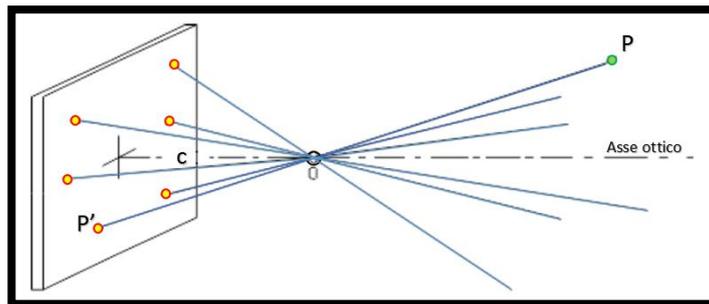


Fig. 13 - Centro di proiezione O (modificata da Kraus).

Finora si è assimilato il fotogramma ad una rigorosa prospettiva centrale, in cui il centro di prospettiva è a una distanza  $c$  dal punto principale del fotogramma.

I parametri quali la distanza principale  $c$  e le coordinate immagine del punto principale PP  $(\xi_0, \eta_0)$ , sono detti parametri di orientamento interno e definiscono la posizione del

centro di proiezione relativamente al piano dell'immagine. Tuttavia questo è modello ideale e non corrisponde fedelmente alla realtà. Se si vuole ottenere la massima precisione possibile, è necessario tenere conto degli errori dell'obiettivo, della camera e del fotogramma stesso.

La teoria geometrica dei sistemi ottici postula l'esistenza, per ogni sistema ottico, di due piani principali H e H' (piani principali nello spazio-oggetto e nello spazio-immagine), su cui l'uno riproduce l'altro alla scala 1:1 perpendicolarmente all'asse ottico. Per un sistema ottico del tipo aria-vetro-aria (Fig. 14), i due punti ottici principali, cioè le intersezioni dei piani principali con l'asse ottico OA, coincidono con i due punti nodali N e N'. Questi sono tali che, per definizione, i cosiddetti raggi centrali (passanti per i punti nodali) formano con l'asse ottico lo stesso angolo  $\tau$  sia nello spazio oggetto che nello spazio immagine ( $\tau' = \tau$ ).

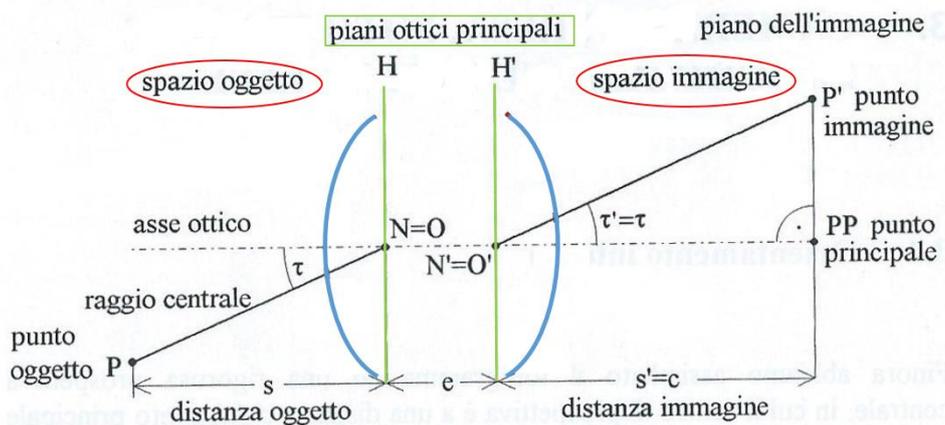


Fig. 14 - Geometria di formazione dell'immagine in un sistema ottico ideale. I punti nodali N, N' coincidono con i centri di prospettiva O, O' (modificata da Kraus).

In questo caso ideale, N è il centro di prospettiva O nello spazio-oggetto, N' è il corrispondente centro di prospettiva O' nello spazio immagine e la distanza principale c coincide con la distanza immagine s' (Zanutta). La distanza immagine s' e la distanza oggetto s sono sempre misurate a partire dai piani principali. Tuttavia, nella fotografia amatoriale pratica, la distanza da impostare sul dispositivo di focamento della camera è:

$$D = (s + e + s') \tag{8}$$

Ossia è la distanza dell'oggetto dal piano immagine.

L'ottica delle camere fotogrammetriche è costituita da obiettivi di notevole spessore, di solito asimmetrici. Le singole lenti sono ricavate da tipi differenti di vetro ottico, in modo da assicurare la migliore correzione possibile alle aberrazioni. Di solito, il diaframma non è al centro dell'obiettivo.

Ci si chiede pertanto dove sia situato il centro di prospettiva.

Tutti i raggi provenienti da un punto oggetto, che attraversano l'obiettivo, devono passare attraverso il diaframma. L'immagine apparente del diaframma vista dalla parte dell'oggetto limita perciò l'effettivo fascio di raggi che formano il punto immagine; questa immagine apparente si chiama pupilla di entrata (EP). Il suo centro di prospettiva O nello spazio oggetto. L'analoga pupilla di uscita (EP') giace nello spazio immagine dell'obiettivo.

L'obiettivo fotogrammetrico reale differisce notevolmente dal modello ideale.

L'asse ottico dovrebbe contenere i centri di tutte le superfici sferiche delle lenti. Dopo l'incollaggio e l'assemblaggio di tutte le singole lenti e il montaggio dell'obiettivo sulla camera rispetto al telaio meccanico che individua il piano di focamento, si saranno inevitabilmente accumulati piccoli errori. Pertanto l'asse di riferimento fotogrammetrico non sarà l'asse ottico OA, ma un raggio principale PRA calibrato (cioè standardizzato) che, nello spazio oggetto, è perpendicolare al piano immagine e passa per il centro della pupilla di ingresso. Il suo prolungamento interseca il piano immagine nel cosiddetto punto principale di auto collimazione (PPA).

In Fig. 15 vengono riportati:

- Il raggio principale di autocollimazione PRA cioè il raggio principale;
- Il cioè il punto principale di autocollimazione PPA nel piano immagine IP;
- LA pupilla di entrata EP e quella di uscita EP';
- Il centro di prospettiva fisico O'P;
- La distanza principale c;
- La distanza radiale dell'immagine  $\rho \rightarrow \rho = \sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2}$  ;
- La distorsione ottica radiale  $\Delta\rho$ .

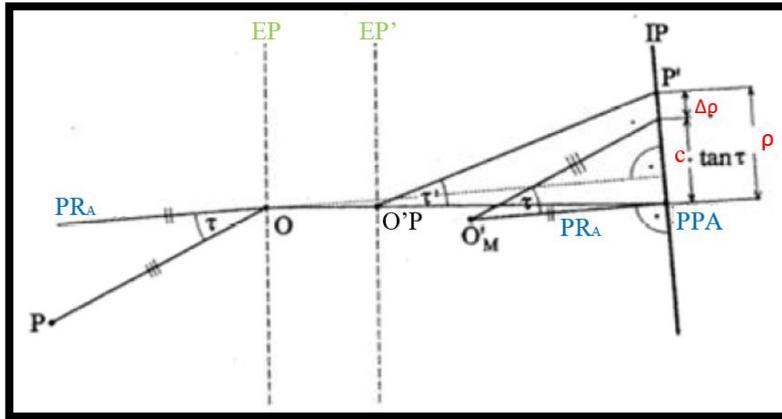


Fig. 15 - Definizione del centro di prospettiva O'M (modificata da Kraus).

- Gli angoli  $\tau$  sono definiti nel centro della pupilla di ingresso e non nei punti nodali. Poiché la pupilla di ingresso di solito non giace sul piano principale H, ne segue che  $\tau'$  non è uguale a  $\tau$ ;
- La distanza principale  $s'_m$  realizzata meccanicamente, definita dal telaio del piano focale della camera, differisce leggermente dalla distanza principale ottica  $s'$ .
- Il piano immagine non è rigorosamente perpendicolare all'asse ottico.

In sintesi, la conseguenza di questi piccoli errori è che gli angoli  $\tau'$  nello spazio immagine non sono uguali agli angoli  $\tau$  nello spazio oggetto. Si definisce perciò un centro di prospettiva matematico O'M collocato ad una distanza perpendicolare  $c$  (distanza principale) dal punto principale di auto-collimazione PPA e che riproduce gli angoli  $\tau$  il più fedelmente possibile.

Gli errori residui vengono attribuiti alla distorsione ottica  $\Delta\rho$ . Pertanto ai parametri di orientamento interno, finora definiti ( $\xi_0, \eta_0, c$ ), si deve aggiungere la distorsione ottica radiale  $\Delta\rho$ .

L'equazione dell'orientamento interno è:

$$\rho = c + \tan(\tau) + \Delta\rho \quad (9)$$

Le camere fotogrammetriche vengono calibrate in laboratorio (calibrazione di laboratorio) con l'aiuto di un goniometro ottico (Fig. 16).

Inizialmente, prima di montare la camera sullo strumento, il cannocchiale di osservazione T1 è posto nella posizione zero, definita per auto collimazione con il cannocchiale T2.

Poi si monta la camera, con il suo centro di prospettiva O nello spazio oggetto posto sull'asse di rotazione, e la si ruota attorno a EP finché l'immagine riflessa del reticolo del cannocchiale T2 si sovrappone al reticolo di T1 (auto collimazione). A questo scopo si pone, sul piano immagine (telaio del piano focale) della camera, una lastra di vetro piana, dotata di una piccola superficie riflettente. Sulla faccia rivolta verso lo spazio oggetto questa lastra porta, inoltre un reticolo graduato di precisione.

Nella posizione zero del cannocchiale T1, come definita in precedenza, l'operatore osserva ora il punto principale di auto collimazione PPA, che viene assunto come origine della scala  $\rho$ . Poi l'operatore collima con T1 le diverse graduazioni della scala  $\rho$  lungo ciascuna semi-diagonale del formato quadrato dell'immagine e misura i relativi angoli  $\tau$ . Si possono così calcolare le distorsioni ottiche radiali come differenze  $\Delta\rho = \rho - co \tan \tau$ , dove  $co$  è il valore più plausibile della distanza principale.

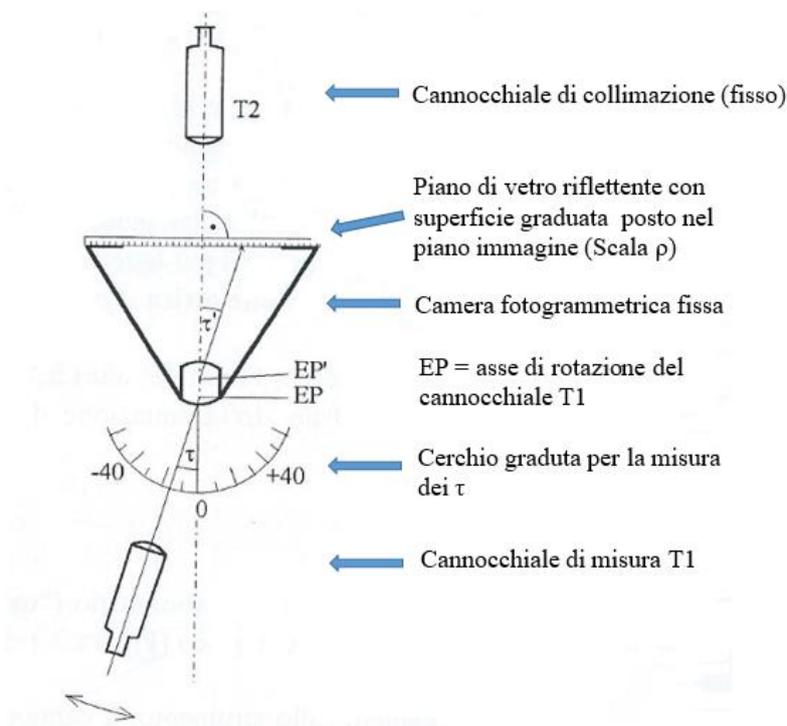


Fig. 16 - Schema semplificato di foto-goniometro (modificata da Kraus).

Di solito i risultati sono asimmetrici: le curve non coincidono. Questa asimmetria è causata da errori di centramento delle singole lenti, dal fatto che il piano immagine non è perfettamente perpendicolare all'asse ottico e dagli errori delle lenti stesse e, infine, dalla limitata precisione con cui si è potuta determinare la posizione del PPA. Questa asimmetria si può ridurre fortemente, scegliendo un altro asse di riferimento PRS, leggermente diverso dal raggio principale di auto collimazione PRA. Questo asse PRS è detto raggio principale di simmetria: passa anch'esso per O, cioè attraverso il centro della pupilla di entrata EP, e interseca il piano immagine nel punto principale di simmetria PBS (Point of Best Symmetry).

L'aver cambiato l'asse di riferimento, da PRA a PRS, ha i seguenti effetti pratici:

- $\xi_0$  e  $\eta_0$  sono ora le coordinate immagine riferite al PBS;
- Il nuovo centro matematico di prospettiva è a distanza  $c$  da PBS;
- Le distorsioni devono essere ricalcolate e riferite a PBS;
- Le rotazioni contenute negli elementi  $r$  delle equazioni della prospettiva centrale sono riferite al nuovo asse PRS.

I fotogrammi ottenuti con vecchi obiettivi fotogrammetrici hanno una distorsione radiale media fino a  $30 \mu m$ . Gli obiettivi moderni sono praticamente privi di distorsione ( $\Delta\rho \leq 5 \mu m$ ).

La distorsione dei moderni obiettivi viene corretta solo nella fotogrammetria analitica di precisione; in tal caso si tiene conto anche della distorsione tangenziale e delle deformazioni dei fotogrammi.

Per definire materialmente il sistema di coordinate immagine e il relativo centro di presa, si utilizzano le marche fiduciali; l'intersezione delle rette passanti per le coppie di marche fiduciali opposte definisce il centro fiduciale FC.

La maggior parte delle camere fotogrammetriche sono realizzate in modo che il PPA e il PBS cadano all'interno di un cerchio con centro in FC e raggio  $\leq 20 \mu m$ .

Il certificato di calibrazione di una camera fotogrammetrica contiene le seguenti informazioni sull'orientamento interno:

- Le coordinate immagine delle marche fiduciali ed, eventualmente, le distanze tra le marche (misurate lungo i lati e le diagonali);
- Le coordinate di PBA, PBS, FC indicate nello stesso sistema di riferimento
- La distanza principale  $c$ ;
- La curva di distorsione media radiale;
- La data della calibrazione;
- Informazioni sulla risoluzione dell'immagine.

Le camere fotogrammetriche dovrebbero essere ricalibrate ad intervalli regolari. Una camera aerea è molto pesante e pertanto può subire lievi danni per urti durante il trasporto o il montaggio sull'aereo. Inoltre essa è sottoposta a forti sbalzi di temperatura. Se il film viene spianato con un dispositivo a depressione contro una piastra metallica nel magazzino del film e la piastra è premuta a sua volta contro il telaio del piano focale, il magazzino deve essere incluso anch'esso nell'operazione di calibrazione.

In fotogrammetria analitica l'orientamento interno viene ricostruito trasformando le coordinate immagine misurate delle marche fiduciali nei valori calibrati riportati sul certificato di calibrazione. Si eliminano così lo stiramento e la deformazione isotropa. Inoltre, si tiene conto della distorsione radiale media dell'obiettivo della camera.

Nella fotogrammetria analogica in pratica, si impone sullo strumento solitamente la distanza principale di calibrazione.

## 2.1.2 ORIENTAMENTO ESTERNO E RESTITUZIONE

Fondamentalmente, la restituzione richiede che sia ricostruita la geometria di presa dei fotogrammi, per mezzo di una proiezione “analogica” o “analitica”.

Se i parametri di orientamento esterno sono noti il problema è molto semplice.

Diversamente, se i parametri di orientamento esterno sono incogniti, devono essere determinati tramite l’ausilio di punti di appoggio.

Esistono diversi metodi di risoluzione dell’orientamento esterno, classificabili in tre gruppi in funzione della modalità di procedimento: orientamento indipendente di due fotogrammi, orientamento contemporaneo di due fotogrammi ed infine orientamento simultaneo di due fotogrammi in due fasi successive.

### 1) **Orientamento Indipendente di due fotogrammi:**

È necessario disporre di almeno tre punti di appoggio visibili su entrambi i fotogrammi per poter risolvere il sistema nelle 6 incognite costituite dai parametri esterni di assetto e posizione del fotogramma ( $\varphi$ ,  $\omega$ ,  $K$ ,  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ).

Con 3 PFA si possono infatti scrivere 6 equazioni di collinearità.

Il metodo prevede la linearizzazione delle equazioni di collinearità e l’introduzione di valori approssimati alle incognite. Tale metodo è anche chiamato "vertice di piramide".

### 2) **Orientamento contemporaneo di due fotogrammi:**

Si misurano le coordinate immagine dei punti di appoggio e di alcuni altri punti. Ogni  $i$ -esimo punto di appoggio fornisce, su un singolo fotogramma, 4 equazioni nelle 12 incognite.

Per ciascun altro punto si hanno 3 incognite aggiuntive (le coordinate oggetto) ma 4 nuove equazioni. La soluzione si ottiene compensando le osservazioni attraverso il metodo delle Osservazioni Indirette. Questa è la procedura più precisa in quanto può utilizzare un numero elevato di punti omologhi che hanno come effetto quello di irrobustire il sistema ed impiega direttamente le equazioni di collinearità.

### 3) **Orientamento simultaneo di due fotogrammi in due fasi successive:**

Nella prima fase si crea un modello stereoscopico a partire da due fotogrammi (procedura di Orientamento Relativo), nella seconda si trasforma questo modello nel sistema di riferimento solidale all'oggetto X, Y, Z (procedura di Orientamento Assoluto).

La seconda fase viene realizzata applicando una trasformazione conforme spaziale che sulla base di punti d'appoggio permette di ricavare i sette parametri incogniti: 3 rotazioni, 3 traslazioni e 1 fattore di scala.

La prima fase conduce alla creazione del modello stereoscopico. Il modello è completamente formato nel sistema x, y, z (sistema modello) quando si intersecano i raggi omologhi di almeno 5 punti ben distribuiti sul modello. Le incognite stimate nella seconda fase della procedura sono i sette parametri che definiscono una trasformazione conforme nello spazio. I parametri di Orientamento Esterno relativi ad una coppia di fotogrammi sono  $6 + 6 = 12$ . È per questo che rimangono 5 incognite da risolversi nella fase di Orientamento Relativo.

#### 2.1.3 TRIANGOLAZIONE AEREA FOTOGRAMMETRICA

Consiste nell'orientamento esterno di un blocco di fotogrammi, tramite l'ausilio di punti omologhi o di legame. Questi sono punti di cui non sono note le coordinate oggetto ma è possibile misurarne le coordinate immagine su almeno una coppia di fotogrammi.

Questo consente di ridurre al minimo i punti di appoggio da utilizzare.

Generalmente esistono due metodi per la triangolazione aerea, a modelli indipendenti e a stelle proiettive:

Per quanto riguarda la prima tipologia, avendo a disposizione  $n$  fotogrammi per blocco, vengono costruiti gli  $n-1$  modelli tramite orientamento relativo.

Successivamente su ogni modello si identificano i punti di interesse di cui si estraggono le coordinate tridimensionali nei singoli sistemi modello.

I singoli modelli stereoscopici nel corso del calcolo vengono connessi in un unico blocco che verrà trasformato poi nel sistema di riferimento a terra.

Per il metodo a stelle proiettive i fotogrammi possono essere acquisiti secondo due modalità (Fig. 17): con assi della camera convergenti o con assi paralleli tra loro.

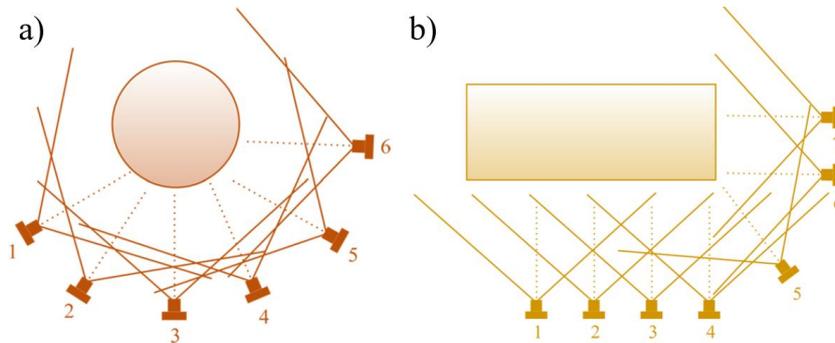


Fig. 17 - Assi della camera convergenti (a), paralleli (b) (modificata da Zanutta).

Questo metodo prevede la stima simultanea dell'orientamento esterno di tutte le stelle del blocco, intese come insieme delle rette proiettive.

È quindi un'estensione della procedura di orientamento esterno contemporaneo e simultaneo di una coppia di fotogrammi, ad un blocco di fotogrammi. Per il calcolo vengono sempre impiegati i punti omologhi di cui si misurano le coordinate immagine e di punti di appoggio di cui sono note le coordinate oggetto e si misurano quelle immagine.

## 2.2 FOTOGRAMMETRIA DIGITALE

Se nella fotogrammetria classica analitica il dato primario da cui partivano tutti i processi di calcolo era la fotografia con l'avvento delle immagini digitali si è passati all'utilizzo di queste ultime facendo nascere una nuova branca della fotogrammetria chiama appunto "fotogrammetria digitale".

Esistono anche differenze dal punto di vista operativo. In fotogrammetria analitica è l'operatore che individua in autonomia i punti necessari per l'orientamento e la restituzione, collimandoli e misurandone le coordinate. Nella fotogrammetria digitale invece può anche avvalersi di procedure automatiche di collimazione e misurazione di punti caratteristici.

Questo aspetto risulta fondamentale in quanto permette di utilizzare algoritmi che consentono di raggiungere un elevato grado di automazione in numerose fasi del processo fotogrammetrico riducendo i tempi di lavorazione e quindi contemporaneamente anche i costi di produzione.

### 2.2.1 STRUTTURA DI UN IMMAGINE DIGITALE

Un'immagine digitale può essere considerata come una funzione continua  $g(x,y)$  dove  $x, y$  sono variabili spaziali. La variabile dipendente esprime il contenuto radiometrico. L'immagine digitale è dunque una funzione discreta ottenuta campionando le variabili spaziali e quantizzando i valori di grigio corrispondenti e consiste in una matrice  $g(x,y)$  i cui elementi sono detti pixel.

$$g(x,y) = \begin{bmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \dots & g(0,C-1) \\ g(1,0) & g(1,1) & \dots & g(1,C-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(R-1,0) & g(R-1,1) & \dots & g(R-1,C-1) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Dove:

- $x=0,1,\dots,C-1$  indice di riga
- $y=0,1,\dots,R-1$  indice di colonna
- $R$ =massimo numero di righe

- $C$ =massimo numero di colonne
- $g(x,y) = \{0,1,\dots,\max\}$  valori di grigio

Ovvero l'immagine digitale è costituita da elementi areali di dimensioni finite (pixel) ad ognuno dei quali è associato un numero intero positivo detto Numero Digitale o Digital Number (DN).

Il DN rappresenta il valore radiometrico della porzione di immagine contenuta all'interno del pixel (Fig. 18).

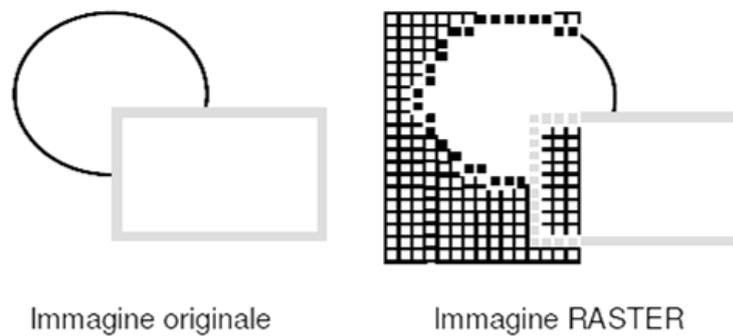


Fig. 18 - Formazione dell'immagine digitale (modificata da Zanutta).

Ogni pixel può essere visto come elemento di una matrice, e quindi individuato univocamente da due numeri interi, che rappresentano la posizione del pixel all'interno della matrice: l'indice di riga e di colonna. Il pixel è quindi la parte elementare e inscindibile dell'immagine ed ha una posizione fissata a priori che non può variare nel tempo (contenuto metrico dell'immagine).

### 2.2.2 RISOLUZIONE DI UN IMMAGINE DIGITALE

La risoluzione di un immagine digitale può essere analizzata sotto due aspetti, la risoluzione radiometrica e quella geometrica. La prima definisce il numero di tonalità che un singolo pixel è in grado di rappresentare, la seconda invece è funzione del grandezza fisica del pixel.

## 1) **Risoluzione radiometrica**

La risoluzione radiometrica è il tipo di trasformazione che viene applicato all'intensità del segnale luminoso, percepita dal sensore, in un valore numerico intero chiamato Digital Number. Il DN viene poi memorizzato per ogni pixel fornendo il valore radiometrico della porzione di immagine occupata.

Esistono diversi tipi di risoluzione radiometrica in funzione della grandezza attribuibile al DN e quindi al tipo di immagine che si vuole ottenere.

Se l'immagine deve rappresentare un oggetto in bianco e nero, quindi costituita da solo 2 colori, la radiometria può essere espressa da due numeri interi: 0 per il bianco e 1 per il nero.

Se si vuole rappresentare un'immagine in bianco e nero, ma più dettagliata a toni di grigio, il valore del DN è un valore compreso tra 0 e 255 dove lo zero è corrispondente al nero e il 255 al bianco. In mezzo si hanno le diverse gradazioni di grigio (Fig. 19).

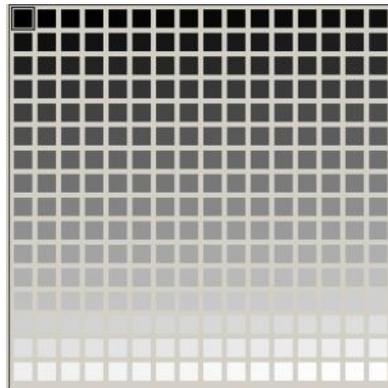


Fig. 19 - Gradazione scala grigio, in alto a destra DN=0 e in basso a sinistra DN=255.

Se l'immagine digitale deve rappresentare un oggetto a colori, immagini True Color (RGB, rosso-verde-blu), ogni colore è la sovrapposizione di tre colori fondamentali. La saturazione di ognuno dei tre colori viene rappresentata da un valore compreso tra 0 e 255. Quindi la radiometria di un pixel è rappresentata dai tre numeri che esprimono le saturazioni dei tre colori fondamentali.

Si riportano nella Tabella 1 - Vari tipi di immagine (modificata da Zanutta) le principali tipologie di immagini in relazione alla risoluzione radiometrica.

n° bit	N° bite 8bit=1Bite	DN	Tipo di immagine
1	1/8	2	Bianco e nero
8	1	256	Toni di grigio
16	2	65536	64K colori
24	3	16777216	Red Green Blu (RBG)

Tabella 1 - Vari tipi di immagine (modificata da Zanutta).

## 2) Risoluzione Geometrica

La risoluzione geometrica dipende dalla grandezza della porzione di immagine occupata dal singolo elemento costituente il sensore. Siccome un'immagine digitale è costituita da una matrice bidimensionale avente tanti elementi quanti sono i pixel dell'immagine allora ad un'elevata risoluzione geometrica corrisponde una matrice con elevato numero di righe e colonne e conseguentemente una dimensione del pixel piccola.

Il parametro che caratterizza la dimensione del pixel è la risoluzione geometrica indicata con DPI (Dots Per Inch). Il DPI costituisce il numero di pixel contenuti in un pollice, ovvero 24.5mm.

$$DPI = \frac{n^{\circ} \text{ pixel}}{\text{pollici}} \quad (11)$$

Un altro modo per indicare la risoluzione geometrica è il  $D_{pix}$  ovvero la dimensione del pixel in  $\mu\text{m}$ . Il DPI e il  $D_{pix}$  sono messi in relazione dalla seguente proporzione:

$$DPI: 25400 = 1: D_{pix} \quad (12)$$

Dove 25400 è il valore di un pollice in  $\mu\text{m}$ .

Dalla formula (12) si ricavano i valori di DPI e  $D_{pix}$ :

$$DPI = \frac{25400}{d_{pix}} \quad D_{pix} = \frac{25400}{DPI} \quad (13)$$

Il modo più corretto per valutare la risoluzione dell'immagine digitale è quello di prendere in considerazione l'area di superficie reale la cui immagine, proiettata sul piano focale e quindi sul sensore, copre la superficie di un pixel; tale area viene detta Ground Sampling Distance (GSD).

$$GSD = l * \frac{Z}{c} \quad (14)$$

Dove:

- Z è la distanza di presa,
- c è la focale della camera,
- l è la dimensione del lato del pixel,
- $\frac{Z}{c}$  è il fattore di scala  $m_b$

A parità di distanza dell'oggetto dall'obiettivo, la risoluzione di un'immagine è tanto maggiore quanto più piccola è la dimensione del lato del pixel del sensore: maggiore è il numero di pixel, più l'immagine riproduce in modo fedele la realtà.

### 2.2.3 TRATTAMENTO DELLE IMMAGINI DIGITALI

Sulle immagini digitali possono essere eseguite una serie di operazioni raggruppabili in 5 gruppi: l'acquisizione, la compressione, il pretrattamento, la segmentazione e la visualizzazione.

La fase di acquisizione consiste nella generazione dell'immagine digitale che può avvenire attraverso diversi dispositivi (camere digitali, scanner, ecc..). La compressione serve per ridurre l'occupazione di un file contenuto in un archivio digitale diminuendone il numero di Bite. Il pretrattamento è una procedura atta a migliorare l'aspetto delle immagini in modo da evidenziare dati utili nelle fasi successive. La segmentazione rappresenta quelle operazioni che permettono di suddividere le immagini in aree significative. Infine l'ultima fase del trattamento delle immagini è costituita dalla visualizzazione, tecnica utilizzata per presentare le immagini.

Le tecniche di pretrattamento consentono di migliorare la qualità dell'immagine e si dividono in due tipi:

- Miglioramento (enhancement) volta a migliorare l'aspetto delle immagini digitali fornendo immagini con caratteristiche migliori rispetto alle originali;
- Ripristino (restoration) con l'obiettivo di recuperare immagini degradate.

L'immagine restoration ha lo scopo di rimuovere o minimizzare il degrado introdotto nell'immagine nella fase di acquisizione le cui cause possono essere molteplici (movimento dell'oggetto al momento dello scatto, sfocamento, rumore radiometrico, distorsione delle lenti. Questo processo può essere applicato utilizzando diversi algoritmi di filtraggio quali ad esempio il Filtro Gamma, la riduzione adattiva del rumore ecc..)

L'immagine enhancement ha invece come obiettivo quello di ottenere un'immagine con caratteristiche migliori rispetto a quella originale.

Si possono usare tecniche, ad esempio, di manipolazione delle immagini che permettono di esaltare i bordi radiometrici, oppure variare la posizione dei valori di grigio, variare il contrasto oppure cercare di ridurre un dato rumore radiometrico sull'immagine. Queste tecniche possono essere suddivise in due grandi gruppi:

- Il miglioramento del contrasto (contrast enhancement): insieme di tecniche che permettono di migliorare il contrasto globale dell'immagine, basate sulla equalizzazione dell'istogramma dei valori radiometrici;
- Il miglioramento dei bordi radiometrici (edge enhancement): insieme di algoritmi che migliorano il gradiente radiometrico nella zona del bordo radiometrico. Essi operano rendendo più ripido il bordo radiometrico assottigliandone la dimensione geometrica e aumentando la differenza radiometrica agli estremi dei bordi.

Poiché queste tecniche spesso alterano drasticamente i dati numerici originali, esse vengono normalmente applicate solo a fini di fotointerpretazione, e non quando si prevede di sottoporre l'immagine ad ulteriori analisi numeriche.

Nello specifico, parlando di fotogrammetria, prima di eseguire la restituzione bisogna cercare di migliorare l'aspetto radiometrico dell'immagine.

È necessario dunque sottolineare tre caratteristiche fondamentali delle immagini digitali:

- La luminosità;
- Il contrasto;
- L'istogramma dei valori radiometrici.

Dato il modello dell'immagine in toni di grigio  $g(x, y)$ , il parametro che esprime la **luminosità** (o brillantezza) è dato dalla media  $g_a(x, y)$ :

$$g_a = \frac{1}{RC} \sum_{x=0}^{R-1} \sum_{y=0}^{C-1} g(x, y) \quad (15)$$

Per esprimere il **contrasto** è invece opportuno utilizzare la deviazione standard  $\sigma$ .

$$\sigma = \frac{1}{RC} \sum_{x=0}^{R-1} \sum_{y=0}^{C-1} (g(x, y) - g_a)^2 \quad (16)$$

I due parametri sopra descritti permettono di definire la funzione di trasferimento del contrasto che permette, tramite la variazione dei parametri, la regolazione cromatica dell'immagine.

$$g'_{ij} = \alpha g_{ij} + r \quad (17)$$

Dove:

- $g'_{ij}$  sono gli elementi della matrice modificata;
- $g_{ij}$  sono gli elementi della matrice non modificata;
- $\alpha$  è il parametro di controllo del contrasto;
- $r$  è il parametro di controllo della brillantezza.

Il parametro  $r$  se aumentato o diminuito trasla tutte le tonalità dell'immagine in positivo o in negativo schiarendo o scurendo l'intera immagine. Possono nascere problemi di saturazione del colore, per questo motivo viene introdotto un parametro che consente di effettuare tale modifica sull'immagine ma senza perdere informazioni per la saturazione dei toni chiari o scuri. Si definisce quindi il coefficiente  $\gamma$  che consente di aumentare il dettaglio in un'immagine a basso contrasto, senza influenzare significativamente le ombre zone di luce.

Tale funzione può non essere lineare:

$$g'_{ij} = g_{ij}^{\gamma} \quad (18)$$

Altro parametro che viene preso in considerazione e che permette una valutazione immediata è l'**istogramma dei livelli radiometrici** (Fig. 20, Fig. 21).

Esso consiste nella rappresentazione della distribuzione dei valori di grigio, ossia una rappresentazione sintetica dei dati contenuti in un'immagine. Considerando il DN di ciascun pixel di un'immagine come una variabile casuale, il corrispondente istogramma ne rappresenta un grafico discreto di frequenza che esprime la distribuzione dei livelli di grigio sull'immagine.

La conoscenza dell'istogramma dei valori di grigio è utile per procedere a espansioni o riduzioni di scala, noti che siano i valori di grigio minimo e massimo presenti.

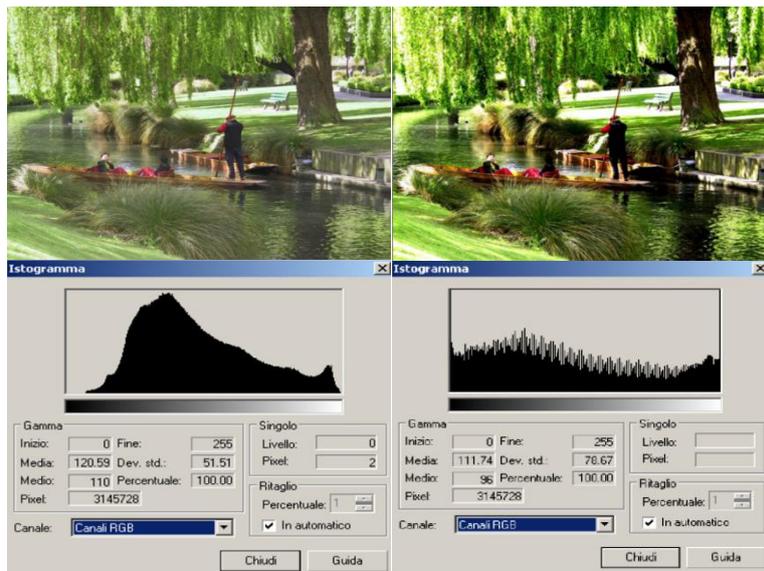


Fig. 20 - Istogramma dei valori radiometrici di un'immagine RGB con aumento di contrasto. A sinistra l'immagine originale.

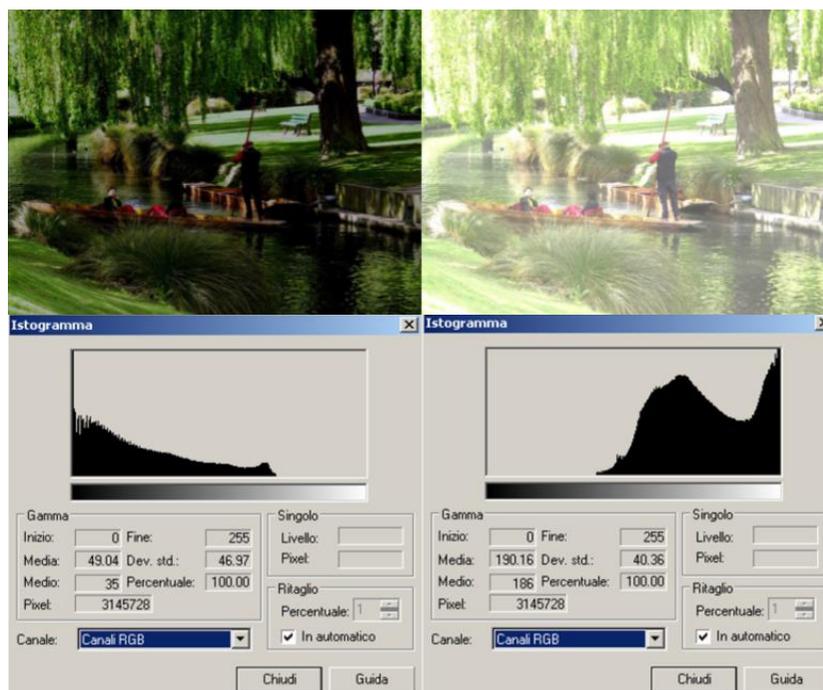


Fig. 21 - Istogramma dei valori radiometrici di un'immagine RGB diminuendo e aumentando la luminosità.

## 2.2.4 FORMATI DI MEMORIZZAZIONE

La memorizzazione dei dati contenuti nelle immagini digitali deve essere tale da riprodurre al meglio il contenuto dell'immagine. Il tipo di memorizzazione prende il nome di formato.

Una prima classificazione si effettua dividendo i formati in due macro-categorie in funzione del fatto che comprimano o meno i dati contenuti, con conseguente perdita di qualità e diminuzione di grandezza del file.

Il formato non compresso è il **formato Bitmap** (BNP). È un file di immagine grafica che immagazzina i pixel sotto forma di tabella di punti e che gestisce i colori sia in True color, sia attraverso una palette indicizzata, sia B/N.

In ogni caso la compressione delle immagini risulta necessaria per garantire la minima occupazione di memoria su disco e per aumentare la possibilità di visualizzazione.

Esistono due tipologie di compressione:

- **Lossless** (senza perdita): in tal caso dall'immagine compressa si riescono a ricavare tutte le informazioni contenute nell'immagine originale;
- **Lossy** (con perdita): questa volta l'immagine che è stata compressa presenta un'informazione simile a quella originale con perdita quindi di qualche informazione.

Tra i formati compressi si possono avere:

- **JPEG** (Joint Photographic Experts Group), compressione *lossy* che si basa sulle peculiarità della visione umana (tiene conto della maggior sensibilità dell'occhio umano alle variazioni di luminosità piuttosto che di cromaticità; e della difficile percezione di elevate variazioni tra pixel ravvicinati). Questo formato è più adatto a immagini con colori sfumati. Il livello di qualità della compressione può essere inoltre variato.
- **TIFF** (Tagged Image File Format), consente di memorizzare in un unico file più di una immagine ed è un formato supportato da tutte le piattaforme grafiche.

- *GIF*, contiene un numero limitato di colori  $N$  (tipicamente 3, 16, 256) e di conseguenza non si ha perdita di informazione solo se l'immagine originale ha meno di  $N$  colori. L'algoritmo secondo cui l'immagine viene compressa è LZW (*lossless*).
- *PNG*, compressione *lossless* simile a GIF, ma rispetto a quest'ultimo è meno supportato.

### 2.2.5 ACQUISIZIONE DI IMMAGINI DIGITALI

Di fondamentale importanza risulta la fase di acquisizione delle immagini.

In questa fase si può parlare di acquisizione diretta quando l'immagine viene presa tramite camere digitali.

Nelle camere digitali l'elemento che raccoglie l'immagine sul piano focale è un sensore. Esso svolge la funzione di cattura e memorizzazione dell'immagine che nelle vecchie macchine da presa veniva assolta dalla pellicola. Il chip elettronico, che oggi è parte essenziale della camera digitale, comprende anche il sensore.

Oggi esistono due tipi di sensori, che vengono utilizzati dalle camere digitali:

- CCD (*charged-coupled device*) dispositivo ad accoppiamento di carica
- CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*).

Entrambi i sensori sono costituiti da elementi disposti in linea o in una matrice in due dimensioni; l'energia della luce cade sugli elementi fotosensibili del grigliato dei pixel e viene convertita in una matrice di valori numerici. Ciò che differenzia sostanzialmente le due tipologie di sensori è la modalità di trasformazione della carica elettrica in tensione e il suo trasferimento dal chip alla camera.

Il **sensore CCD** (Fig. 22) è formato da due parti fondamentali:

- La matrice di pixel;
- Il filtro di luce.

La matrice di pixel, è costituita da condensatori metallo-ossido-semiconduttore (MOS) disposti a scacchiera, uno accanto all'altro, che in determinate condizioni per mezzo

dell'effetto fotoelettrico possono liberare elettroni sfruttando l'energia dei fotoni della luce incidente il condensatore.

Il secondo è un filtro che permette su ogni singolo pixel solo il passaggio di determinate frequenze di luce (solitamente rosso, verde o blu), consentendo dopo una opportuna fase di rielaborazione dei dati una visione dell'immagine a colori.

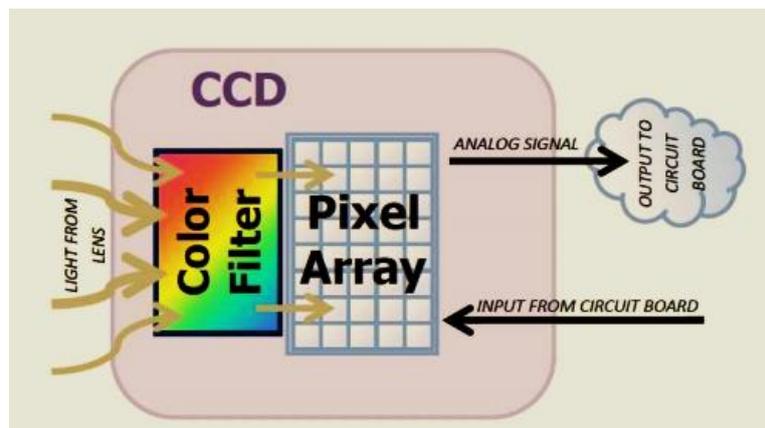


Fig. 22 - parti principali sensore CCD.

I pixel che lo compongono trasferiscono l'informazione in modo sequenziale l'uno all'altro fino a che non si arriva ad una "riga di lettura" (shift register). È opportuno sottolineare che la trasformazione della carica elettrica in un segnale analogico di tensione avviene quindi solo quando si arriva a questa riga di lettura alla fine della quale troviamo un amplificatore che manda il segnale in uscita.

Per trasformare poi il segnale da analogico a digitale, occorre un convertitore A/D che generalmente è esterno al sensore.

Il **sensore CMOS** (Fig. 23) è costituito da quattro parti:

- Il filtro colori;
- La matrice di pixel
- Il controllore digitale;
- Il convertitore analogico digitale.

La luce arriva attraverso le lenti dell'obiettivo e viene elaborata dal filtro colore prima di arrivare alla matrice. Una volta raggiunta, ogni pixel converte la luce in tensione amplificata che verrà poi inviata alle altre parti del sensore.

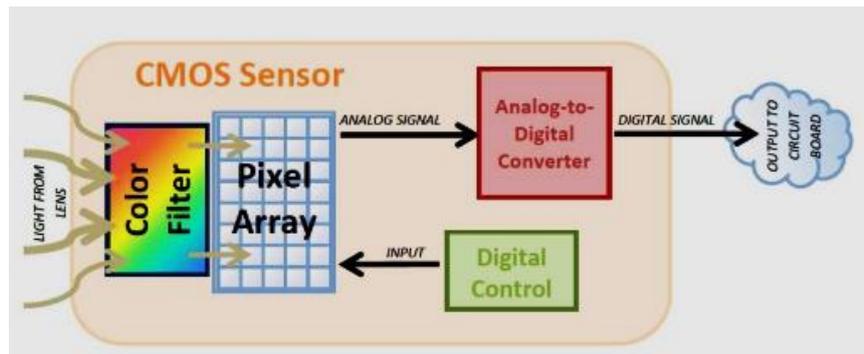


Fig. 23 - Parti principali sensore CMOS.

Entrambi i sensori sfruttano l'effetto fotoelettrico ma si differenziano per le tecniche di elaborazione e costruzione dei dati.

Già a livello di componenti notiamo una prima differenza. Nel sensore CCD abbiamo filtro colore, matrice di pixel e amplificatore, mentre le altre funzioni sono esterne al sensore stesso. Nel sensore CMOS, invece, sono presenti tutte le funzioni sopracitate compreso il controllore digitale e il convertitore A/D e altre permettendo un risparmio di spazio anche nel circuito stampato.

Anche a livello di output si riscontrano delle differenze.

Il pixel di un CCD fornisce infatti cariche elettriche, mentre quello CMOS emette già un segnale analogico, essendo ogni singolo pixel fornito di un proprio amplificatore di segnale ed essendo che il convertitore analogico digitale è normalmente inglobato nel sensore. Nei sensori CCD il segnale analogico sarà realizzato solo all'uscita del sensore e quello digitale solo all'esterno.

I due sensori sono poi differenti se si va a considerare la velocità di trasferimento dell'informazione all'interno della matrice: nel CCD essa viene trasmessa di pixel in pixel fino al nodo di uscita e questo fa sì che ci sia necessità di tempo perché si arrivi in fondo al processo; nel sensore CMOS ogni pixel è direttamente collegato al nodo di uscita e questo identifica un minor tempo per compiere l'operazione (Fig. 24).

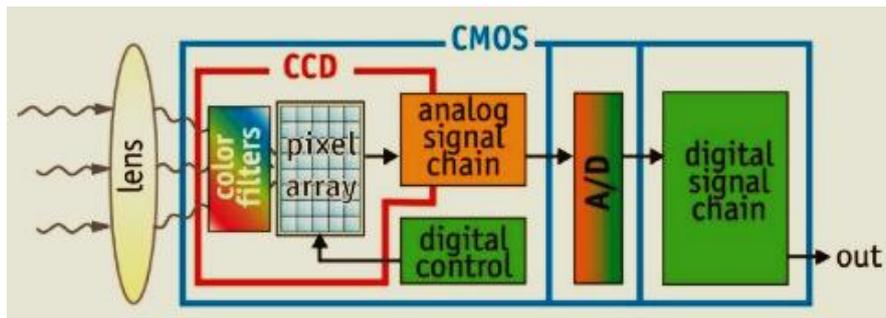


Fig. 24 - Confronto tra sensore CCD e CMOS.

Un elevato numero di amplificatori, come nel CMOS, porta però degli svantaggi come una maggior disomogeneità dell'immagine. Inoltre questo sensore ha un'area disponibile per la rilevazione della luce che risulta inferiore poiché al suo interno ha molte funzionalità.

Uno dei fattori che rende i CMOS competitivi nei confronti dei CCD è quello del consumo di potenza. Il sensore CMOS, sfruttando appunto tale tecnologia, è in grado di operare con tensioni di alimentazioni piuttosto basse e dispositivi sempre più miniaturizzati, il che comporta un consumo di potenza piuttosto basso. I CCD invece richiedono di operare con tensioni normalmente più elevate, il che comporta inevitabilmente una maggiore dissipazione di potenza (Dall'Alba; 2012).

## 2.2.6 LA CORRELAZIONE AUTOMATICA

Con lo sviluppo della fotogrammetria digitale si sono andate sviluppando delle tecniche automatiche per l'individuazione di punti omologhi all'interno di sistemi di immagini digitali. I punti omologhi sono dei punti dei quali si possono misurare facilmente le coordinate essendo visibili contemporaneamente su due o più fotogrammi. Questi sono fondamentali per la realizzazione di modelli rappresentativi dell'oggetto e per il loro orientamento. Il problema di identificazione di questi punti prende il nome di IMAGE MATCHING e si sviluppa principalmente in 4 fasi:

- Si seleziona una porzione di immagine in una delle due immagini da mettere in relazione;
- Si identificano nella seconda immagine le corrispondenze;

- Viene calcolata la posizione tridimensionale delle entità nello spazio oggetto dell'entità in esame;
- Si valuta la qualità della procedura di *matching* utilizzata.

La fase più complicata è quella dell'individuazione delle corrispondenze tra immagini. In questo passaggio si incontrano una serie difficoltà causate da molteplici fattori sia di natura tecnica che legati all'acquisizione del fotogramma. I problemi che si riscontrano solitamente possono essere l'elevato numero di operazioni che la macchina deve svolgere, possibilità di riscontrare ambiguità o la presenza di occlusioni prospettiche.

Per far fronte a questi inconvenienti si può, in primis, ridurre l'area di ricerca delle entità. Questo viene fatto adottando delle strategie dovute al metodo delle Linee Epipolari che riducono appunto la ricerca del punto omologo alle linee stesse.

Preso una camera in due posizioni, il piano passante per i due centri di proiezione  $O_L$  e  $O_R$  ed un punto oggetto  $P$  si chiama piano epipolare. Le rette intersezione del piano epipolare con il piano immagine nelle due posizioni sono le rette epipolari. Queste rette consentono di ridurre notevolmente l'area di ricerca del punto omologo in quanto viene limitata alla retta stessa (Fig. 25).

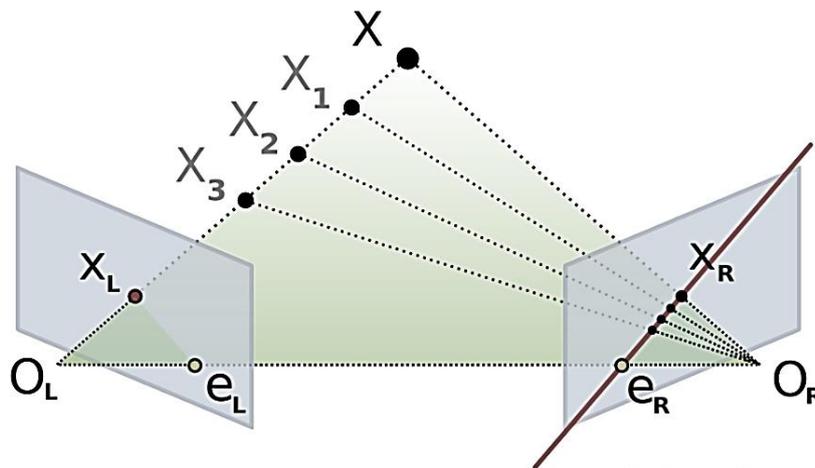


Fig. 25 - Geometria epipolare (Wikipedia modificata).

L'altro metodo adottato, per la stessa finalità, è chiamato **Vertical Line Locus** che sfrutta anch'esso il concetto di geometria epipolare. Tale metodo viene mostrato di seguito (Fig. 26), dove  $U$  e  $L$  rappresentano i punti di massima e minima quota attesa. Il punto  $S$  è il punto oggetto da ricercare e  $P$  è il punto medio del segmento  $UL$ . Se  $C'$  e

$C''$  sono i centri di proiezione dei due fotogrammi e se si rappresentano i piani passanti per  $U, L$  e  $C'$  e  $U, L$  e  $C''$ , la ricerca del punto  $S$  nei due fotogrammi sarà ristretta alla linea creata dall'intersezione tra i piani epipolari e il piano immagine.

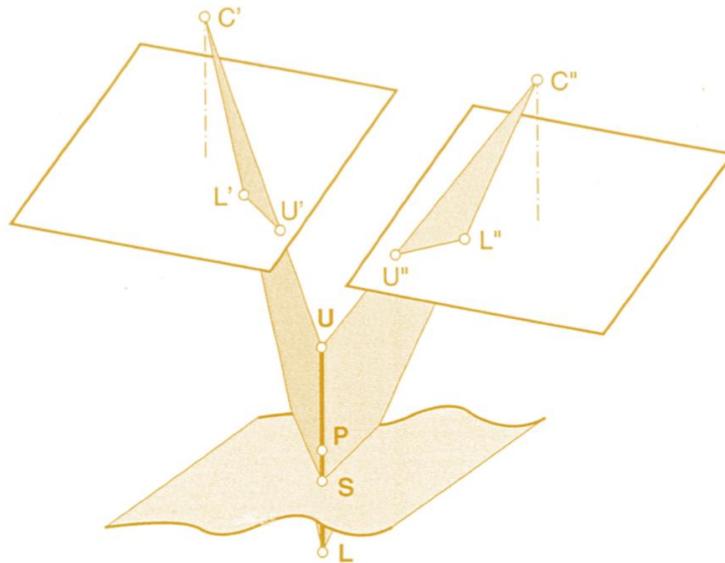


Fig. 26 - Vertical Line Locus (modificata da Zanutta).

Un ulteriore metodo per ridurre lo spazio di ricerca è fornito dalla possibilità di aumentare la dimensione del pixel e di realizzare la ricerca di corrispondenze su livelli d'immagine a differente risoluzione, da grossolana a fine. Questo prende il nome di **approccio gerarchico** (Fig. 27).

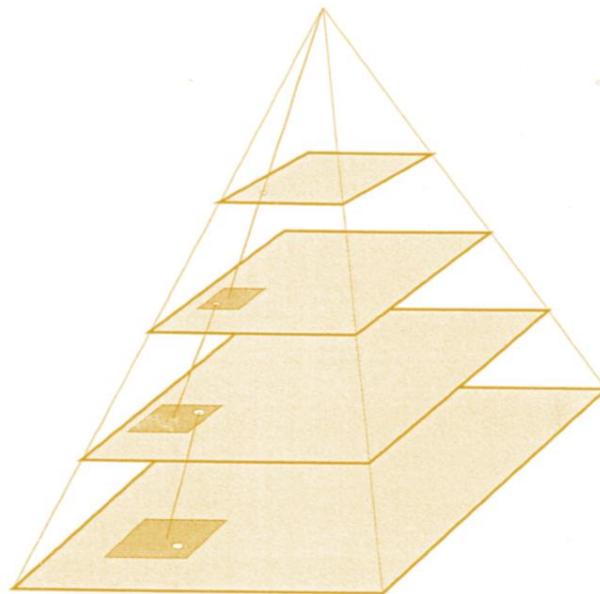


Fig. 27 - Approccio gerarchico: ogni livello ha dimensioni pari ad un quarto rispetto al precedente (modificata da Zanutta).

Per risolvere il problema di ambiguità sarà invece necessario adottare delle entità caratteristiche di dimensioni maggiori al pixel.

Infine per far fronte al problema delle occlusioni, l'unico modo sarà acquisire un maggior numero di fotogrammi cercando di scattare foto da diverse angolazioni evitando così che parte del soggetto fotografato sia coperto da ostacoli.

#### 2.2.6.1 Correlazione AREA BASED

La correlazione *Area Based* si basa su algoritmi che raffrontano il valore radiometrico in scala di grigi tra pixel appartenenti a diverse immagini. Le immagini quindi inizialmente subiscono una trasformazione in livelli di grigio e successivamente vengono sottoposte agli algoritmi di correlazione che ne valutano la similitudine dei valori radiometrici. Viene identificata una matrice detta *Sagoma* che rappresenta una porzione di immagine. Successivamente viene utilizzata una finestra di Ricerca tramite la quale si ricercano le corrispondenze.

Infine si ha la finestra di correlazione che rappresenta la porzione di immagine che viene ottenuta mettendo a confronto le due immagini da correlare.

La dimensione dell'immagine sagoma da considerare è molto importante. Aumentando la dimensione della matrice sagoma questa diviene sempre più caratteristica (le ambiguità nella ricerca di entità omologhe diminuiscono), ma, per contro, aumentano molto le distorsioni geometriche e quindi pixel adiacenti a quello centrale considerato, possono ricoprire porzioni di oggetto diverse.

I metodi usati principalmente per l'identificazione di entità omologhe sono due:

- Ricerca del massimo coefficiente di cross-correlazione;
- Metodo dei minimi quadrati per minimizzare la differenza dei livelli di grigio.

Il metodo più intuitivo è il primo, ovvero la ricerca del massimo di correlazione fra i valori di grigio di due finestre d'immagine. Spostando l'immagine mobile sulla prima fissa, si valuta un indice di correlazione  $r$ . Il massimo della funzione di cross correlazione definisce la posizione di migliore somiglianza tra la matrice di ricerca e la matrice sagoma (Fig. 28)

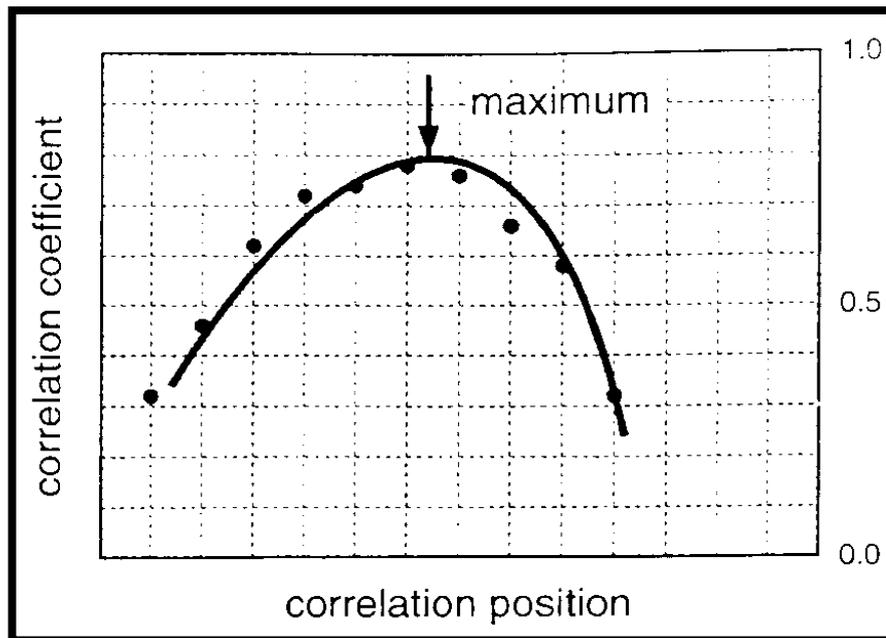


Fig. 28 - Andamento del coefficiente di correlazione lungo una linea epipolare: il valore massimo della curva interpolatrice individua la posizione del punto omologo (modificata da Zanutta).

#### 2.2.6.2 Correlazione Feature based matching

La Feature Based Matching (FBM) è un tipo di algoritmo che sfrutta la presenza di punti significativi all'interno di un'immagine e ne cerca la correlazione all'interno di altri. I punti di interesse vengono individuati da appositi operatori chiamati operatori di interesse.

Questi punti di interesse non sono però punti specifici, bensì delle feature, ossia dei raggruppamenti di pixel effettuati in modo tale che quelle porzioni di immagine risultino non ambigue e abbiano una qualche peculiarità. Una volta estratte queste feature, che possono essere locali o globali, vi si associa una descrizione per ognuna tramite dei cosiddetti descrittori. Questo consente poi di confrontare tra loro i descrittori stessi, permettendo di andare ad individuare le feature da correlare in immagini differenti.

Per comparare i descrittori la procedura più applicata è quella definita *quadratic matching procedure*, lenta ma rigorosa: la procedura consiste nella comparazione tra tutte le possibili combinazioni dei *keypoints* di una coppia di immagini e valutando come

corrispondenze quelle combinazioni che hanno la minor distanza euclidea tra i vettori descrittivi (Nearest Neighbor Search).

### 2.2.6.3 *Structure from motion*

Il termine *Structure for Motion* (struttura del movimento) è una tecnica che attraverso la collimazione automatica di punti omologhi presenti in un insieme di foto permette la ricostruzione della forma reale di oggetti.

Lo studio della SFM è cominciato negli anni '90 con la diffusione delle camere digitali che, consentendo la memorizzazione di molte più immagini, ha posto la necessità di analizzare grandi sequenze di immagini. La prima formulazione della tecnica SFM, finanziata da Microsoft, fu sviluppata nel 2006 dal ricercatore di Microsoft Richard Szeliski e da Steven Seitz dell'Università di Washington e permetteva di posizionare spazialmente le foto turistiche di monumenti scattate dagli utenti, liberamente disponibili in rete.

Successivamente, lo stesso Noah Snavely ha reso disponibile il codice sorgente di “*Bundler*”, nel sito “PhotoTour”.

In fotogrammetria, una delle fasi principali è quella dell'orientamento dei fotogrammi. L'obiettivo risulta dunque ricostruire la struttura spaziale di un oggetto o di una scena partendo da un database di immagini non strutturato, e disponendo di pochissime informazioni sui parametri di orientamento e sull'oggetto stesso.

Attualmente i metodi di risoluzione della SfM si basano su metodologie analoghe, descritte schematicamente di seguito (Fig. 29).

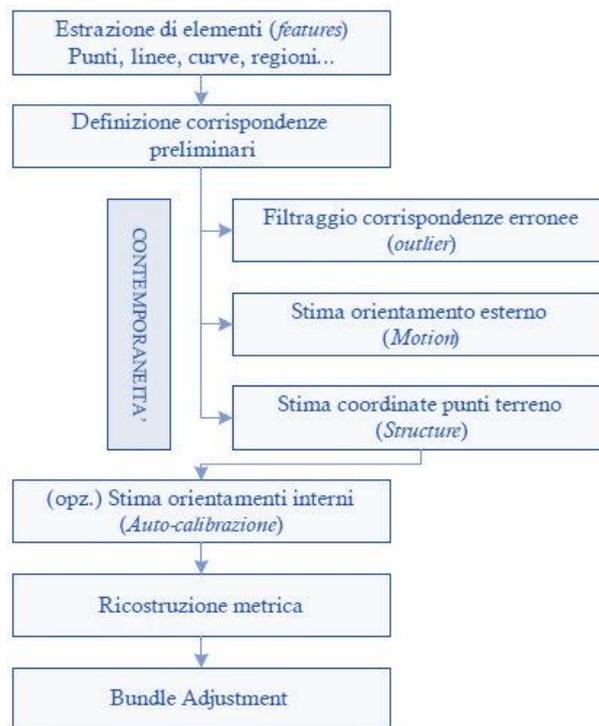


Fig. 29 - Schema generale per un problema di Structure from Motion.

Inizialmente sulle singole immagini vengono selezionati una serie di elementi (normalmente puntuali) che, con un certo grado di probabilità, siano rintracciabili su più fotogrammi attraverso l'utilizzo di operatori matematici di interesse.

Individuati un determinato numero di IP si cerca di catalogare, in primo tentativo, le corrispondenze omologhe attraverso criteri geometrici e radiometrici. Generalmente per fare ciò si fa uso della geometria epipolare o trifocale.

La geometria ricostruita non coincide ovviamente con quella reale, bensì rappresenta una geometria a livello proiettivo equivalente a quella reale. Per ottenere una ricostruzione reale è sufficiente la conoscenza dei parametri di orientamento interno che possono essere noti a priori oppure stimati direttamente.

Infine è possibile ottenere un modello ottimale tramite una stima ai minimi quadrati (*bundle adjustment*) in cui possono essere inserite informazioni quali punti di appoggio, inter-distanze note, etc. in modo da giungere a una completa definizione dei parametri di orientamento (*motion*) e alla ricostruzione della struttura della scena (*structure*).

Le fasi principale sono dunque due, un primo processo di estrazione delle features per la correlazione e successivamente la determinazione delle coppie omologhe.

L'**estrazione di features** consiste nell'individuazione di elementi interessanti di tipo puntuale che siano facilmente identificabili e rintracciabili in diversi fotogrammi tramite l'utilizzo di operatori matematici di interesse (*detectors*). Esistono diversi tipi di operatori con caratteristiche diverse che ne variano la capacità di estrarre punti omologhi da insiemi di fotogrammi.

Tanto maggiore è il grado di invarianza rispetto a trasformazioni geometriche (traslazione, rotazione) e radiometriche (scala, illuminazione) di un operatore tanto più alta sarà la sua capacità di estrazione.

Gli operatori di interesse implementati maggiormente nella Structure from Motion sono i seguenti:

- **L'operatore di Harris**

L'operatore di Harris si basa sul fatto che i punti di interesse (*key points*) esibiscono alto valore del gradiente in più direzioni. Questo operatore è in grado di evidenziare lati e angoli usando un campionario di dimensioni fisse che scansiona l'immagine muovendosi all'interno di essa alla ricerca di cambiamenti geometrici (Fig. 30). Considera una porzione di immagine che comprende il punto in esame e ne calcola la similarità con le porzioni vicine. Le variazioni sono trovate mediante il coefficiente di correlazione  $\rho$ . Se  $\rho$  è nullo allora la regione è omogenea e non ci sono variazioni geometriche. Quando il detector determina la presenza di un cambiamento registra le coordinate bidimensionali dell'IP. Un limite importante di questo operatore è rappresentato dal fatto che esso non è invariante rispetto alla scala ma solo alla rotazione.

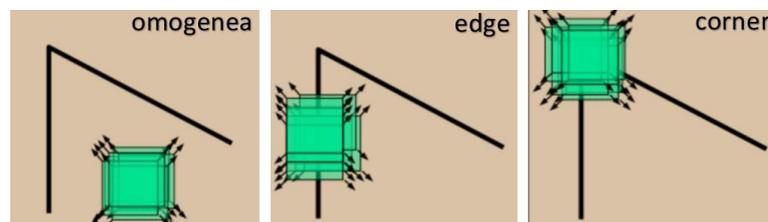


Fig. 30 - a) regione omogenea (non ci sono variazioni in tutte le direzioni), b) edge (non ci sono variazioni lungo la direzione dell'edge), c) corner (ci sono variazioni significative in tutte le direzioni) (modificata da Zanutta).

- **L'operatore SIFT (Scale Invariant Feature Transform)**

Questo operatore è un algoritmo per estrazione di feature pubblicato da David G. Lowe nel 1999. Tale procedura si basa sull'impiego della matrice Hessiana dello sviluppo di Taylor della DoG (differenza tra Gaussiane). La matrice è costituita dalle derivate seconde della funzione che rappresenta la distribuzione radiometrica dell'immagine in scala di grigi.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \cdot \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \cdot \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \cdot \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \cdot \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \cdot \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \cdot \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

L'algoritmo usato è il SIFT e risulta invariante rispetto alla scala, alla rotazione e all'illuminazione. Il SIFT associa ad ogni feature estratta dall'immagine un vettore che viene utilizzato per identificare il punto omologo in immagini successive. Il vettore costituisce il gradiente radiometrico di un determinato pixel rispetto a quelli adiacenti.

Per individuare il punto su cui verrà valutato il gradiente radiometrico il SIFT utilizza immagini piramidali o "ottave" (Fig. 31), ottenute attraverso il *kernel* di Gauss. Per ogni ottava calcola la differenza tra le immagini adiacenti e memorizza i massimi e minimi come punti di interesse.

Affinché il pixel possa essere considerato tale deve essere il punto di massimo o minimo tra gli 8 adiacenti e i 9 della differenza tra gaussiane superiore ed inferiore.

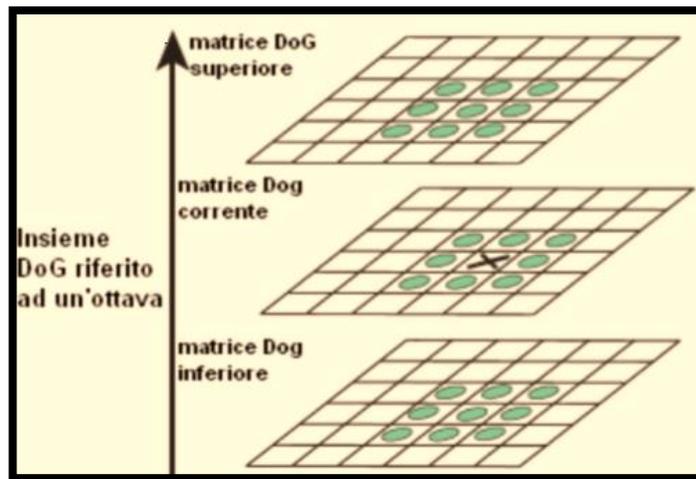


Fig. 31 - Ottava (modificata da Zanutta).

Per ogni punto individuato è definito un vettore che descrive i gradienti radiometrici nell'intorno del punto di interesse.

Raggruppando quindi i vettori di tutti i pixel si forma un istogramma di gradienti orientati i cui picchi rappresentano le direzioni dominanti (Fig. 32)

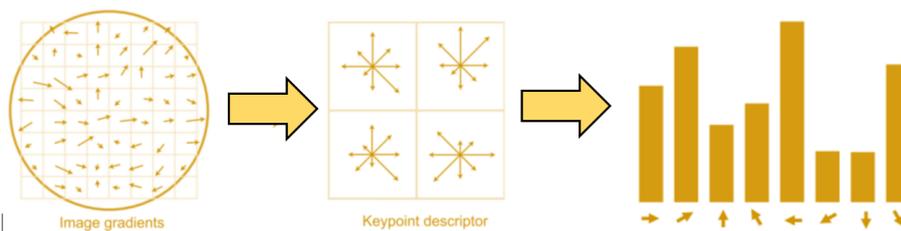


Fig. 32 - Formazione istogramma di gradienti (modificata da Zanutta).

La seconda fase riguarda la **determinazione delle coppie omologhe**, fase di notevole interesse in quanto gli accoppiamenti che vengono realizzati, verranno trascinati fino alla fine dell'elaborazione. Per questo motivo è importante “portarsi dietro” il minor errore possibile, per evitare di ottenere prodotti non soddisfacenti o indesiderati.

La fase di *matching* è quindi una fase cruciale che risulta oltretutto complessa poiché non è realizzata tramite procedimenti analitici semplici ma può essere soggetta a errori e può necessitare di attenzione particolare in funzione del caso specifico che si sta analizzando.

La rimozione dei valori anomali (*outliers*) viene realizzata applicando un approccio basato su RANSAC (*RANdom SAMple Consensus*). Tale stimatore è stato pubblicato per la prima volta da Fischler e Bolles nel 1981. È un metodo iterativo che permette la stima di parametri di un modello matematico a partire da un insieme di dati contenente outlier.

Il procedimento iterativo del RANSAC nella SfM consiste in:

- Selezionare un subset di tentativo delle corrispondenze preliminari tra due fotogrammi (inliers);
- Calcolare i parametri che ne descrivono la geometria epipolare;
- Testare tutte le altre corrispondenze nei confronti del modello trovato;
- Il modello stimato è ragionevolmente valido quando la maggioranza dei punti rientra nei livelli di confidenza, quelli al di fuori vengono scartati come outliers.

Questo processo viene compiuto in modo consecutivo su tutte le coppie di immagini che mostrano corrispondenze.

Al termine delle procedure descritte fino ad ora, ci si trova davanti ad un blocco ripulito da tutti gli errori grossolani. Tuttavia il blocco che viene restituito fornisce una geometria solo equivalente a quella reale ma non verifica le condizioni reali. Questo è dovuto al fatto che la forma e i parametri sono stati calcolati a partire dalle sole coordinate immagine, senza sfruttare eventuali caratteristiche quali preconnoscenze sulla geometria dell'oggetto (punti d'appoggio). Questo può essere fatto compiendo una compensazione in blocco ai minimi quadrati delle equazioni dei raggi proiettivi di ciascun punto di legame tra le immagini (**Bundle Block Adjustment**).

In contemporanea al *bundle block adjustment* viene realizzata una calibrazione automatica (self-calibration) dei parametri di distorsione interna delle camere, oltre che l'orientamento interno ed esterno di ciascun fotogramma.

L'auto calibrazione può essere eseguita inserendo o meno dei vincoli dati dalla geometria dello spazio oggetto, in genere nella forma di Punti Fotogrammetrici d'Appoggio (PFA). Un vincolo minimo per definire il datum del network è sempre

richiesto, questo può essere impostato attraverso vincoli interni, free-network adjustment, o attraverso un'esplicita configurazione minima di GCP (arbitrari o reali).

L'auto calibrazione basata sui *tie-points* valutati grazie alle tecniche SfM è per l'appunto una compensazione in blocco che impiega come solo vincolo interno la focale presente negli *header* (Exif) dei fotogrammi digitali. Tale valore è richiesto solo come valore di primo tentativo per le iterazioni di raffinamento dei parametri intrinseci ed estrinseci della rete di prese. La focale ( $c$ ), insieme alle coordinate immagine ( $x_0, y_0$ ) del punto principale, rappresentano appunto i parametri intrinseci (POI) delle camere, mentre le coordinate 3D ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) del centro di proiezione e l'assetto ( $\omega, \varphi, k$ ) della camera rispetto al datum sono i parametri estrinseci (POE).

# 3 PROCEDURE INNOVATIVE DI RILEVAMENTO: I DRONI

Il termine drone non è altro che il nome comune con cui si descrive una particolare categoria di oggetti volanti, ovvero, gli Aeromobili a Pilotaggio Remoto, meglio noti come APR. Come si può facilmente intuire sono dispositivi di diverse dimensioni capaci di librarsi in cielo, il cui volo è controllato da un pilota che rimane a terra provvisto di radiocomando collegato con un computer a bordo del velivolo in modo tale da dirigerne i movimenti. La parola drone, coniata quasi 100 anni fa, prende le sue origini dal ronzio dei primi modelli creati somigliante al rumore emesso dal maschio dell'ape, il fuco, in inglese drone. Sono noti anche attraverso altri acronimi, tra cui UAV (Unmanned aerial vehicle, ovvero veicolo aereo senza pilota)

Gli UAV sono formati da tre componenti:

- Il velivolo: costituito dallo scheletro, dal sistema di propulsione, dal sistema di controllo e di navigazione;
- Il *payload*: costituito da sistemi accessori, indispensabili per lo scopo del volo, quali gli infrarossi, il sistema di posizionamento, il radar, ecc.;
- La *Ground Control Station o System* (GCS): lo strumento in mano al pilota, dove vengono visualizzate le informazioni del volo.

## 3.1 REGOLAMENTAZIONE PREVISTA

Ogni tipo di drone, qualsiasi siano il suo peso o le sue caratteristiche specifiche, viene definito come Aeromobile ed in quanto tale deve essere sottoposto alla regolamentazione aeronautica che interessa tutti i mezzi in grado di volare. Questo è dovuto alla pericolosità che questi sistemi possono portare a persone, infrastrutture o altri sistemi. I pericoli che comportano non sono da sottovalutare e di conseguenza è fondamentale stabilire delle regole.

Parlando di UAV è doveroso ricordare che, per quanto concerne lo Stato Italiano, il volo attraverso pilotaggio remoto è permesso solo previo ottenimento del "Permesso di Volo

per scopi sperimentali” rilasciato dall’ENAC (Fig. 33) dal Luglio del 2015 (Ente Nazionale per l’Aviazione Civile).



Fig. 33 - Logo ENAC.

In Italia la prima edizione del Regolamento è però uscita il 16 dicembre 2013 con il nome “Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto”. Questa però lasciava molti dubbi su come comportarsi in determinate situazioni, sulla classificazione, fornita unicamente in base al peso, e sulle possibilità di utilizzo legate alla presentazione di diverse pratiche ed autorizzazioni.

La seconda edizione del regolamento (16 Luglio 2015) fornisce norme sulle caratteristiche tecniche e sulla sicurezza degli Aeromobili a Pilotaggio Remoto, facendo chiarezza anche per quanto concerne le qualificazioni richieste dal pilota e sull’occupazione dello spazio aereo.

La principale distinzione creata dall’ENAC è in funzione dell’utilizzo che viene fatto dei droni, gli APR vengono divisi tra aeromobili ad uso professionale o per uso ricreativo e sportivo.

Gli aeromobili ad uso professionale vengono classificati in due classi in base al peso:

- **> 25 kg:** sono sottoposti alle normative riservate agli aeromobili tradizionali;
- **< 25 kg:** sono sotto la responsabilità dell’operatore, a patto che non decollino in aree critiche che possono portare danni a terzi in casi di guasti al velivolo.

Per la prima volta vengono regolamentati anche gli APR con peso al decollo  $\leq 2$  kg.

L’ENAC classifica i droni in funzione della massa operativa al momento del decollo, introducendo, rispetto alla prima edizione del 2013, una regolamentazione anche per piccoli droni aventi una peso minore di 0,3 kg. In particolare le operazioni condotte con APR di massa minore a 0,3kg e velocità massima 60 km/h non sono considerate critiche e al pilota non è richiesto nessun attestato, in ogni caso deve garantire che tali operazioni siano svolte osservando le regole di circolazione.

Diventa fondamentale il concetto di identificativo dell'aeromobile e dell'operatore proprietario del mezzo. Ogni APR deve essere fornito di targhetta contenente i dati identificativi e deve essere fornito di un apparato elettronico per la trasmissione in tempo reale dei dati del volo, quelli relativi al proprietario/operatore e quelli dell'APR stesso. Deve essere presente un sistema che permette di avere un controllo continuo della quota di volo, in accordo con le regole dell'aria per quanto concerne l'occupazione dello spazio aereo. Infine in alcuni casi il drone deve essere equipaggiato anche di una luce o un segnale luminoso che ne garantisca la visibilità.

Viene fatta una distinzione tra operazioni specializzate critiche e non critiche, quest'ultime sono quelle in cui il pilota non perde mai il contatto visivo con il mezzo (VLOS, Visual Line Of Sight) e che non prevedono il volo su aeree congestionate. Le seconde, nello specifico, sono operazioni condotte in VLOS che non prevedono il sorvolo di aree con agglomerati urbano o presenza di persone. Le VLOS sono consentite fino a una distanza massima orizzontale di 500 m e fino ad un'altezza massima di 150 m. Distanze e altezze superiori possono essere valutate e autorizzate caso per caso dall'ENAC.

L'ENAC ha evidenziato anche le zone in cui non è possibile effettuare manovre di volo. È vietato condurre operazioni con APR all'interno dell'ATZ (Aerodrome Traffic Zone) di un aeroporto e nelle zone sottostanti il decollo e l'atterraggio. Il divieto è valido anche nei 5 km circostanti la ATZ e in particolari zone proibite indicate dall'AIP (Aeronautical information publication)

Viene poi toccato, oltre al discorso sicurezza, anche quello che riguarda la privacy. Laddove le operazioni svolte attraverso un SAPR possano comportare un trattamento di dati personali, tale circostanza deve essere menzionata nella documentazione sottoposta ai fini del rilascio della pertinente autorizzazione.

Da quanto riportato si evince quindi l'importanza di avere una regolamentazione universale per non incappare in problematiche e sanzioni.

## 3.2 SVILUPPO STORICO DEI DRONI

La storia dei velivoli a controllo remoto, ha radici molto antiche, i primi si furono tentati di realizzare contemporaneamente alla creazione dei primi oggetti volanti con pilota.

Il primo impiego è stato in ambito militare, spetta all'esercito Austro Ungarico che utilizzò alcuni palloni aerostatici carichi di esplosivo controllati da un sistema a funi. Vennero lanciati contro Venezia nel 1849 attraverso la nave Vulcano evitando di esporsi al fuoco diretto dei cannoni.

I primi veri e propri velivoli teleguidati nacquero però durante la prima guerra mondiale nel 1917, quando l'ingegnere Archibald Low, capitano della forza aerea del Regno Unito, creò il primo velivolo a motore con sistema di pilotaggio da remoto attuato con onde radio, chiamato Aerial Target (Fig. 34).

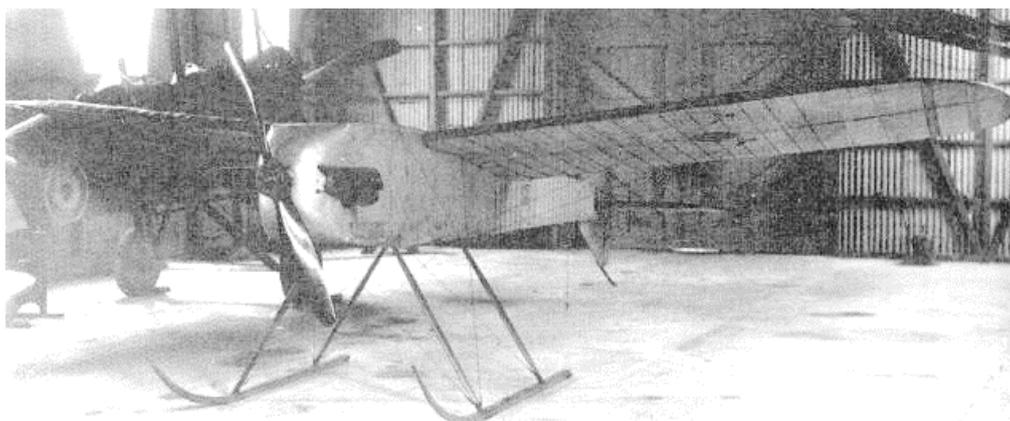


Fig. 34 - Rara foto scattata circa nel 1917 di un prototipo di un Aerial Targer in un hangar del Royal Flying corps (Davide Migliore, 2013, modificata).

La notizia arrivò anche nel nuovo continente e smosse l'interesse della Marina americana che disegnò la Curtiss-Sperry Flying Bomb nel 1917 con la quale tentarono una serie di lanci, fallendo per problemi aerodinamici. Le prove continuarono sugli idrovolanti Curtiss N9 (Fig. 35) di proprietà della marina, uno dei quali, nell'Ottobre del 1917 venne lanciato da una catapulta costruita dall'Ingegnere Carl Norden. Il volo sarebbe dovuto essere di una decina di chilometri ai quali seguiva l'ammiraglio, ma dopo poco l'aereo scomparì dal raggio d'azione del segnale radio e si perse in mare.



Fig. 35 - Esercitazione di un idrovolante Curtiss N9 (ceticowboy, modificata).

Gli esperimenti continuarono anche nel secondo conflitto mondiale. In Germania l'apparato militare continuò gli studi strategici sulle esperienze della prima guerra mondiale. I tedeschi svilupparono delle telearmi lanciabili da terra, da navi o sganciabili da bombardieri creando i "droni da attacco". Un esempio è la Fritz X, conosciuta come Fritz X. Si trattava di una bomba perforante con superfici telecomandate via impulsi radio, comandata dall'aereo madre tramite un'impugnatura a cloche, praticamente l'antenato del joystick moderno. La sua vittima più celebre fu la corazzata Roma della Regia Marina italiana, affondata tra il golfo dell'Asinara e le bocche di Bonifacio il 9 settembre 1943. Morirono 1.352 marinai (Fig. 36).



Fig. 36 - Abbattimento della corazzata Roma dopo il bombardamento della Fritz X (L'impronta).

Ancora più vicino all'idea che abbiamo oggi di aeromobile a pilotaggio remoto fu la Henschel 293/294, dotata di un motore a razzo, era radiocomandata dall'aereo lanciatore con un raggio di azione di ben 11 chilometri (Fig. 37). È il discendente dei missili guidati di oggi. Avrebbe dovuto equipaggiare estesamente i reparti antinave della Luftwaffe, l'aviazione militare tedesca, ma la sua efficacia trovò grandi limiti nella tecnologia di radio controllo e nelle tattiche di combattimento. Interessò soprattutto gli alleati, che la studiarono e la sperimentarono a fondo dopo la fine della guerra in quanto gli ingegneri tedeschi avevano tentato lo sviluppo di versioni con guida acustica o televisiva.

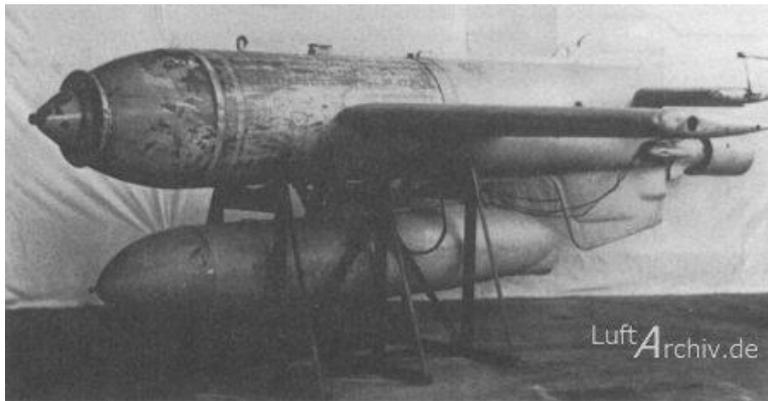


Fig. 37 - Foto del Henschel 293/294 presa dall'archivio dell'aviazione tedesca (luftarchiv).

Di nuovo gli americani, impressionati dalle ricerche tedesche, riuscirono a realizzare il progetto più interessante degli anni '40. Si trattava di un piccolo aliante sganciato dall'aereo madre la cui discesa verso il bersaglio era in parte controllata da un operatore, fino a che un radar posto sul velivolo non agganciava il bersaglio. Il suo nome era Swod Mk 9 Bat e venne impiegata alla fine del conflitto nel Pacifico. Inizialmente non fu particolarmente efficiente in quanto il radar veniva spesso ingannato dal profilo del suolo, ma fu utilissima per affinare i sistemi di doppio controllo remoto del futuro (Fig. 38).

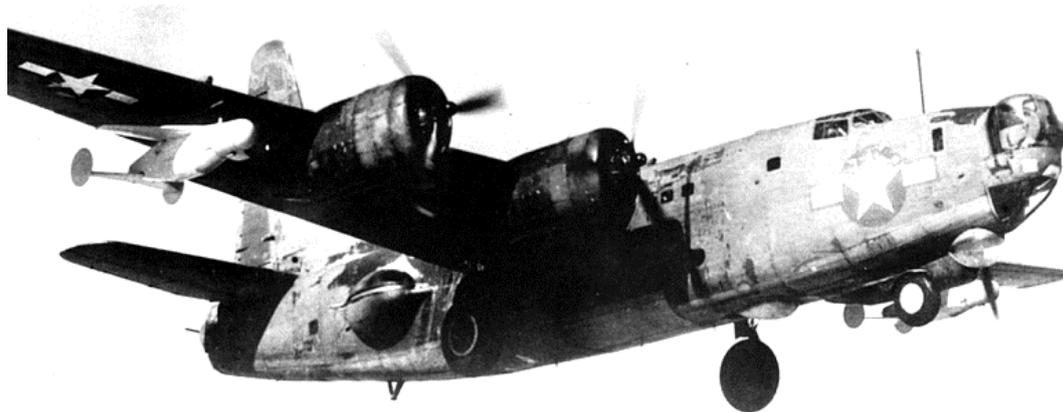


Fig. 38 - Un pattugliatore Consolidated PB4Y-2 Privateer della U.S. Navy in atterraggio su una base nel Pacifico mostra due velivoli da attacco teleguidati Bat appesi sotto le ali. (Migliore, 2013, modificata).

Gli anni della guerra fredda videro l'ampliamento dell'uso dei droni anche nella ricerca aeronautica e nella sperimentazione di volo.

Il blocco sovietico aveva sistemi radar e telearmi di efficienza elevatissima tanto performanti da rendere insicuro l'uso dei velivoli convenzionali per ricognizione strategica e vero e proprio spionaggio.

La guerra del Vietnam e l'impegno nel sud est asiatico servirono come insostituibile campo di prova per l'ampliamento dei ruoli affidati ai velivoli senza pilota. L'industria statunitense Teledyne Ryan, specializzata nella produzione di droni da ricerca o bersagli volanti, sviluppò dall'AQM 34 Firebee, una famiglia di velivoli lanciabili da terra o sganciabili dalle ali di un aereo madre, di solito un aereo da trasporto Lockheed DC 130 Hercules. Questi velivoli erano riempiti di apparecchiature per analizzare e disturbare le emissioni radio e radar del nemico, oppure per effettuare ricognizioni fotografiche. Tra il 1965 ed il 1973 USAF (United States Air Force) e US Navy (marina militare degli Stati Uniti) svolsero oltre 34.000 ore di volo con i loro Ryan Firebee (Fig. 39), portati a uno stadio sempre più avanzato e in grado di compiere missioni con le stesse prestazioni di un moderno jet da combattimento.



Fig. 39 - 1975, Aereo da trasporto DC-130° in volo equipaggiato con 4 droni da ricognizione AQM-Firebee.

Le pesantissime perdite subite dalle forze aeree statunitensi, in termini di aerei abbattuti, raffrontati con le prestazioni sempre più spinte dei droni fecero sorgere spontanea a Washington la considerazione di affidare ai velivoli senza pilota anche una parte delle missioni di combattimento, dotandoli di armamenti e sistemi di puntamento adatti.

Questo sviluppo è lampante fino ai giorni nostri. I droni odierni, come il Global Hawk possono volare ininterrottamente per più di 30 ore, il che addirittura permette di avvicendare nella missione più piloti che potranno godere così di turni di riposo (Migliore Davide, massacrata).

I sistemi di pilotaggio attuali hanno grandi potenzialità e, a oggi, un pilota seduto in una stanza è in grado di pilotare un velivolo a notevoli distanze. Questo può essere da un lato un bene, ma dall'altro, parlando di terrorismo internazionale, può provocare gravissimi danni ed è quindi fonte di grosso pericolo.

### 3.3 IMPIEGO IN AMBITO CIVILE

Negli ultimi anni, le tecnologie legate allo sviluppo di sistemi APR hanno subito un importante sviluppo in molteplici campi, tra cui l'impiego dei droni in ambito civile. In particolare lo sviluppo tecnologico nell'ambito della sensoristica, permette di equipaggiare APR con molteplici carichi, nello spettro del visibile (camere digitali compatte o professionali), dell'infrarosso (camere termiche), camere multi spettrali fino ad arrivare a sensori più evoluti come ad esempio sensori Lidar o per il monitoraggio della qualità dell'aria.

Due esempi di utilizzo in ambito civile sono il telerilevamento e la fotogrammetria.

Il telerilevamento, in inglese *Remote Sensing*, è la scienza applicata con finalità diagnostico-investigative che permette di ricavare informazioni, qualitative e quantitative, sull'ambiente e su oggetti posti a distanza da un sensore mediante misure di radiazione elettromagnetica che interagisce con le superfici fisiche di interesse. Grazie alla possibilità di volare anche a quote molto basse e di disporre di sensori di piccole dimensioni ma di buona qualità, gli APR, in particolare quelli appartenenti alla categoria microdrone, possono essere utilizzati per applicazioni legate al telerilevamento quali la creazione di mappe di copertura e uso del suolo di mappe di colture agricole e monitoraggio dello stato di salute della vegetazione o per l'analisi e il supporto nelle fasi immediatamente successive a calamità naturali. Inoltre se equipaggiati con una camera termica ad infrarossi possono essere utilizzati per il monitoraggio e la mappatura delle dispersioni termiche di edifici privati e pubblici.

La fotogrammetria invece è una tecnica di rilievo che permette di acquisire dei dati metrici di un oggetto (forma e posizione) tramite l'acquisizione e l'analisi di una coppia di fotogrammi stereometrici. Con l'avvento delle camere digitali di ridotte dimensioni (compatte o reflex), ma che possono garantire un elevato standard qualitativo relativamente all'immagine prodotta, la fotogrammetria può essere accostata agli APR e al loro utilizzo per la creazione di Modelli digitali del terreno (DTM), produzione ortofoto e, allo stesso tempo, per il rilievo architettonico di infrastrutture ed edifici per la creazione di modelli 3D.

Altri ambiti in cui il drone risulta di fondamentale importanza sono i seguenti

- Sicurezza territoriale, delle frontiere e lotta ai narcotrafficienti. Gli APR vengono impiegati per segnalare i movimenti e la forza numerica dei narcotrafficienti, nel 2011 gli Stati Uniti e il Messico hanno iniziato una collaborazione per arginare il fenomeno dell'immigrazione clandestina e del traffico di sostanze stupefacenti attraverso il loro confine
- Ampliamento della connessione Internet. Da diversi anni numerose aziende come Google e Facebook stanno utilizzando i droni per aumentare la copertura di Internet nel mondo.
- Monitoraggio siti Archeologici, contro la depredazione e il commercio illegale di reperti.
- Monitoraggio centrali termoelettriche e impianti industriali. Gli APR possono essere utilizzati per monitorare nel tempo gli impianti di produzione di energia elettrica, o più in generale impianti industriali, utilizzando degli appositi sensori (termocamere, camere multispettrali ecc.).
- Monitoraggio ambientale e calamità naturali. Gli APR sono stati accostati in maniera diretta al monitoraggio ambientale e delle aree colpite gravemente da terremoti e inondazioni. Un esempio sono gli APR statunitensi Global Hawk che hanno sorvolato la Centrale nucleare di Fukushima, addentrandosi nella zona vietata ("no go zone") per monitorare i reattori dopo le esplosioni causate dal terremoto del 2011. L'alta radioattività rendeva infatti impossibile l'avvicinamento degli esseri umani.

### 3.4 MICRODRONE PER RILEVAMENTO

I microdrone UAV sono velivoli di piccole dimensioni costituite da un telaio in fibra di carbonio (Fig. 40) o alluminio avente dimensioni minime di 60x60 cm. I microdrone volano grazie alla spinta di quattro o più motori ad elica controllati da regolatori di velocità dedicati ad ogni singolo motore.



Fig. 40 - Telaio in fibra di carbonio di un quadricottero.

Questi velivoli sono equipaggiati di schede e componentistica utile al volo (barometri, accelerometri, GPS ecc.) che possono trasportare sensori di rilievo dedicato.

L'impiego di multi-rotori di piccole dimensioni e con alte capacità di personalizzazione è legato alla possibilità di costruire una piccola flotta di quadricotteri dotati di diversi sensori che potranno agire in sincronia in modo da acquisire molteplici informazioni del territorio. Questo permette di realizzare così un campionamento contemporaneo di diverse grandezze.

Vista la grandissima manovrabilità e flessibilità nell'equipaggiamento, i microdrone possono essere utilizzati per molteplici applicazioni:

- Riprese aeree di porzioni di territorio con telecamere;
- Produzione di modelli digitali della superficie a partire da stereo coppie;

- Rilievi a distanza di aree edificate, centri urbani o singoli edifici;
- Rilievo a distanza di aree non accessibili o non sicure;
- Ripresa del territorio nel campo del visibile, dell'infrarosso e del termico;
- Analisi degli inquinanti dispersi in atmosfera.

Come gli APR anche i microdrone per poter essere utilizzati devono seguire le normative restrizioni fornite dall' ENAC, per qualsiasi operazione è quindi necessario dotarsi di una macchina che risponda a tutti i requisiti di legge, che sia sicura e affidabile e che abbia caratteristiche tecniche vantaggiose per poter operare nei più differenti scenari.

### 3.5 DRONI IN COMMERCIO

Le soluzioni elencate di seguito sono differenti per prezzo, finalità e caratteristiche tecniche, quindi sarà compito dell'operatore scegliere quella maggiormente adatta alle proprie esigenze. In genere questi droni sono tutti dotati di navigazione GPS, decollo e atterraggio automatico, Return to Home, doppi controlli per la videocamera e altri piccoli dettagli che le rendono per molti versi simili le une alle altre (Rubboli). Quello che maggiormente cambia è il payload, il carico trasportabile, il numero di minuti di volo, il peso complessivo, la trasportabilità e, naturalmente, il prezzo.

- **Italdron –Highone 4HSE Pro** (Fig. 41)



Fig. 41 - Italdron - Highone 4HSE Pro (vanillamagazine, modificata).

Il drone commercializzato da *Italdron* è a marchio *ZEROUAV*, personalizzato dall'azienda italiana per rispondere ai requisiti imposti dalla nostra legislazione del volo. Il quadricottero è una soluzione particolarmente adatta all'impiego per riprese video, questo a causa del carrello retrattile di serie e del *gimbal* con elettronica *brushless*, e si rivela particolarmente adatto ad essere impiegato anche in altri scenari quali i rilevamenti del suolo o la video sorveglianza. L'elettronica ridondante lo rende uno dei SAPR più sicuri in assoluto, e i doppi comandi del velivolo più gimbal sono semplicissimi da usare anche per gli operatori meno esperti. Ha parecchi vantaggi tra cui il carrello retrattile, l'elettronica ridondante e un paracadute compreso nel prezzo. Unico svantaggio è dovuto al payload non particolarmente elevato essendo di soli 2,5 kg.

- **Walkera Qr X350 pro** (Fig. 42)



Fig. 42 - Walkera Qr X350 pro (youtube, modificata).

Il prezzo è intorno a 600-700 euro; l'autonomia di volo dichiarata è di 25 minuti. Si presenta come un drone di dimensioni contenute, lungo e largo 289 millimetri e alto 200. La massima larghezza delle pale è, invece, di 206 millimetri. L'allestimento FPV della *Walker* è composto da un QR X350 PRO fornito di gimbal brushless G-2D per la stabilizzazione sui due assi, compatibile con GoPro 3. È presente, inoltre, una videocamera iLook a 720p di risoluzione che integra al suo interno un trasmettitore video a 5.8 Ghz con 200mW di potenza, e un radiocomando DEVO F7, dotato di ricevitore video a 5.8 Ghz e di un monitor LCD su cui visualizzare le immagini di volo.

Si tratta, infatti, di un Apr estremamente agile, più simile a un elicottero Rc di classe 450 che a un vero e proprio aeromobile a pilotaggio remoto. Detto questo, il QR X350 Pro è estremamente semplice da controllare, grazie a una serie di sensori (Altitude hold system e Altitude sensor) pensati proprio per dare una mano ai piloti meno esperti. Una volta in volo, il drone si comanda senza particolari problemi (per una mano con un minimo di pratica) e può dare grandi soddisfazioni fin dalle prime battute. Le funzioni Failsafe e Return to home, inoltre, garantiscono un buon livello di sicurezza in caso di problemi.

- **Aibotix X6** (Fig. 43)



Fig. 43 - Aibotix X6 (uavinsider, modificata).

Aibotix è una realtà ormai decisamente affermata nel panorama delle macchine professionali, questo a causa della lunga esperienza nella costruzione di sistemi a pilotaggio remoto dedicati agli scopi più disparati, da rilievi topografici ad ispezioni in piattaforma a prolungati voli con payload superiore a 2 Kg. L'Aibotix è molto conosciuto in ambito professionale e comporta diversi vantaggi fra i quali la possibilità di posizionare un doppio payload sopra e sotto la carlinga, un elevato payload e la possibilità di volare per oltre 30 minuti. Uno degli svantaggi principali del drone è la sua alta sensibilità al vento, data dall'effetto vela del grande copri-elica centrale.

- **3D Robotics Iris+** (Fig. 44)



Fig. 44 - 3D Robotics Iris+ (dronionline, modificata).

È in grado di effettuare riprese centrate sull'operatore che segue sempre oppure si presta alla programmazione di un piano di volo tracciabile sullo schermo dello smartphone. L'autonomia di volo arriva fino a 22 minuti circa. A confronto con gli altri droni professionali è estremamente veloce: sfiora i 75 km/h. Viene venduto a circa 1.700 euro senza videocamera e può ospitare camere di diverse marche, GoPro compresa.

- **Udi U818a** (Fig. 45)



Fig. 45 - Udi U818a (ddroni, modificata).

Il prezzo è sui 60 dollari. È facile da controllare e stabile. Si alza fino a 30 metri di altezza. L'autonomia di volo si aggira tra i 7 e i 9 minuti.

- Drone Spia Militare **PD-100 Black Hornet** (Fig. 46)



Fig. 46 - Drone Spia Militare PD-100 Black Hornet (startmag, modificata).

PD-100 Black Hornet di Prox Dynamics è un drone per utilizzo militare davvero “sui generis”, un modello che non può che suscitare grande interesse e curiosità tra gli appassionati di velivoli a pilotaggio remoto. PD-100 Black Hornet è un drone dalle dimensioni minuscole, una sorta di piccolissimo elicottero con elica dal peso di appena 18 grammi che può essere tranquillamente tenuto sul palmo di una mano. Questo drone così particolare nasce con il chiaro intento di controllare dei territori e di effettuare delle immagini “spia”, riducendo al minimo il rischio di essere scoperti ed offrendo, allo stesso tempo, dei filmati notevolmente precisi e qualitativi. A rendere PD-100 Black Hornet quanto mai adatto a questo tipo di utilizzo militare vi è inoltre il fatto che tale mini-elicottero trasmette immediatamente i filmati realizzati all’operatore remoto, senza custodirli in memoria: ciò significa che qualora questo piccolissimo drone dovesse essere individuato e catturato dai nemici, esso diverrebbe immediatamente del tutto inutile, essendo impossibile recuperarne i filmati prodotti. Le caratteristiche tecniche di questo minidrone sono molto interessanti: PD-100 Black Hornet, oltre ad avere, come detto in precedenza, un peso esiguo, ha un’autonomia di volo pari a 25 minuti, e le sue videocamere riescono a riprendere fino a ben 1 Km di distanza, a dispetto delle piccole dimensioni. Sulla base delle esigenze, peraltro, è possibile realizzare il video

opzionando la videocamera termica, quella notturna e quella tradizionale; anche la velocità è tutt'altro che trascurabile per un velivolo di simili dimensioni, essendo pari a 5 metri al secondo. Attualmente PD-100 Black Hornet è in dotazione alle forze speciali britanniche, ormai da almeno 2 anni, ed è notizia recente che anche gli eserciti statunitensi ne stiano testando l'utilizzo per includerlo tra le proprie dotazioni tecnologiche. Il costo di questo elicottero-spia dalle minuscole dimensioni è di 40.000 dollari.

- **RQ-4 Global Hawk** (Fig. 47)



Fig. 47 - RQ-4 Global Hawk (dailyairforce).

Sviluppato da Northrop Grumman, l'RQ-4 Global Hawk nasce alla fine degli anni '90, sotto il programma ACTD (Advanced Concept Technology Demonstration). Decolla per la prima volta nel 1998 e, qualche anno dopo, viene subito lanciato sul campo di battaglia, nella sua prima versione, la Block 10. In occasione del conflitto in Afghanistan il mito del Global Hawk inizia a farsi largo. Grazie al drone, l'Esercito americano riesce a individuare con precisione i rifugi dei terroristi, per poi intervenire. Da quel momento, il Global Hawk diventa un'arma fondamentale per l'US Air Force. Dal punto di vista tecnico, il Global Hawk è un drone monomotore alimentato da una turbina Rolls-Royce F137-RR-100, lungo circa 14 metri e alto quasi 5, con un'apertura alare di 40 metri. L'Apr può raggiungere una velocità massima di 575 km/h, con un'autonomia operativa di oltre 28 ore.



## 4 RILEVAMENTO AEREO

### MULTISENSORIALE

Parlando di rilevamento aereo effettuato con aeromobili a pilotaggio remoto non ci si riferisce solo al classico rilievo fotogrammetrico effettuato con fotocamere o videocamere RGB a risoluzioni più o meno elevate.

Nell'ultimo anno si sta sempre più diffondendo e ottimizzando la possibilità di affiancare al sensore RGB anche altri tipi di sensori che permettono la determinazione di informazioni diverse dell'area sorvolata, tra cui il sensore termico.

I sensori termici e iperspettrali equipaggiati su un drone permettono di studiare le proprietà e caratteristiche del suolo e degli oggetti presenti su di esso sfruttando la radiazione solare riflessa in regioni dello spettro elettromagnetico che sono invisibili all'occhio umano. Questo consente di individuare fenomeni, caratteristiche e qualità che in maniera molto più rapida e precisa in quanto evitano onerose e lunghe indagini in loco (Fig. 48).



Fig. 48 - Rilevamento termico per agricoltura di precisione.

## 4.1 LA TERMOGRAFIA

La termografia all'infrarosso è una tecnica diagnostica non distruttiva che sfrutta il principio fisico secondo il quale qualsiasi corpo con una temperatura maggiore dello zero assoluto, corrispondente a  $-237,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , emette energia sotto forma di radiazione infrarossa.

La scoperta dei raggi infrarossi spetta a William Herschel compiuta con un ingegnoso esperimento eseguito nel 1800. Pose un termometro al mercurio nello spettro prodotto da un prisma di vetro, per misurare il calore delle differenti bande di luce colorate (Fig. 49). Scoprì che il termometro continuava a salire anche dopo essersi mosso oltre il bordo rosso dello spettro, dove non c'era più luce visibile. Fu il primo esperimento che mostrò come il calore poteva trasmettersi grazie a una forma invisibile di energia.

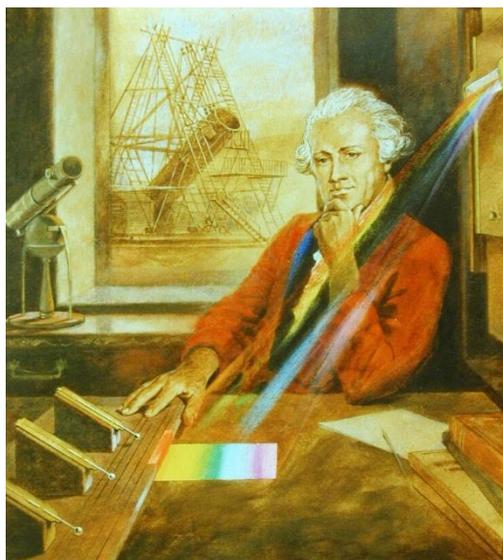


Fig. 49 - Esperimento che portò alla scoperta dell'infrarosso da parte di William Herschel (1738-1822).

L'energia termica, risiede nello spettro non visibile perché la sua lunghezza d'onda è troppo lunga per essere scorta dall'occhio umano. Si situa in quella parte dello spettro elettromagnetico che percepiamo come calore.

#### 4.1.1 LE TERMOCAMERE

Per studiare il valore e la variazione delle radiazioni ad infrarossi di un oggetto è stato creato uno strumento, la termocamera, che sfruttando tale principio converte l'energia emessa da un corpo sotto forma di onde elettromagnetiche infrarosse in un segnale elettronico che viene successivamente elaborato per produrre un'immagine radiometrica alla quale viene abbinata una palette di colori corrispondenti ad una scala di temperatura che consenta di leggerne i valori (Fig. 50).

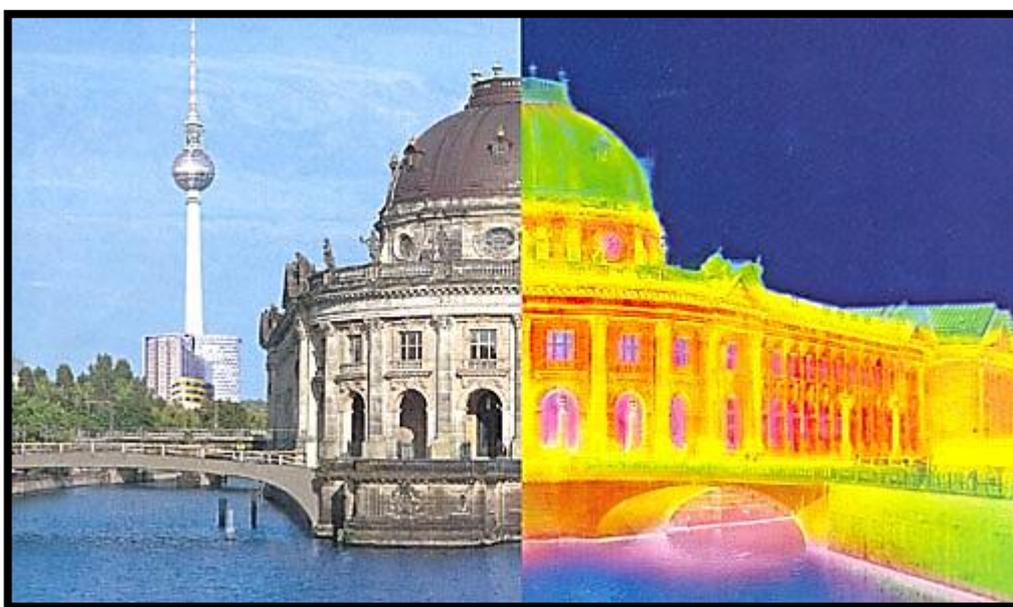


Fig. 50 - Accostamento tra immagine a colori e immagine termica del Bode Museum di Berlino.

La quantità di radiazioni emessa sotto forma di energia e la temperatura assoluta di un oggetto sono correlate da una legge alla quarta potenza che prende il nome di Legge di Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma T^4$$

Dove la T è la temperatura assoluta espressa in gradi kelvin e  $\sigma = 6.6703 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$  prende il nome costante di Boltzmann

Una termocamera è un'eccezionale strumento di diagnostica utilizzabile in molti settori, in quanto permette di individuare in modo immediato aree o componenti soggette a punti

caldi o freddi in modo da migliorare le efficienze costruttive e gestire al meglio l'energia (calore) per massimizzarne il rendimento e la sicurezza.

La termografia è tra le metodiche non distruttive maggiormente utilizzate nella diagnostica delle patologie degli edifici e strutture che ,anche se realizzati a regola d'arte, sono soggetti a degrado a causa dell'invecchiamento dei materiali e della prolungata mancanza di manutenzione. Questo perché limita al minimo i disagi degli abitanti consentendo di poter operare all'interno di edifici senza interrompere le normali attività e inoltre evita ulteriori traumi a strutture dissestate individuando i punti realmente rappresentativi su cui poi verranno eseguiti i saggi distruttivi.

Recentemente entrata a far parte delle tecniche di telerilevamento per l'analisi delle condizioni di stabilità degli ammassi rocciosi. Tale applicazione, ancora sulla frontiera della ricerca, consente di studiare il comportamento termico degli ammassi rocciosi, con l'obiettivo di individuare ed analizzare eventuali anomalie termiche superficiali e fenomeni di instabilità. In particolare, la termografia trova valide applicazioni per l'analisi di scarpate in roccia e falesie. Recenti casi di studio hanno dimostrato che, in abbinamento con altre tecniche di telerilevamento (Interferometria SAR Terrestre, Laser Scanner Terrestre e Fotogrammetria), è in grado di fornire informazioni utili per la mappatura delle zone maggiormente predisposte a fenomeni di crollo e, di conseguenza, per la zonazione delle priorità di intervento per la mitigazione del rischio.

Le termocamere si dividono sostanzialmente in due tipologie, quelle non radiometriche e termocamere radiometriche.

Inizialmente questo strumento non nasce per rilevare la temperatura di un corpo, ma per rilevare l'energia termica, sotto forma di raggi infrarossi, presenta sulla superficie di un oggetto in modalità non invasiva. Quindi le prime ad essere costruite furono le termocamere non radiometriche, che forniscono un'immagine termica che mostra le differenze di temperatura ma non è possibile rilevare in alcun modo il valore assoluto della temperatura su tale immagine.

In seguito allo sviluppo tecnologico dello strumento vennero poi create le termocamere radiometriche, che a differenza delle prima associano ad ogni pixel dell'immagine un valore radiometrico che ne permette la valutazione della temperatura. Maggiore è la risoluzione geometrica dell'immagine, ovvero il numero di pixel contenuti, maggiore

sarà il dettaglio e la precisione con cui è possibile leggere la temperatura, in quanto le termocamere radiometriche sono in grado di misurarla per ciascun pixel rilevato.

Altro parametro fondamentale è la risoluzione termica (Fig. 51) che rappresenta la minima differenza di temperatura apprezzabile dalla termocamera. Di seguito sono riportate due immagini scattate con due strumenti aventi diversa risoluzione termica.

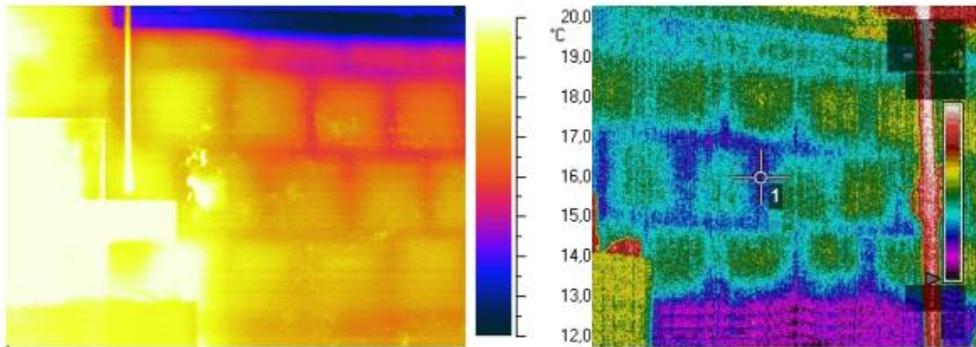


Fig. 51 - Confronto tra immagini a differente risoluzione termica. A sinistra lo strumento apprezza una variazione di  $0,05^{\circ}\text{C}$ , a destra di  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Un'altra classificazione può essere effettuata attraverso la frequenza di acquisizione (Fig. 52). Questo parametro diventa di grossa importanza quando si cerca di misurare la temperatura di un oggetto in movimento o nel caso in cui l'operatore si muova durante l'acquisizione del dato come nel caso di un rilevamento aereo. Se la frequenza di acquisizione non è sufficiente si può avere un'effetto mosso dell'immagine che impedisce una corretta lettura della temperatura. In base alla frequenza si possono distinguere in:

- Termocamere per fenomeni statici con  $F_r$  minore di 33 Hz
- Termocamere per eventi brevi e rapidi con  $F_r$  tra 33 e 60 Hz
- Termocamere per analisi particolare con  $F_r$  maggiore di 60 Hz

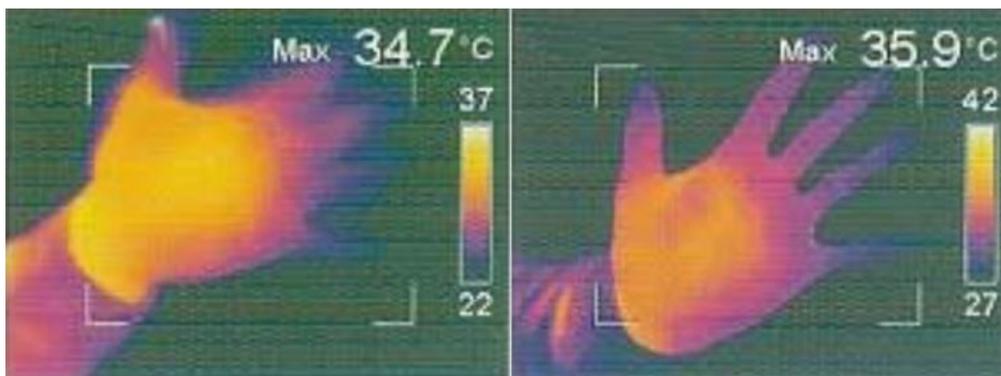


Fig. 52 - Confronto tra immagini scattate da termocamere con frequenze diverse nel quale si apprezza la differenza di nitidezza della mano in movimento. A sinistra la frequenza di acquisizione è 20 Hz e a destra 50 Hz.

#### 4.1.2 ALCUNE TERMOCAMERE IN COMMERCIO

Poiché l'utilizzo delle termocamere si è particolarmente diffuso negli ultimi anni, un numero sempre maggiore di aziende stanno avviandosi alla produzione di questi strumenti. Esiste infatti una ampia scelta per quanto riguarda la termocamera più adatta al tipo di operazione che bisogna effettuare. Ogni strumento presenta caratteristiche tecniche che lo differenzia deli altri e che l rendo più o meno adatto al lavoro da compiere. Le marche produttrici sono molteplici, di seguito si riporta una serie di termocamere presenti sul mercato:

- **FLIR MR 176** (Fig. 53)



Fig. 53 - FLIR MR 176 (flirshop, modificata).

Grazie alla tecnologia IGM (Infrared Guided Measurement), supportata da un sensore termografico FLIR Lepton incorporato 80x60 con 4800 pixel che permette l'individuazione sul display a colori potenziali problemi di umidità. MR176 ti guida visivamente verso il punto preciso in cui può nascondersi l'umidità, per svolgere ulteriori test e indagini. L'igrometro con immagine termica IGM in versione Plus è uno strumento *all-in-one* dotato di termocamera integrata, che indica esattamente dove misurare l'umidità. La tecnologia Infrared Guided Measurement (IGM) dell'MR176 evidenzia i punti critici di ampie aree con problemi di umidità, consentendo di focalizzare e analizzare le misurazioni nel punto giusto. Il sensore di umidità integrato senza puntali e la sonda esterna con puntali offrono flessibilità di misura non invasiva e invasiva. Grazie al sensore di temperatura e umidità relativa intercambiabile e alla misura automatica dei parametri ambientali, l'MR176 offre maggiore praticità e facilità d'uso garantendo misure corrette con maggiore velocità.

- **Testo 875-1i** (Fig. 54)



Fig. 54 - Testo 875 - 1i (elcoteam, modificata).

La termocamera testo 875-1i mette in evidenza anche le più piccole differenze di temperatura. Si tratta di una termocamera a cui è integrata una fotocamera digitale con la quale è possibile acquisire un'immagine reale e abbinarla a quella termica. La risoluzione delle immagini è 160x120, che fornisce 19 200 punti di misurazione della temperatura. Con la tecnologia SuperResolution è possibile aumentare di un livello la qualità delle immagini e portarla a 320 x 240 pixel. Questa tecnologia, che moltiplica

per quattro i valori di misura e fornisce una migliore risoluzione geometrica (fattore 1,6), si traduce in dettagli ancora più nitidi e in una maggiore sicurezza della misura termografica. La risoluzione di temperatura  $< 50$  mK consente di mettere in evidenza anche le più piccole differenze di temperatura. Software professionale incluso per l'analisi delle immagini al PC. A scelta le immagini termiche possono essere salvate anche in formato JPEG. La fascia di misura della temperatura è tra  $-30^{\circ}\text{C}$  e  $+350^{\circ}\text{C}$

- **NEC Termo Gear R300** (Fig. 55)



Fig. 55 - NEC Termo Gear R300 (edilportale, modificata).

Le caratteristiche della R300 sono state pensate per un cliente esigente che voglia poter operare in tutte le condizioni, senza rinunciare a nessuna applicazione gli si ponga davanti. La R300 unisce elevata sensibilità di immagini, qualità e prestazioni, ad un prezzo molto interessante per la categoria. R300 è l'unica termocamera che può registrare simultaneamente un filmato sia termico che visibile, anche in modalità RealTime, grazie al collegamento USB. Questa caratteristica offre la possibilità di acquisire velocemente ampie zone riducendo i tempi di elaborazione. La doppia modalità di visualizzazione, tramite oculare regolabile o sul display LCD da 3,5" orientabile, permette di operare agevolmente in qualunque ambiente. È caratterizzata da un sensore da  $320 \times 240$  pixel, da una sensibilità di misura della temperatura di  $0,03^{\circ}\text{C}$  e un range di valutazione tra  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $500^{\circ}\text{C}$ .

## 4.2 CARATTERISTICHE DEI RILIEVI IPERSPETTRALI

Il rilievo della superficie terrestre con sensore iperspettrale ha come obiettivo quello di indagare le proprietà del suolo e degli oggetti presenti su esso analizzando la radiazione solare riflessa. Il sensore cattura intervalli spettrali immediatamente adiacenti a quello del visibile, la radiazione ultravioletta e l'infrarosso.

L'acquisizione della radianza tramite sensore iperspettrale, integrata con le rilevazioni ottiche nel visibile (immagini aerofotografiche) e quelle laser (LiDAR), garantisce che l'identificazione degli elementi sul territorio sia la più accurata ed oggettiva possibile, e porta ad un innumerevole sviluppo di applicazioni.

I campi di applicazione sono molteplici:

- Agricoltura di precisione;
- Monitoraggio energetico civile
- Monitoraggio ambientale, geologico e marino
- Monitoraggio della biomassa in ambito forestale
- Supporto in campo archeologico
- Monitoraggio impianti fotovoltaici

### 4.2.1 AGRICOLTURA DI PRECISIONE

I droni stanno rivoluzionando l'agricoltura. I rilievi fotografici con termocamere e sensori ad infrarossi mostrano informazioni sulle coltivazioni mai viste in precedenza.

Se le termocamere vengono montate a bordo di droni si possono acquisire dati essenziali sulla salute della vegetazione e del suolo che permettono di massimizzare la resa dei raccolti risparmiando acqua, concimi e pesticidi (Fig. 56).



Fig. 56 - Drone equipaggiato con camera termica che sorvola un campo agricolo.

Questa tecnica viene chiamata agricoltura di precisione, è costituita da droni, multi sensori ad alta precisione e mappe tridimensionali che mostrano lo stato di salute di un campo da decine di ettari con errori di pochi centimetri.

I rilievi video-fotografici realizzati da droni sono molto più precisi e meno onerosi di quelli satellitari. I dati ottenuti in questo modo possono suggerire di irrigare meglio alcune porzioni di campo, indicare quali piante stanno crescendo meglio e quali hanno bisogno di essere concimate e altre informazioni essenziali.

Il Sensore termico inoltre è in grado di mostrare le piante sotto un altro aspetto, quelli infrarossi.

*“Nella luce infrarossa la vegetazione ha una maggiore riflettività rispetto ad altri oggetti. Questo grazie alla clorofilla, che fornisce un indice di vigore della vegetazione”* spiega Stefano Sgrella, amministratore di Salt & Lemon.

A seconda del colore rilevato dai sensori montati sui droni, si riesce a capire quali piante stanno crescendo meglio e quali, invece, sono più indietro. L'obiettivo è quello di avere un raccolto uniforme e della stessa qualità.

Le piante valutate più sane e forti non vengono più concimate, mentre su quelle più deboli viene fornita maggior cura. Questo permette di risparmiare fino al 30% del concime rispetto ad una normale attività agricola.

L'agricoltura di precisione permette di salvaguardare anche l'ambiente consentendo di dosare pesticidi e fertilizzanti chimici limitando l'utilizzo solo dove è effettivamente necessario.

Questo settore si sta rivelando di grande interesse in Italia, in particolare per la relativa semplicità dell'utilizzo dei droni in aree agricole considerate 'non critiche' in quanto disabitate e prive di infrastrutture (Martorana; 2015). A tal proposito l'ENAC ha emanato di recente un regolamento specifico per operare in aree rurali non critiche con i droni i cui punti fondamentali sono quelli di non poter superare i 70 metri di altezza e l'obbligo di manovrare il drone entro un raggio massimo di 200 metri.

#### 4.2.2 MONITORAGGIO IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Un impianto fotovoltaico è un impianto elettrico costituito da più moduli fotovoltaici che sfruttano l'energia solare per produrre energia elettrica. Negli ultimi anni si è assistito ad un boom di installazione di tali impianti in quanto sono in grado di generare energia gratuitamente e allo stesso tempo salvaguardare l'ambiente producendo elettricità da fonte di energia rinnovabile.

Diventa molto importante quindi la manutenzione di tali sistemi, che in alcuni casi raggiungono anche una grandezza considerevole.

L'utilizzo degli APR multi sensore risulta fondamentale in quanto è possibile effettuare indagini, ricerche di guasti e malfunzionamenti su impianti fotovoltaici di piccole e grandi dimensioni, installati sia a terra che su edificio, dove potrebbe essere pericoloso e dispendioso l'intervento umano.

I difetti che danno origine ai malfunzionamenti dei moduli fotovoltaici possono essere visibili ad occhio nudo come bolle, incrinature, ingiallimenti; oppure a difetti di fabbrica. L'uso di droni equipaggiati con termocamere consente di individuare e risolvere ogni tipo di malfunzionamento consentendo di operare solo sul singolo elemento difettoso (Fig. 57).

Un buon monitoraggio dei moduli risulta quindi cruciale per una tempestiva ed efficace manutenzione dell'impianto, così da ottenere le migliori prestazioni possibili.



Fig. 57 - Vista infrarossi di un impianto fotovoltaico. In rosa gli elementi difettosi.

#### 4.2.3 SALVAGUARDIA DELLE FORESTE

I droni possono essere utilizzati anche per la tutela della vegetazione delle foreste, attraverso le immagini termiche è possibile mappare i boschi e le foreste per poterne pianificare meglio la manutenzione.

Grazie agli APR diventa semplice raggiungere zone prima difficilmente accessibili dall'uomo. Questo permette di minimizzare i tempi per lo studio della salute forestale diminuendo i costi.

Oltre che per la manutenzione delle foreste, infatti, i droni possono essere utilizzati per altri compiti di tutela ambientale, come il monitoraggio della fauna o l'antincendio boschivo.

## 5 CASO DI STUDIO: CAMPO AGRICOLO CON ANOMALIE TERMICHE

L'area oggetto di studio è sita a Medolla, un comune di 6282 abitanti situato su un terreno alluvionale bonificato nella bassa Pianura Padana ed importante centro agricolo e industriale dell'area nord della provincia di Modena (Fig. 58, Fig. 59).



Fig. 58 - Posizione Geografica di Medolla all'interno della cartina nazionale (wikipedia, modificata).



Fig. 59 - Posizionamento territoriale all'interno della provincia di Modena (wikipedia, modificata).

In particolare la zona oggetto di studio è un campo agricolo all'interno del quale si sono presentate delle anomalie termiche dovute a fenomeni geologici e pedologici inusuali manifestatisi in seguito al terremoto dell'Emilia del 2012 che ha danneggiato gravemente Medolla attraverso principalmente due grandi scosse. La prima scossa di magnitudo 5.9 del 20/05/2012 con epicentro a Finale Emilia ha fatto crollare le chiese delle frazioni di Villafranca e Camurana e danneggiato gravemente la chiesa parrocchiale dei Santi di Senesio e Teopompo (Fig. 60).



Fig. 60 - Crollo della chiesa di Villafranca (emmeweb).

La seconda scossa di maggior livello, verificatasi il 29/05/2012 ha avuto come epicentro proprio Medolla e ha avuto effetti devastanti sulle industrie locali, distruggendo interi capannoni e aziende e provocando anche 6 vittime (Fig. 61).



Fig. 61 - Vigili del fuoco impegnati nelle ricerche dei dispersi dopo il crollo alla Haemotronic di Medolla (Il Resto del Carlino).

## 5.1 FENOMENI INUSUALI GEOLOGICI

Alcune delle emergenze geologiche, trascurate per decenni, sono ritornate alla ribalta a causa del rinnovato interesse per i fluidi sotterranei dovuto in seguito agli eventi sismici del 2012. Negli ultimi due anni sono pervenute una serie di segnalazioni nelle zone colpite dal sisma che riguardano diversi fenomeni geologici:

- Pozzi per acqua con presenza di acque calde;
- Fuoriuscite di gas dal terreno;
- Comparsa di vulcanetti di fango o sabbia;
- Presenza di fratture o sprofondamenti nel terreno;
- Il manifestarsi di questi eventi inusuali è dovuto alle caratteristiche del sottosuolo dell'Emilia Romagna.

Analizzando solo la superficie della pianura potremmo essere tentati di affermare che essa sia omogenea, ma in realtà se si studia più in profondità la stratigrafia del terreno ci si accorge che non è così. Il sottosuolo, al di sotto dei più recenti depositi del Po e dei fiumi appenninici, è costituito infatti da terreni più antichi fortemente deformati contenenti idrocarburi derivanti dalla decomposizione della materia organica che sono i maggiori responsabili degli eventi inusuali (Fig. 62).



Fig. 62 - Esempi di fenomeni geologici inusuali, a sinistra eruzione di un pozzo di idrocarburi, a destra una fuoriuscita di gas metano infiammabile (ambiente.regione-emiliaRomagna, modificata).

In alcune aree della pianura la materia organica, argille nerastre o frammenti di legno nel sedimento, è presente sin dai primi metri di profondità. Questi depositi organici, attraverso un processo chimico fisico, si decompongono e producono gas metano che quindi è presente sin dai primi metri di sottosuolo.

Solitamente gli idrocarburi non fuoriescono in superficie per via di strati impermeabili o poco permeabili che ne bloccano la risalita, a volte però la presenza di fratture o variazioni di permeabilità consentono la fuga esterna.

Le faglie e le fratture che dal sottosuolo si propagano fino alla superficie possono così costituire una sorta di via di fuga per gli idrocarburi che, quindi, possono affiorare al suolo in modo del tutto naturale.

In modo analogo possono arrivare in superficie anche acque di provenienza profonda che hanno temperature maggiori e presentano valori di salinità diversi rispetto a quelle usualmente captate dai pozzi per acqua (ARPA Emilia Romagna).

## 5.2 DESCRIZIONE AREA DI STUDIO

Il rilievo fotogrammetrico, eseguito tramite l'utilizzo di un drone, è stato effettuato per monitorare una porzione di campo agricolo avente un'area complessiva di circa 12000 metri quadri, situato qualche chilometro a Est rispetto al centro di Medolla (MO), più precisamente nella frazione di Corte Wegman.



Fig. 63 - Visione aerea dell'intera area oggetto di studio (Google maps).

Come si può notare dalla figura soprastante (Fig. 63), sono presenti 2 anomalie termiche di sviluppo non indifferente dovute alle attività sismiche manifestate nel terremoto del 2012 (INGV).

L'obiettivo del rilievo aereo è l'individuazione precisa del perimetro e della temperatura di quelle aree attraverso la mappatura termica del terreno, al fine di facilitare indagini geofisiche, geoelettriche e altri studi.



Fig. 64 - Logo Sal Engineering.

L'azienda che lo ha eseguito è la SAL – SEA AIR LAND ENGINEERING S.r.l. leader nella progettazione, produzione e commercializzazione di sistemi UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) e ROVs (Remotely Operated Vehicle) per l'acquisizione di dati in ambiente aereo, marino, terrestre e subacqueo (Fig. 64).

Gli apparecchi di cui dispone possono essere equipaggiati con qualsiasi tipologia di sensore o dispositivo fotografico.

Il sensore ha il compito di catturare la luce incidente tramite delle parti fotosensibili e, attraverso altre componenti, trasformarle in un segnale digitale.

### 5.3 IL RILEVAMENTO AEREO E IL SUO EQUIPAGGIAMENTO

Sulla porzione di territorio analizzata è stato pianificato un volo test allo scopo di analizzare il funzionamento del velivolo, su cui sono stati installati due sistemi di acquisizione, una camera di dimensione e peso ridotti a focale fissa e una termocamera ad infrarossi per l'acquisizione di immagini termiche.

Essendo un volo di prova, il drone ha compiuto una semplice ellisse attorno alle zone di interesse. Non è stato quindi progettato un volo seguendo le direttive classiche della fotogrammetria aerea.

Il rilevamento aereo ha una durata di 3 minuti considerando anche il tempo impiegato dallo strumento per il decollo e per l'atterraggio. È costituito da due strisciate in direzione longitudinale rispetto all'area sorvolata che rispettano la condizione di sovrapposizione laterale (sidelap) del 20%.

La partenza è stata realizzata da un pilota manualmente agendo su di una console radiocomandata. Al raggiungimento di una certa quota che viene definita dall'operatore, il velivolo diviene autonomo e segue la traiettoria pianificata, per poi tornare al controllo manuale nella fase di atterraggio (Fig. 65).



Fig. 65 - Schematizzazione traiettoria di volo. In rosso è riportato il punto di decollo e atterraggio.

L'operazione di volo fin qui descritta è stata ripresa a partire dalla fase di decollo sia con il sensore RGB che con quello termico. I filmati permettono l'estrazione di singoli frame a cadenza temporale costante in base alla velocità di volo, ottenendo un numero

di immagini molto elevato per facilitare l'approccio di orientamento e restituzione in automatico.

Durante la fase di trattamento del dato sono state memorizzate e trattate solo i frame relativi al volo stabilizzato in quota, non verranno quindi utilizzate le immagini della fase di decollo e atterraggio.

La geometria di presa vincola l'efficacia delle procedure di correlazione automatica quindi i fotogrammi acquisiti nelle fasi di decollo e di atterraggio sono stati scartati manualmente in fase di calcolo. I fotogrammi sono stati acquisiti in funzione della velocità di movimento del "drone" in modo da consentire una corretta sovrapposizione tra immagini successive. La percentuale di sovrapposizione, ottenuta dall'estrazione dei frame, sarà circa 80% relativamente a fotogrammi successivi (Fig. 66) e di circa il 20% relativamente a strisciate di fotogrammi contigue.



Fig. 66 - Accostamento di due fotogrammi successivi esportati dal filmato RGB.

### 5.3.1 DRONE UTILIZZATO PER IL RILIEVO - UAV ESAFLY A2500



Fig. 67 - Drone utilizzato per effettuare il rilievo della porzione di territorio.

Nel caso in esame lo strumento utilizzato è lo UAV ESAFLY A2500 (Fig. 67) prodotto dalla Sal Engineering composto da una struttura multirotrice a sei eliche in carbonio ad alta resistenza avente un peso, compreso di batterie di 3,300 kg e in fase di volo, nella quale si aggiunge il peso del payload, può raggiungere un peso massimo di 5,800 kg. L'altezza totale è di 30 cm e ha un diametro complessivo di 100cm. L'autonomia della batteria varia tra i 12 e i 20 minuti in funzione del tipo utilizzato e dalla peso al decollo. Il sistema illuminato che permette al pilota una guida più semplice è costituito da luci di posizione, luci led ad alta visibilità e dalla freccia direzionale installata sotto il braccio bianco, riportante il logo della ditta costruttrice, che individua il fronte del velivolo. È equipaggiato di un sistema GPS per la localizzazione spaziale e un sistema inerziale per il controllo d'assetto in collegamento con la Ground Control Station in modo da garantire un volo stabilizzato consentendo di mantenere la posizione e la traiettoria prevista in fase di progetto e facilitare il possibile rientro al punto di partenza sia in fase di atterraggio sia nel caso sorgano problemi tecnici quali perdita di segnale o scaricamento della batteria. Esiste la modalità di pilota automatico (autopilota) o manuale dalle quali è possibile passare in qualsiasi momento. Lo strumento per

l'acquisizione di fotogrammi o video è installato su un supporto a due o tre assi che permette un'ammortizzazione elettronica e meccanica della dell'inquadratura.

Attraverso la GCS (Fig. 68), grazie al software Mission Planner, è possibile pianificare il volo e, in tempo reale, controllarne i diversi parametri come l'altezza di volo, l'inclinazione degli assi del velivolo, il mantenimento della rotta e la potenza residua delle batterie entro un raggio complessivo di 5 km grazie ad un collegamento radio tra il drone e la stazione di controllo.



Fig. 68 - Ground Control Station Bag (Sal Engineering site, modificata).

Il dispositivo è stato equipaggiato con due apparecchi fotografici diversi in grado di fornire due tipologie di prodotto:

- Un filmato a colori ad alta risoluzione eseguito con una Action cam Gopro Hero 2;

- Un filmato termico avente una risoluzione più bassa eseguiti con una termocamera ad infrarossi Optris Pi450.

### 5.3.2 ACTION CAM GOPRO HERO 2

Le action cam rappresentano delle fotocamere o videocamere di piccole dimensioni e peso ridotto indossabili tramite accessori appositi resistenti ad urti e acqua.

Queste caratteristiche fisiche le rendono molto utili e comode per l'installazione su droni di piccole dimensioni che non dispongono di un peso di payload eccessivo.

Sono numerosi i modelli di action cam presenti sul mercato. Dalle più note GoPro, utilizzate nel nostro caso, alle Sony, Nilox, Garmin e molti altri.

Nel caso in esame è stata utilizzato una GoPro Hero 2 (Fig. 69), un dispositivo con assenza di comando zoom, quindi a focale fissa, e obiettivo grandangolare di 170 gradi di ampiezza. Registra i dati su scheda di memoria SD ed è alimentata attraverso una batteria al litio.

La camera è larga 60 mm, alta 40 e ha una spessore di 2 mm, a va aggiunto una sottile scocca di plastica molto resistente e impermeabile che la protegge dagli urti e dall'acqua. Il peso totale complessivo di videocamera, batteria e custodia è di solo 190 grammi.



Fig. 69 - Rappresentazione della GoPro Hero 2 con e senza custodia protettrice (wired, modificata).

Il modello HD Hero 2 può generare video in 1080p (Full HD) come risoluzione massima. È presente un sensore da 11 megapixel in grado di catturare fino a dieci foto a distanza di un secondo. Dispone di una porta USB, un'uscita HDMI con connettore di

tipo mini, un'uscita video composito, e ha disponibile un modulo aggiuntivo per trasmettere l'anteprima video via wi-fi a dispositivi tablet o smartphone.

Le foto e i video possono essere effettuati con qualità e risoluzioni anche minori in modo da occupare meno memoria (Fig. 70).

CARATTERISTICHE + CAMPO VISIVO - FOTO	
MEGAPIXEL	11, 8, 5 MP FOV largo (170°) FOV medio (127°)
MODI	Scatto Singolo ★ 10 foto al secondo ★ Scatto temporizzato ogni 0.5, 1, 2, 10, 30, 60 sec. Autoscatto
RISOLUZIONE - CAMPO VISIVO VIDEO	
1080p	1920×1080 FOV largo (170°) ★ Campo medio (127°) ★ FOV stretto (90°) 30fps
960p	1280×960 FOV largo (170°) ★ 48fps 30fps
720p	1280×720 FOV largo (170°) 30fps 60fps
WVGA	848×480 FOV largo (170°) ★ 120fps 60fps

Fig. 70 - Diverse possibilità di acquisizione di foto e video (GoPro site).

### 5.3.3 Termocamera Optris Pi450

La termocamera ad infrarossi installata sul drone è una OPTRIS Pi 450 (Fig. 71), rappresenta una perfetta scelta per l'impiego in tutti quei settori dove è richiesto un rilevamento termografico con controllo da remoto, come nel caso dei droni, in quanto è caratterizzata da dimensioni e peso ridotti rispetto alle altre presenti sul mercato. Per la precisione la sola termocamera ha una dimensione di 46x56x90, mentre con il NetBox è di 111x55x45 mm, il peso totale complessivo di lenti è di soli 350 g.

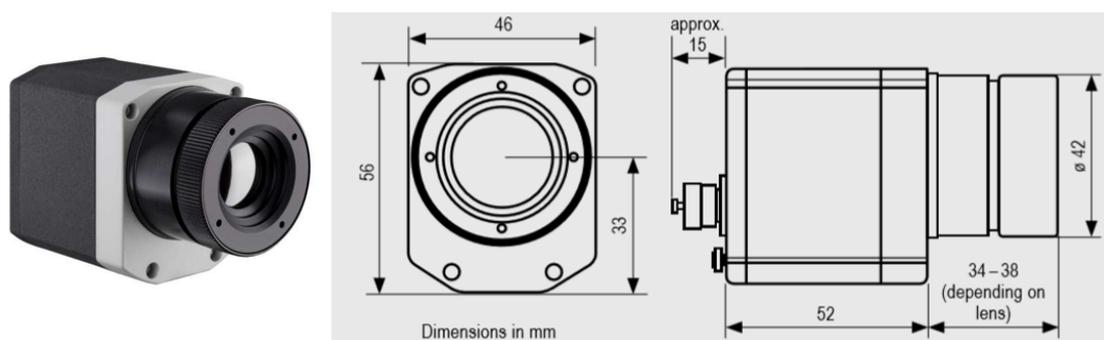


Fig. 71 - Termocamera OPTRIS Pi 450.

La termocamera Optris Pi450 è un sistema radiometrico per il rilevamento e la visualizzazione di immagini termiche e profili di temperatura degli oggetti da osservare. È uno strumento all'avanguardia di ultima generazione grazie all'interfaccia USB 2.0 che consente di effettuare termografie in tempo reale con 96 immagini al secondo e registrazioni sincroniche in tempo reale a 80 Hz. La termocamera offre anche una eccellente relazione qualità / prezzo e può essere utilizzata come strumento portatile o per l'installazione fissa. È possibile registrare immagini o video sequenze. La base della termocamera Pi450 è un micro-bolometro (strumento che misura l'intensità energetica di radiazione elettromagnetica) da 382 x 288 pixel. Gli obiettivi intercambiabili consentono l'adattamento alle dimensioni dell'oggetto e distanze differenti. L'eccellente sensibilità termica rende possibile la visualizzazione dei dettagli della temperatura. Pertanto la termocamera Pi450 è la soluzione ideale per applicazioni nel campo della ricerca e sviluppo, banchi di prova, automazione dei processi o attività sul campo. La termocamera si collega a un computer tramite un cavo USB ed è subito pronta per l'uso. I risultati sono trasferiti come immagini termiche al software Optris PI Connect incluso nel prezzo e dispone di una funzione linescanner per monitorare processi con oggetti in movimento. Con un peso di solo 320 g la termocamera Pi450 è straordinariamente

leggera ed è una delle termocamere più piccole al mondo. In combinazione con un Tablet PC la termocamera può essere utilizzata anche per la manutenzione preventiva o per la termografia degli edifici. Optris Pi450 riempie il vuoto esistente fino ad ora tra le termocamere a infrarossi portatili e gli strumenti per installazione fissa.

Di seguito è riportata la scheda tecnica completa della termocamera (Fig. 72).

Basic model		PI 400 / PI 450	
Type		IR	
Detector	FPA, uncooled (25 µm x 25 µm)	Accuracy	±2 °C or ±2 %, whichever is greater
Optical resolution	382 x 288 pixels	PC interface	USB 2.0 / optional USB to GigE (PoE) conversion
Spectral range	7.5–13 µm	Process interface (PIF)	Standard PIF 0–10 V input, digital input (max. 24 V), 0–10 V output
Temperature ranges	–20 °C ... 100 °C, 0 °C ... 250 °C, 150 °C ... 900 °C, additional range: 200 °C ... 1500 °C (option for PI 400)		Industrial PIF (optional) 2x 0–10 V inputs, digital input (max. 24 V), 3x 0–10 V outputs, 3x relays (0–30 V / 400 mA), fail-safe relay
Frame rate	80 Hz	Ambient temperature (T <sub>Umfg</sub> )	PI 400: 0 °C ... 50 °C / PI 450: 0 °C ... 70 °C
Lenses (FOV)	38° x 29° / f = 15 mm or 13° x 10° / f = 41 mm or 62° x 49° / f = 11 mm or 80° x 56° / f = 7.7 mm	Storage temperature	PI 400: –40 °C ... 70 °C PI 450: –40 °C ... 85 °C
		Relative humidity	20–80 %, non-condensing
		Enclosure (size/ rating)	46 mm x 56 mm x 90 mm / IP 67 (NEMA 4)
		Weight	320 g, incl. lens
Thermal sensitivity (NETD)	PI 400: 0.08 K PI 450: 0.04 K mit 38° x 29° FOV / F = 0.8 PI 400: 0.08 K PI 450: 0.04 K mit 62° x 49° FOV / F = 0.8 PI 400: 0.1 K PI 450: 0.06 K mit 13° x 10° FOV / F = 1.0	Shock/ vibration	Shock: IEC 60068-2-27 (25 g und 50 g) Vibration: IEC 60068-2-6 (sinus-shaped)/ IEC 60068-2-64 (broadband noise)
		Tripod mount	1/4 - 20 UNC
		Voltage supply	via USB

Fig. 72 - Scheda tecnica OPTRIS Pi 450.

### 5.3.4 TARGET TERMICO

Un normale rilievo topografico necessita di un sistema di riferimento per riuscire a posizionare i punti misurati in modo assoluto.

Lo stesso vale anche per un rilievo effettuato tramite termocamera. L'obiettivo è quello di rapportare la temperatura di determinati punti rispetto ad altri di cui se ne conosce il valore.

In alcuni casi durante il rilievo si analizzano oggetti o corpi cui ci sono presenti aree di cui se ne conosce il valore termico. Nel caso oggetto di studio non si hanno dei punti noti dei quali si conosce la temperatura, essendo stato fatto su una porzione di territorio agricolo.

Per questo motivo sono stati posizionati una serie di target termici (Fig. 73), dei dispositivi dotati di una batteria e di una resistenza elettrica che ne genera il loro surriscaldamento aumentandone la temperatura fino all'esaurimento della batteria.



Fig. 73 - Target termico posizionato sul campo agricolo.

Le coordinate di questi punti, essenziali per la georeferenziazione del modello, sono state misurate posizionando sopra al telaio del target un'antenna GPS collegata ad un ricevitore a doppia frequenza GPS-GLONASS Topcon GB500 (Fig. 74).



Fig. 74 - Ricevitore GPS-GLONASS TOPCON GB500 (png).

Lo strumento è dotato di una coppia di batterie interne al litio che consentono il funzionamento continuativo durante un'intera giornata di lavoro. Riceve segnali sia singola che doppia frequenza.

È fornito di tre porte seriali e un'unica uscita USB, essenziale per un immediato trasferimento di dati su un altro dispositivo.

Il GB-500 è un ricevitore GNSS con antenna esterna. Questo strumento si basa sulla scheda elettronica Topcon EURO 160T, che contiene il chip Paradigm e la memoria per i dati.

Il MINTER (Minimum INTERface) è una semplice interfaccia che consente di impartire comandi basilari al ricevitore senza usare per forza controller esterni. È dotato anche di led e tasti funzione che consentono all'utente di vedere il numero di satelliti tracciati ed avviare o interrompere la registrazione dati.

Come detto, a questo dispositivo viene collegata un'antenna (Fig. 75) esterna GNSS a doppia frequenza GPS-GLONASS TOPCON TPSPG A1 alla quale è impostato un angolo di cut-off tale che le permette di rifiutare tutti i segnali riflessi dall'area sottostante.



Fig. 75 -Antenna TOPCON PG-A1 (geoinstruments, modificata).

Questo è di fondamentale importanza, in quanto consente di attenuare il fenomeno del multipath, permettendo di ottenere maggiore precisione sulla misura dei punti.

Funziona in un range di temperature che vanno da  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+55^{\circ}\text{C}$  ed usa un connettore TNC.

Il piatto integrato aiuta ad eliminare errori causati dal multipath.

La PGA-1 riceve i segnali L1+L2 GPS/GLONASS, WAAS e EGNOS. Pesa 492 grammi ed ha una dimensione di 14.2 x 14.2 x 5.4 centimetri

Una volta che i due dispositivi vengono assemblati bisogna posizionare con cura l'antenna sopra al target termico cercando di farla coincidere il più possibile, a questo punto il ricevitore misurerà la posizione del centro di fase dell'antenna (Fig. 76).

Questo consente di disporre di Punti Fotogrammetrici d'Appoggio (PFA) per la georeferenziazione dei prodotti ottenuti dal calcolo.

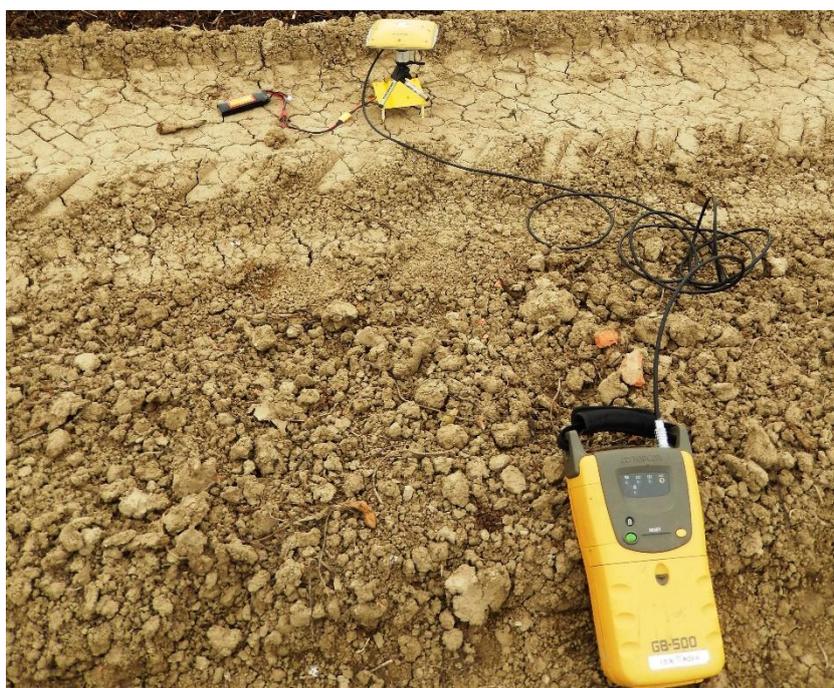


Fig. 76 - Rilevamento della posizione del target attraverso il ricevitore e l'antenna satellitare TOPCON.

Ad ogni target è stata attribuita una sigla di riconoscimento.

I target posizionati sono in tutto 5 (Fig. 77) e sono stati inseriti in corrispondenza delle due anomalie termiche. I primi 4 circondano la prima macchia che si incontra partendo dal punto del decollo/atterraggio (anomalia 1), il quinto invece precede la seconda macchia posta in corrispondenza dell'inversione di rotta del drone (anomalia 2):

- rovN1007**b**\_91Q8 [b]: posizionato in alto a sinistra rispetto all' anomalia 1
- rovN1007**c**\_91Q8 [c]: posizionato in alto a destra rispetto all'anomalia 1
- rovN1007**d**\_91Q8 [d]: posizionato in basso a destra rispetto all'anomalia 1

- rovN1007e\_91Q8 [e]: posizionato in basso a sinistra rispetto all'anomalia 1
- rovN1007f\_91Q8 [f]: posizionato nel tratto di campo tra le due macchi decentrato verso l'anomalia 2

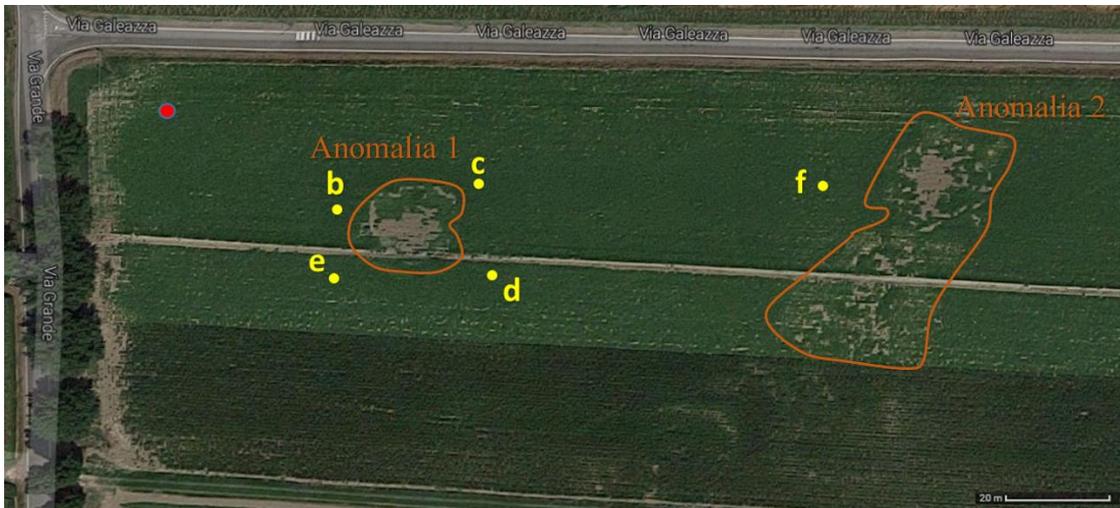


Fig. 77 - Vista satellitare del campo. In giallo sono indicati i target termici e in rosso il punto di decollo/atterraggio.

Il sistema ufficiale di riferimento del GPS è un sistema geocentrico globale associato all'ellissoide WGS84 (World Geodetic System 1984). Usando un ricevitore satellitare le coordinate o le componenti della base sono automaticamente riferite a questo sistema. La terna cartesiana relativa a tale sistema è così composta:

- Ha origine nel centro di massa “convenzionale” della Terra
- Asse Z diretto come l'asse di rotazione terrestre passante per il polo nord;
- L'asse X passante per il meridiano di Greenwich, formato dall'intersezione tra il piano meridiano di riferimento e il piano equatoriale;
- L'asse Y scelto in modo tale da formare una terna destrorsa ovvero tale che un osservatore posto lungo l'asse Z veda l'asse X sovrapporsi a Y con moto antiorario.

La progettazione delle misure GPS è basata su diversi fattori. Devono essere scelti il sito di misura (non devono esserci ostacoli, superfici riflettenti e campi elettromagnetici), la finestra di osservazione (in funzione del numero di satelliti disponibili e della loro configurazione geometrica) e la durata della sessione (legata alla lunghezza della base, tipo di ricevitore utilizzato, satelliti visibili) (Tabella 2).

Posizionamento	Lunghezza delle basi	Tempi di stazionamento	Intervallo di campionamento
Statico	< 10km	1 h	15-30s
	10-30 km	3-4 h	
	>30 km	>4 h	
Statico Rapido	<20 km	15-20 <u>min</u>	1-5 s
Cinematico con post elaborazione	<20 km	<1 <u>min</u>	1s
RTK in singola base	<20 km	< 10s	1s
RTK con correzioni di rete	<50 km	< 10s	1s

Tabella 2 - Tipologie di misura.

In questo determinato caso è stato utilizzato un rilievo di tipo RAPIDO- STATICO.

Si sono utilizzati due ricevitori GNSS. Il primo (Master) durante il rilievo è rimasto fermo su di uno stesso punto geodetico, opportunamente materializzato nell'area test. Il secondo ricevitore è stato messo in acquisizione per circa 10 minuti in sequenza sui punti fotogrammetrici di appoggio.

Il calcolo delle coordinate è stato realizzato mediante un software commerciale della Trimble (Trimble Total Control) differenziando le osservazioni acquisite in modalità singola base, utilizzando le osservazioni contemporanee della stazione IGS di Modena, con coordinate ETRS08 mantenute fisse durante il calcolo.

Le coordinate geocentriche sono state trasformate automaticamente dal software in cartografiche UTM mantenendo la quota ellissoidica.

Di seguito vengono riportare le coordinate nel sistema di riferimento geodetico globale e le temperature misurate (Tabella 3).

Sigla Target Termico	Coordinate WGS 84			Temperatura
	Latitudine	Longitudine	Quota	
b	4974168,06	190712,3112	61,35735	36,5
c	4974160,235	190742,2368	61,27548	37,1
d	4974137,233	190732,891	61,25257	39,1
e	4974155,547	190702,0762	61,23074	56,1
f	4974118,498	190795,7779	61,02326	39,1

Tabella 3 - Lista coordinate UTM dei PFA, coordinate in metri, Temperature in °C.



# 6 TRATTAMENTO DEL DATO

L'intero procedimento descritto di seguito è stato effettuato inizialmente solo con l'utilizzo di software gratuiti open source, successivamente lo stesso prodotto è stato ricavato in un ambiente low-cost per confrontarne le caratteristiche.

Seguendo i passaggi che verranno descritti è possibile ottenere un modello georeferenziato a valenza metrica di cui sono note le coordinate e le temperature dei punti che lo formano, usando solo software gratuiti e quindi accessibili a chiunque. La potenza del metodo di rilievo è legata al tempo tecnico entro il quale si riescono ad ottenere questo tipo di informazioni.

## 6.1 FILMATO A COLORI OTTENUTO CON GOPRO HERO 2

### 6.1.1 OBIETTIVO CON GRANDANGOLO

Il drone ESAFLY A2500 è stato equipaggiato con GoPro Hero 2 che ha ripreso tutto il volo, dal momento del decollo a quello dell'atterraggio.

Il filmato generato ha una risoluzione full HD 1920x1080 e una durata di 2:43 minuti. Il formato di memorizzazione è MP4 di dimensione 391 MB, mentre la frequenza dei fotogrammi (frame rate) è di 30 fps (fotogrammi per secondo).

La GoPro è munita di un obiettivo grandangolare con lente sferica che consente un angolo di ripresa (Field Of View) più ampio rispetto alle normali ottiche in commercio. La caratteristica principale di questi obiettivi è la breve lunghezza focale che di norma è inferiore a 50 mm, che appunto consente riprese con FOV maggiore di ottiche con focale più lunga.

Offrono una maggior profondità di campo aumentando la zona dell'immagine in cui gli oggetti appaiono nitidi e focalizzati, infatti uno dei vantaggi dell'obiettivo grandangolare è anche quello di permettere una facile messa a fuoco della foto.

Il grandangolare crea un'illusione ottica dovuta alla prospettiva allargata che distorce la dimensione relativa degli oggetti e fa sì che gli stessi sembrino più lontani fra loro.

Quelli più vicini all'obiettivo sembrano insolitamente grandi mentre tutto quello che si trova in secondo piano appare molto più piccolo di quanto percepito dall'occhio umano.

Un aspetto fondamentale è la distorsione molto accentuata che crea l'obbiettivo grandangolare della GoPro dovuto alla lente sferica, comunemente chiamata fish-eye.

Come si può notare dalla Fig. 78 la distorsione è abbastanza accentuata sulla strada e in parte è presente anche sul campo. Infatti essendo una distorsione radiale del tipo barilotto è minore al centro e maggiore verso i bordi.



Fig. 78 - Immagine scattata con una GoPro in cui si nota molto bene la distorsione radiale.

Questa distorsione è necessario eliminarla se si vogliono ottenere delle immagini calibrate per la creazione del modello tridimensionale.

### 6.1.2 ELABORAZIONE DEL DATO – ELIMINAZIONE DISTORSIONE

Sono disponibili alcuni software specializzati nell'elaborazione fotografica, come Adobe Photoshop, oppure prodotti direttamente dalle varie case fotografiche in cui sono implementati algoritmi specifici che permettono la rimozione di questo effetto.

GoPro mette a disposizione gratuitamente un software di editing fotografico chiamato GoPro Studio attraverso il quale è possibile, in pochi passaggi, ottenere la calibrazione di singole immagini, gruppi di immagini e interi filmati.

Proprio l'ultima funzione è quella che verrà utilizzata in questo caso.

Una volta lanciato GoPro Studio, durante la prima fase di importazione e conversione, la prima cosa da fare è importare il file da trattare, successivamente si seleziona la porzione di video da trattare e applicando un comando viene eliminata la distorsione da tutti i frame che generano il filmato. Infine dal video rettificato si estraggono i singoli frame necessari per la restituzione fotogrammetrica.

Importato il video, si apre nella finestra centrale il filmato con i classici comandi di riproduzione presenti in qualsiasi lettore multimediale e altre funzioni particolari come ad esempio *Mark In* e *Mark Out* () che permettono di selezionare la parte di filmato che ci interessa trattare.

In questo caso sono state eliminate le due fasi di decollo e atterraggio lasciando solo la porzione di video nel quale il drone ha raggiunto una quota il più possibile stabile.

La fase di stabilizzazione in quota comincia al 40° secondo e termina al minuto 2'32", di conseguenza la durata di volo utile per il rilievo è di 1'52".

Sempre nella fase di importazione e conversione Fare clic su *Advanced Setting* (Fig. 79). Si apre una finestrella con alcuni parametri di trasformazione del filmato:

- *Image size*: 1920x1080
- *Frame rate*: 30 fps
- *File format*: AVI
- *Remove Fisheye*: selezionato

A questo punto bisogna rimuovere l'effetto fisheye per applicare una "regolazione lente" al file GoPro e ottenere un FOV più piccolo. Si fa clic su OK, si aggiunge il video all'elenco di conversione e poi si converte il video.

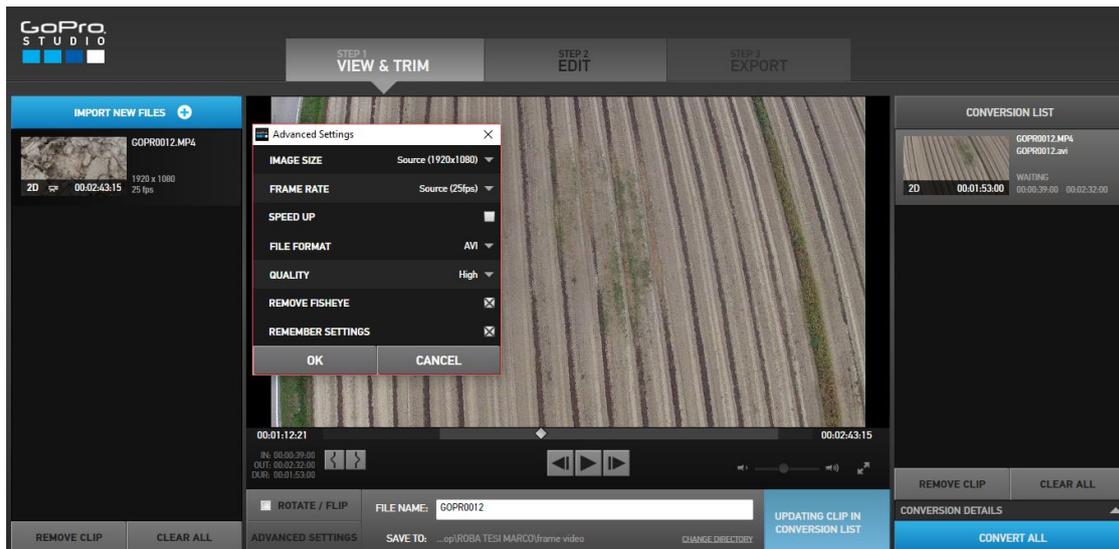


Fig. 79 - Schermata video della fase importazione e conversione di GoPro Studio.

### Fig.. – Schermata video della fase importazione e conversione di GoPro Studio

La rimozione dell'effetto fisheye e quindi della distorsione radiale e tangenziale viene effettuata utilizzando il modello di calibrazione di Bröwn (1966), il quale è implementato all'interno dell'algoritmo del comando sopra descritto. Le componenti di errore sistematico imposte dall'obiettivo al momento della presa sono valutabili attraverso delle funzioni polinomiali, ottenute aggiungendo al modello di collinearità 5 parametri di distorsione ( $k_1, k_3, k_5, p_1, p_2$ ).

Quello che si ottiene sono le coordinate immagine corrette alle quali sono state eliminate le deformazioni radiali e tangenziali. Si ottengono dalle seguenti relazioni:

$$\begin{cases} x = \hat{x} + dx_r + dx_t \\ y = \hat{y} + dy_r + dy_t \end{cases} \quad (20)$$

Dove:

- $x$  e  $y$  sono le coordinate corrette dagli effetti sistematici indotti dalle distorsioni radiali e tangenziali;
- $\hat{x}$  e  $\hat{y}$  sono le coordinate affette dagli errori legati alle distorsioni delle lenti;
- $dx_r$  e  $dy_r$  sono gli errori prodotti dalle distorsioni radiali;
- $dx_t$  e  $dy_t$  sono gli errori prodotti dalle distorsioni tangenziali.

Le distorsioni radiali e tangenziali valutate attraverso il modello di Bröwn sono:

$$d_r = k_1 r^3 + k_3 r^5 + k_5 r^7 + \dots \quad (21)$$

Dove  $r$  è la distanza radiale tra il punto immagine e il Punto di Migliore Simmetria e  $k_1, k_3, k_5$  sono i parametri di distorsione radiale delle lenti.

$$\begin{aligned} dx_t &= [p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2xy](1 + p_3r^2 + \dots) \\ dy_t &= [p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1xy](1 + p_3r^2 + \dots) \end{aligned} \quad (22)$$

Dove  $r$  è la distanza radiale tra il punto immagine e il Punto di Migliore Simmetria e  $p_1, p_2$  sono i parametri di distorsione tangenziale delle lenti.

Sulla base delle relazioni analitiche espresse precedentemente, l'intero filmato acquisito con la camera digitale è stato rettificato, minimizzando le aberrazioni geometriche principali.

Di seguito in (Fig. 80) è riportato un frame estratto dal video prima e dopo il processo di eliminazione delle distorsioni. Si nota subito come l'effetto distorsivo a barilotto è stato completamente eliminato una volta applicato la trasformazione di Bröwn. L'immagine sarà priva della distorsione tuttavia sarà ingrandita sui bordi, di conseguenza in questa zona si avrà a risoluzione minore rispetto alla zona centrale che continuerà a mantenere la definizione originale.



Fig. 80 - Differenza tra frame originale (in alto) e calibrato (in basso).

### 6.1.3 ELABORAZIONE DEL DATO – ESTRAPOLAZIONE SINGOLI FRAME

Una volta terminato il processo di conversione si passa alla fase 2 di Editing (Fig. 81) nella quale è possibile applicare una serie di effetti grafici volti ad eliminare i difetti delle immagini originali e a migliorarne le caratteristiche radiometriche. In questa fase è possibile esportare singoli frame del video rettificato, dal quale è stata rimossa la distorsione, ottenendo così le immagini calibrate da utilizzare per la fase di Image Matching successiva.

Per farlo si seleziona il filmato e ci si posiziona sul frame interessato usando i comandi di riproduzione oppure i tasti freccia della tastiera. Dopodiché dal menù a tendine *File* si seleziona *export / still image* e si esporta l'immagine con la risoluzione desiderata in formato JPEG. Per facilitare l'operazione si può usare il comando rapido *CTRL+SHIFT+E*.

Per avere un alto numero di punti omologhi in grado di generare una nuvola di punti il più denso possibile sono stati memorizzati i frame relativi ad ogni secondo, ottenendo così 113 elementi.

Una volta che viene fatto partire il comando si apre una finestra di selezione nella quale bisogna impostare la risoluzione con cui si vuole esportare il frame. In questo caso è stata selezionato “*Actual Size*” che fornisce l’immagine con maggiore qualità.

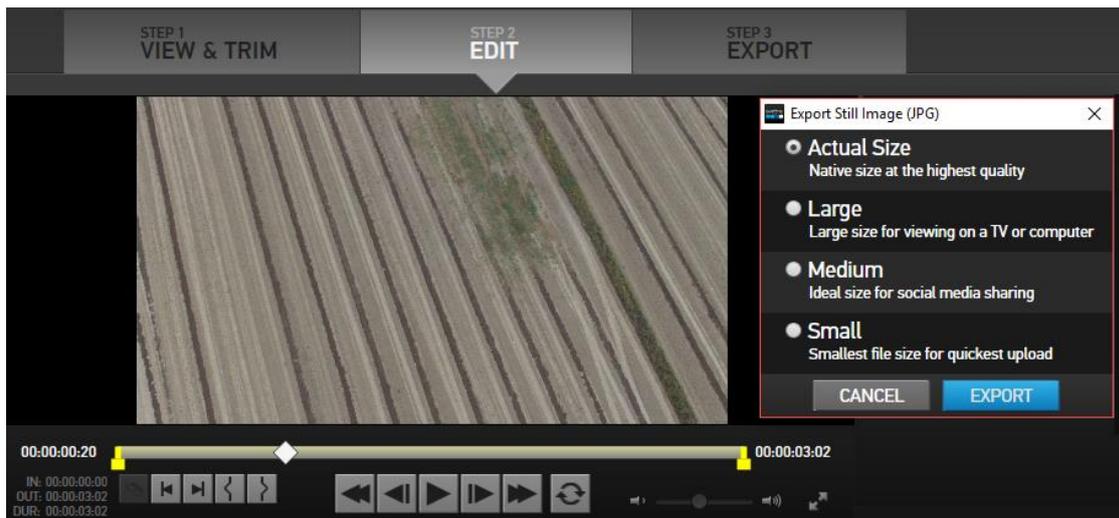


Fig. 81 - Schermata video della fase EDIT di GoPro Studio. È stato posizionato il cursore romboidale in corrispondenza del secondo nel quale si vuole esportare il frame. A destra la finestra *Export Still Image* permette di scegliere la qualità dell’immagine esportata.

Nel caso si volesse memorizzare il video calibrato si passa all’ultima fase di esportazione nella quale può essere scelta la qualità del prodotto finale.

## 6.2 IMMAGINI TERMICHE OTTENUTE CON TERMOCAMERA AD INFRAROSSI OPTRIS PI450

Attraverso l'utilizzo della termocamera ad infrarossi è stato acquisito un filmato termico nel quale sono stati rilevati i valori radiometrici di grigio relativi all'oggetto inquadrato dall'obbiettivo.

Il video viene memorizzato in un formato speciale creato appositamente dalla OPTRIS, il quale può essere riprodotto, analizzato ed elaborato solamente attraverso un software specifico fornito direttamente dalla marca produttrice dello strumento.

Il formato in questione si chiama “.RAVI” e caratterizza un file video costituito da sequenze radiometriche prodotto attraverso i dispositivi OPTRIS Pi.

Il software in grado di analizzare file .RAVI si chiama “OPTRIS Pi CONNECT” e permette di esportare singoli frame dal filmato.

In totale le immagini memorizzate dall'inizio del decollo fino all'atterraggio sono 117, quindi sono state acquisite ad una cadenza diversa rispetto a quelle estrapolate del video della GoPro.

Di queste immagini solo 93 sono state ritenute adatte per la creazione del modello tridimensionale, prime 14 relative alla fase di decollo e stabilizzazione in quota e le ultime 7 della fase di atterraggio sono state cestinate.

### 6.2.1 CONVERSIONE FORMATO IMMAGINE – DA CSV A TXT CON VALORI DELIMITATI DA TABULAZIONI

Le immagini sono state inizialmente acquisite in un formato tabellare di Excel CSV (comma-separated values), nel quale è riportata la matrice che descrive la foto, in cui per ogni pixel è associato il suo valore radiometrico di temperatura. La matrice ha la stessa dimensione della risoluzione del fotogramma, 392 colonne e 288 righe.

Per riuscire a visualizzare ed analizzare i contenuti dell'immagine vera e propria con ImageJ, un software open source di elaborazione digitale di immagini sviluppato dal

National Institutes of Health degli Stati Uniti programmato in JAVA (6.2.3), bisogna seguire una serie di passaggi per la trasformazione del formato.

Innanzitutto bisogna ottenere delle immagini in formato testo “.TXT” facilmente ottenibili direttamente utilizzando Excel salvando con nome l’immagine considerata utilizzando il formato “Testo (con valori delimitati da tabulazioni)”.

In questo modo si ottiene un file simile al precedente come contenuto, ma riproducibile da qualsiasi editor di testo per l’elaborazione di testi semplici come “Blocco Note”.

Questo procedimento è sì semplice ma inappropriato in molti casi, specialmente dove la mole di dati da convertire risulta essere di una certa entità.

Per risolvere il problema di trasformazione di grandi quantità di file in un unico passaggio si è adottato un software di nome “TOTAL CSV CONVERTER” (Fig. 82) che permette la conversione in blocco di grosse quantità di file CSV in molti formati tra cui PDF, DOC, HTML e appunto TXT.

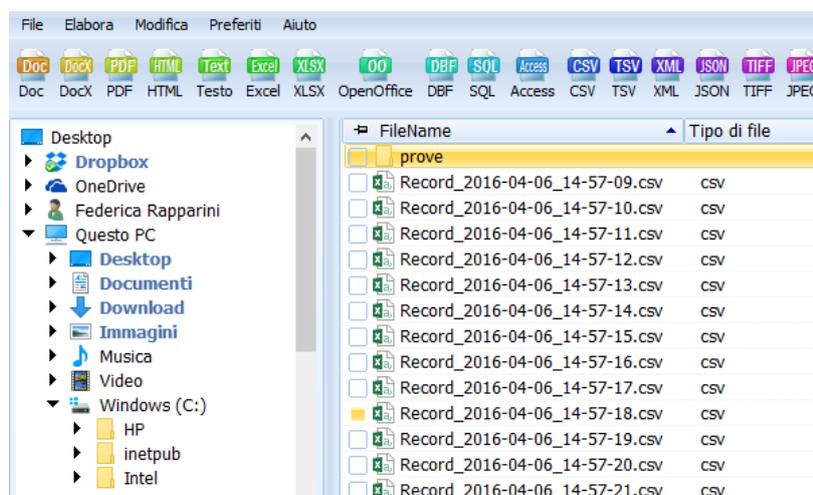


Fig. 82 - Schermata di visualizzazione iniziale di Total CSV Converter. In alto sono riportati tutti i tipi di formato che il software è in grado di trattare e convertire. Sono presenti due finestre principali, a sinistra bisogna selezionare il percorso nel quale sono contenuti i dati da analizzare, i quali vengono evidenziati nella finestra di selezione a destra che consente di scegliere i singoli file da convertire.

Bisogna caricare la cartella con all’interno file di cui si vuole fare la trasformazione e si selezionano e si sceglie il formato di conversione nella barra superiore, in questo caso

testo (  ). Si apre una finestra di salvataggio in cui viene richiesto la cartella di destinazione, una volta scelta si fa partire la conversione in blocco.

Si ottengono immagini testo con valori separati da tabulazioni.

## 6.2.2 CONVERSIONE FORMATO IMMAGINE – DA TXT CON VALORI DELIMITATI DA TABULAZIONI A ;

I file appena ottenuti non sono ancora compatibili con ImageJ, il quale richiede che i valori dell’immagine testo siano separati da dei “punti e virgola” e non da tabulazioni.

Anche in questo caso si può semplicemente aprire con Blocco Note ogni singolo file e sostituire al “Tab” il “punto e virgola” ma risulta un’operazione molto lunga.

Si può utilizzare un software gratuito di nome “Ecobyte Replace Text” (Fig. 83) molto utile che permette l’individuazione, e l’eventuale sostituzione, di singoli caratteri o parole in più file testo contemporaneamente.

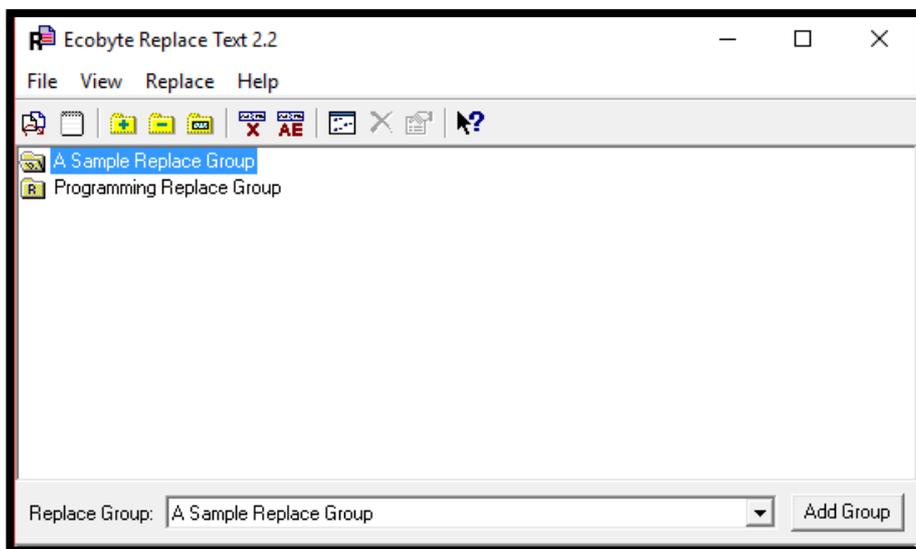


Fig. 83 - Schermata di visualizzazione iniziale di Ecobyte Replace Text.

È necessario creare un gruppo all’interno del quale possono essere inseriti singoli file o intere cartelle.

Dopodiché si procede con la fase di sostituzione, cliccando sul comando *Advanced edit* () si apre una finestra divisa in due parti. A sinistra bisogna immettere il carattere da ricercare in tutti i file selezionati in precedenza (“TAB”) e a destra il carattere da sostituire (“;”).

Infine si fa procedere con la sostituzione cliccando sul comando *Start Replacing* () con la quale si ottengono immagini testo i cui valori sono separati da “punti e virgola”.

### 6.2.3 CONVERSIONE FORMATO IMMAGINE – DA TXT A JPG

Per completare il processo di conversione ed ottenere immagini in scala di grigi che rappresentino il frame estrapolato dal video è stato utilizzato il software ImageJ.

ImageJ è un software open source, programmato in JAVA, di elaborazione digitale di immagini sviluppato dal National Institutes of Health degli Stati Uniti. Nasce con l’obiettivo di emulare le funzionalità dei più comuni software commerciali per l’image processing.

Può essere eseguito su differenti piattaforme: sia sotto forma di applet (Online) sia sotto forma di applicazione JAVA su qualsiasi computer su cui sia installata la Java Virtual Machine versioni 1.1 o successive.

Consente di visualizzare, modificare, analizzare, processare, salvare e stampare immagini a 8-bit, 16-bit e 32-bit. I Formati supportati sono TIFF, JPG, GIF, BMP, DICOM, FITS e “text image”.

ImageJ offre anche la possibilità di calcolare l’area e le statistiche sui valori dei pixel relativamente a delle regioni di interesse selezionate dall’utente. È inoltre possibile misurare distanze e angoli, plottare grafici e istogrammi e supporta le più comuni trasformazioni geometriche come scaling, rotazione e operazione di zooming.

La distribuzione più recente di ImageJ può essere scaricata dal sito <https://imagej.nih.gov/ij/download.html> nel quale è possibile scegliere tra due modalità di installazione:

- “Modalità Utente”: se si vuole utilizzare ImageJ in maniera standard cioè come un software per l’Image Processing;
- “Modalità Sviluppatore”: se si vuole estendere ImageJ mediante l’implementazione di plugins.

Avviando il software compare una finestra (Fig. 84) contenente una barra dei menu, una barra degli strumenti, una barra di stato.

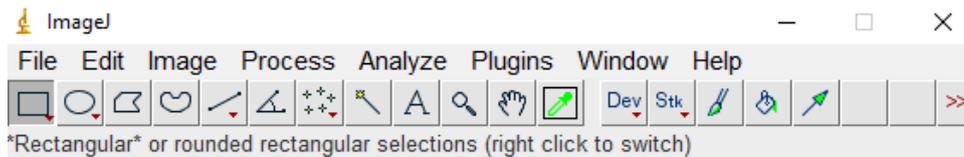


Fig. 84 - Finestra principale di ImageJ.

La barra degli strumenti (Fig. 85) contiene gli strumenti per effettuare selezioni, operazioni di zooming e scrolling su immagini, per cambiare i colori, etc . Cliccando su un particolare strumento viene visualizzata la descrizione ad esso relativa nella barra di stato.



Fig. 85 - Barra degli strumenti ImageJ.

Di seguito viene riportata una breve descrizione di alcuni degli strumenti disponibili:

- *Rectangle Selection tool*  : consente di effettuare selezioni rettangolari. Tenendo premuto il tasto shift è possibile selezionare quadrati; inoltre premendo i tasti freccia e contemporaneamente il tasto alt è possibile variare le dimensioni della selezione. La locazione e le dimensioni della selezione sono visualizzate nella barra di stato.
- *Polygon Selection tool*  : consente di effettuare selezioni di forma irregolare. Per creare una selezione bisogna cliccare ripetutamente con il mouse per disegnare i lati del poligono. Alla fine si clicca sul piccolo box in corrispondenza del punto iniziale e ImageJ automaticamente disegna l’ultimo segmento mancante.

- *Freehand Selection tool*  : consente di effettuare selezioni di forma irregolare trascinando (dragging) il mouse.
- *Wand Selection tool*  : consente di effettuare selezioni di oggetti di colore uniforme o sogliati all'interno di una immagine.
- *Straight Line Selection tool*  : consente di creare una linea retta. Tenendo premuto il tasto alt è possibile specificare la direzione (orizzontale o verticale) della linea.
- *Magnifying Glass tool*  : consente di effettuare operazioni di zooming sull'immagine. Un doppio click sull'icona del tool consente di riportare l'immagine alle dimensioni originali 1:1. Il livello di zooming corrente è mostrato nella barra del titolo dell'immagine. Vi sono 11 possibili livelli di zooming: 1:32, 1:16, 1:8, 1:4, 1:2, 1:1, 2:1, 4:1, 8:1, 16:1 e 32:1.

Oltre ad elaborare tutti i formati sopra descritti è possibile importare immagini testo accendendo dalla barra dei menu al menu file e cliccando su *import/Text Image* (Fig. 86).

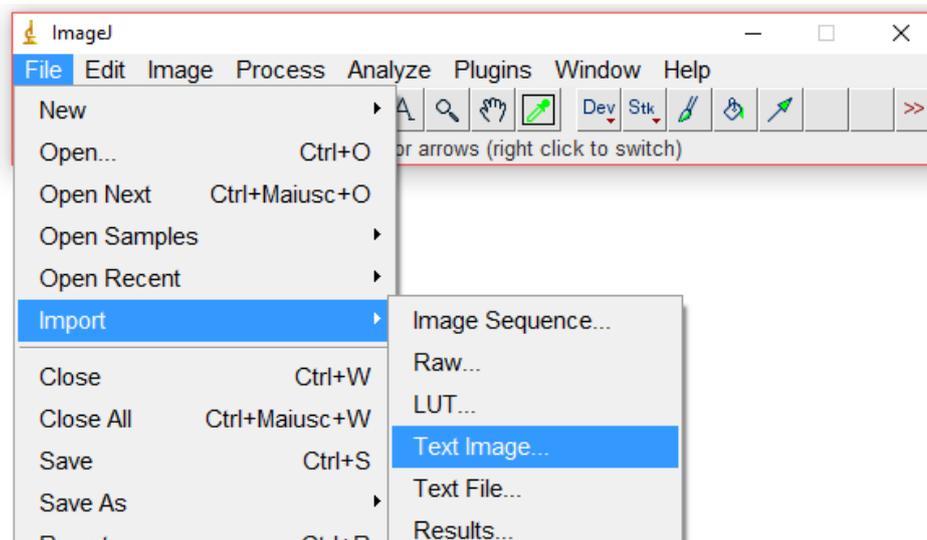


Fig. 86 - Processo di importazione di immagine testo.

Il software in automatico fornisce un'immagine in scala di grigi nella quale ogni valore radiometrico associato al singolo pixel viene rappresentato da una tonalità di grigio. A stessi valori radiometrici vengono assegnati stesse gradazioni, in particolare

a temperature più alte la tonalità è più tendente al bianco mentre a valori minori di temperatura viene associato un colore più nero.

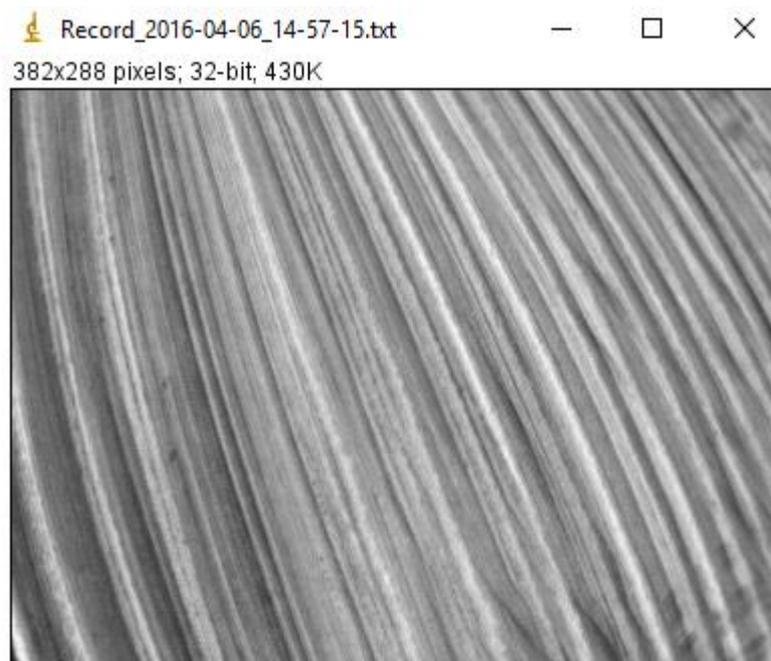


Fig. 87 - Visualizzazione in scala di grigi di un immagine testo importata su ImageJ.

Passando con il cursore sopra all'immagine è possibile leggere nella barra di stato le coordinate immagine e il corrispondente valore radiometrico caratteristici del pixel selezionato. Come si può notare nella figura sopra (Fig. 87) nella finestra che si apre contenente la foto in scala di grigi è riportata anche la risoluzione (382x288) e il tipo (32-bit) di immagine generata.

Per ottenere il dato in formato JPEG o altri tipi di formato immagine compatibili con il programma è sufficiente salvare con nome dal menu file della barra dei menu.

ImageJ permette anche di effettuare conversioni di blocco di più file, essenziale quando la mole di dati da trasformare è significativa come in questo caso.

Dal menu a tendina *Process* della barra dei menu si seleziona *Batch / Convert* (Fig. 88).

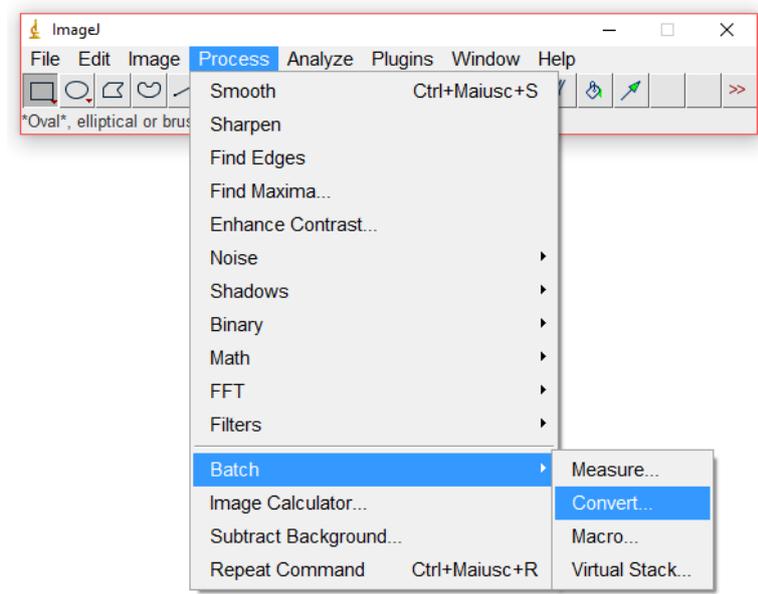


Fig. 88 - Conversione formato immagine.

Si apre una nuova finestra da dove si seleziona la cartella di Input contenente i file da trasformare e la cartella di output dove esportare il dato trasformato nei vari formati possibili.

Partendo da un immagine testo in formato CSV sono state create delle rappresentazioni grafiche .jpg in scala di grigi rappresentanti i valori radiometrici assegnati ai pixel della matrice costituente il dato iniziale.

Riassumendo le fasi affrontate sono:

- Conversione file da .csv a .txt effettuato con Total CSV Converter;
- Sostituzione del separatore di valore di valore “tab” con “punto e virgola” con Ecobyte Replace Text;
- Salvataggio immagine in formato .jpg utilizzando ImageJ.

#### 6.2.4 CALIBRAZIONE IMMAGINI TERMICHE

Come per quanto fatto nei fotogrammi a colori scattati con la GoPro anche le immagini termiche devono essere sottoposte ad un processo di calibrazione per l'eliminazione delle distorsioni impresse dall'obiettivo nel momento della presa. Le immagini termiche sono state trattate come immagini in toni di grigio nelle quali il valore radiometrico è rappresentato da un valore specifico di temperatura.

La procedura di rettifica delle singole immagini è stata realizzata, per quanto riguarda la camera GoPro Hero 2 utilizzando i parametri di calibrazione standard forniti dalla casa costruttrice che erano implementati all'interno del software GoPro Studio, mentre le immagini ottenute con la camera termica sono state rettificate utilizzando i dati di calibrazione forniti dalla SAL Engineering, che preventivamente si è occupata della calibrazione della camera.

In ogni caso esistono software specializzati nel calcolo dei parametri di calibrazione relativi allo strumento impiegato per l'acquisizione delle immagini di cui si vuole eliminare la distorsione, tra cui *Camera Calibration Toolbox for MatLab* e *Calib3V*, che vengono descritti di seguito.

##### 6.2.4.1 *Camera Calibration Toolbox for MatLab*

Il software MATLAB (abbreviazione di Matrix Laboratory) è un programma per l'analisi statistica e il calcolo numerico che permette di manipolare matrici, implementare algoritmi, visualizzare funzioni e dati, creare interfacce utente, e interfacciarsi con altri programmi.

Il campo di applicazione di Matlab è ulteriormente estendibile grazie ai toolbox, raccolte di funzioni e interfacce Matlab, con i quali è possibile affrontare in modo più specifico problemi tecnici di qualsiasi tipo, come l'elaborazione di segnali o appunto il processamento di immagini.

Camera Calibration Toolbox for MatLab è gruppo di routine che consente di calibrare in serie un gruppo di immagini e correggerle dalla distorsione, creando altre immagini, rettificate. Viene fornito un reticolo calibrato, stampabile, da fotografare con lo strumento con il quale sono state scattate le immagini da calibrare che, tramite una serie

di passaggi di seguito descritti, permette di calcolare i parametri di distorsione da applicare alle immagini.

Può funzionare per tutte le versioni di MatLab da MatLab.5 a MatLab.8 sulle piattaforme Windows e Linux.

Una volta scaricato, per poter utilizzare tutte le funzione contenute nel toolbox, bisogna aggiungere la cartella ottenuta all'interno del *seth path* di MatLab cliccando sul comando apposito (  Set Path ) il quale apre una finestra che consente di aggiungere la cartella.

A questo l'algorithmo è completamente funzionabile, e per far partire la funzione di calibrazione bisogna scrivere nella command window il comando "calib" che fa apparire una schermata di selezione rappresentata in Fig. 89.

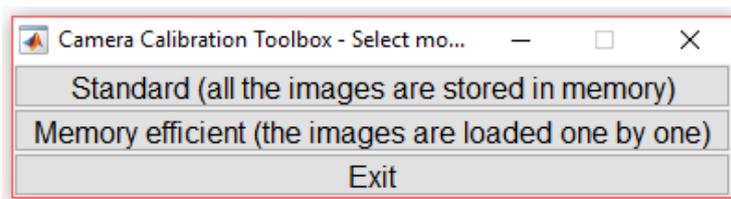


Fig. 89 - Schermata principale della toolbox di calibrazione.

Questa permette di poter scegliere tra due modalità di operazione, la standard e la Memory efficient da utilizzare nel caso in cui la mole di immagini da calibrare risulta molto alta.

Cliccando sulla modalità standard compare un'altra finestra (Fig. 90) di selezione nella quale sono riportate tutte le funzioni disponibili nel toolbox.

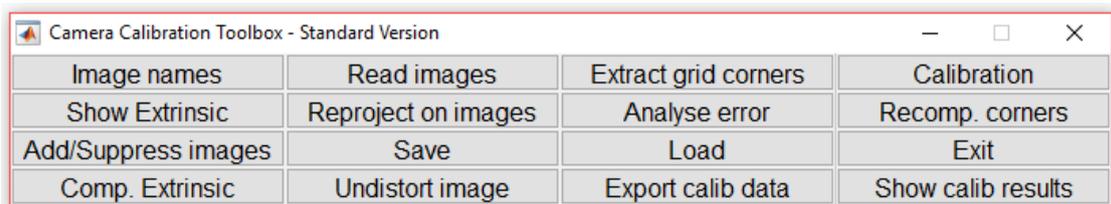


Fig. 90 - Schermata di selezione della modalità di calibrazione standard.

A questo punto comincia il processo di calibrazione.

Il primo passaggio è quello di importare le foto scattate al reticolo fornito che si trova all'interno della cartella scaricata dal web. Bisogna fare particolare attenzione nello scattare le foto, devono essere scattate da vari punti con diverse angolazioni e cercare di inquadrare in ogni scatto l'intero reticolo a meno della cornice più esterna (Fig. 91).

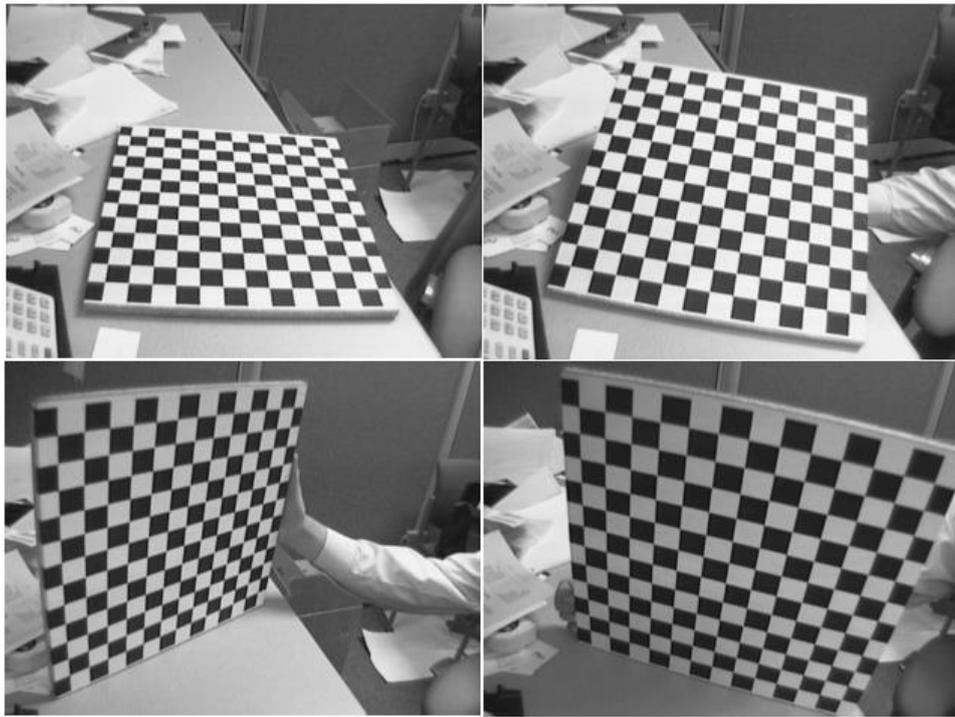


Fig. 91 - Tecnica corretta per fotografie al reticolo calibrato.

Bisogna impostare come Current Folder la cartella contenente le immagini e cliccare sul comando “*Read images*” che individua tutte le immagini presenti. Per caricarle su MatLab si inserisce il nome delle foto e il formato e viene visualizzata una figura contenente tutte le foto della presenti (Fig. 92).

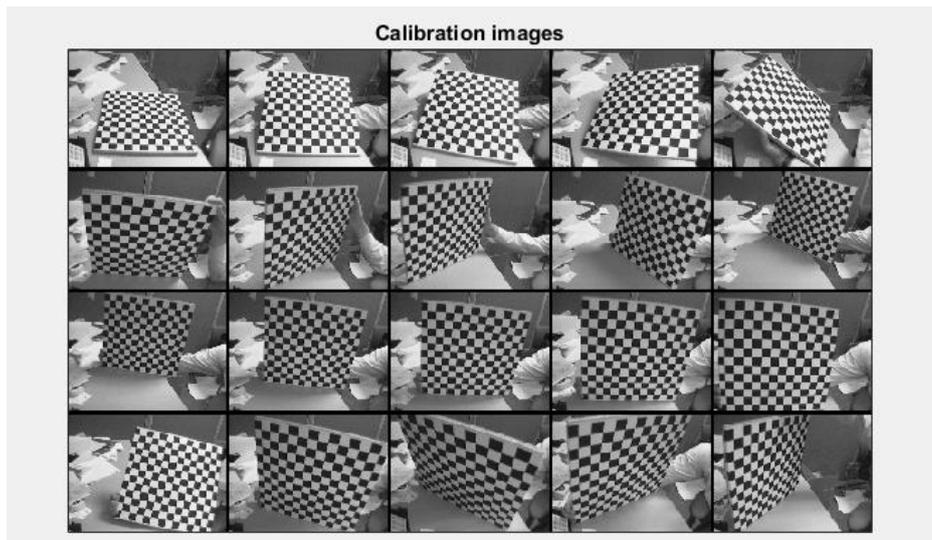


Fig. 92 - Mosaico contenente tutte gli scatti effettuati sul reticolo.

Una volta importate tutte le foto si procede all'individuazione dei 4 spigoli del reticolo attraverso il comando "*Extract grid corners*" per ogni immagine. I corner da specificare sono quelli relativi alla seconda cornice, non vanno considerati quindi gli spigoli più esterni (Fig. 93).

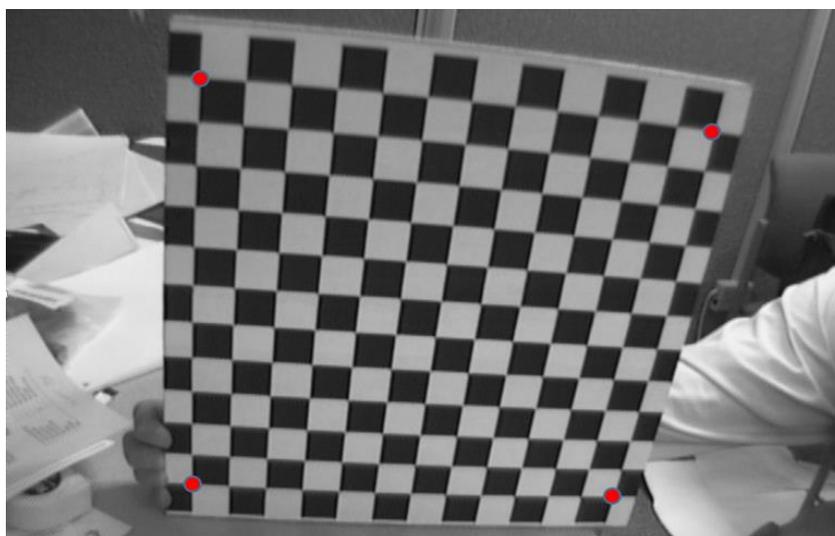


Fig. 93 - Corner da individuare.

Selezionando il comando si apre una nuova finestra, raffigurante la prima immagine, nella quale è presente un cursore a croce che consente di individuare i 4 corner del reticolo (Fig. 94).

Click on the four extreme corners of the rectangular pattern (first corner = origin)... Image 1

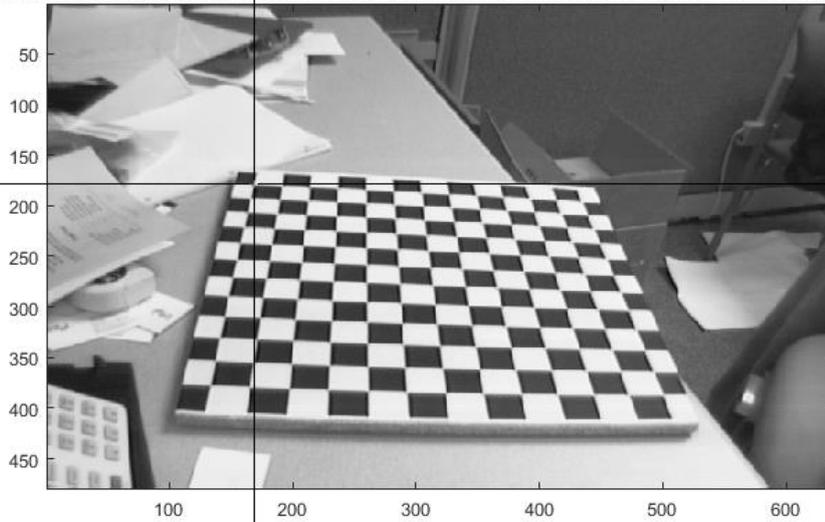


Fig. 94 - individuazione dei corner del reticolo.

Il primo punto selezionato corrisponde all'origine del sistema di riferimento che verrà associato alla griglia, di conseguenza bisogna fare attenzione che in tutte le immagini sia riferito allo stesso spigolo. Gli altri tre corner possono essere selezionati arbitrariamente in senso orario o antiorario. Il contorno del reticolo di calibrazione è rappresentato in (Fig. 95).

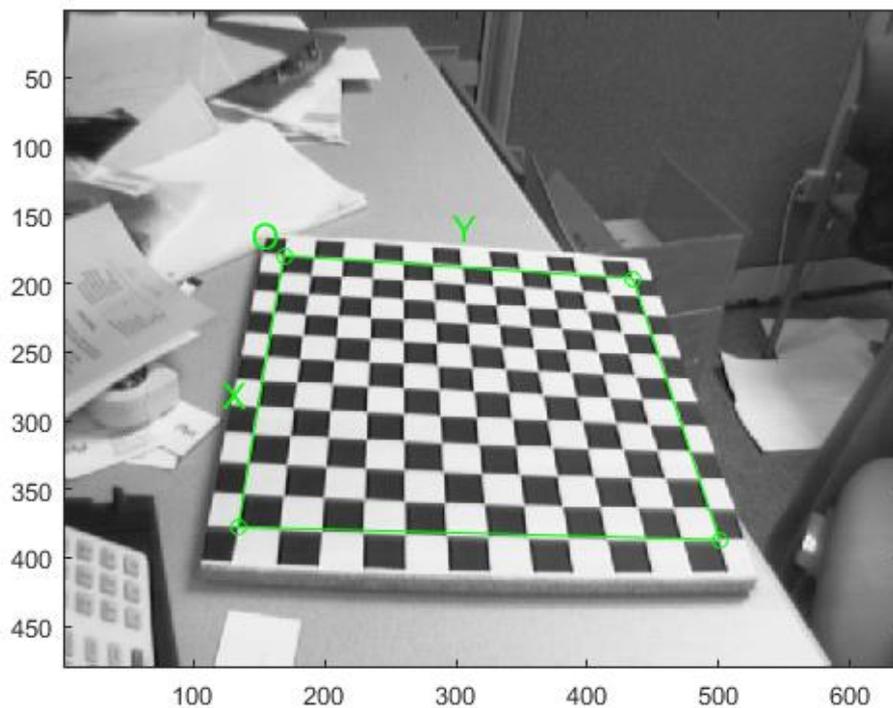


Fig. 95 - Individuazione contorno reticolo di calibrazione.

Si inserisce la dimensione dei lati di un singolo quadrato costituente il reticolo in direzione x e y e in automatico vengono rilevati tutti gli spigoli della scacchiera attraverso una piccola crocetta rossa (Fig. 96).

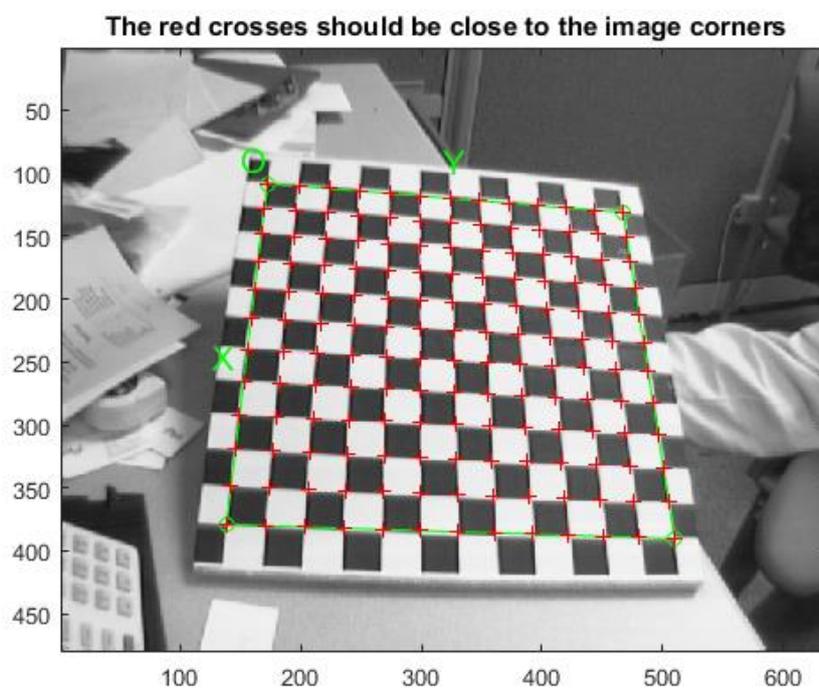


Fig. 96 - Localizzazione spigoli scacchiera.

In automatico si apre la seconda immagine nella quale devono essere selezionati i 4 spigoli partendo dallo stesso corner della prima immagine. E così per tutte le foto.

Terminato il processo di estrazione in tutte le foto si genera in automatico un MatLab data file chiamato “*calib\_data.mat*” che contiene tutte le informazioni raccolte in questa fase (le coordinate immagine, le corrispondenti coordinate tridimensionali della griglia, la dimensione della griglia, ecc.)

Per ultimo bisogna far partire il processo di calibrazione attraverso il pulsante “*Calibration*” contenuto nella finestra di selezione standard con il quale vengono calcolati di tutti i parametri di distorsione dell’immagine. La calibrazione viene effettuata in 2 step successivi, una prima fase di inizializzazione e una seconda di ottimizzazione non lineare.

La fase di inizializzazione calcola i diversi parametri senza includere alcuna distorsione della lente (Bouguet Jean-Yves; 2014).

La fase di ottimizzazione non lineare minimizza gli errori attraverso metodo ai minimi quadrati applicato su tutti i parametri di calibrazione, 9 parametri intrinseci della camera (lunghezza focale, punto principale e parametri di distorsione radiale) e 6 parametri estrinseci per ogni immagine (posizione e assetto).

Nell'analisi riportata in questa tesi non verrà utilizzato il processo appena descritto anche se i risultati ottenibili sono buoni in quanto i parametri di calibrazione sono già stati forniti da SAL Engineering.

#### *6.2.4.2 Processo di calibrazione con Calib 3V*

Calib 3v è un software gratuito in grado di effettuare la calibrazione di fotocamere con obiettivo grandangolare e fotocamere di grande formato (full frame). Come nel caso appena descritto, il software utilizza un reticolo calibrato (Fig. 97), fornito all'utente insieme al file di installazione, che può essere stampato.

Per la calibrazione e l'utente deve selezionare un'area quadriforme dell'immagine contenente il pannello che comprenda i reference points.

Dopo aver eseguito la calibrazione si possono importare tutte le immagini prese dalla stessa macchina fotografica con le stesse impostazioni ed eliminare la distorsione imposta dall'obiettivo.

Inoltre il software è in grado anche di eliminare la distorsione presente su interi filmati, attraverso il calcolo dei parametri deformativi effettuati su video nei quali viene ripreso il pannello calibrato contenente i reference points.

In questo modo è possibile eliminare la distorsione da tutti i video girati con la stessa macchina con le stesse impostazioni di quella con cui è stato effettuato il video al reticolo.

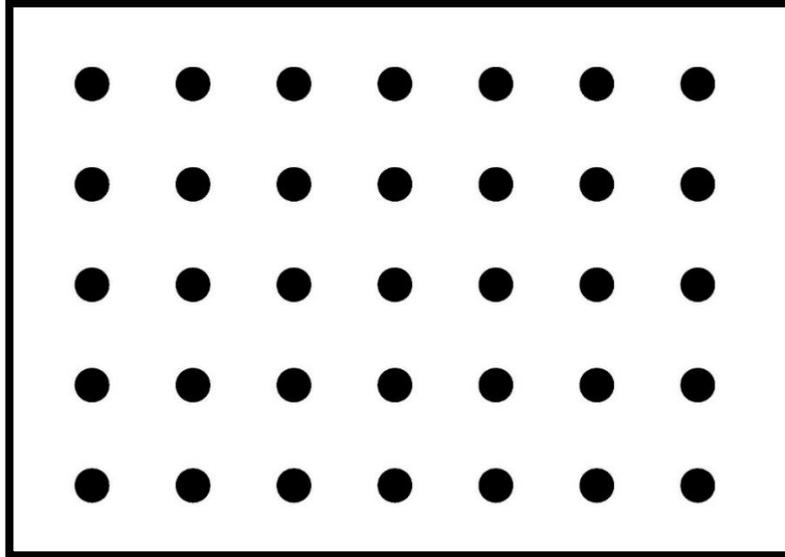


Fig. 97 - Pannello di calibrazione Calib 3V.

La funzionalità e il processo di calibrazione è simile a quello descritto per la toolbox di MatLab.

Per prima cosa bisogna importare le foto effettuate al pannello calibrato dal menu a tendina *calibration* selezionando “Add Image”. Poi sempre in calibration si seleziona “*setting*”, appare una finestra dove inserire il numero di righe e di colonne costituenti il reticolo (5 righe e 7 colonne) la dimensione del sensore della camera e la distanza fra i cerchi del pannello in millimetri. Quindi si può far partire la calibrazione cliccando “calibrate images” sempre dal menu Calibration (Fig. 98).

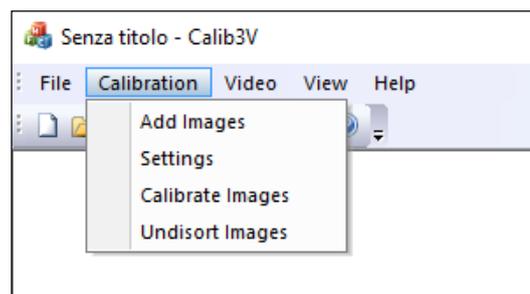


Fig. 98 - Schermata principale Calib3V, nello specifico è mostrato il menu “Calibration”.

Viene visualizzata una nuova schermata contenente la prima foto scattata al pannello ed importata nel programma nella prima fase. È possibile modificare il contrasto, x una

maggior nitidezza, e la dimensione dei caratteri con cui verranno appuntati i singoli cerchi individuati in automatico dal software.

Cliccando sulla foto appare un cursore con il quale bisogna disegnare un poligono che inscrive tutti i cerchi del reticolo, ogni vertice si crea cliccando con il tasto sinistro e per chiudere la polilinea si clicca con il destro (Fig. 99).

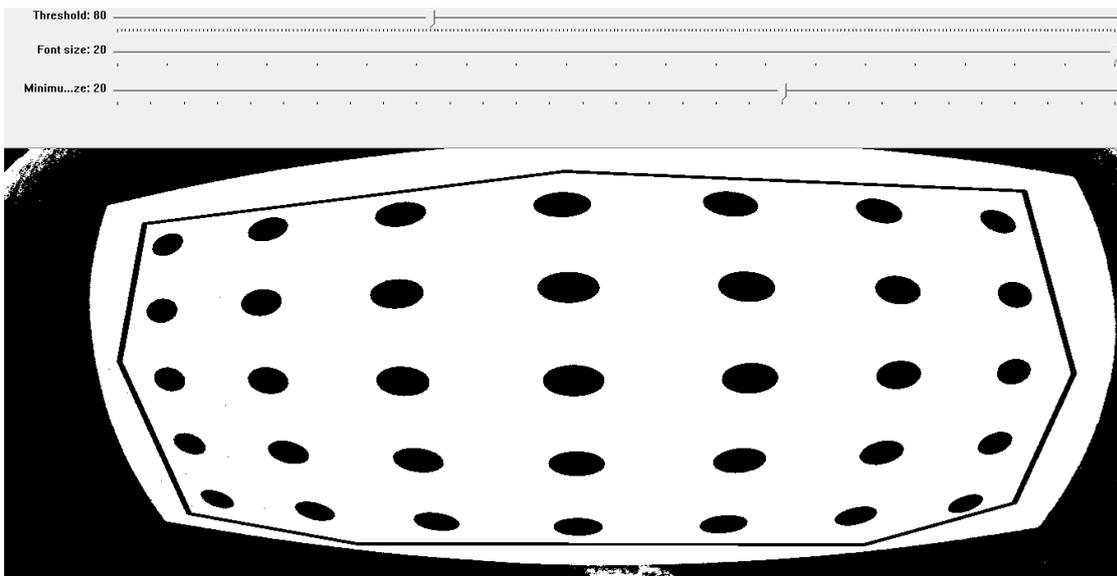


Fig. 99 - Costruzione polilinea.

Per passare alla fase successiva basta preme un tasto qualsiasi della tastiere e in automatico il programma proietta su ogni cerchio un numero identificativo (Fig. 100), la dimensione del carattere può essere modificati tramite la barra superiore “font size”.

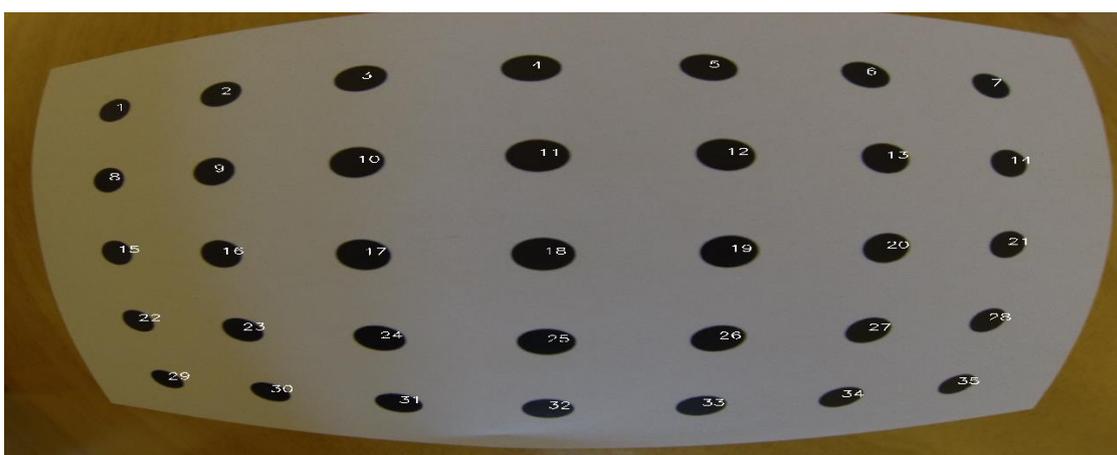


Fig. 100 - Assegnazione posizione ai cerchi del pannello.

La stessa procedura va applicata ad ogni foto importata, le quali vengono visualizzate in automatico in sequenza.

Terminato il processo per tutte le immagini Calib calcola i parametri intrinseci della camera e li riporta nella schermata principale. I valori determinati sono la lunghezza focale, le coordinate del punto principale, i tre parametri di distorsione radiale  $k_1, k_2$  e  $k_3$  e i due parametri di distorsione tangenziale  $p_1$  e  $p_2$  (Balletti, Guerra, Tsiouskas, Vernier; 2014).

Il file contenete i parametri di calibrazione può essere esportato o stampato.

A questo punto possono essere caricate tutte le foto effettuate con la stessa macchina e il software per ognuna di esse crea un immagine calibrata alla quale è stata rimossa la distorsione impressa al momento dello scatto (Fig. 101), salvandola in formato JPEG.

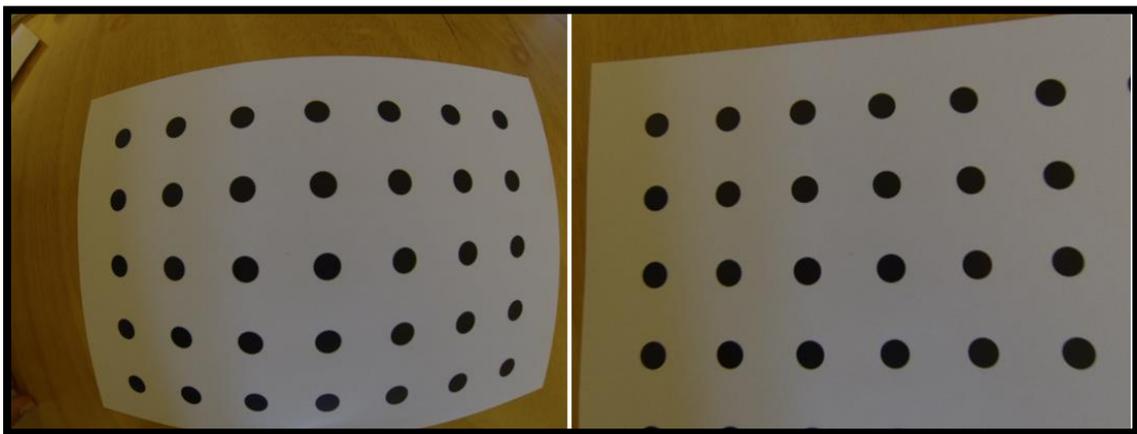


Fig. 101 - Esempio di calibrazione immagine, a sinistra l'immagine originale e a destra quella calibrata.

L'eliminazione della distorsione può essere applicata anche a interi filmati. Bisogna caricare un filmato nel quale viene ripreso il pannello di calibrazione e tramite le opzioni del menu video si catturano singoli frame del video relative a tutte le angolazioni possibili premendo la barra spaziatrice nel momento corretto. Le immagini devono contenere tutti i punti se no non possono essere utilizzate. Dopodiché si caricano i frame, memorizzati sul computer, e si procede come descritto per la calibrazione delle foto in quanto il video viene calibrato eliminando la distorsione per ogni frame.

Come già detto i parametri di calibrazione sono stati forniti da SAL Engineering, è stato scelto rettificare le immagini con Calib3V in quanto consente di importare direttamente il certificato di calibrazione di qualsiasi strumento, di conseguenza i parametri possono essere calcolati in altri ambiti e poi successivamente caricati all'interno del software. Questo permette di calibrare qualsiasi fotografia effettuata con lo strumento corrispondente al certificato.

Nello specifico i parametri sono stati estratti tramite il software Agisoft in formato XML e sono di seguito riportati:

- Lunghezza focale (Pixel)  $\begin{cases} f_x = 371.311951 \\ f_y = 371.878540 \end{cases}$  (23)

- Coordinate Punto Principale (Pixel)  $\begin{cases} c_x = 189.732666 \\ c_y = 153.172714 \end{cases}$  (24)

- Parametri di distorsione radiale  $\begin{cases} k_1 = -0.433356 \\ k_2 = 0.293951 \\ k_3 = -0.130654 \end{cases}$  (25)

Una volta importati è possibile calibrare le fotografie JPEG ottenute da ImageJ. Le immagini da trattare si caricano cliccando su “*Undistort image*” dal menu *Calibration*, il software le elabora e in automatico memorizza sul computer le immagini senza distorsione (Fig. 102).

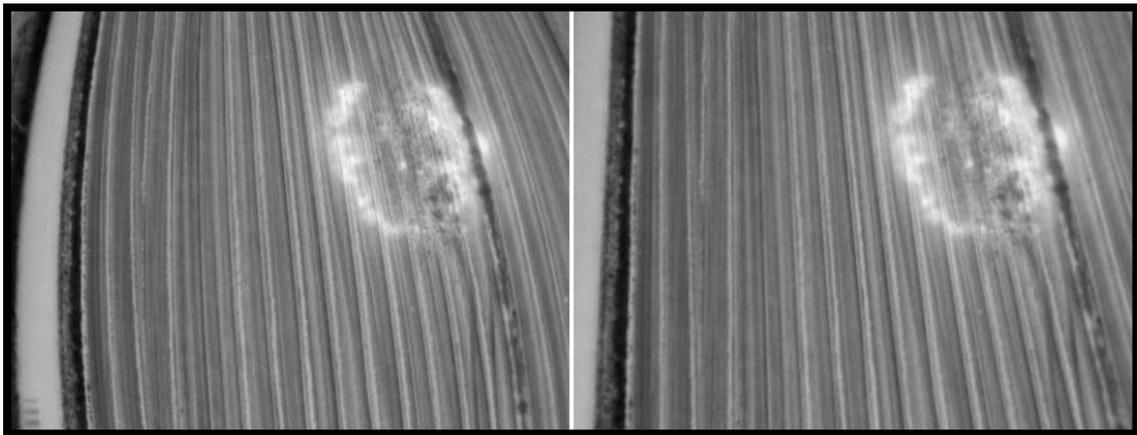


Fig. 102 - Calibrazione di un fotogramma aereo estrapolato dal filmato termico girato con Optris Pi450.

Terminato l'intero processo di calibrazione si possono creare i modelli tridimensionali sia per ciò che riguarda le immagini acquisite attraverso la termocamera ad infrarossi, sia per le esportate dal filmato della GoPro.

# 7 PROCEDURA DI RESTITUZIONE

## FOTOGRAMMETRICA AUTOMATICA

In questo capitolo viene utilizzato un programma per la creazione di una nuova densa di punti che successivamente scalata e georeferenziata sulla base delle coordinate dei punti fotogrammetrici d'appoggio

Si tratta di un software open source chiamato VisualSFM (acronimo di “Structure For Motion”) scaricabile liberamente on line dal sito di riferimento, di seguito riportato: <http://ccwu.me/vsfm/>.

Tutte le operazioni per l'ottenimento del dato denso georeferenziato sono state effettuate su un'unica stazione di lavoro con processore dual-core intel core i5 5200u da 64-bit e 2.20 GHz, provvisto di un RAM da 4GB e sistema operativo Windows 10.

### 7.1 SOFTWARE OPEN-SOURCE VISUALSFM

VisualSFM è un applicazione che, come detto, consente la ricostruzione tridimensionale di nuvole dense di punti, visualizzabile attraverso l'interfaccia grafica presente nel software.

La Structure for Motion (struttura del movimento) è una tecnica che attraverso la collimazione automatica di punti omologhi presenti in un insieme di foto permette la ricostruzione della forma reale di oggetti.

VisualSFM, basato su questa tecnica, è stato sviluppato da Changchang Wu, attualmente software engineer di Google, il quale ha implementato il codice sorgente di "*Bundler*", che ricostruisce la posizione delle fotocamere e la geometria tridimensionale incrociando piccolo gruppi di immagini per volta (Fig. 103).

Il software nasce per operare su insiemi di immagini, risolvendo con velocità impressionanti, problemi di orientamento e fornendo nuvole di punti tridimensionali (Noah Snavely).



Fig. 103 - Ricostruzione Colosseo attraverso il codice Bundler.

Il processo di ricostruzione della scena tridimensionale è articolato in due fasi:

- L'estrazione e il matching delle feature, effettuate tramite un'implementazione al calcolo su GPU del SIFT (Scale-invariant feature transform).
- Triangolazione e bundle adjustment, basati su un algoritmo di compensazione multicore (parallelizzato) tra CPU e GPU grazie alle librerie OpenGL e CUDA.

Nella fase di PBA è da sottolineare che i parametri interni della camera utilizzata non sono mantenuti costanti ma valutati in modo differente per ogni singola presa e il modello di distorsione è particolarmente semplificato in quanto adotta un solo parametro per la distorsione radiale, per un totale di 4 POI (Changchang Wu).

#### 7.1.1 CREAZIONE SCENA CON IMMAGINI GOPRO

Per la realizzazione della nuvola densa di punti bisogna seguire 4 passaggi, individuati da altrettanti comandi collocati nella barra degli strumenti del software (Fig. 104). Le fasi sono riportate di seguito:

- Add Images  : Aggiungere immagini alla workspace;
- Matche the Images  : lanciare la ricerca delle feature e la corrispondenza tra coppie di immagini;
- Sparse Reconstruction  : lanciare ricostruzione sparsa;
- Dense Reconstruction  : Lanciare la ricostruzione densa usando CMVS/PMVS di Yasutaka Furukawa.

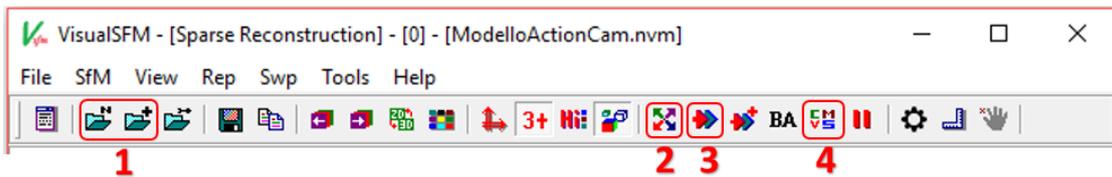


Fig. 104 - Comandi principali di VisualSFM.

Nella prima fase si selezionano le foto da inserire, che il programma dovrà quindi processare per arrivare alla realizzazione di un modello denso.

Le foto devono essere realizzate con tipologia di presa il più possibile normale, con assi paralleli tra loro. È opportuno che le strisciate di fotogrammi analizzati non abbiano assi della camera ortogonali tra loro, altrimenti occorrerà suddividere il processo.

Per caricare le immagini si utilizza il comando *Open Multi Images* che consente di importare tutte le immagini (Fig. 105) che devono essere utilizzate per la creazione della nuvola densa.

Il materiale di partenza proveniente dalla fase di rilievo è costituito da:

- 114 fotogrammi utili;
- Formato JPEG e dimensione 1920x1080 pixel.

Inizialmente l'insieme di foto era costituito da 165 elementi, di questi non sono stati considerati tutti i fotogrammi relativi alla fase di decollo e atterraggio del drone.

Le immagini pesano circa 1 MB ciascuna, quindi la mole di dati da analizzare ha una dimensione totale di circa 114MB.



Fig. 105 - Visualizzazione di tutte le immagini elaborate.

Il software per ogni immagine riporta nella task Viewer il nome del file, le caratteristiche di risoluzione e lunghezza focale espresse in pixel e per ultimo il tempo impiegato per l'intera operazione.

Successivamente si utilizza il comando “*Compute Missing Matches*” per eseguire l'estrazione di caratteristiche e una ricerca di corrispondenze presunte su tutte le coppie di fotogrammi. Nella Fig. 106 estrapolata dalla Task Viewer si nota che per ogni feature estratta (numero di SIFT) e per ogni immagine sono cercate le corrispondenze sulle successive e il numero di secondi impiegati nella ricerca.

```

Compute Missing Pairwise Matching, begin...
6328 pairs to compute match
NOTE: using 3 matching workers
0000 and 0001: 916 matches, 0.84sec, #0
0001 and 0003: 997 matches, 0.83sec, #1
0000 and 0003: 1149 matches, 0.87sec, #2
0000 and 0001: E[809/916], H[649], 0.03sec
0001 and 0003: E[929/997], H[615], 0.03sec
0000 and 0003: E[971/1149], H[432], 0.01sec
0002 and 0003: 0 matches, 0.54sec, #1
0000 and 0002: 1136 matches, 0.56sec, #0

```

Fig. 106 - Confronto tra immagini per ricercare corrispondenze. Parziale del report che il software riporta durante l'elaborazione.

Le corrispondenze, ovvero le SIFT, vengono salvate in file di testo automaticamente creati nella cartella contenente le immagini caricate nel programma. Inoltre nello

stesso direttorio vengono generati file .mat che sono il risultato del *feature matching* (Fig. 107).

SIFT: 0000, 1920x1080,	5694, 0.85sec
SIFT: 0001, 1920x1080,	5544, 0.21sec
SIFT: 0002, 1920x1080,	4976, 0.22sec
SIFT: 0003, 1920x1080,	5817, 0.22sec
SIFT: 0004, 1920x1080,	5652, 0.25sec
SIFT: 0005, 1920x1080,	5180, 0.20sec
SIFT: 0006, 1920x1080,	5703, 0.23sec
SIFT: 0007, 1920x1080,	5659, 0.21sec
SIFT: 0008, 1920x1080,	5174, 0.23sec
SIFT: 0009, 1920x1080,	5906, 0.22sec
SIFT: 0010, 1920x1080,	5796, 0.22sec
SIFT: 0011, 1920x1080,	5250, 0.20sec
SIFT: 0012, 1920x1080,	5722, 0.23sec

Fig. 107 - File SIFT.

A questo punto, con il comando “*Compute 3D Reconstruction*” il software cerca di ottenere una prima ricostruzione sparsa della nuvola di punti, che viene generata in modo continuo (Fig. 108).

```
Run full 3D reconstruction, begin...
1818(1620) pairs have essential matrices
6268(2) pairs have fundamental matrices
Initialization: Th = 0.400, Ti = 30.
Initialize with 02.26.00 and 02.28.00
800 3D points initialized from two images
PBA library version = 105
PBA: 800 3D pts, 2(-0) cams and 1600 projs...
PBA: 0.225 -> 0.189 (1 LMs in 0.03sec)
Focal Length : [2304.000]->[2307.147]
Focal Length : [2304.000]->[2301.860]

#####
#3: [02.27.00] sees 865 (+1385) 3D points
Refine camera pose with P3P
Estimated Focal Length [2773][1.20N]
# 1846 projs (622 pts and 0 merges)
PBA: 1422 3D pts, 3(-0) cams and 3446 projs...
PBA: 1.326 -> 0.393 (58 LMs in 0.44sec)

*****
#3/3: 2160 proj, 761 pts, 0M, 0UP, 0s
PBA: 1561 3D pts, 3(-0) cams and 3760 projs...
PBA: 0.450 -> 0.415 (31 LMs in 0.22sec)
PBA: 1561 3D pts, 3(-0) cams and 3760 projs...
PBA: 0.415 -> 0.415 (7 LMs in 0.04sec)
Focal Length : [2773.015]->[3437.960]
Radial Distortion : [0.174 -> 12]
```

Fig. 108 - Ricostruzione sparsa effettuata con triangolazione.

I risultati ottenuti sono riportati nella workspace.

Viene effettuata la triangolazione e il *Bundle Adjustment* (PBA) e a questo punto si potrebbe effettuare un primo salvataggio della nuvola in formato .nvm o .ply.

Il .ply è un formato utilizzato principalmente per la stampa 3D, è progettato principalmente per memorizzare i dati tridimensionali e di singoli oggetti polinomiali tridimensionali. È composto da una lista di elementi (vertici, facce, segmenti, materiali) e ad ognuno di essi sono associato una o più proprietà, ad esempio le coordinate x, y, z, il colore in RGB, il livello di corrispondenza, ecc.

In questa fase il programma cerca di dare un orientamento ad ogni fotogramma considerando la focale, la distanza di presa e l'assetto di ogni fotogramma, in modo tale da ricostruire la scena (Fig. 109).

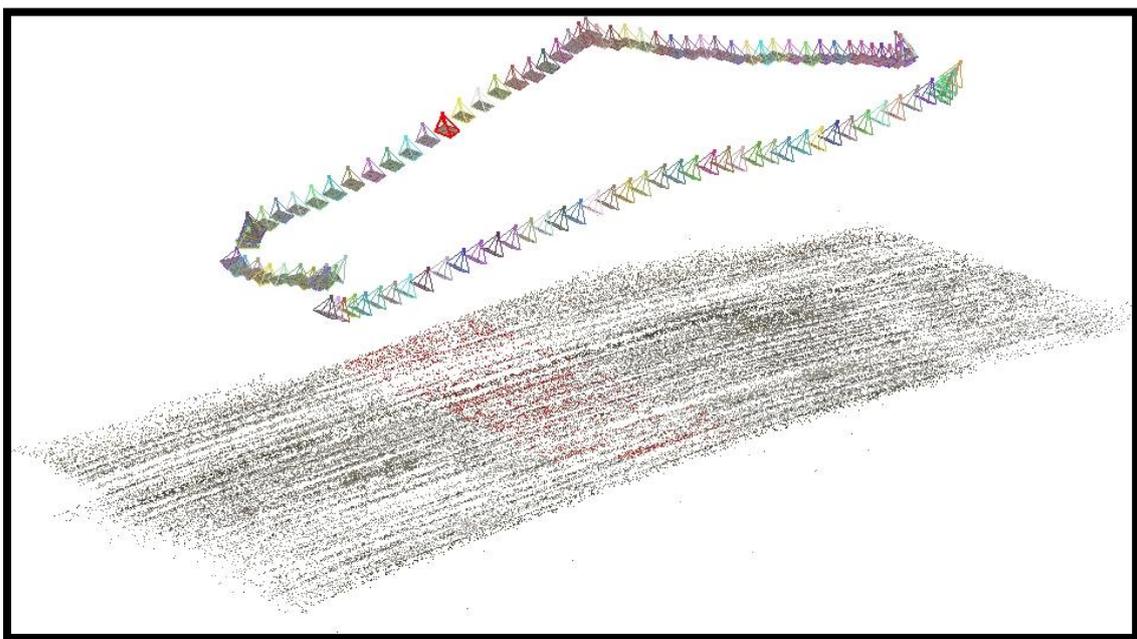


Fig. 109 - Ricostruzione automatica della struttura della scena.

Terminata la prima ricostruzione sparsa, bisogna creare quella densa utilizzando il comando “*Run Dense Reconstruction*”.

Per questa parte finale vengono utilizzati CMVS/PMVS2 scritti da Yasutaka Furukawa.

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.

Un 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.

PMVS2 è l'acronimo di Patch-based Multi-view Stereo Software versione 2 e rappresenta il vero dense matcher. Questo prende un insieme di immagini con i relativi parametri della camera e ne ricostruisce una struttura tridimensionale dell'oggetto rappresentato nelle immagini.

Il software in automatico riesce ad individuare la presenza di oggetti mobili non relativi all'oggetto di studio, come pedoni o elementi vegetali quali alberi, e li elimina. In questo modo restituisce la sola struttura rigida. In output si ottengono una serie di punti orientati, dove le coordinate tridimensionali e la normale alla superficie sono stimati per ogni punto orientato.

Il risultato ottenuto in seguito alla ricostruzione densa è riportato di seguito in (Fig. 110).

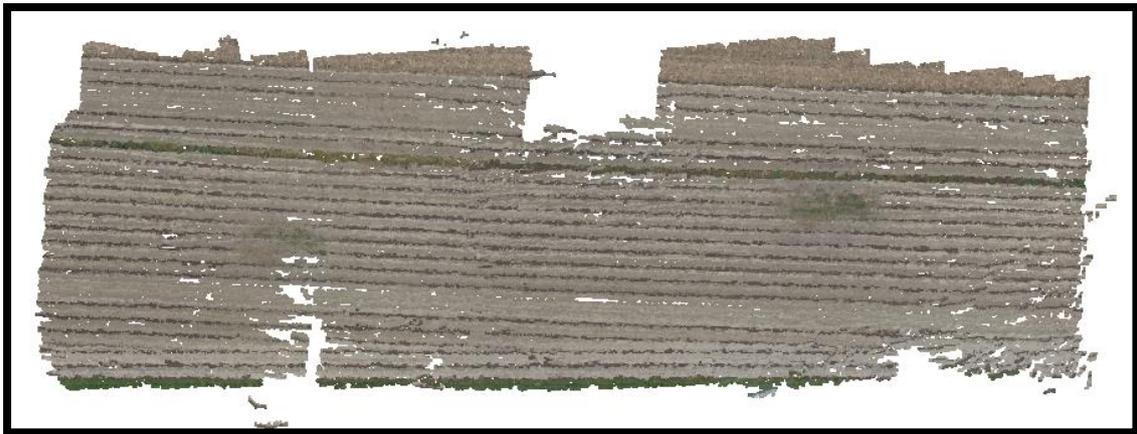


Fig. 110 - Visualizzazione nuvola densa di punti.

Il tempo impiegato per la realizzazione della nuvola densa in totale è di 31 minuti. Infine, come ultimo step, la nuvola di punti deve essere georeferenziata, per farlo si utilizza il comando “*GCP-based Transformation*” (Fig. 111).



Fig. 111 - Visualizzazione comando per la georeferenziazione.

La georeferenziazione viene effettuata a partire dalle coordinate, misurate dal ricevitore GPS, dei punti fotogrammetrici d'appoggio (Fig. 112).

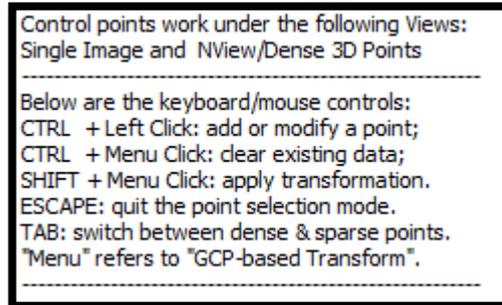


Fig. 112 - Comando GCP-based Transformation.

In bisogna inserire manualmente i punti di appoggio ai quali viene assegnato un nominativo e le tre coordinate locali X, Y e Z che vengono così registrate dal software (Fig. 113).

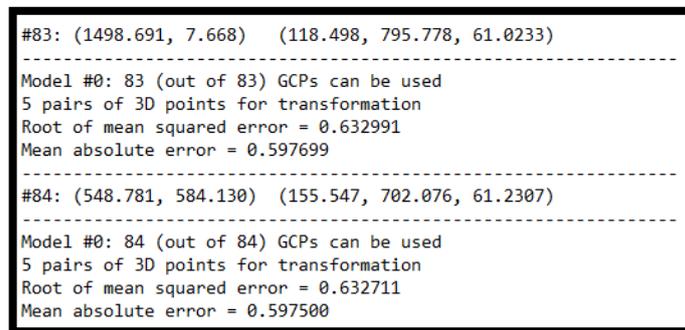


Fig. 113 - Registrazione delle coordinate dei punti. Report parziale della procedura di orientamento assoluto.

Nella Task Viewer compaiono la *Root of mean square* (varianza interna) e la *Mean absolute error* (media degli errori assoluti) corrispondenti a:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}} \quad \text{varianza interna} \quad (26)$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad \text{media degli errori assoluti} \quad (27)$$

Nell'inserimento del punto bisogna essere il più possibile preciso in funzione della precisione con cui sono state effettuate le misure.

Per individuare con maggior facilità e velocità i punti all'interno dei fotogrammi è stata costruita una tabella (Tabella 4) dove vengono riportate le corrispondenze tra i PFA e le immagini. Questo aiuta notevolmente in quanto ogni foto è rappresentativa di una porzione dell'oggetto da ricostruire, di conseguenza tutti i PFA non sono compresi in ognuna di esse. Inoltre VisualSFM non carica le immagini seguendo un ordine preciso.

Di seguito viene riportata una parte della tabella delle corrispondenze:

FOTOGRAMMI	B	C	D	E	F	TOTALE PUNTI
00:39	X			X		2
00:40	X			X		2
00:41	X			X		2
00:42	X					1
00:43	X					1
00:44	X					1
00:45	X					1
00:46		X				1
00:47		X				1
00:48		X	X			2
00:49		X	X			2
00:50		X	X			2
00:51		X	X			2
00:52		X	X			2
00:53		X	X			2
00:54						0
00:55						0
00:56						0

Tabella 4 - Corrispondenza PFA per ogni immagine.

Una volta inquadrato il punto noto sull'immagine per immettere le coordinate bisogna cliccare con il tasto sinistro del mouse tenendo contemporaneamente premuto CTRL (Fig. 114).

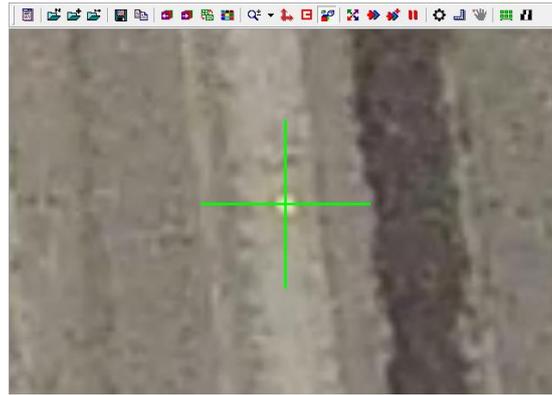


Fig. 114 - Inserimento coordinate PFA.

Inizialmente per il processo di georeferenziazione sono state inserite le coordinate originale dei PFA, caratterizzate da valori molto grandi (centinaia di migliaia di metri essendo coordinate UTM). Queste però hanno prodotto una nuvola contenente un errore sistematico fornendo un modello a strisce più o meno equi spaziate (Fig. 115).

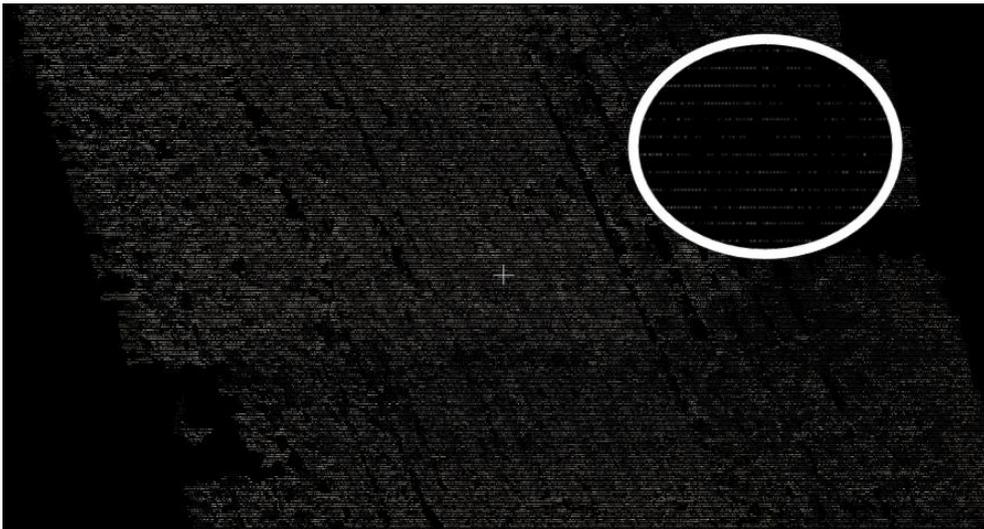


Fig. 115 - Primo modello georeferenziato con problemi dovuti all'uso delle coordinate UTM.

Il problema è noto al creatore del software ed è stato più volte segnalato nel forum dedicato.

Come soluzione le coordinate planimetriche assegnate ai punti fotogrammetrici d'appoggio si shiftano in modo da ridurre il numero cifre significate eliminando la parte che non subiva variazioni tra un punto e l'altro (Tabella 5). In questo modo si importano nel software valori più piccoli che permettono di ottenere prodotti più accurati. Questo è stato effettuato anche per la nuvola termica.

Coordinate planimetriche originali		Coordinate planimetriche shiftate	
Latitudine	Longitudine	Latitudine	Longitudine
4974168.05989	190712.31124	168.05989	712.31124
4974160.23449	190742.23683	160.23449	742.23683
4974137.23277	190732.89103	137.23277	732.89103
4974155.54736	190702.07617	155.54736	702.07617
4974118.49751	190795.77789	118.49751	795.77789

Tabella 5 - Variazione coordinate, coordinate in metri.

Una volta rieseguito quindi il procedimento è possibile ottenere un prodotto molto più denso, privo del sistematismo riscontrato precedentemente.

Le coordinate planimetriche e altimetriche sono le seguenti (Tabella 6).

Sigla target termico	Coordinate planimetriche		Quota
	Latitudine	Longitudine	
rovN1007b_91Q8	168.05989	712.31124	61,3573
rovN1007c_91Q8	160.23449	742.23683	61,2755
rovN1007d_91Q8	137.23277	732.89103	61,2526
rovN1007e_91Q8	155.54736	702.07617	61,2307
rovN1007f_91Q8	118.49751	795.77789	61,0233

Tabella 6 - Coordinate plano-altimetrico inserite, coordinate in metri.

In seguito all'importazione delle coordinate il punto viene contrassegnato con una croce rossa, questo processo va effettuato in tutte le immagini dove sono presenti uno o più punti fotogrammetrici d'appoggio (Fig. 116).



Fig. 116 - Immagine nella quale sono inquadrati 4 PFA. In verde invece è rappresentato il puntatore.

Come risultato della procedura fotogrammetrica si è ottenuta una nuvola di punti del terreno costituita da 814495 punti (Fig. 117).

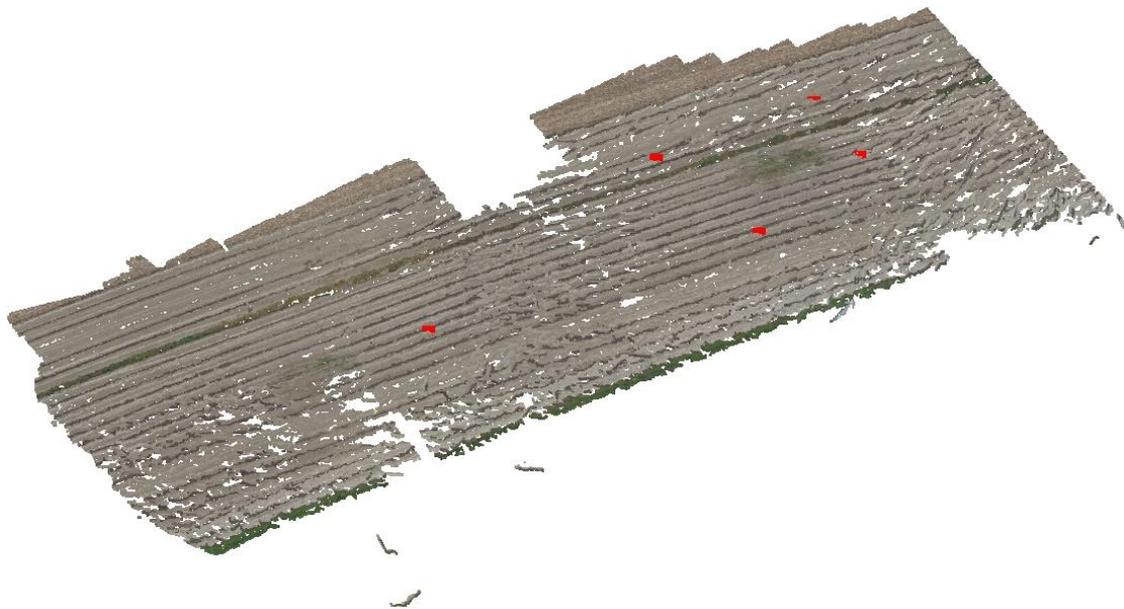


Fig. 117 - Visualizzazione dei 5 PFA sulla nuvola densa di punti.

Terminato l'inserimento di tutti i punti di appoggio, si applica una trasformazione conforme a 7 parametri premendo  +Shift. Questa è una trasformazione che permette la roto-traslazione con fattore di scala realizzando la georeferenziazione della nuvola.

Inizialmente la nuvola risulta orientata in un sistema di riferimento locale e per riportarle al sistema reale, applicando un orientamento assoluto, sarà anche necessario applicare la trasformazione conforme 7 parametri:

$$X' = S * R * X + T \quad (27)$$

I 7 parametri sono riportati nella Task Viewer (Fig. 118) e sono dati da:

- Un fattore di scala (S);
- Tre parametri di rotazione (R);
- Tre parametri di traslazione (T);

```

S =      2.894629511744
R =      0.55036131  0.83480174  0.01443898
          -0.81016743  0.53814112 -0.23244974
          -0.20181966  0.11623335  0.97250123
T =      100.517961667260
          837.413417365476
          25.327212427791
[Transformed points] [User coordinates]
118.4551 795.7781 61.5302      118.5 795.8 61.02
137.3766 732.8962 60.3100      137.2 732.9 61.25
160.2200 742.2133 60.7331      160.2 742.2 61.28
155.4635 702.0898 61.8835      155.5 702.1 61.23
168.0568 712.3158 61.6827      168.1 712.3 61.36

```

Fig. 118 - Parametri della trasformazione conforme

Mettendo a confronto le coordinate inserite manualmente (User Coordinates) con quelle trasformate (Transformed points), si calcolano i residui dati dalla differenza tra il valore delle coordinate inserire e quelle trasformate, ottenendo i valori mostrati in Tabella 7.

NOME PUNTO	COORDINATE PFA IN WGS84			COORD. TRASFORMATE IN VSfM			RESIDUI		
	N[m]	E[m]	UP[m]	N[m]	E[m]	UP[m]	N[m]	E[m]	UP[m]
B	168,05989	712,31124	61,35735	168,0568	712,3185	61,6827	0,0031	-0,0073	-0,3254
C	160,23449	742,23683	61,27548	160,2200	742,2133	60,7331	0,0145	0,0235	0,5424
D	137,23277	732,89103	61,25257	137,3766	732,8962	60,3100	-0,1438	-0,0052	0,9426
E	155,54736	702,07617	61,23074	155,4635	702,0898	61,8835	0,0839	-0,0136	-0,6528
F	118,49751	795,77789	61,02326	118,4551	795,7781	61,5302	0,0424	-0,0002	-0,5069

MEDIA	0,0000	-0,0005	0,0000
MAX	0,0839	0,0235	0,9426
MIN	0,1438	0,0136	0,6528

Tabella 7 - Calcolo dei residui e della media.

Come si può evincere dai valori di cui sopra, le medie dei residui calcolate sulle tre coordinate Nord, Est e UP sono tutte praticamente nulle. Questo individua la NON presenza di alcun sistematismo.

I residui dell'orientamento esterno mostrano un informazione nei riguardi della congruenza dei punti e delle immagini, e quindi sulla georeferenziazione complessiva. Si nota che in Planimetria l'errore medio complessivo è dell'ordine dei 5 centimetri. Molto maggiore è l'errore in altimetria, questo è dovuto alle proprietà della camera che è caratterizzata da una focale molto corta crea delle distorsioni radiali molto accentuate che probabilmente non sono state eliminate in toto.

#### 7.1.1.1 Miglioramento della qualità

Come si può notare dalla Fig. 119 il prodotto ottenuto in seguito alla realizzazione della nuvola densa di punti non è caratterizzato da una alta densità di punti e quindi non è di alta qualità.

Sono presenti grossi buchi dovuti al fatto che il software in quei punti non è riuscito ad individuare corrispondenze fra le immagini e quindi il processo di Image Matching non ha funzionato. Inoltre in alcune zone il dato risulta molto disperso e si notano errori grossolani nell'individuazione delle coordinate assegnate ai SIFT (corrispondenze).

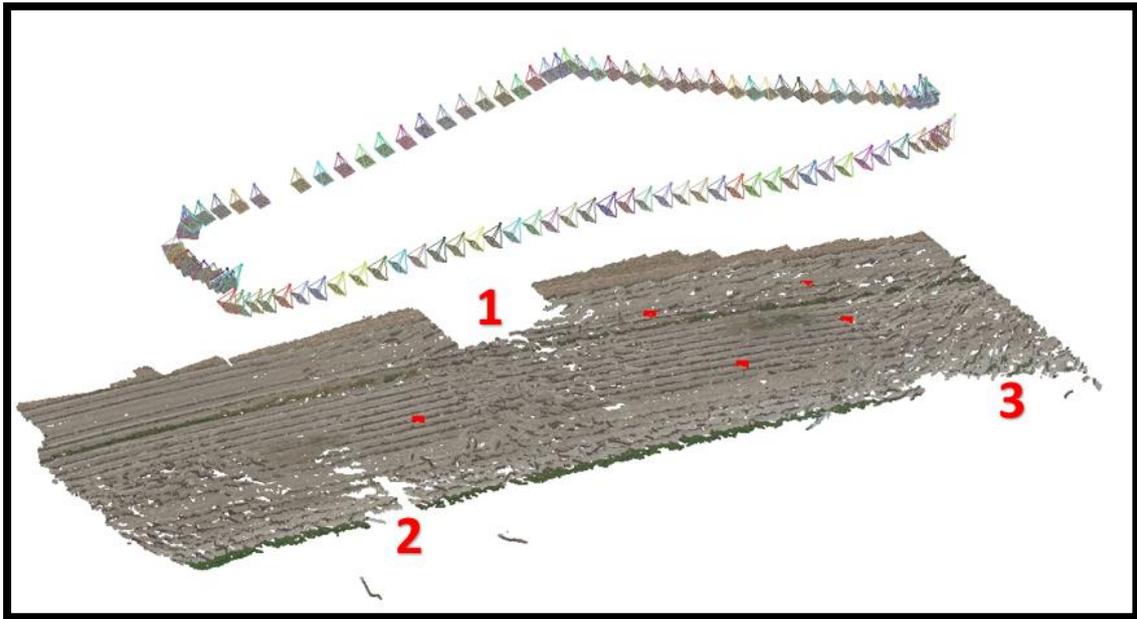


Fig. 119 - Visualizzazione della nuvola densa. Sono indicati anche i PFA e la posizione e assetto delle fotografie.

La mancanza di dati più significativa risulta essere nella parte centrale (ZONA 1). In questa area la totale mancanza di corrispondenze è dovuta alla traiettoria di volo assunta da drone, che ha aumentato la sua quota raggiungendo proprio l'altezza massima sopra alla zona considerata. Questo ha avuto ripercussioni in tutta la fascia centrale, nella quale il dato è più rarefatto e meno preciso.

Nella ZONA 2 la dispersione è dovuta alla qualità delle immagini analizzate. In questo punto il drone cambia bruscamente traiettoria alterando anche la quota di volo.

La ZONA 3 è relativa alla zona di partenza e atterraggio del drone, la mal riuscita della nuvola densa è condizionata dal processo di stabilizzazione in quota del drone.

Per migliorare il prodotto ottenuto bisogna riprocedere con la fase di “*Run Dense Reconstruction*” partendo però questa volta dalle immagini nella quali sono state assegnate le coordinate ai PFA.

Il processo non viene effettuato sulla totalità delle immagini, vengono lasciate quelle contenenti le zone da migliorare.

In questo modo il software ricalcola la nuvola densa di punti trovando nuove corrispondenze concentrandosi su meno immagini. Ciò può essere fatto più volte, facendo analizzare sempre un gruppo di immagini diverso.

Queste nuove nuvole combaciano perfettamente con quella creata iniziale in quanto tutte hanno subito un precedente processo di georeferenziazione.

Come ultimo prodotto si ottiene quindi una nuvola densa costituita da molti più punti, nella quale è stato riempito il vuoto in corrispondenza del picco di quota.

Alla fine del processo è stato ottenuto un prodotto costituito da 3007554 punti (Fig. 120) a discapito della nuvola precedente che ne conteneva solo 814495.

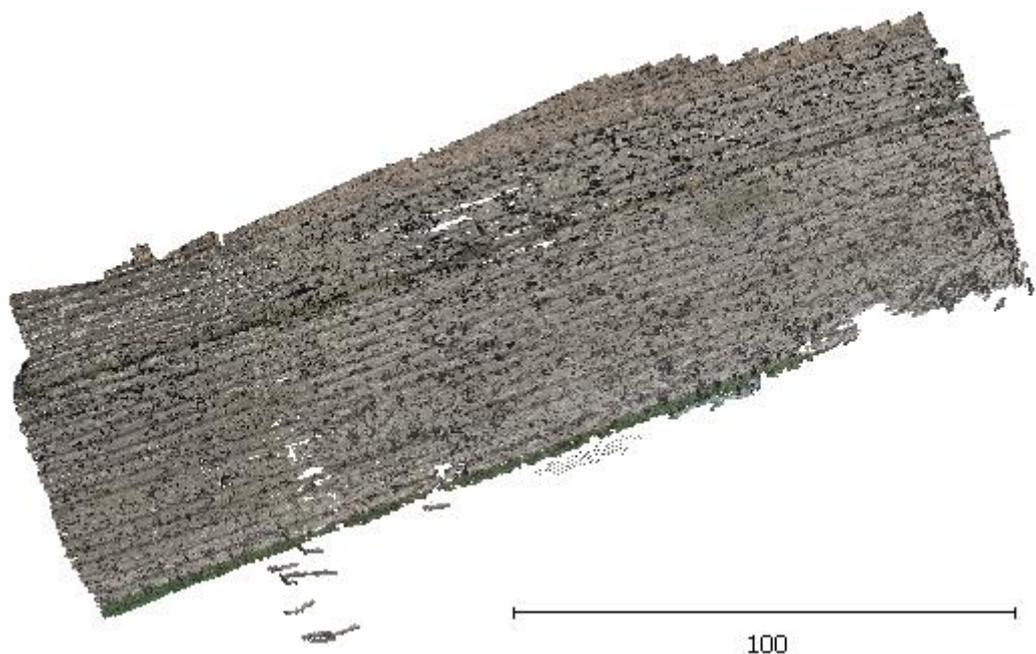


Fig. 120 - Nuvola densa di punti finale georeferenzziata nel sistema UTM, scalimetro espresso in metri.

### 7.1.2 CREAZIONE SCENA CON IMMAGINI TERMICHE

Le fasi per la creazione della nuvola densa di punti, riportati brevemente di seguito, sono i medesimi effettuati per l'ottenimento della scena tridimensionale realizzata con le immagini a colori. Riporto brevemente di seguito:

- Add Images  : Aggiungere immagini alla workspace;

- Matche the Images  : lanciare la ricerca delle feature e la corrispondenza tra coppie di immagini;
- Sparse Reconstruction  : lanciare ricostruzione sparsa;
- Dense Reconstruction  : Lanciare la ricostruzione densa usando CMVS/PMVS di Yasutaka Furukawa.

Con il comando “Add Images” si caricano tutte le immagini da far analizzare a VisualSFM. Le foto termiche importate sono in tutto 92 (Fig. 121).

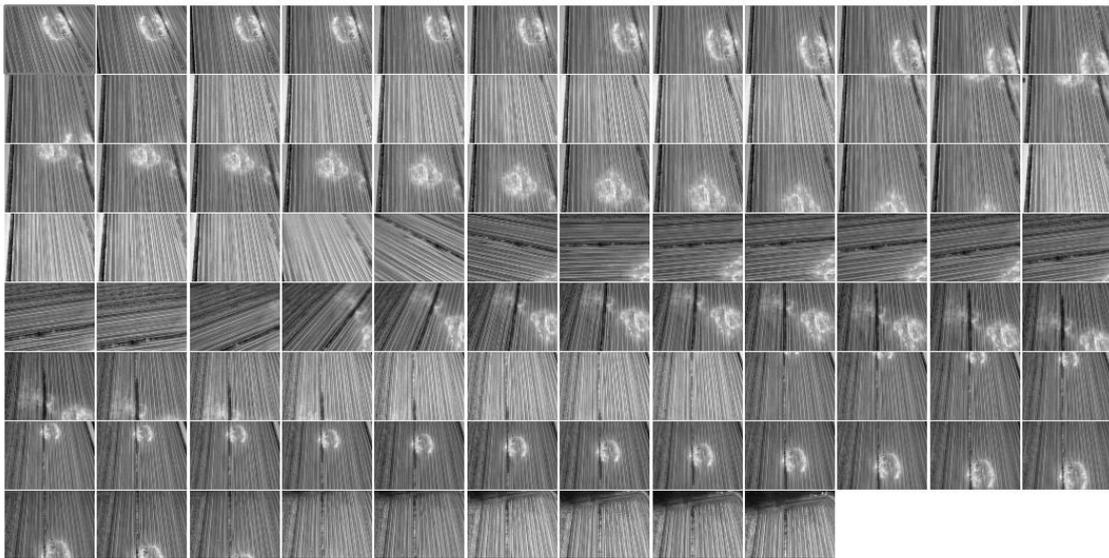


Fig. 121 - Visualizzazione di tutte le immagini importate.

Successivamente si utilizza “Compute Missing Matches” () per eseguire l’estrazione di caratteristiche e una ricerca di corrispondenze presunte su tutte le coppie di fotogrammi.

A questo punto, con il comando tramite “Compute 3D Reconstruction” () il software cerca di ottenere una prima ricostruzione sparsa della nuvola di punti, che viene generato in modo continuo e ne riporta i risultati sulla workspace

Viene effettuata la triangolazione e il Bundle Adjustment (PBA) e a questo punto si potrebbe effettuare un primo salvataggio della nuvola in formato .nvm o .ply (Fig. 122).

In questa fase il programma cerca di dare un orientamento ad ogni fotogramma considerando la focale, la distanza di presa e l'assetto di ogni fotogramma, in modo tale da ricostruire la scena.

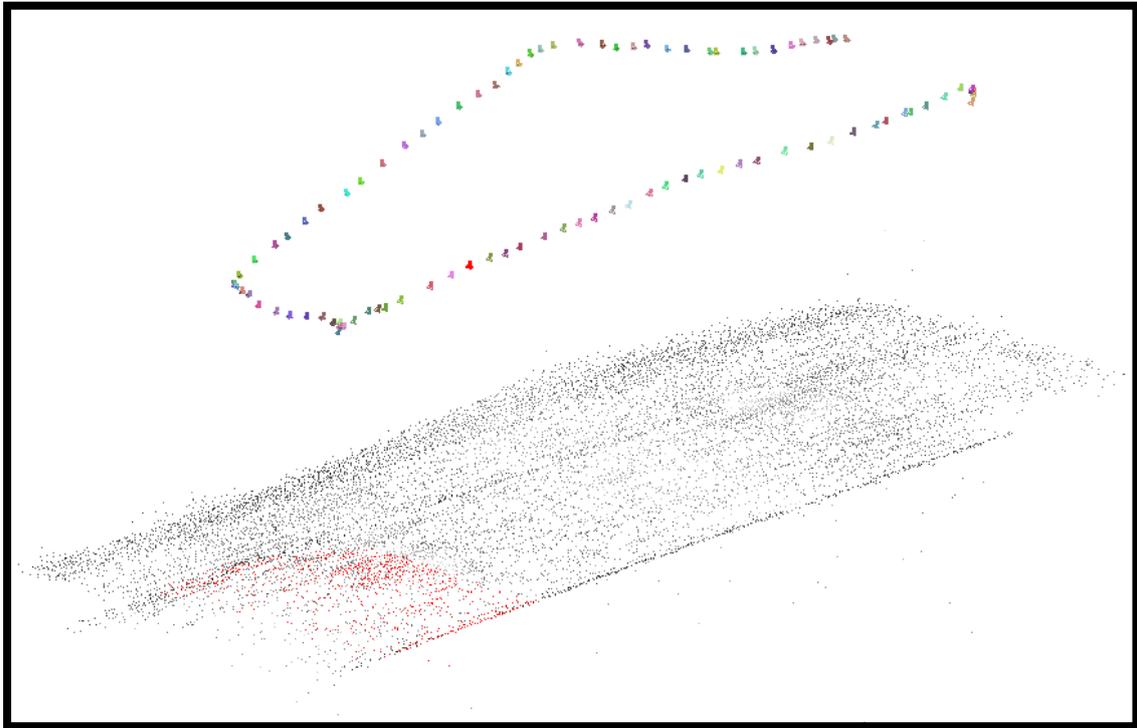


Fig. 122 - Ricostruzione automatica della struttura della scena.

Si può notare che la ricostruzione della traiettoria del drone è la medesima di quella effettuata in precedenza. Ci si aspettava di ottenere questa informazione in quanto l'ottenimento dei due tipi di dati, termico e a colori, è avvenuto contemporaneamente in un unico volo.

Terminata la prima ricostruzione sparsa, bisogna creare quella densa utilizzando il comando *“Run Dense Reconstruction”* (  ).

In output si ottengono una serie di punti orientati, dove le coordinate tridimensionali e la normale alla superficie sono stimati per ogni punto orientato.

Il risultato ottenuto in seguito alla ricostruzione densa è riportato di seguito in (Fig. 123).

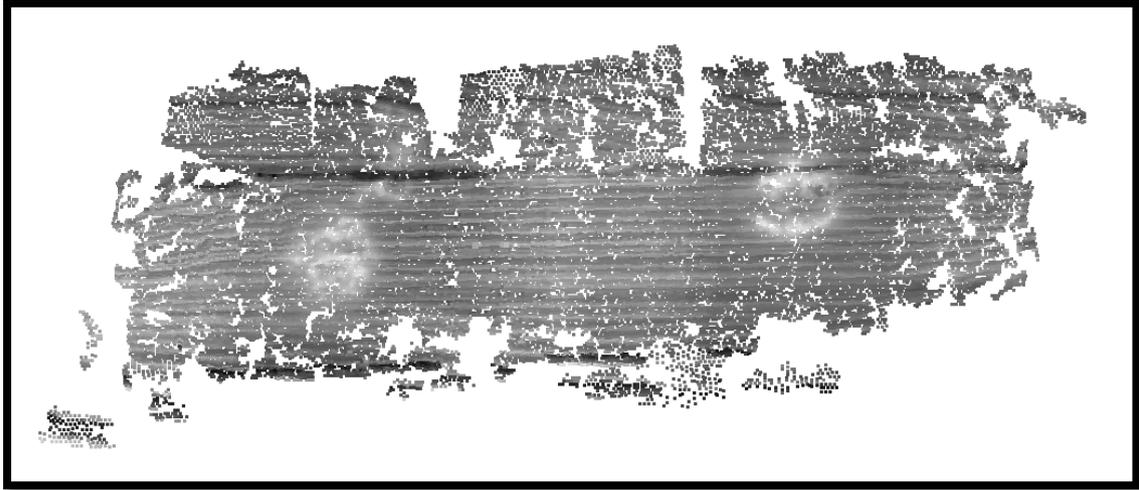


Fig. 123 - Visualizzazione nuvola densa di punti.

Il tempo impiegato per la realizzazione della nuvola densa in totale è di 20 minuti.

Infine, come ultimo step, la nuvola di punti deve essere georeferenziata, per farlo si utilizza il comando “*GCP-based Transformation*” (  ) inserendo le coordinate, misurate dal ricevitore GPS, dei punti fotogrammetrici d’appoggio.

Per individuare con maggior facilità e velocità i punti all’interno dei fotogrammi è stata costruita una tabella (Tabella 8) dove vengono riportate le corrispondenza tra i PFA e le immagini. Di seguito viene riportata una part della tabella delle corrispondenze:

FOTOGRAMMI	B	C	D	E	F	TOTALE PUNTI
57:23	X	X				2
57:24	X	X				2
57:25	X	X				2
57:26	X	X		X		3
57:27	X	X				2
57:28	X	X				2
57:29	X	X				2
57:30	X	X				2
57:31	X	X				2
57:32		X				1
57:33						0
57:34		X	X			2
57:35		X	X			2
57:36		X	X			2
57:37		X	X			2
57:38		X				1
57:39		X				1

Tabella 8 - Numero di PFA presenti in ogni immagine.

L'individuazione dei PFA nelle immagini è risultata più complessa per via della bassa risoluzione dei fotogrammi termici. In seguito all'importazione delle coordinate il punto viene contrassegnato con una croce rossa, questo processo va effettuato in tutte le immagini dove sono presenti uno o più punti fotogrammetrici d'appoggio.

Come risultato della procedura fotogrammetrica si è ottenuta una nuvola di punti del terreno costituita da 32587 punti (Fig. 124).

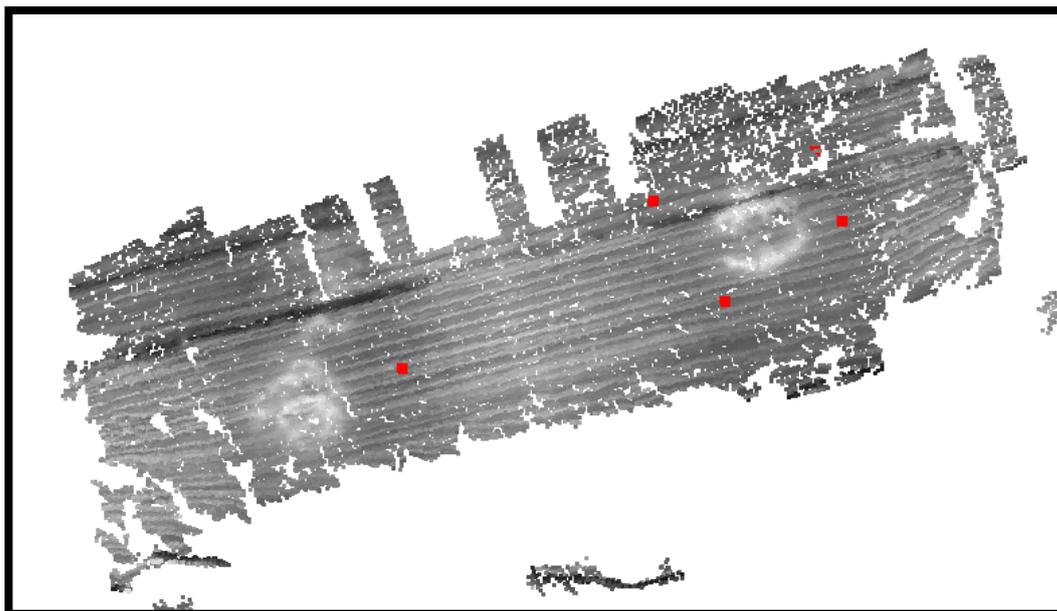


Fig. 124 - Visualizzazione dei 5 PFA sulla nuvola densa di punti.

Terminato l'inserimento di tutti i punti di appoggio, si applica una trasformazione conforme a 7 parametri premendo  +Shift. Questa è una trasformazione che permette la roto-traslazione con fattore di scala.

Mettendo a confronto le coordinate inserite manualmente (User Coordinates) con quelle trasformate (Transformed points), si calcolano i residui dati dalla differenza tra il valore delle coordinate inserite e quelle trasformate, ottenendo i valori mostrati in Tabella 9.

COORDINATE PFA IN WGS84			COORD. TRASFORMATE IN Vsfm			RESIDUI		
N[m]	E[m]	UP[m]	N[m]	E[m]	UP[m]	N[m]	E[m]	UP[m]
168,05989	712,31124	61,35735	168,0572	712,2417	61,4005	0,0027	0,0695	-0,0432
160,23449	742,23683	61,27548	160,1732	742,0566	61,1532	0,0613	0,1802	0,1223
137,23277	732,89103	61,25257	137,2904	732,9632	60,9593	-0,0576	-0,0722	0,2933
155,54736	702,07617	61,23074	155,6003	702,1986	61,4593	-0,0529	-0,1224	-0,2286
118,49751	795,77789	61,02326	118,4509	795,8330	61,1671	0,0466	-0,0551	-0,1438

MEDIA	0,0000	0,0000	0,0000
MAX	0,0613	0,1802	0,2933
MIN	-0,0576	-0,1224	-0,2286

Tabella 9 - Calcolo dei residui e della media.

Come si può evincere dai valori di cui sopra, le medie dei residui calcolate sulle tre coordinate Nord, Est e UP sono tutte praticamente nulle. Questo fa presumere la NON presenza di alcun sistematismo.

I residui dell'orientamento esterno mostrano un informazione nei riguardi della congruenza dei punti e delle immagini, e quindi sulla georeferenziazione complessiva. Si nota che pure in questo caso in Planimetria l'errore medio complessivo è minore rispetto a quello presente in altimetria. Però in questo caso la differenza non è così marcata come nel caso della GoPro. L'errore planimetrico è più alto, questo è con molta probabilità dovuto alla difficoltà riscontrata nell'individuare con precisione il PFA nei fotogrammi.

#### *7.1.2.1 Miglioramento della qualità*

Come si può notare dalla Fig. 125 il prodotto ottenuto in seguito alla realizzazione della nuvola densa di punti non è caratterizzato da una alta densità di punti e quindi non è di alta qualità assumendo una tendenza molto simile a quella ottenuta con le immagini RGB.

Sono presenti grossi buchi dovuti al fatto che il programma in quei punti non è riuscito ad individuare corrispondenze fra le immagini e quindi il processo di *Image Matching* non ha funzionato. Inoltre in alcune zone il dato risulta molto disperso e si notano errori grossolani nell'individuazione delle coordinate assegnate ai SIFT (corrispondenze).

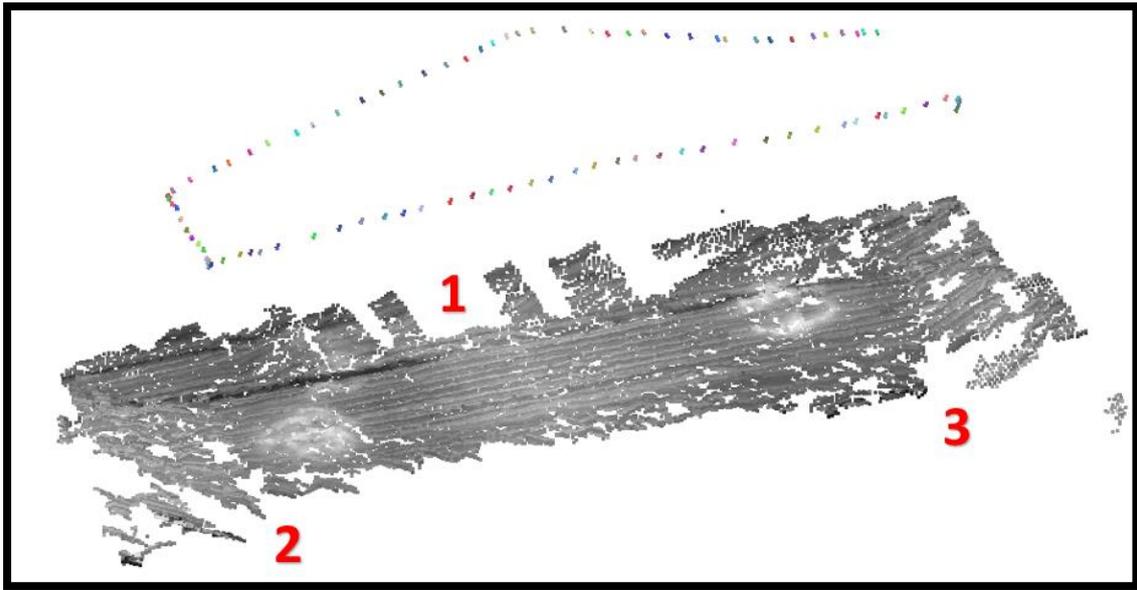


Fig. 125 - Visualizzazione della nuvola densa. Sono indicati anche i PFA e la posizione e assetto delle fotografie.

In generale il risultato è peggiore rispetto a quello ottenuto in precedenza, e la nuvola densa è molto più rarefatta in quanto il numero di punti che la costituisce è minore.

Le motivazioni legate alle mancanze di dati e sbagliata assegnazione delle coordinate dei SIFT sono le medesime in quanto le foto sono state acquisite con lo stesso criterio.

La mancanza di dati più significativa risulta essere nella parte centrale (ZONA 1). In questa area la totale assenza di corrispondenze è dovuta alla traiettoria di volo assunta da drone, che ha aumentato la sua quota raggiungendo proprio l'altezza massima sopra alla zona considerata.

Nella ZONA 2 la dispersione è dovuta alla qualità delle immagini analizzate. In questo punto il drone cambia bruscamente traiettoria alterando anche la quota di volo.

La ZONA 3 è relativa alla zona di partenza e atterraggio del drone, la mal riuscita della nuvola densa è condizionata dal processo di stabilizzazione in quota del drone.

Per migliorare il prodotto ottenuto bisogna riprocedere con la fase di “*Run Dense Reconstruction*” partendo però questa volta dalle immagini nella quali sono state assegnate le coordinate ai PFA.

Come ultimo prodotto si ottiene quindi una nuvola densa costituita da molti più punti, nella quale è stato riempito il vuoto in corrispondenza del picco di quota.

Alla fine del processo è stato ottenuto un prodotto costituito da 90454 punti (Fig. 126) a discapito della nuvola precedente che ne conteneva solo 32587.

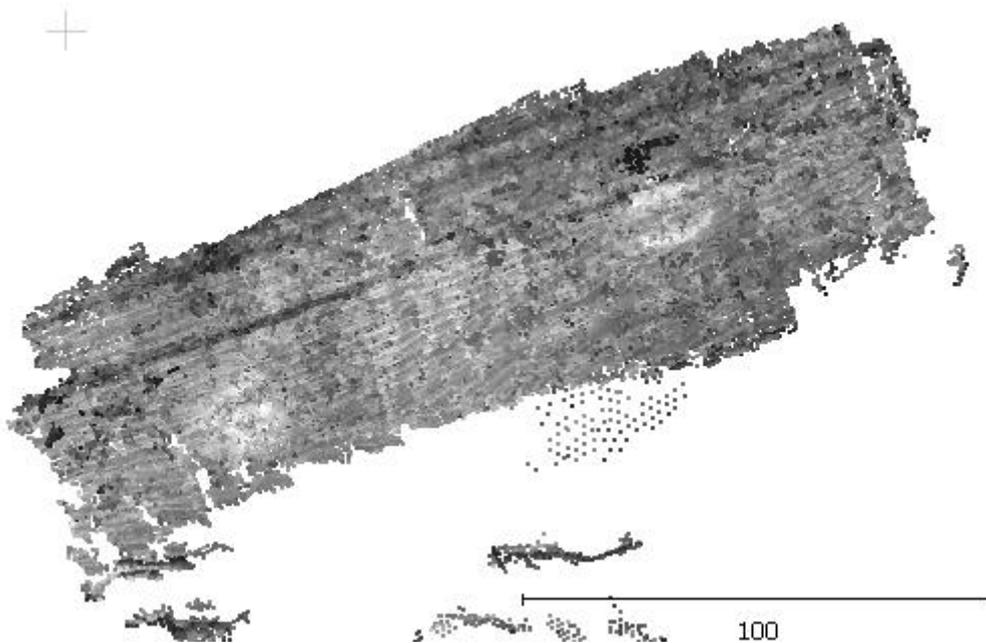


Fig. 126 - Nuvola densa di punti finale georeferenziata nel sistema UTM, scalimetro espresso in metri.

### 7.1.3 CREAZIONE SCENA CON IMMAGINI TERMICHE CON VARIAZIONE DELLA TEMPERATURA

La nuvola densa di punti viene creata con le stesse immagini utilizzate in precedenza di conseguenza il prodotto finale è molto simile.

Le differenze che presenta sono dovute al fatto che in VisualSFM ogni volta che si fa partire la “Compute 3D Reconstruction” e la “Run Dense Reconstruction” vengono individuati sempre punti diversi che portano a piccole variazioni di omogeneità e qualità delle scene tridimensionali (Fig. 127).

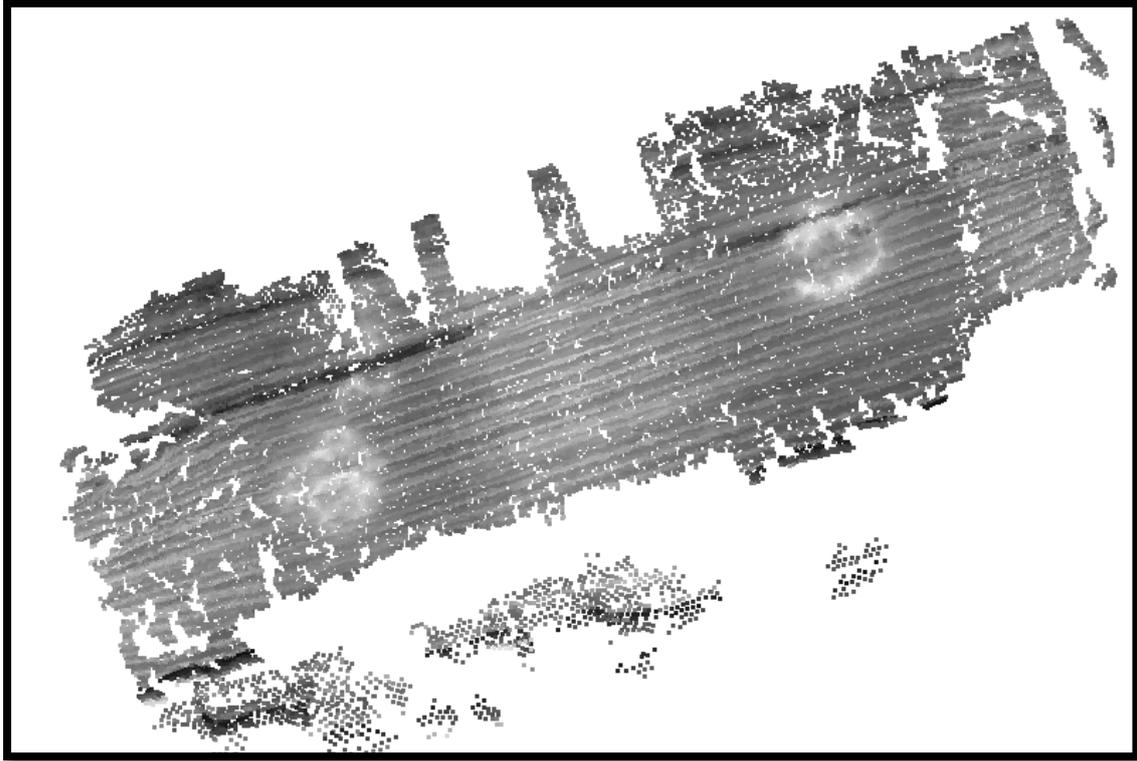


Fig. 127 - Visualizzazione nuvola densa di punti.

La variazione tra le due nuvole termiche consiste nella fase di georeferenziazione che si ottiene inserendo le coordinate dei PFA usando il comando “GCP-based Transformation” (  ).

Le coordinate planimetriche Nord e Est sono le stesse, cambia invece l’assegnazione della quota. Al posto della coordinata Up è stata inserita la temperatura del target termico corrispondente al PFA, per cercare di ottenere una nuvola che fornisca informazioni sulla temperatura dei punti e non sulla quota.

In questo modo il software crea una nuvola di punti nella quale a specifici pixel relativi ai target termici è stata attribuita oltre alle posizione planimetrica un’informazione termica.

L’obiettivo è quello di realizzare un DSM nel quale a punti aventi lo stesso valore radiometrico di grigio sia corrisposto una uguale informazione termica, così come succede per i classici modelli tridimensionali nei quali a punti aventi la stessa quota viene attribuita la stessa informazione.

Le coordinate planimetriche e le temperature riportate sono le seguenti (Tabella 10).

Sigla target termico	Coordinate planimetriche		Temperatura
	Latitudine	Longitudine	
rovN1007b_91Q8	168.05989	712.31124	36,5
rovN1007c_91Q8	160.23449	742.23683	37,1
rovN1007d_91Q8	137.23277	732.89103	39,1
rovN1007e_91Q8	155.54736	702.07617	56,1
rovN1007f_91Q8	118.49751	795.77789	39,1

Tabella 10 - Coordinate assegnate ai PFA, coordinate in metri e Temperatura in °C.

Il processo di assegnazione è lo stesso effettuato per l'altro modello termico in quanto le immagini considerate sono le stesse.

Come risultato della procedura fotogrammetrica si è ottenuta una nuvola di punti del terreno costituita da 33014 punti.

Terminato l'inserimento di tutti i punti di appoggio, si applica una trasformazione conforme a 7 parametri premendo  +Shift. Questa è una trasformazione che permette la roto-traslazione con fattore di scala.

Mettendo a confronto le coordinate inserite manualmente (User Coordinates) con quelle trasformate (Transformed points), si calcolano i residui dati dalla differenza tra il valore delle coordinate inserite e quelle trasformate, ottenendo i valori mostrati in Tabella 11

COORDINATE PFA IN WGS84			COORD. TRASFORMATE IN VisualSFM			RESIDUI		
N[m]	E[m]	T [°C]	N[m]	E[m]	T [°C]	N[m]	E[m]	T [°C]
168,05989	712,31124	36,5	167,8308	711,7056	41,1776	0,2291	0,6056	-4,6776
160,23449	742,23683	37,1	159,4303	741,2401	36,2716	0,8042	0,9967	0,8284
137,23277	732,89103	39,1	137,7749	733,5854	45,8027	-0,5421	-0,6944	-6,7027
155,54736	702,07617	56,1	156,2776	702,5687	47,7810	-0,7302	-0,4925	8,3190
118,49751	795,77789	39,1	118,2584	796,1929	36,8671	0,2391	-0,4150	2,2329

MEDIA	0,0000	0,0001	0,0000
MAX	0,8042	0,9967	8,3190
MIN	-0,7302	-0,6944	-6,7027

Tabella 11 - Calcolo dei residui e della media.

Come si può evincere dai valori di cui sopra, le medie dei residui calcolate sulle tre coordinate Nord, Est e UP sono tutte praticamente nulle. Questo individua la NON presenza di alcun sistematismo.

I residui dell'orientamento esterno mostrano un informazione nei riguardi della congruenza dei punti e delle immagini, e quindi sulla georeferenziazione complessiva.

L'errore planimetrico risulta essere molto alto, con picchi di 80 cm per il Nord e quasi un metro per la Est (punto B).

Importanti residui si ottengono anche per quanto riguarda le temperature, ad esempio nel punto D si ha un errore di più di 8°.

Il prodotto ottenuto in seguito alla realizzazione della nuvola densa di punti non è di grossa qualità. Sono presenti gli stessi problemi sorti nella scena termica precedente, di conseguenza è stata effettuata la stessa operazione per migliorarne la qualità individuando nuovi corrispondenze

Come ultimo prodotto si ottiene quindi una nuvola densa costituita da molti più punti, nella quale è stato riempito il vuoto in corrispondenza del picco di quota.

Alla fine del processo è stato ottenuto un prodotto costituito da 81563 punti (Fig. 128 - Nuvola densa di punti finale georeferenzata nel sistema UTM, scalimetro espresso in metri.) a discapito della nuvola precedente che ne conteneva solo 33014.

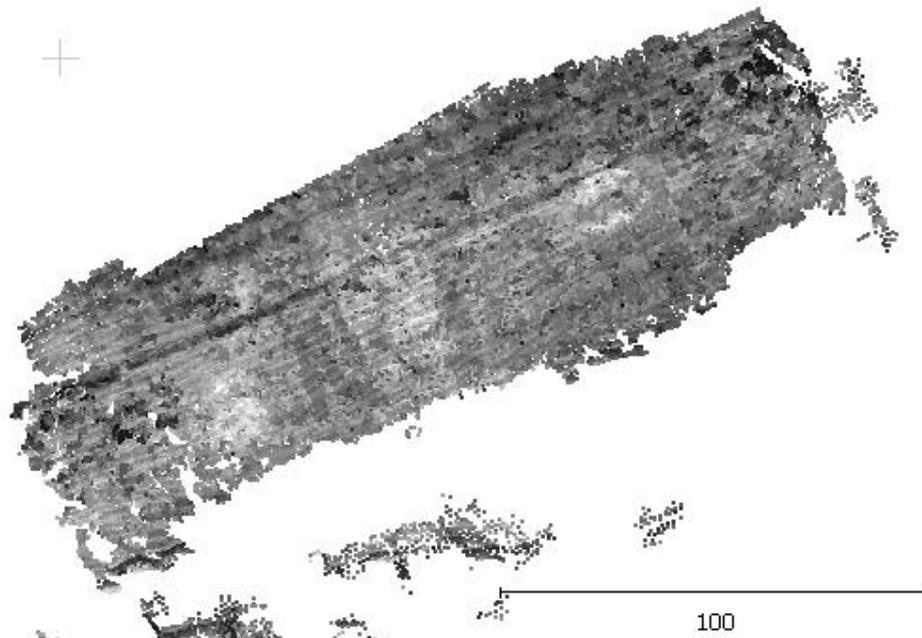


Fig. 128 - Nuvola densa di punti finale georeferenziata nel sistema UTM, scalimetro espresso in metri.

La variazione del valore della quota fa sì che il modello georeferenziato ottenuto non coincide con i due fatti in precedenza. Planimetricamente coincidono mentre altimetricamente c'è una differenza di orientamento, come si può notare dalla (Fig. 129).

Sovrapponendo il modello appena ottenuto con quello ricavato dalle immagini prese con la GoPro si nota che effettuando una vista dall'alto le due nuvole combaciano perfettamente, ma se si analizza di profilo si nota il diverso orientamento dovuto alla variazione del valore quota.

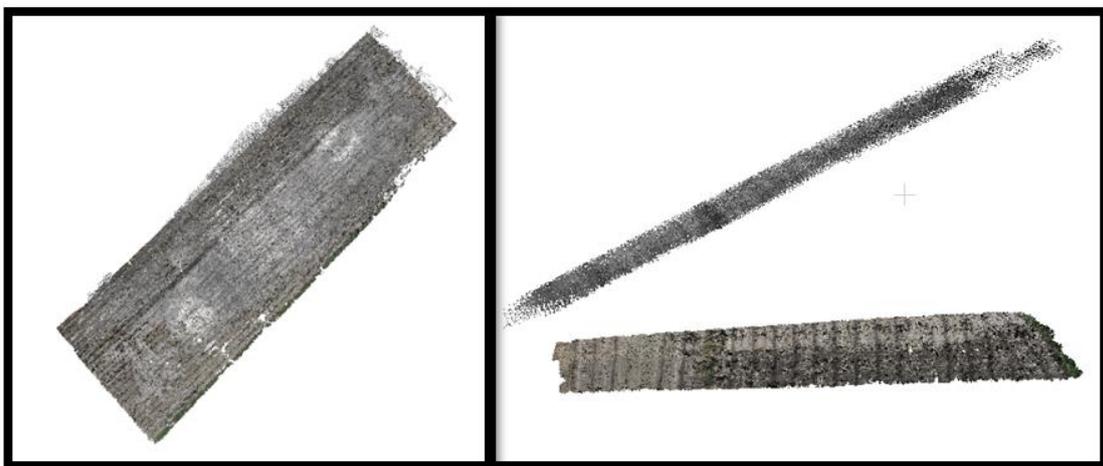


Fig. 129 - Sovrapposizione modello GoPro e termico. A sinistra una vista planimetrica, a destra si denota la diversità di orientamento.

# 8 TRATTAMENTO DELLE NUVOLE DENSE DI PUNTI

Le nuvole di punti ottenute nella fase di realizzazione della scena tridimensionale devono essere analizzate e trattate per ottenere dei modelli utili per i fini che ci si era preposti.

Queste nuvole infatti contengono molti outliers ed elementi di disturbo che devono essere eliminati.

Esistono molti software che permettono il trattamento delle nuvole dense tridimensionali e spesso sono di difficile utilizzo in quanto forniscono molti più dati informativi rispetto a quelli che e sono effettivamente richieste e che il committente è in grado di realizzare.

## 8.1 ELABORAZIONE CON CLOUDCOMPARE

L'ambiente che si sceglie di utilizzare per la trattazione e analisi della nuvola densa georeferenziata è CloudCompare. E' un software Open Source utilizzato per la gestione di nuvole di punti e mesh triangolari.

Inizialmente questo programma era progettato per eseguire dei confronti tra scansioni di immagini, solo successivamente sono stati introdotti numerosi di algoritmi che permettono l'analisi e il trattamento delle nuvole di punti. Il programma è in grado di eseguire diverse operazioni con le nuvole tra cui la registrazione, il ricampionamento, la gestione del colore, la gestione campi scalari, la generazione di ortofoto e profili, DEM statistiche di calcolo, gestione sensore, segmentazione interattiva o automatica, ecc).

Si basa su una specifica struttura *octree* (struttura di dati ad albero) che consente grandi performance. Tipicamente usa una maglia triangolare, una nuvola di punti (vertici della maglia) con una topologia associata (triplette di punti connessi corrispondenti a ogni triangolo).

Tra tutte le “caratteristiche” che possono essere associate a una nuvola di punti (colore, normale, etc.) una ha particolare importanza: il campo scalare.

CloudCompare è in grado di gestire più campi scalari contemporaneamente ed è anche possibile applicare delle operazioni (-,+,/,\*) tra due campi scalari di una stessa nuvola.

Permette di studiare ed elaborare due tipi di entità, le nuvole di punti e le mesh. Queste sono visualizzabili e modellabili grazie all’interfaccia grafica del software, rappresentata in nero nella (Fig. 130), nella quale è riportata anche la scala graduata e l’orientamento deli assi locali.

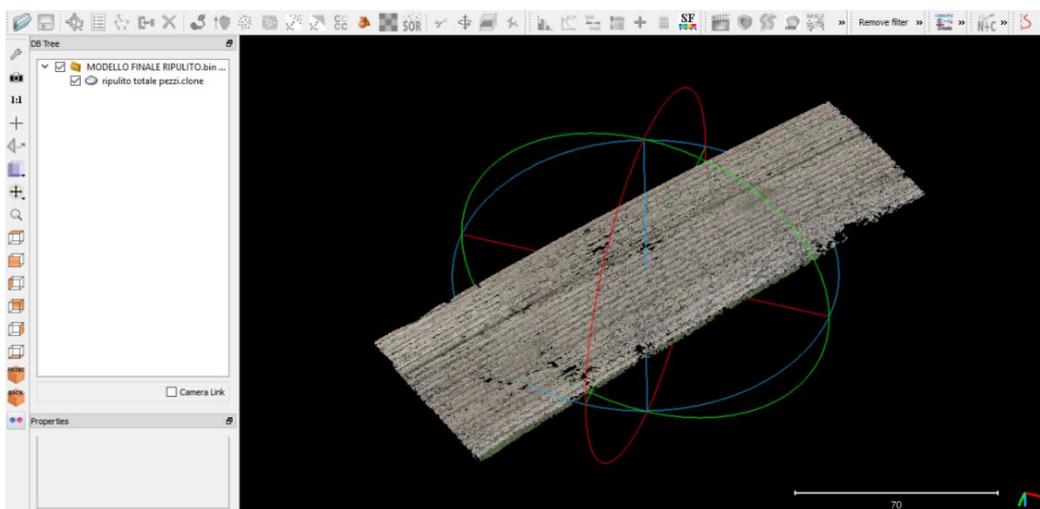


Fig. 130 - schermata principale Cloude Compare.

*Point Cloud*  : una nuvola di punti è un insieme di punti tridimensionali non organizzati (X,Y,Z). A questa possono esser associati dei vettori normali e dei colori che corrispondono al valore d'intensità del pixel corrispondente al punto 3D nell’immagine di riferimento o ad una media dei valori radiometrici presenti sui pixel di tutte le immagini in cui tale punto è visibile:

- Un unico colore per l’intera entità (RGB);
- Colori per punti (RGB);
- Vettori normali per punto ( $N_x, N_y, N_z$ ).

*Mesh*  : è un insieme di triangoli. Internamente, i triangoli sono rappresentati da triplete di indici interi. Questi indici sono relativi a una nuvola associata (vertici della mesh). Ad una maglia possono essere associati:

- Vettori normali per triangolo ( $N_x, N_y, N_z$ );
- Materiali per triangolo.
- Una mesh tipica generalmente corrisponde ad un unico oggetto.

Tramite l'impiego di questo software, a partire da una nuvola densa di punti realizzata precedentemente, si può perfezionare e isolare solo la parte di effettivo interesse.

Questo è fondamentale per il trattamento della nuvola in quanto consente la pulizia consentendo di eliminare tutte le fonti di disturbo nate dalla creazione della scena tridimensionale.

In particolare è possibile selezionare solo una parte dell'intera nuvola con il comando taglia (*Segment* ) che permette di conservare o eliminare la parte selezionata.

È inoltre possibile unire nuvole di punti differenti per crearne una unica.

Tale operazione può essere realizzata tramite il comando *Merge* .

Si possono poi creare sezioni dell'oggetto in esame tramite *Cross Section* . Permette all'utente di definire una casella di ritaglio attorno alla nuvola. Con questo comando si possono anche estrarre in sequenza una serie di segmentazioni ed estrarre contorni poligonali in ogni "fetta".

### 8.1.1 TRATTAMENTO NUVOLA GOPRO

La nuvola densa di partenza è costituita da 3007554 punti, questa però contiene un numero abbondante di outliers da eliminare in modo da ottenere una nuvola più pulita che rappresenti al meglio la porzione di territorio in esame.

Questi outliers rappresentano dei valori distanti da un campo di dati raccolti e sono quindi fonti di disturbo

Esistono dei comandi quasi automatici per eseguire questa operazione che si decide quindi di applicare per una prima pulizia, per poi passare a rilevarne eventuali residui manualmente.

Il comando, posizionato nella barra degli strumenti, è rappresentato da  ossia “*Label Connected Components*”.

Questo strumento segmenta la nuvola selezionata in parti più piccole separate da una distanza minima. Ogni parte rappresenta un componente collegato.

Si seleziona la nuvola da pulire e si aziona il comando, si apre una finestra nella quale vengono richiesti alcuni parametri (Fig. 131).

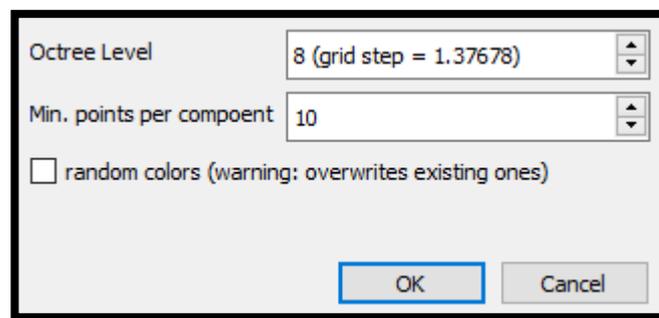


Fig. 131 - Interfaccia Label Connected Components.

I parametri da inserire sono due:

- “*Octree Level*” definisce quanto deve essere piccola la distanza tra due componenti. CloudCompare utilizza una griglia tridimensionale per estrarre i componenti collegati.
- “*Min. points per component*” permette di scegliere quali componenti sono da tenere in considerazione e quali da ignorare in funzione del numero minimo di punti di cui sono formati.

Al termine del processo i componenti saranno dei sottoinsiemi della nube originale e compariranno nella finestra che elenca le entità caricate nel software. Queste nuove nuvole avranno le stesse caratteristiche della principale (campi scalari, normali e colori). La prima nuvola (CC#0) è quella contenente la maggior parte dei punti ovvero il soggetto principale, le altre sono relative agli outliers da eliminare. Di seguito si riporta

la nuvola originale alla quale è stato applicato il comando “*Label Connected Components*” (Fig. 132, Fig. 133).

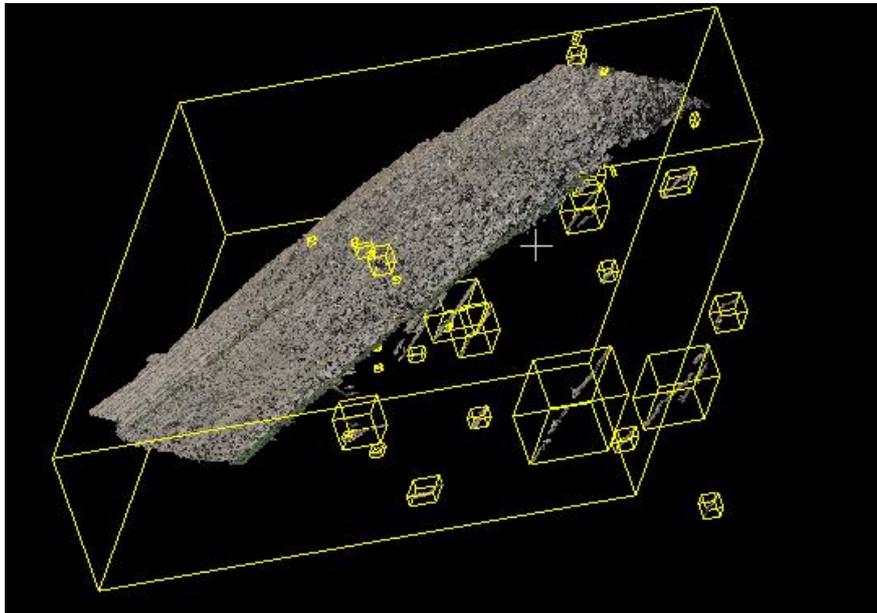


Fig. 132 - Vista dei componenti creati dall’algoritmo “Label Connected Components”.



Fig. 133 - Scomposizione in gruppi di punti.

In tutto sono stati creati 52 sottoinsiemi da eliminare. Questa procedura può essere effettuata più volte fino a che CloudCompare non individua altri blocchi di punti estrani dal corpo principale. Si procede con questa pulitura automatica fino a che la nuvola risulta non ulteriormente scomponibile.

Il prodotto ottenuto contiene comunque altri elementi di disturbo direttamente collegati all’oggetto. Questi vengono eliminati manualmente con il comando “*Segment*”  sempre riportato nella barra degli strumenti.

Permette di creare dei riquadri nei quali i punti contenuti vengono separati dalla nuvola principale e quindi possono essere cancellati. Nella figura viene visualizzato il comando, in verde è riportato il riquadro contenente gli outliers (Fig. 134).

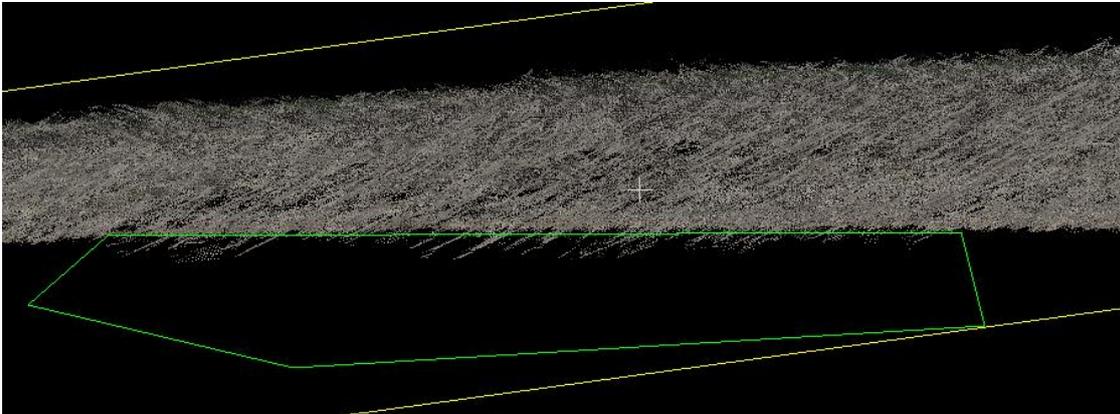


Fig. 134 - Vista del riquadro creato con il comando "Segment".

A questo punto, dopo aver accuratamente eliminato tutti gli outliers si ottiene una nuvola densa composta da 2594552 punti (Fig. 135). Rispetto a quella iniziale ne sono stati eliminati 413002 ovvero circa il 13,8%.

La densità media dei punti risulta di circa 198 punti ogni metro quadro.

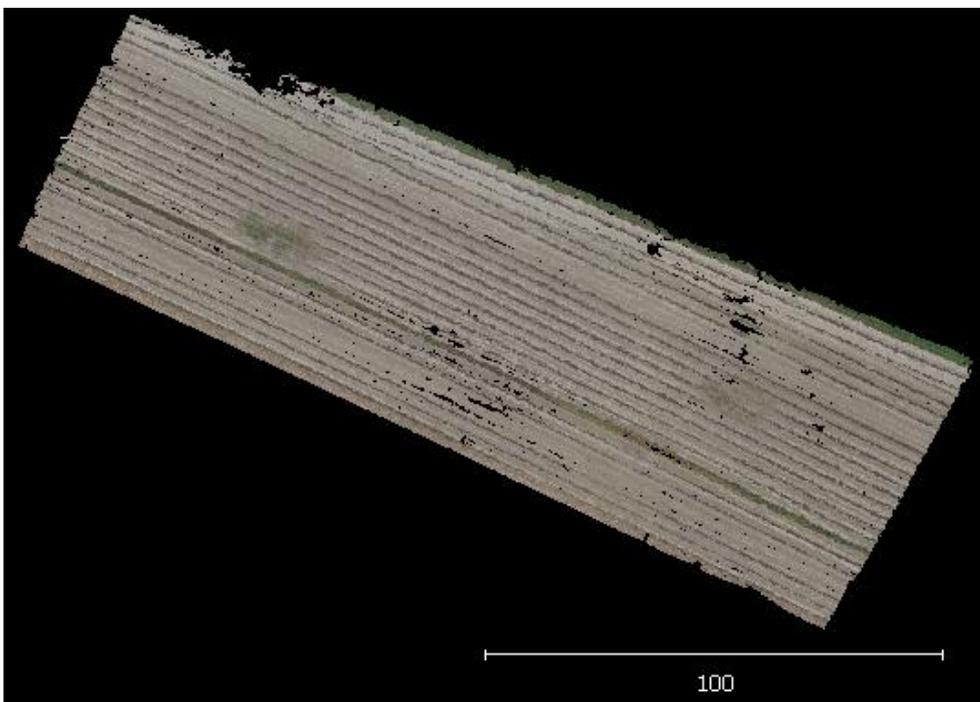


Fig. 135 - Nuvola densa ripulita dagli outliers, scalimetro in metri.

La suddetta nuvola presenta diversi “buchi” che si deve cercare di colmare al fine di ottenere un buon prodotto per lo studio di profili e sezioni in modo da analizzarne la morfologia.

A tale scopo si è cercato il migliore interpolatore implementato nel software per il caso specifico. In CloudCompare sono importati diversi algoritmi interpolatori:

- *Delaunay 2.5D (XY plane)*;
- *Delaunay 2.5D (best fit plane)*;
- *Poisson Surface Reconstruction*.

Gli algoritmi di *Delaunay* sono adatti all’interpolazione di nuvole convesse, mentre nel caso si lavorasse con nuvole di punti rappresentanti una scena tridimensionale è più appropriato l’utilizzo dell’algoritmo di *Poisson*.

In questo caso è stato scelto “*Poisson Surface Reconstruction*”, algoritmo idoneo ad essere applicato a nuvole o scene tridimensionali.

“*Poisson Surface Reconstruction*” è stato sviluppato da Kazhdan, Bolitho e Hoppe nel 2006.

Per poter utilizzare questo plugin, è necessario che il data set messo in input abbia associato ad ogni punto della nuvola la sua normale rispetto alla superficie. Partendo dall'insieme di tutte le normali l'algoritmo permette di ricavare la forma dell'oggetto iniziale risolvendo quello che viene visto come un Problema di *Poisson*, da cui il nome.

L’output di questo algoritmo è una iso-superficie, una via di mezzo tra la nuvola di punti e la mesh finale.

Il comando utilizzato è indicato con l’icona  all’interno del menu a tendina “*Plugins*”.

Si seleziona quindi la nuvola interessata e si apre una finestra (Fig. 136) che propone diversi parametri.

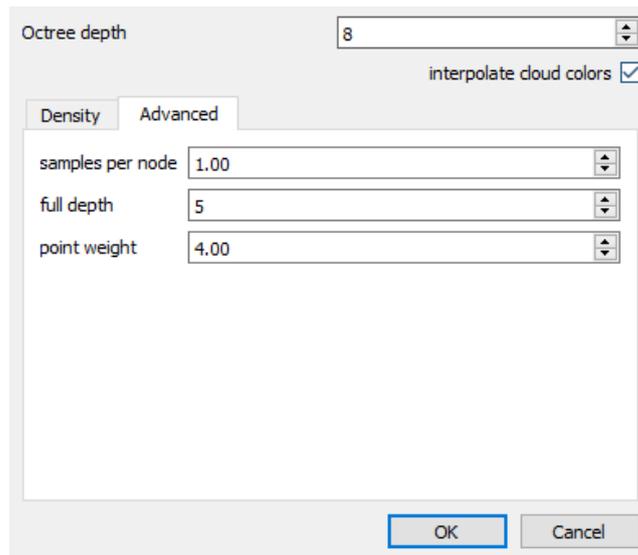


Fig. 136 - Interfaccia grafica Poisson Surface Reconstruction.

Il parametro principale è “*octree depth*”.

Permette di modificare l’altezza massima dell’octree. Valori maggiori danno una ricostruzione più precisa, mentre valori minori migliorano il tempo di elaborazione. Nell’immagine seguente (Fig. 137) sono rappresentate diverse ricostruzioni della stessa *point cloud* con diverse *depth*.

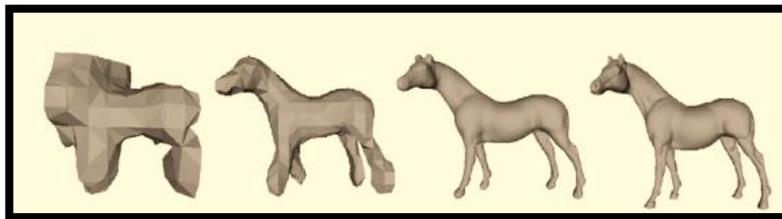


Fig. 137 - Interpolazione di Poisson con indice di "Depth" differenti: 3, 4, 6, 10.

“*Samples per node*”: questo parametro permette di settare quanti punti saranno contenuti in ciascun blocco prima che questo venga suddiviso in blocchi più piccoli. Diminuire questo parametro permette di suddividere l’iso-superficie in molte più parti, a rischio, però, di aumentare enormemente il tempo di elaborazione per un vantaggio che può essere difficilmente visibile. D’altro canto, aumentare il valore di questo parametro permette di smussare le curve e questo, se fatto in modo appropriato, può risultare un effetto di soppressione del rumore.

Vengono fatte diverse prove per verificare quali siano i parametri corretti da adottare.

Si decide di lasciare le impostazioni avanzate di default, mentre per quanto riguarda l'octree depth si è deciso di aumentarlo a 9 (default era 8) per ottenere una mesh interpolante più precisa senza comunque allungare di tanto i tempi di esecuzione.

Dopo poco tempo si ottiene il seguente prodotto (Fig. 138).

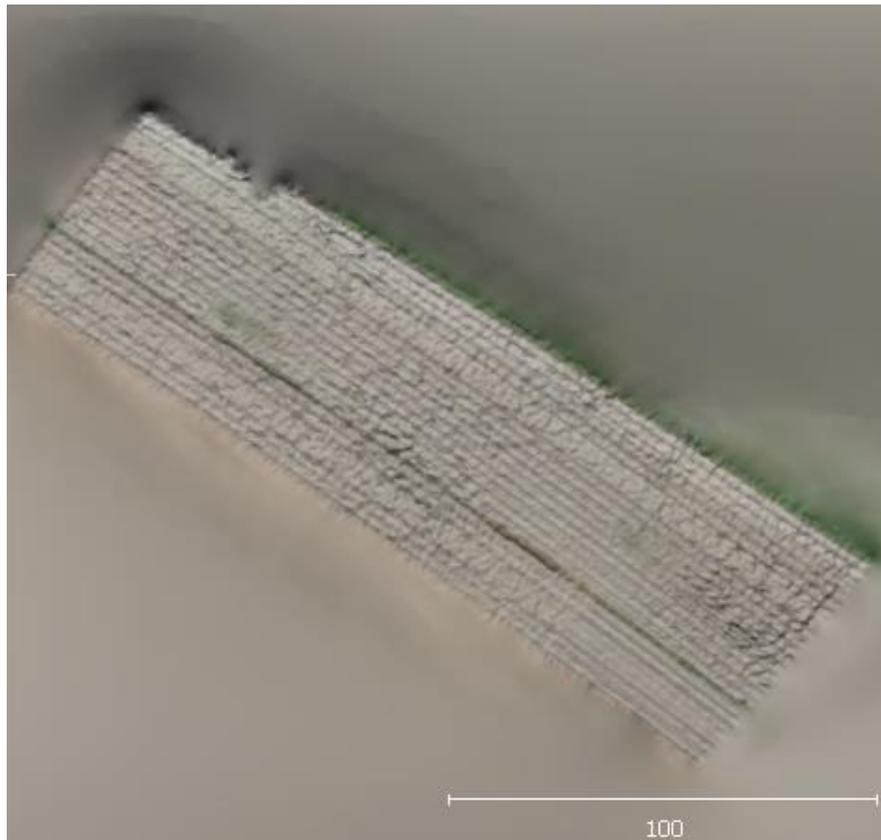


Fig. 138 - Modello interpolato tramite l'algoritmo di Poisson, scalimetro in metri.

È stata realizzata una superficie rettangolare che interpola i punti considerati andando a colmare i vuoti. Per pulire la parte in eccesso si usa il comando “*Segment*”, ottenendo così il prodotto finale (Fig. 139) dal quale potranno essere effettuate le analisi su sezioni e profili.

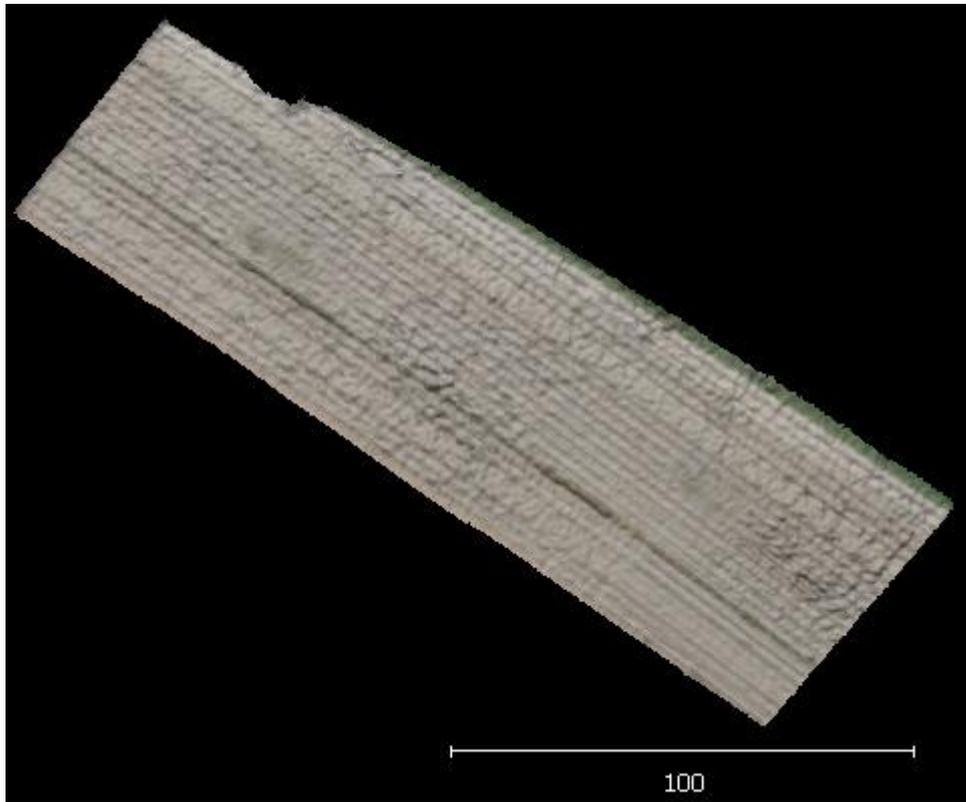


Fig. 139 - Modello interpolato pulito, scalimetro in metri.

Con CloudCompare è possibile studiare geometricamente la porzione di territorio interessata, estraendo sezioni e profili dell’oggetto considerato (Fig. 140). Utilizzando il comando “*Cross Section*”  è possibile isolare parti del modello in modo da studiarne la morfologia.

Vengono create 2 sezioni trasversali (Fig. 141) e un profilo longitudinale (Fig. 142). Di seguito inoltre vengono individuate le sezioni, in verde, e il profilo, in rosso, all'interno del modello interpolato pulito.

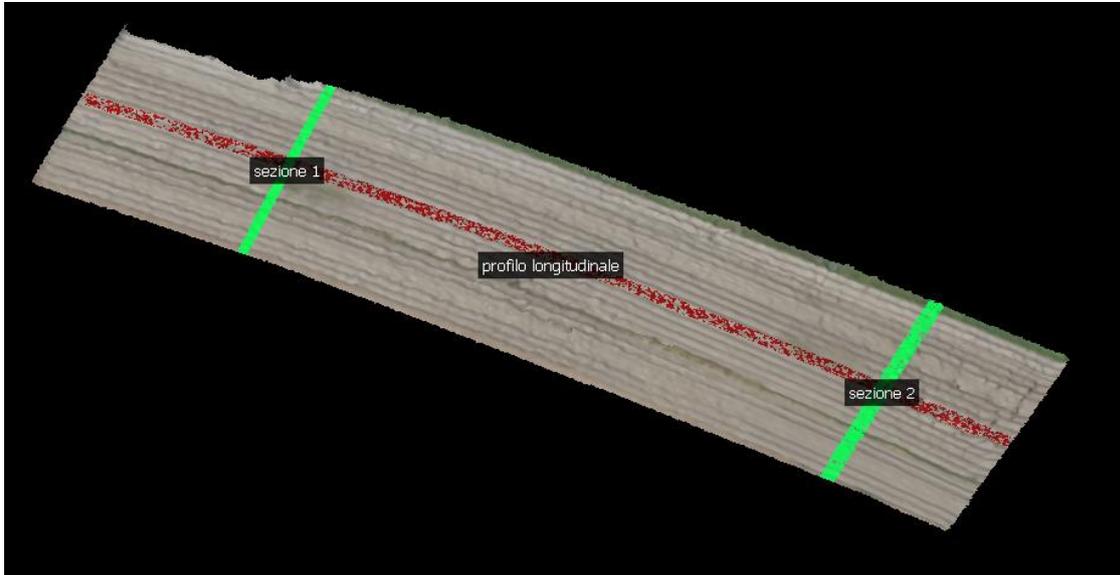


Fig. 140 - Visualizzazione profilo (rosso) e sezioni (verde) estrapolate.



Fig. 141 - Sezione trasversale, scalimetro in metri.

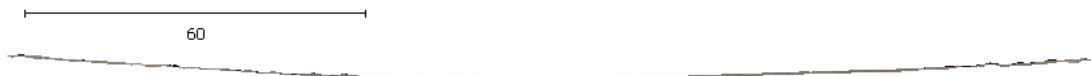


Fig. 142 - Profilo longitudinale, scalimetro in metri.

Per la valutazione del *Groud Sampling Distance* (GSD) è necessario conoscere le quote dei fotogrammi. Nel caso in esame il volo non ha mantenuto una quota costante per tutto il rilievo, di conseguenza sono state considerate le quote di volo riferite a punti significativi (Fig. 143).

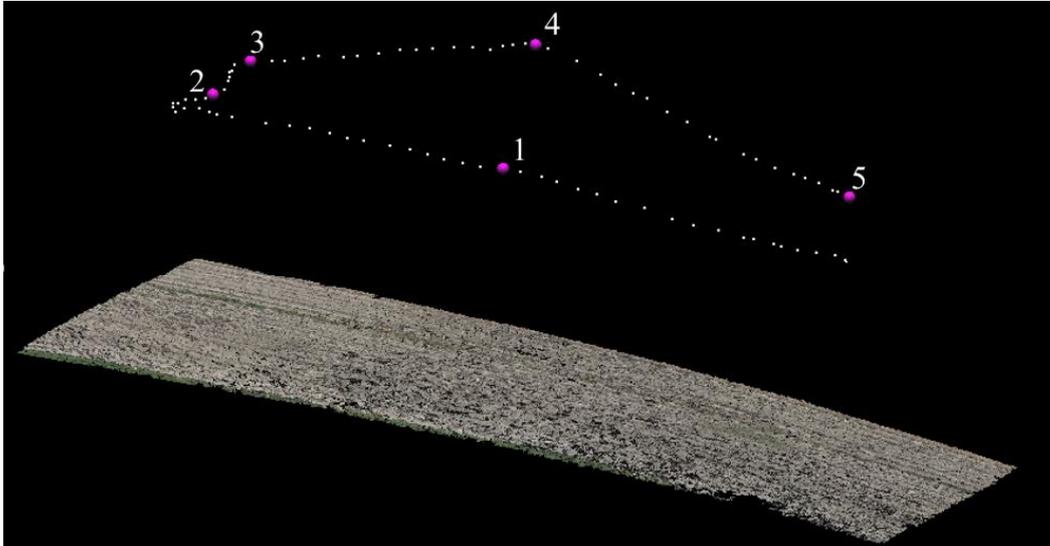


Fig. 143 - Visualizzazione del tragitto percorso dal drone, punti significativi evidenziati in viola.

I punti sono stati così scelti:

- 1) Punto centrale tratto a quota costante;
- 2) Punto centrale tratto di inversione di rotta;
- 3) Punto di partenza del tratto con variazione di quota;
- 4) Punto centrale di picco;
- 5) Punto finale di atterraggio.

Per trovare la quota relativa quei fotogrammi è si trova il punto sul territorio avente le stesse coordinate planimetriche e ne è stata valutata la differenza di quota. I risultati sono di seguito riportati (Tabella 12).

Nome punto	Quota
1	44,337
2	44,194
3	49,373
4	64,348
5	43,324

Tabella 12 - Quote punti significativi, quota in metri.

Questo permette di valutare la dimensione del pixel di un immagine a terra, il Ground Sampling Distance (14). A parità di grandezza del sensore della fotocamera il GSD sarà tanto più grande quanto più la foto è scattata da una quota maggiore.

In Tabella 13 viene calcolato il GSD relativo ai 5 punti significativi.

Nome punto	Quota [m]	Quota [mm]	Lunghezza focale[mm]	Dimensione Pixel [mm]	GSD [mm]
1	44,337	44337	14	0,015	47,5
2	44,194	44194	14	0,015	47,3
3	49,373	49373	14	0,015	52,8
4	64,348	64348	14	0,015	68,9
5	43,324	43324	14	0,015	46,4

Tabella 13 - Ground Sampling Distance GoPro.

### 8.1.2 TRATTAMENTO NUVOLA TERMICA

La nuvola densa di partenza è costituita da 90454 punti, questa però contiene un numero abbondante di outliers da eliminare in modo da ottenere una nuvola più pulita che rappresenti al meglio la porzione di territorio in esame.

Il primo passaggio è costituito dall'eliminazione semiautomatica effettuata dal comando “*Label Connected Components*” . Di seguito (Fig. 144) si riporta la nuvola originale alla quale è stata applicata la prima scrematura dalle fonti di disturbo.

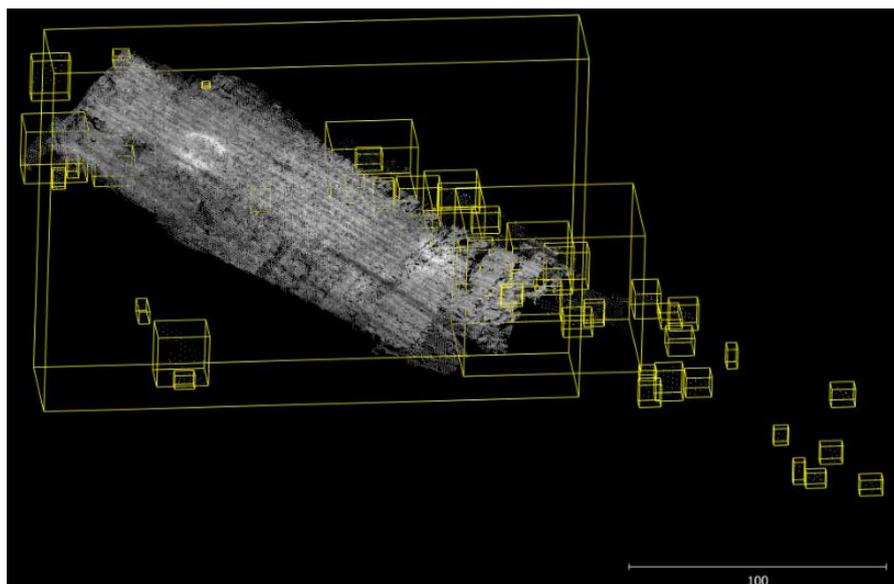


Fig. 144 - Vista dei componenti creati dall'algoritmo "Label Connected Components".

Il prodotto ottenuto contiene comunque altri elementi di disturbo direttamente collegati all'oggetto. Questi vengono eliminati manualmente con il comando "Segment"  .

A questo punto, dopo aver accuratamente eliminato tutti gli outliers si ottiene una nuvola densa composta da 70258 punti riportata in (Fig. 145). Rispetto a quella iniziale ne sono stati eliminati 20196 ovvero circa il 22,3%.

La densità media dei punti risulta di circa 6 punti ogni metro quadro.

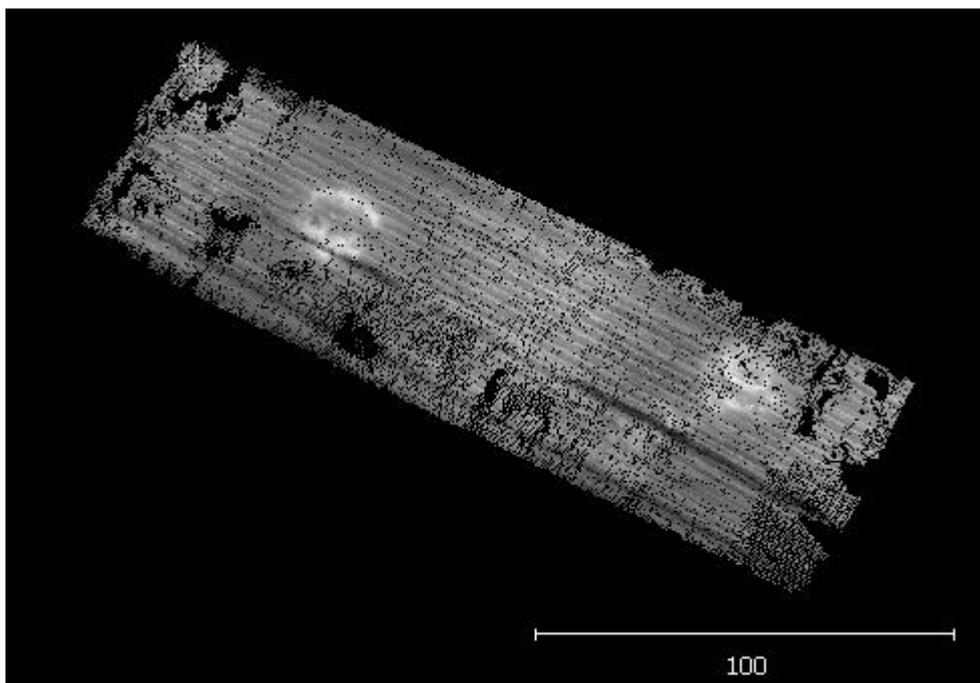


Fig. 145 - Nuvola densa ripulita dagli outliers, scalimetro in metri.

Essendo costituita da molti meno punti rispetto a quella ottenuta con i fotogrammi a maggior risoluzione della videocamera non viene effettuata la fase di interpolazione.

La grossa presenza di buchi, affiancata alla minor quantità di dati ottenuta, produrrebbe in interpolazione errata che non rappresenta la morfologia dell'area.

Di conseguenza anche l'estrapolazione di sezioni e profili non risulta un'operazione utile, in quanto la nuvola relativa alle foto scattate con la GoPro è molto più rappresentativa della realtà.

Con le stesse quote relative ai punti significativi viene calcolato il GSD in Tabella 14.

Nome punto	Quota [m]	Quota [mm]	Lunghezza focale[mm]	Dimensione Pixel [mm]	GSD [mm]
1	44,337	44337	33,63093	0,09044	119,2
2	44,194	44194	33,63093	0,09044	118,8
3	49,373	49373	33,63093	0,09044	132,7
4	64,348	64348	33,63093	0,09044	173,0
5	43,324	43324	33,63093	0,09044	116,5

Tabella 14 - Ground Sampling Distance Optris Pi 450.

### 8.1.3 TRATTAMENTO NUVOLA TERMICA TERMICO-TEMPERATURE

La nuvola densa di partenza è costituita da 81563 punti, questa però contiene un numero abbondante di outliers da eliminare in modo da ottenere una nuvola più pulita che rappresenti al meglio la porzione di territorio in esame.

In seguito alla pulizia degli outliers effettuata con “*Label Connected Components*” e “*Segment*” si è ottenuta una nuvola densa composta da 55536 punti riportata in (Fig. 146). Rispetto a quella iniziale ne sono stati eliminati 26028 ovvero circa il 31.9%.

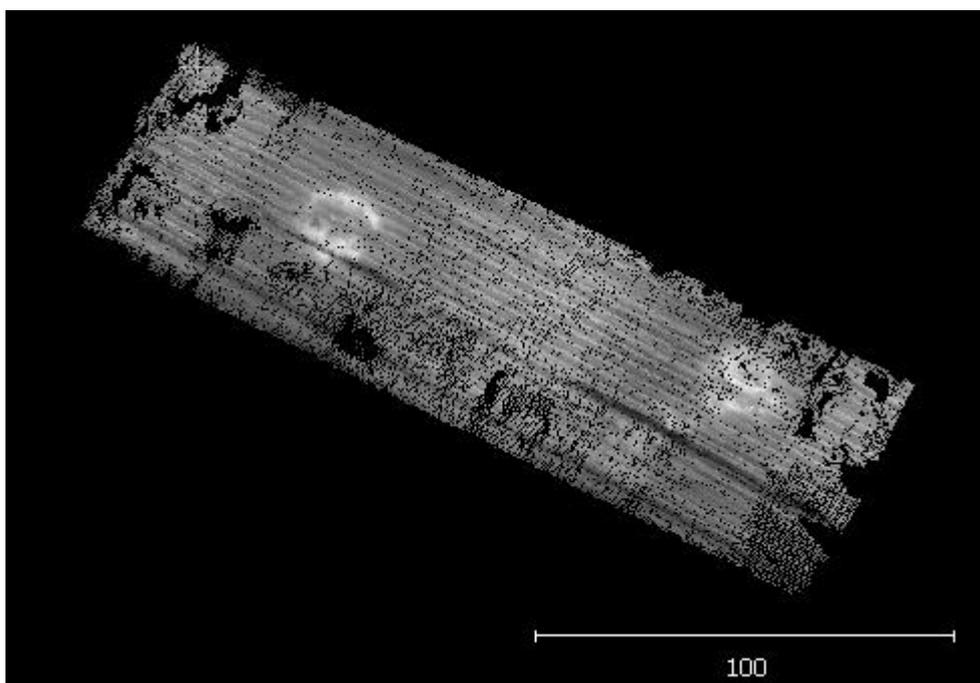


Fig. 146 - Nuvola densa ripulita dagli outliers, scalimetro in metri.

Anche per questa nuvola non viene creata l'interpolazione con *Poisson*.

Questo prodotto georeferenziato non è orientato come i due precedenti, ma appartiene ad un piano inclinato rispetto a quello occupato dalle altre due nuvole avente anche valori di quota differenti.

Planimetricamente invece le scene combaciano alla perfezione, infatti se viene effettuata una vista dall'alto di questo modello sovrapposto a quello della GoPro si nota che le anomalie termiche ricoprono perfettamente le macchie verdastre presenti nella scena rappresentativa della porzione di territorio.

Il modello termico-temperature risulta essere leggermente stirato rispetto agli altri due in quanto anche se diversamente orientato la sua proiezione sul piano della GoPro si adatta perfettamente ai lineamenti reali (Fig. 147, Fig. 148).

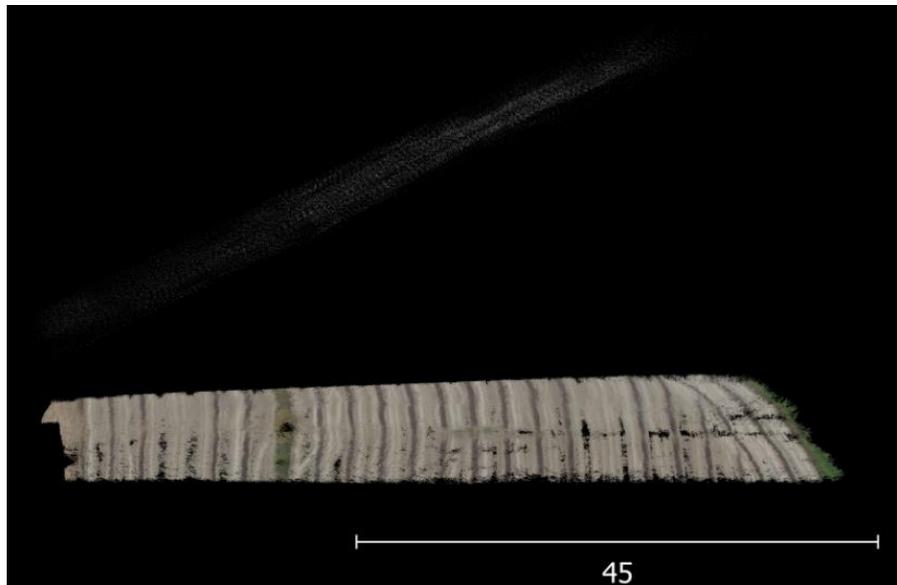


Fig. 147 - Vista frontale del modello RGB sovrapposto al modello termico temperatura.

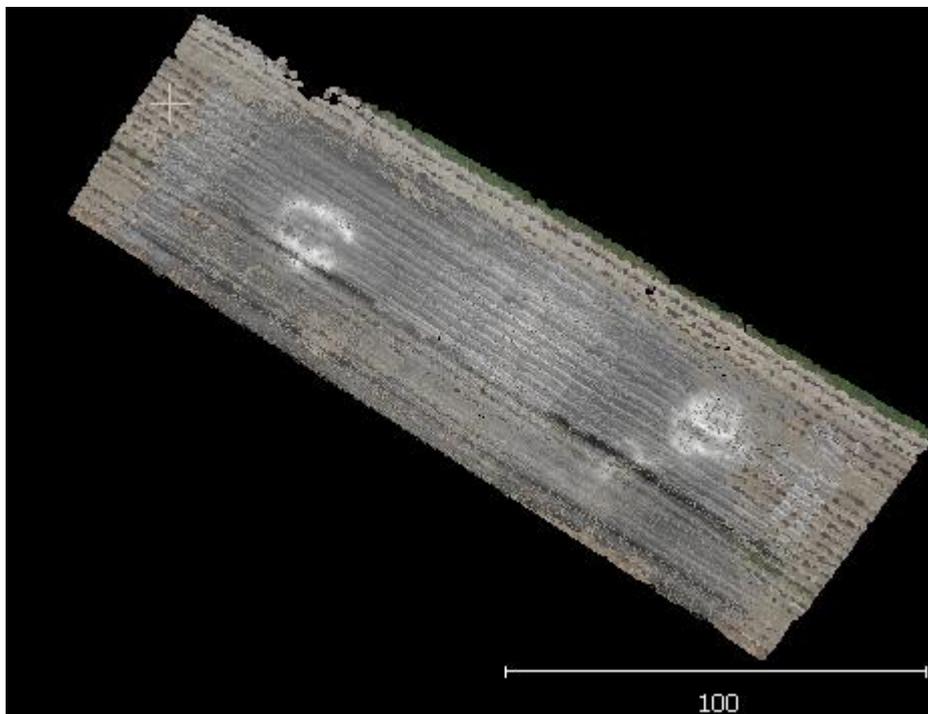


Fig. 148 - Sovrapposizione modello quota-temperatura con modello GoPro visto dall'alto, scalimetro in metri.

In conseguenza del diverso orientamento ottenuto, questo modello non viene utilizzato per un raffronto geometrico con gli altri 2 DSM. Inoltre l'informazione sulla temperatura non è attendibile in quanto, come descritto in Tabella 11, i residui relativi al valore termico sono molto alti.

Si è cercato quindi una modalità alternativa per ottenere i valori termici relativi al valore radiometrico del singolo punto.

## 8.2 CONVERSIONE VALORE RADIOMETRICO CON TEMPERATURA

Durante la fase di trattamento del dato è stata persa l'informazione sulle immagini termiche relative alla temperatura.

Più precisamente quando è stato utilizzato ImageJ per convertire l'immagine testo (formato .txt) termica in immagine con formato JPEG è stato assegnato al pixel il valore radiometrico corrispondente.

Prima della trasformazione di formato l'immagine testo era costituita da una matrice in cui ad ogni pixel costituente l'immagine era assegnato il valore di temperatura misurato dalla termocamera. In seguito alla conversione ImageJ ha realizzato una immagine a cui, invece che la  $T^{\circ}$ , ad ogni pixel è stato assegnato il valore radiometrico di grigio corrispondente alla porzione di immagine occupata dal pixel.

Di seguito (Fig. 149) è riportata una vista dei valori dei primi elementi delle matrici rappresentanti le due immagini convertite, a sinistra l'immagine testo con i valori di temperatura e a destra l'immagine JPEG con i valori radiometrici.

	A	B	C	D		A	B	C	D
1	23.90	23.34	23.34	23.34	1	156	157	159	163
2	23.57	23.07	23.12	23.28	2	157	158	160	162
3	23.39	23.07	22.83	23.19	3	158	160	161	162
4	23.41	22.98	22.98	23.03	4	158	161	163	163
5	23.34	22.87	22.76	22.96	5	157	161	163	162
6	23.19	22.85	22.65	22.80	6	156	160	164	163
7	23.07	23.01	23.05	22.96	7	157	160	164	166
8	23.10	23.03	22.87	23.03	8	157	160	164	168
9	23.32	22.92	22.85	22.89	9	156	158	162	166
10	23.07	22.71	22.76	22.69	10	158	160	163	167

Fig. 149 - Perdita informazione sulla temperatura, a sinistra la matrice originale con i valori di temperatura assegnati ad ogni pixel, a destra la matrice trasformata in scala di grigi.

I valori di temperatura dei punti caratterizzanti le immagini sono fondamentali per effettuare degli studi termici della zona inquadrata dalla termocamera affiancati a quelli geometrici effettuati sul modello tridimensionale ottenuto con le immagini RGB.

Per ottenere nuovamente i valori di temperatura è si applica un procedimento di conversione descritto di seguito.

Per prima cosa è si sceglie un immagine termica campione in formato JPEG che contiene un alto gradiente termico tra due diversi pixel. La differenza di temperatura deve essere il più grande possibile in modo da poter rappresentare il gradiente massimo di temperatura presente nel modello termico in quanto andrà confrontato con il gradiente radiometrico di tutto il modello termico.

L'immagine utilizzata per l'analisi è la 57\_52 (Fig. 150) in quanto è contenuta una macchia termica a temperatura elevata (bianca) ed una zona perimetrale a sinistra a temperatura molto bassa (nera).

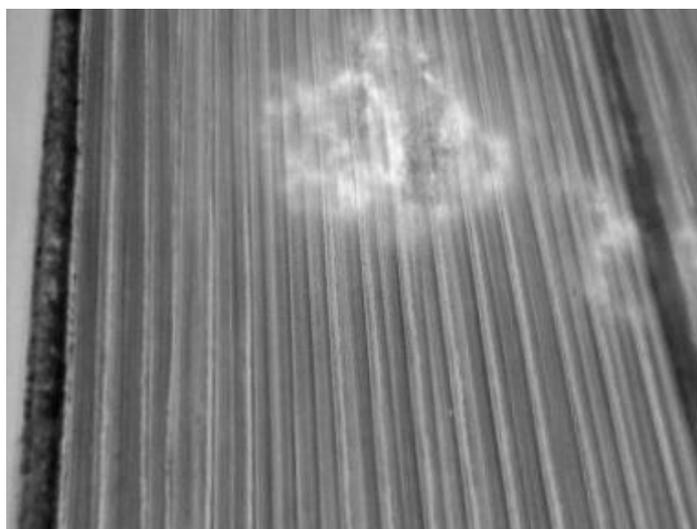


Fig. 150 - Immagine termica utilizzata per il processo di conversione.

Di questa immagine se ne calcolano i valori massimi e minimi di temperatura. L'intervallo di temperatura è stato estratto aprendo con Excel l'immagine testo originale ed è risultato il seguente:

$$\begin{cases} T_{min} = 20,01 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{max} = 29,08 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (31)$$

Per ottenere i valori radiometrici limite invece è stato analizzato con Excel il modello termico esportato da CloudCompare in formato .OBJ.

Questo file è costituito da 6 colonne, E, N, Q, R, G, B. Le prime tre riportano le coordinate Est, Nord e quota di tutti i punti che costituiscono la nuvola tridimensionale.

Le ultime riportano i valori di Red, Green e Blu. Queste tre colonne sono uguali in quanto l'immagine è in toni di grigio e quindi rappresentano il valore radiometrico di grigio associato ad ogni punto.

Di una di queste colonne ne sono stati individuati i valori radiometrici limite:

$$\begin{cases} Rad_{min} = 4 \\ Rad_{max} = 251 \end{cases} \quad (32)$$

Si calcola poi la differenza tra i valori di temperatura e di radiometria e ne si valuta il rapporto.

$$\Delta T = 29,08 - 20,01 = 9,07 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta Rad = 251 - 4 = 247 \quad (33)$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta Rad} = \frac{9,07}{247} = 0,0367206$$

A questo punto è possibile trovare il fattore correttivo che permette di ottenere il valore di temperatura partendo dal valore radiometrico fornito dal modello termico.

La temperatura corrispondente al valore i-esimo radiometrico è la seguente:

$$T_i = T_{min} + (Rad_i - Rad_{min}) * \frac{\Delta T}{\Delta Rad} \quad (34)$$

Dove:

$$T_{min} + (Rad_i - Rad_{min}) * \frac{\Delta T}{\Delta Rad} = R^* \quad \text{Fattore correttivo} \quad (35)$$

A questo punto si è creato un file CSV nel quale vengono riportate tre colonne. Le prime due relative alle coordinate planimetriche Est e Nord e la terza con tutte le temperature associate ad ogni singolo punto (Fig. 151).

	A	B	C
1	E	N	R*
2	55,5409	822,215	24,4532
3	56,0304	821,5	24,4532
4	56,4735	820,76	24,15943
5	57,5315	819,201	24,23287
6	57,9296	818,515	24,2696
7	58,3276	817,829	24,2696
8	55,5482	823,832	23,53518
9	56,0123	823,03	23,82895
10	56,4453	822,298	23,97583

Fig. 151 - Temperature associate ai punti.

## 8.3 CREAZIONE ORTOFOTO

Una ortofoto è una fotografia che deriva, nel nostro caso, dalla composizione di più fotogrammi aerei, che risulta geometricamente corretta in modo tale da essere descritta tramite una scala di rappresentazione uniforme in quanto geo-referenziata, ed equivale quindi ad una mappa.

Su questa “mappa” possono essere effettuate misure di distanze o altro che sono a tutti gli effetti reali; vi si può inoltre interagire in modo tale da realizzare confronti o evidenziare elementi o parti di interesse differenziandoli da altri.

Per la realizzazione dell’ortofoto si usa un software chiamato “Global Mapper” che offre la possibilità di visualizzare, manipolare e modificare nuvole di punti.

L’utilizzo di questo software permetterà di ottenere un’immagine ad alto livello di dettaglio, nella scala desiderata e tramite un semplice procedimento vi si assocerà il file .tfw che ne permette la georeferenziazione nello spazio.

### 8.3.1 REALIZZAZIONE ORTOFOTO GOPRO

Il primo passaggio da fare è esportare da CloudCompare la nuvola di punti in formato TIF che verrà successivamente importata in Global Mapper per l’ottenimento dell’ortofoto.

L'estrazione dell'immagine si effettua selezionando dal menu a tendina "*Display*" il comando "*Render to file*". Si aprirà una finestra (Fig. 152) nella quale deve essere riportato il nome del file da salvare e impostare il valore di zoom da cui dipenderà la risoluzione del prodotto finale. Maggiore sarà lo zoom, migliore sarà la risoluzione del file TIF e maggiore sarà la memoria occupata dal dato.

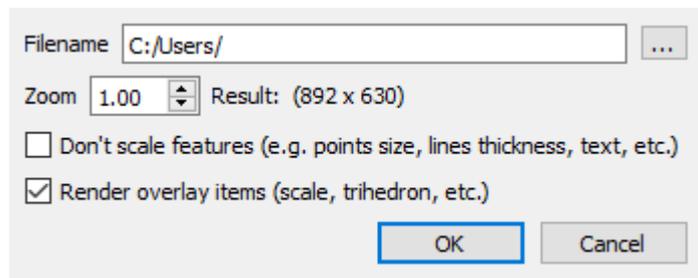


Fig. 152 - Schermata "Render to file".

Un altro parametro da impostare è la grandezza con la quale devono essere rappresentati i singoli punti della nuvola, questo è modificabile direttamente accedendo alle proprietà dell'entità.

Il valore dello Zoom è impostato di default su uno e come indicato fornisce un TIF di 892x630 pixel.

In base alla precisione raggiunta durante il rilievo effettuato con la GoPro, nel quale si sono evidenziati dei residui medi in planimetria intorno ai 5 cm si è deciso di utilizzare uno zoom pari a 8 e una dimensione dei punti di 3.

Il dato ottenuto è un'immagine .tif dal peso di 162 MB e dimensioni 8464x5040 pixels.

Una volta realizzata l'immagine con i parametri scelti, si importa il file all'interno di Global Mapper con "*open your own data files*" selezionando "*manually rectify image*". Si apre una schermata all'interno della quale sono presenti due finestre raffiguranti l'immagine caricata che permettono l'inserimento di determinati punti per permettere la georeferenziazione dell'ortofoto.

Normalmente si dovrebbero inserire le coordinate misurate sui PFA ma la grandezza del pixel a terra non consente di individuare sul DSM la posizione di tali punti.

Bisogna quindi individuare dei punti caratteristici del Modello denso individuabili su Global Mapper di cui se ne conoscano le coordinate.

Per ogni modello sono quindi state ricavate su CloudCompare le coordinate dei punti corrispondenti ai 4 spigoli della porzione di territorio (Fig. 153) utilizzando il

comando “*Point picking*”  che fornisce informazione su coordinate, distanze e angoli.

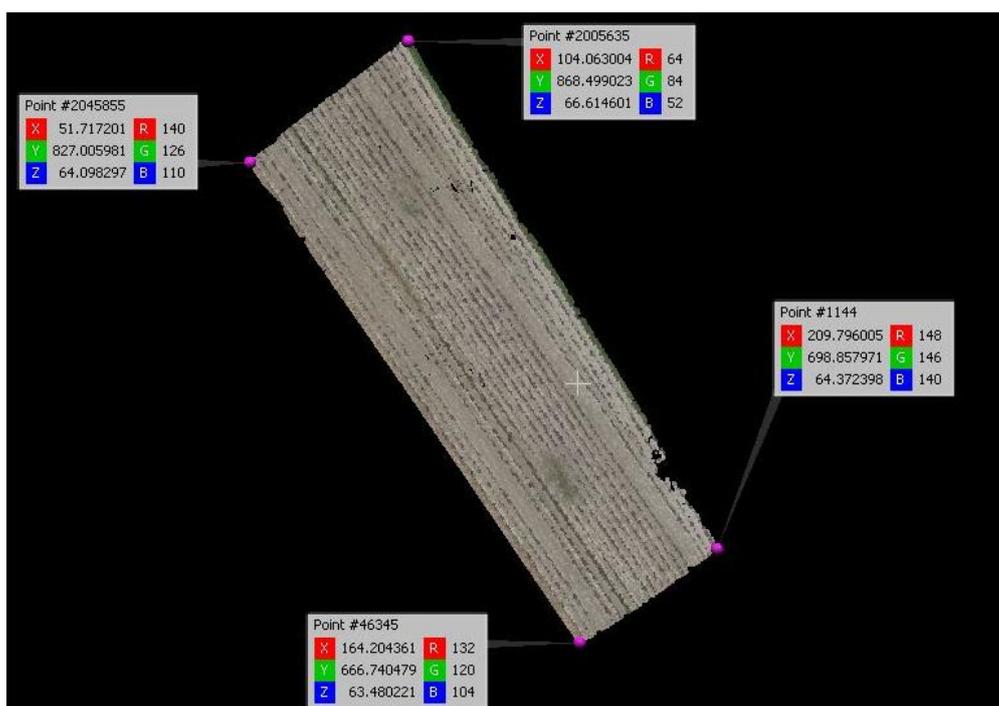


Fig. 153 - Individuazione coordinate dei 4 vertici della porzione di territorio.

Per ogni punto è stata creata una monografia nella quale si nota con precisione a quale fanno riferimento le coordinate estrapolate (Fig. 154). È stata modificata alla la size point in modo da riconoscerli meglio.

Le coordinate dei 4 spigoli sono riportate in Tabella 15.

NOME PUNTO	COORDINATA X=NORD [m]	COORDINATA Y=EST [m]
ALTO SINISTRA	51.717	827.006
ALTO DESTRA	104.063	868.499
BASSO DESTRA	209.796	698.858
BASSO SINISTRA	164.204	666.740

Tabella 15 - Coordinate dei punti estremi del modello.

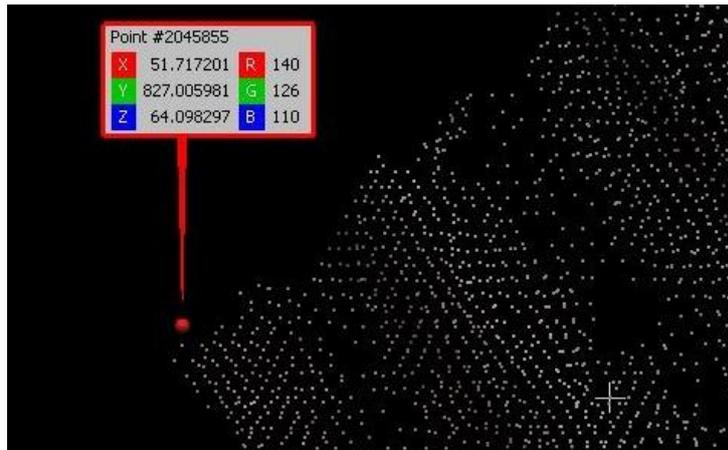


Fig. 154 - Monografia localizzazione punto in alto a sinistra modello GoPro.

Successivamente si individua il medesimo punto su Global Mapper che in automatico ne valuta le coordinate pixel (Fig. 155). A questo punto si inseriscono le coordinate UTM di tutti e 4 i punti precedentemente esportate da CloudCompare.

Il sistema di riferimento deve essere impostato da “*Select Projection*” selezionando UTM e assegnando la zona 33 dell’emisfero nord compresa tra il 12° e il 18° meridiano EST.

La coordinata X corrisponde alle Nord e la Y alle est in quanto al momento dell’assegnazione di esse su VisualSFM è stata inserita prima la nord e poi la est e il software assegna alla prima l’asse X e alla seconda la Y.

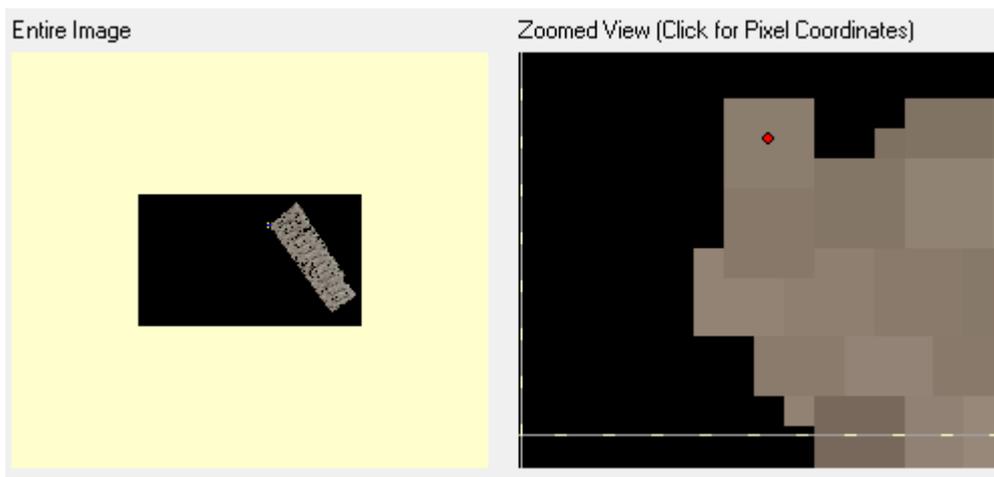


Fig. 155 - Individuazione punto su Global Mapper.

In Global Mapper è inserita una funzione chiamata “*shift all*” che permette di traslare tutte le coordinate di un determinato valore. In questo modo possono essere ripristinate le coordinate originali inserendo i valori precedentemente eliminati nella fase di georeferenziazione su VisualSFM. Le traslazioni applicate sono:

- 4974000 m in direzione NORD
- 190000 m in direzione EST

Una volta realizzata l’immagine con i parametri scelti, si deve creare il file testo associato per la georeferenziazione quindi si esporta l’immagine in formato Geotiff. Questo crea 2 file, uno .tif contenente solo l’immagine senza le informazioni geografiche ed un altro in formato .tfw che è lo standard del file di georeferenziazione e si presenta nel seguente modo (Fig. 156):

```
0.047587156
0
0
-0.047587156
190642.74913
4974218.63931
```

Fig. 156 - File tipo, formato .tfw

Questo contiene nella prima e quarta riga la dimensione del pixel in metri una volta positiva e una volta negativa; nella seconda e terza riga due zeri e infine gli ultimi due valori rappresentano le coordinate in metri (Y e X o Est e Nord) dello spigolo in alto a sinistra dell’immagine associata.

In generale i primi 4 valori rappresentano una matrice 2x2 di roto/scalatura, in questo caso il secondo e terzo valore sono zero, mentre il primo ed il quarto sono il fattore di scala verticale ed orizzontale ovvero la dimensioni del singolo pixel. La scala verticale è negativa perché il numero di riga dell’immagine aumenta verso il basso mentre il sistema di riferimento geografico è crescente verso l’alto.

Gli ultimi due rappresentano il vettore di traslazione, quindi in totale il file fornisce una trasformazione di rototraslazione con variazione di scala essenziale per trasportare ogni pixel nella posizione geografica che rappresenta.

Le coordinate geografiche relative ad un generico pixel situato nella colonna  $j$  e riga  $i$  sono:

$$\text{longitudine} = T_x + A_{11} * j$$

$$\text{latitudine} = T_y + A_{22} * i \quad (35)$$

Dove:

- $T_x$  è la coordinata EST in metri dello spigolo in alto a sinistra;
- $T_y$  è la coordinata NORD in metri dello spigolo in alto a sinistra;
- $A_{11}, A_{22}$  sono la dimensione orizzontale e verticale del singolo pixel.

Si riporta in seguito l'ortofoto estratta (Fig. 157).

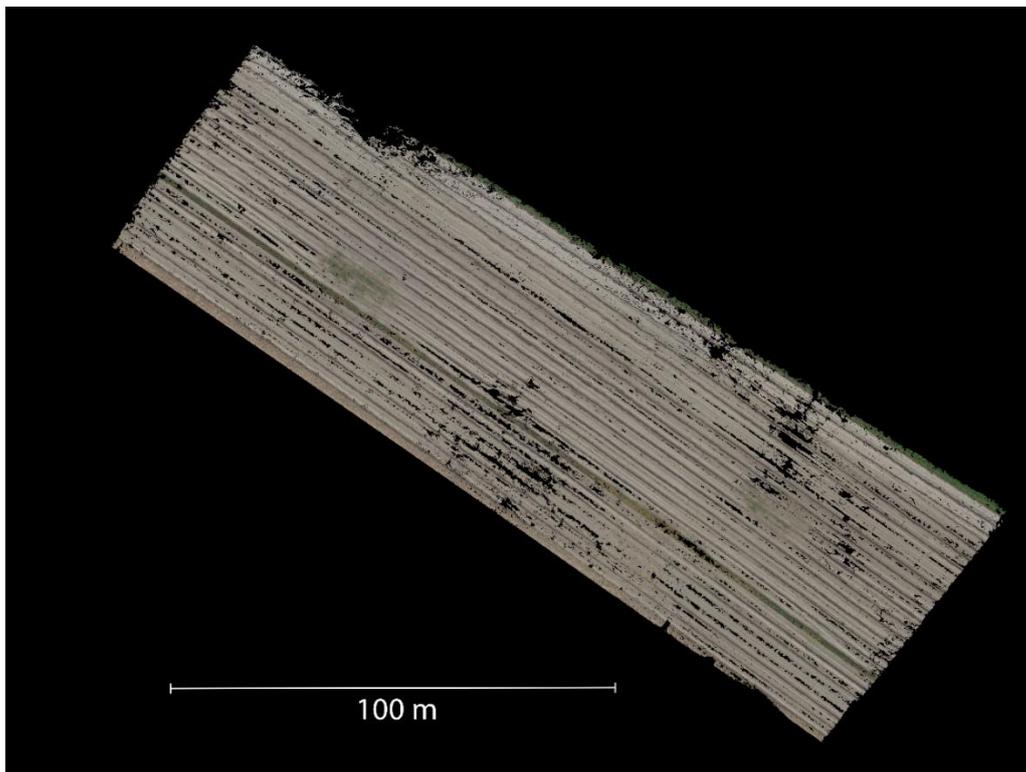


Fig. 157 - Ortofoto (vista dall'alto), scalimetro in metri.

### 8.3.2 REALIZZAZIONE ORTOFOTO TERMICO

Lo stesso procedimento di individuazione delle coordinate dei punti estremi e il successivo inserimento su Global Mapper per la realizzazione del prodotto finale è stato effettuato anche sulla DSM termico-quote.

Il prodotto ottenuto è riportato di seguito (Fig. 158).

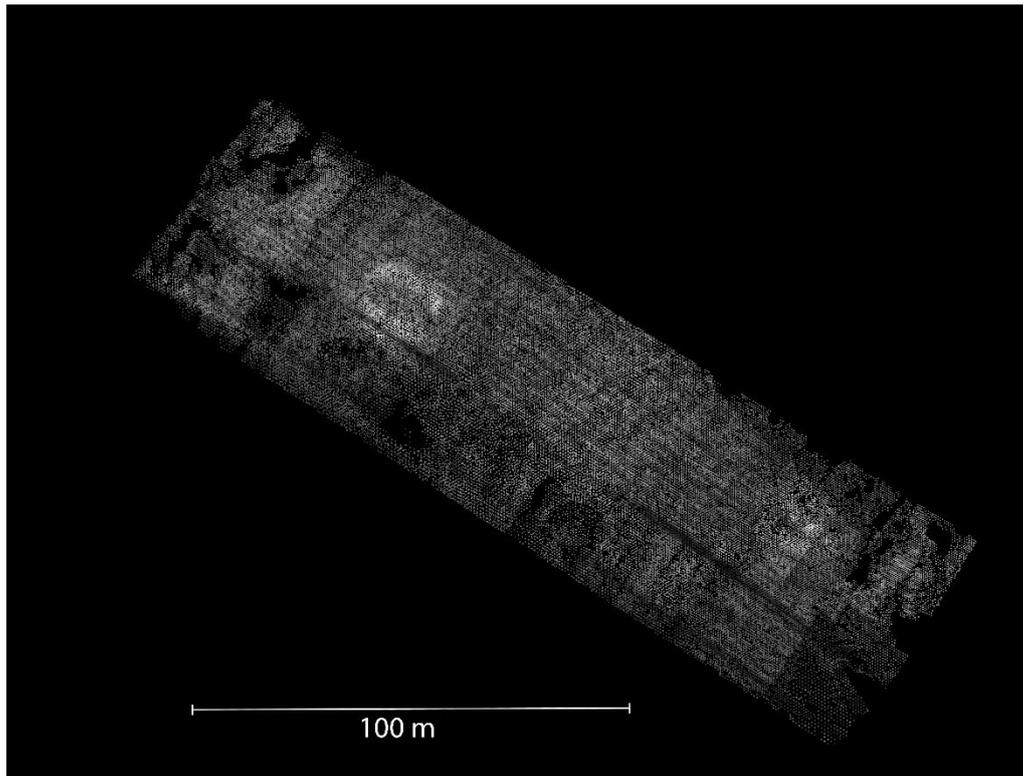


Fig. 158 - Ortofoto termico (vista dall'alto), scalimetro in metri.

# 9 REALIZZAZIONE DEM CON SOFTWARE LOW COST

Per la costruzione del modello tridimensionale della porzione di terreno è stato utilizzato anche un software a basso costo chiamato **Agisoft Photoscan**. Photoscan è un software ad interfaccia grafica sviluppato dalla Agisoft LLC disponibile in ambiente Windows.

Si tratta di un programma commerciale molto usato a fini ingegneristici che permette di realizzare modelli 3D a partire da un sistema di fotografie attraverso una procedura fotogrammetrica automatica nella quale vengono utilizzati algoritmi di correlazione automatica molto impiegati nei software di fotogrammetrici di Structure from Motion (SfM).

Nella *Structure from Motion* vengono individuate le correlazioni con processi di feature matching tra il blocco di immagini, detto *chunk*, che devono essere stabili rispetto a variazioni di illuminazione e del punto di vista. Su ognuno di essi viene generato un *descriptor* che si basa su una regione definita nell'intorno del punto. Per la determinazione delle corrispondenze tra le fotografie viene utilizzato un algoritmo simile allo SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) ed in una fase successiva si effettua la risoluzione dei parametri di orientamento interni ed esterni.

Le coordinate del centro di scatto camere vengono trovate in un primo momento con un algoritmo grezzo e successivamente vengono raffinate impiegando il Bundle Adjustment. La ricostruzione della nuvola densa di punti utilizza un approccio a viste multiple con la fusione di mappe di profondità

Photoscan prevede un filtraggio degli outliers che può essere impostato su tre livelli (*moderate, mild, aggressive*) ciascuno da fissare in dipendenza alla regolarità della superficie, indicando quindi la presenza di un fattore di regolarizzazione. Quindi questo software consente di fare tutte le procedure effettuate in precedenza con VisualSfM e CloudCompare essendo in grado di produrre nuvole dense e gestirle attraverso l'interfaccia grafica.

Inoltre permette la creazione di mesh interpolate della scena tridimensionale e realizzare ortofoto.

## 9.1 ALLINEAMENTO DEL CHUNK

Per effettuare tutti i passaggi sopra descritti bisogna effettuare uno dopo l'altro tutti i comandi riportati nel menu a tendina "Workflow" (Fig. 159) presente nella barra principale del software.

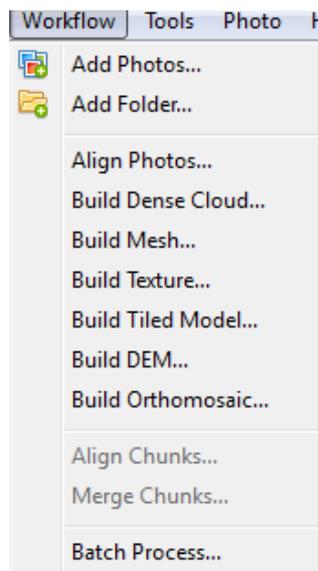


Fig. 159 - "workflow" indica il piano di lavoro da seguire su Photoscan.

La prima operazione da compiere consiste quindi nel caricare le fotografie all'interno del software.

Diversamente da VisualSFM, dove sono state importate tutte le immagini esportate dal filmato RGB, in Photoscan vengono importate meno fotografie in quanto i frame estratti sono troppo ravvicinati e hanno valori di sovrapposizione molto alta. Questo produce dei problemi durante la fase di allineamento in quanto un'eccessiva sovrapposizione porta alla creazione di "rumore" nell'allineamento dei fotogrammi, quindi si è deciso di importare una fotografia ogni tre.

Per l'elaborazione dei dati fotogrammetrici quindi sono state selezionate 38 fotografie (Fig. 160.).

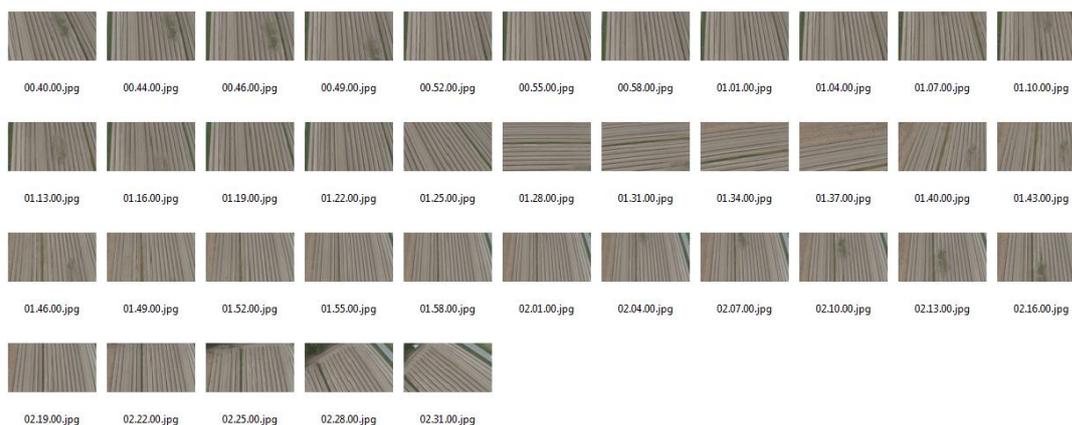


Fig. 160 - Lista fotogrammi importati su Photoscan.

Esiste la possibilità di poter selezionare nei vari fotogrammi delle zone di interesse chiamate *masks*, in questo modo vengono eliminate parti delle foto che non sono utili alla creazione della nuvola tridimensionale, diminuendo il peso dell'immagine stessa e facilitando i processi fotogrammetrici successivi. In questo caso non verrà eseguita questa operazione in quanto tutte la totalità dell'immagine è riferita alla porzione di terreno da ricostruire.

Per poter georeferenziare il modello bisogna inserire le coordinate di almeno tre punti fotogrammetrici d'appoggio. Nel caso in esame sono presenti 5 PFA corrispondenti ai 5 target termici posizionati in prossimità delle anomalie termiche. Le coordinate inserite sono le stesse utilizzate per VisualSFM, quindi sono state sottoposte ad una traslazione dei valori verso destra (Tabella 5). I Target vengono utilizzati per ottimizzare l'allineamento delle fotografie ed impostare un sistema di coordinate che consenta la misura di distanze e volumi sulla nuvola tridimensionale.

Per inserire le coordinate dei PFA si collimano all'interno delle fotografie i punti che rappresentano i marker a terra. Un grosso vantaggio di Photoscan rispetto a Visual si riscontra proprio in questo passaggio in quanto in Agisoft è implementato un algoritmo che studia la geometria epipolare dell'immagine. Ne consegue che una volta che un punto è stato individuato in un immagine viene creato il piano epipolare passante per il centro di proiezione di due immagini (contenente il punto) e il punto. Questo intersecato con l'immagine dove ancora non è stato individuato genera una retta che limita la ricerca della corrispondenza alla retta stessa (Fig. 161).



Fig. 161 - Retta epipolare.

Una volta individuato anche su una seconda immagine la sua posizione è individuata su tutte le immagini che lo contengono, che Photoscan cataloga attribuendole una bandiera chiusa. In ogni caso si tratta sempre di un posizionamento approssimativo funzione della qualità delle foto scattate, quindi bisogna sempre collimare correttamente il punto. Selezionato il PFA sull'immagine per creare il marker si clicca con il tasto destro del mouse e si seleziona "create marker" (🚩), si assegna un nome e si inseriscono le coordinate di longitudine, latitudine e altitudine misurate con il ricevitore GPS.

Diversamente da quanto è stato assegnato su Visual, dove la prima coordinata inserita (x) era riferita al nord corrispondente alla latitudine, su Agisoft alla coordinata x è stata attribuito l'est corrispondente alla longitudine. Le coordinate inserite sono quindi riportate di seguito (Tabella 16).

Sigla target termico	Coordinate planimetriche		Quota
	Est [m]	Nord [m]	
B	712.31124	168.05989	61,3573
C	742.23683	160.23449	61,2755
D	732.89103	137.23277	61,2526
E	702.07617	155.54736	61,2307
F	795.77789	118.49751	61,0233

Tabella 16 - Coordinate dei PFA.

Questo processo viene effettuato per ognuno dei PFA.

Successivamente si effettua l'allineamento utilizzando il comando "Align Photos". Tramite questo comando, il programma confronta i punti comuni nelle diverse fotografie ritrovando la posizione spaziale della macchina fotografica nella ripresa di ogni fotogramma, generando così una nuvola di punti omologhi necessari per la ricostruzione dell'oggetto fotografato.

Si apre una finestra (Fig. 162) dove bisogna selezionare alcuni parametri dell'allineamento tra cui il livello di accuratezza che può essere low, medium o high, si sceglie High per avere un prodotto migliore.

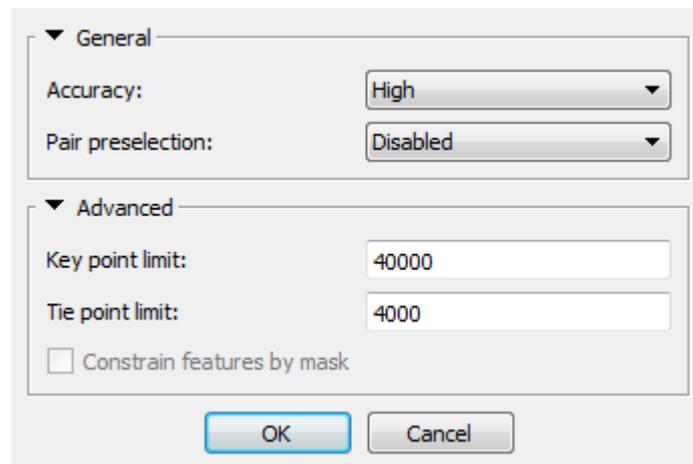


Fig. 162 - Visualizzazione comando Align photos.

## 9.2 REALIZZAZIONE SCENA TRIDIMENSIONALE

Concluso il processo di allineamento è stata creata una nuvola sparsa di punti. Prima di valutare l'errore sulle coordinate dei marker ottenute, bisogna ottimizzare il modello con il comando “*Optimize cameras*” () . Attraverso questa operazione vengono calcolati i parametri di calibrazione del modello di Bröwn ( $k_1, k_2, p_1, p_2$ ).

Gli errori ottenuti in seguito al posizionamento e allineamento dei 5 marker sono riportati in Tabella 17.

Sigla target termico	Coordinate planimetriche		Quota [m]	errore [m]	errore [pix]
	Est [m]	Nord [m]			
B	712,31124	168,05989	61,3573	0,0227	0,253
C	742,23683	160,23449	61,2755	0,007	0,15
D	732,89103	137,23277	61,2526	0,035	0,245
E	702,07617	155,54736	61,2307	0,0327	0,306
F	795,77789	118,49751	61,0233	0,0007	0,19
				0,0239	0,24

Tabella 17 - Coordinate e residui marker.

La nuvola sparsa ottenuta con l'allineamento è costituita da 33574 punti ma contiene una serie di valori anomali che non sono utili per la creazione del modello finale (outliers). Questi sono delle fonti di disturbo e potrebbero creare errori nei passaggi di densificazione e interpolazione successivi, e quindi devono essere eliminati. Per l'eliminazione di tali punti si procede con il comando “*rectangle section*” () che consente di selezionare gli outliers attraverso finestre rettangolari (Fig. 163).

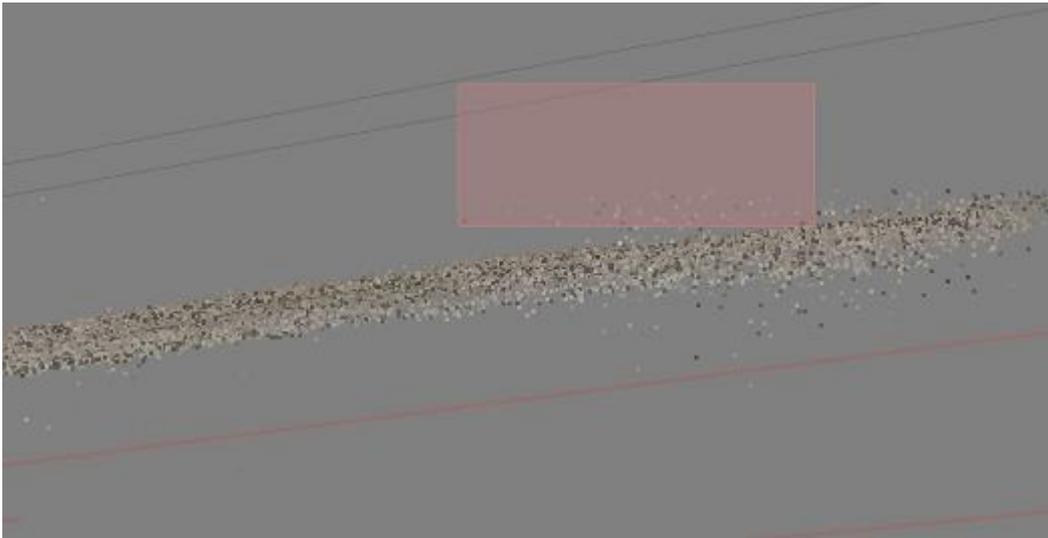


Fig. 163 - Fase di eliminazione degli outliers.

Per cancellarli definitivamente, una volta selezionati si preme *Cancl*. La nuvola sparsa finale ottenuta risulta essere formata da 26246 punti (Fig. 164).

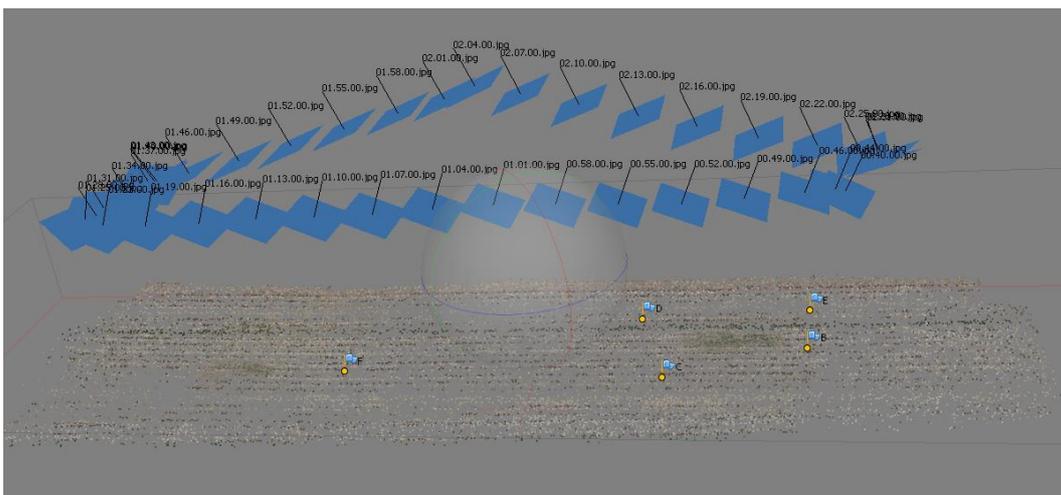


Fig. 164 - Nuvola sparsa di punti pulita dalle fonti di disturbo.

Ora si procede con il processo di densificazione della nuvola di punti con il comando “*Build Dense Cloud*” seguendo l’ordine indicato nel Workflow. Tramite questo comando, il programma genererà una nuvola di punti a partire dalle immagini allineate. Questi punti colorizzati sono omologhi tra i fotogrammi e orientati nello spazio. Viene richiesta la qualità del prodotto in base alla quale vengono creati più o meno punti aggiuntivi, influenzando anche il tempo di processamento e la pesantezza del dato ottenuto. Viene scelta la qualità High.

Il prodotto ottenuto, costituito da 4433343 punti, presenta anch'esso dei outliers da eliminare con la stessa procedura utilizzata per la nuvola sparsa. Il prodotto finale pulito è formato da 4430666 punti (Fig. 165).

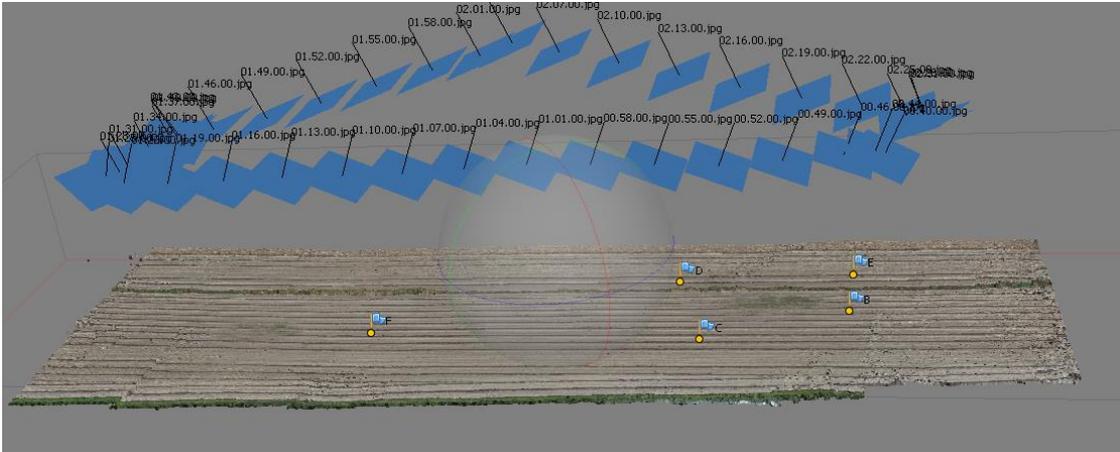


Fig. 165 - Nuvola densa di punti.

Terminata la densificazione si procede con la fase di interpolazione per determinare la mesh, ovvero una superficie che permette di visualizzare meglio l'oggetto tridimensionale (Fig. 166). Per farlo si usa il comando "Build Mesh" della sezione Workflow e si lasciano impostati i valori di default applicati dal software.

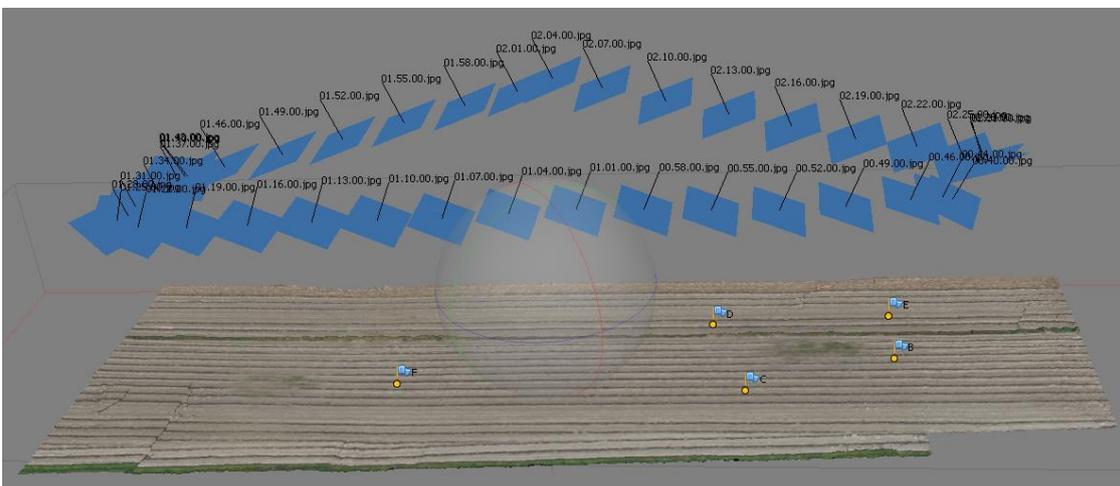


Fig. 166 - Costruzione della mesh.

Successivamente si continua l'elaborazione applicando la Texture sui punti continuando il piano di lavoro. Si utilizza il comando *"Build Texture"* che genererà una texture che descrive le qualità materiche dell'oggetto e consente di poter esportare l'ortofoto secondo viste orientate.

Infine si genera appunto l'ortofoto con *"Build Orthomosaic"* che utilizza come superficie la mesh texturizzata (Fig. 167).

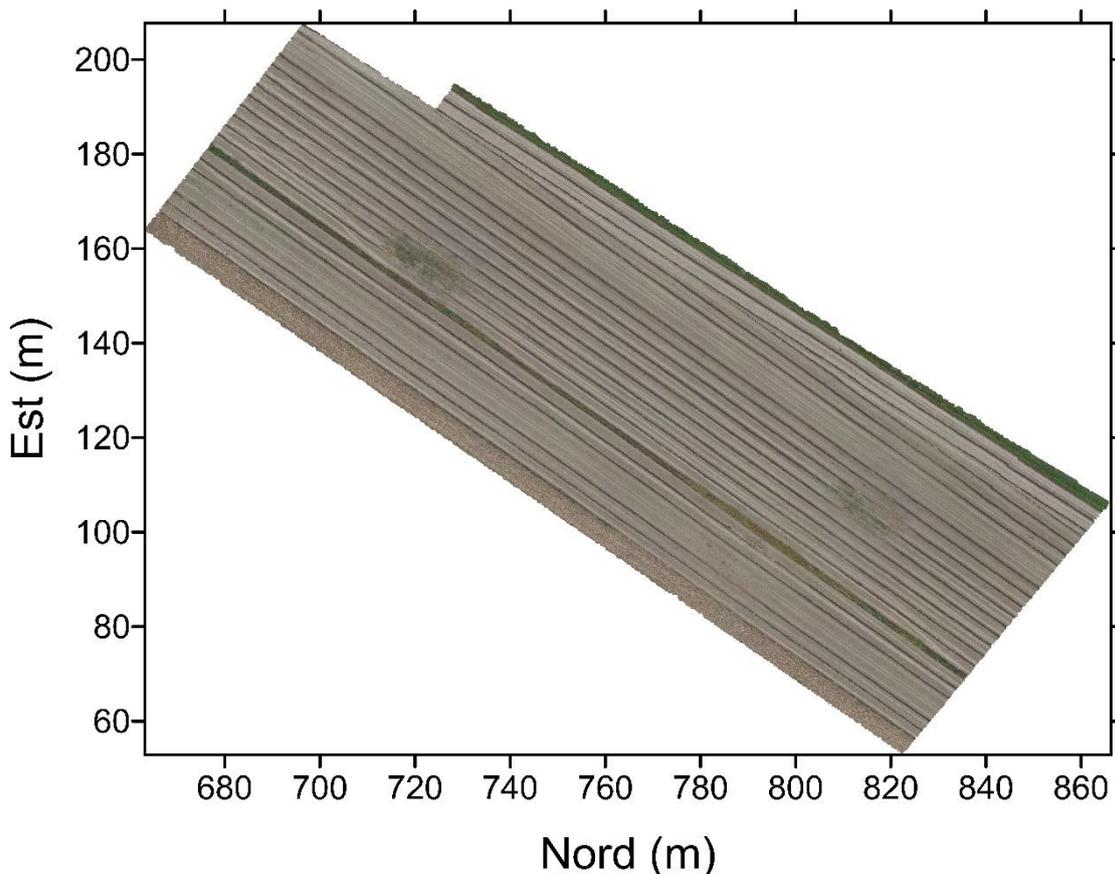


Fig. 167 - Ortofoto realizzato con Agisoft Photoscan, scalimetro in metri.

Tutti i prodotti ottenuti possono essere esportati per poterli elaborare in altri software.

In particolare la nuvola densa di punti si esporta per poter eseguire uno studio geometrico con CloudeCompare. Per fare questo, mediante il comando *"Export Points"* dal menu file della barra principale, si è optato per il formato standard. Si tratta di un formato binario che memorizza tutte le informazioni contenute in una nuvola di punti 3D in una forma relativamente compatta.

Per quanto riguarda l'ortofoto invece l'esportazione si esegue con il comando "*Export Orthophoto*" nel quale si può scegliere tra diversi formati (JPEG, TIFF, PNG).

Si apre una finestra in cui verranno richieste una serie di parametri. È importante controllare che il comando *Write World File* sia spuntato.

In questo modo si ottiene un file in formato testo associato all'immagine nel quale sono scritti i parametri di georeferenziazione dell'immagine stessa. Esso contiene 6 righe: la dimensione del pixel in X e in Y, due parametri di rotazione che solitamente sono circa pari a zero ed infine le coordinate X e Y del primo pixel in altro a sinistra (Fig. 168).

```
0.0282213  
0.0  
0.0  
-0.0282213  
663.2205049090966  
207.7064001460537
```

Fig. 168 - Contenuto .tfw

# 10 CONFRONTO ED ANALISI DEL DSM RGB E TERMICO

Tutte le informazioni raccolte permettono di fare una serie di considerazioni sia di aspetto prettamente geometrico sia di carattere radiometrico e di temperature. Innanzitutto è essenziale confrontare i diversi modelli ottenuti per valutarne la qualità. Considerando inizialmente solo i modelli ottenuti con software open source si nota in Tabella 18 come quello che restituisce al meglio la realtà della porzione di territorio sia quello ottenuto con immagini RGB in quanto è costituito da un numero di punti considerevolmente maggiore.

Nome Modello	Numero punti
Modello RGB	2594552
Termico quote	70258
Termico temperature	55536

Tabella 18 - Confronto numero di punti.

Il Modello RGB ha una densità di punti molto più alta e solo in poche zone sono presenti dei buchi dovuti alla mancanza di corrispondenze. Queste sono molto più significative nei due modelli ottenuti con la termocamera (Fig. 169).

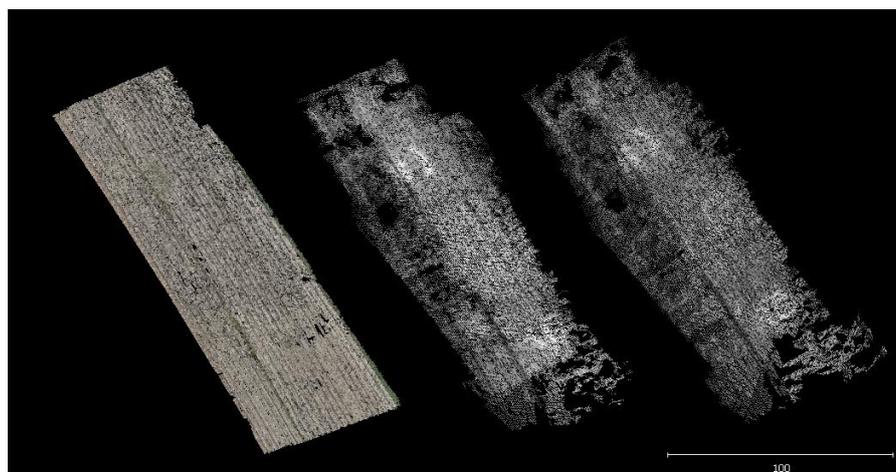


Fig. 169 - Confronto planimetrico dei tre modelli. Da sinistra a destra: modello RGB, termico quote, termico temperature.

Inoltre nei due modelli termici si percepisce molto di più la differenza di quota con il quale sono state scattate le foto nei due tratti di andata e ritorno del volo. Questa influenza la densità dei punti a terra provocando una sorta di linea di separazione tra la fascia destra, relativa al tratto di andata, e la fascia sinistra di ritorno.

Inizialmente il drone viaggia ad una quota pressoché stabile di 44,3 m fino al punto di inversione di rotta in corrispondenza della fine della seconda anomalia termica, in questa porzione il modello restituisce al meglio il territorio (Fig. 170).

Successivamente comincia il tratto di inversione di rotta che avviene ad una quota inizialmente invariata che aumenta verso il secondo punto di rotazione del drone.

Nel tratto di ritorno l'altezza di volo è molto variabile. Nel punto iniziale è di 49,3m poi, dopo un breve tratto a quota costante, aumenta fino a raggiungere un picco di 64,3m, per poi riabbassarsi fino al punto dove comincia la fase di atterraggio a 44,3m. Questa variazione è ben visibile nel modello, nel quale sono presenti molti buchi nel quale il processo di Image Matching non ha funzionato ed in generale una densità di punti più bassa rispetto al resto.

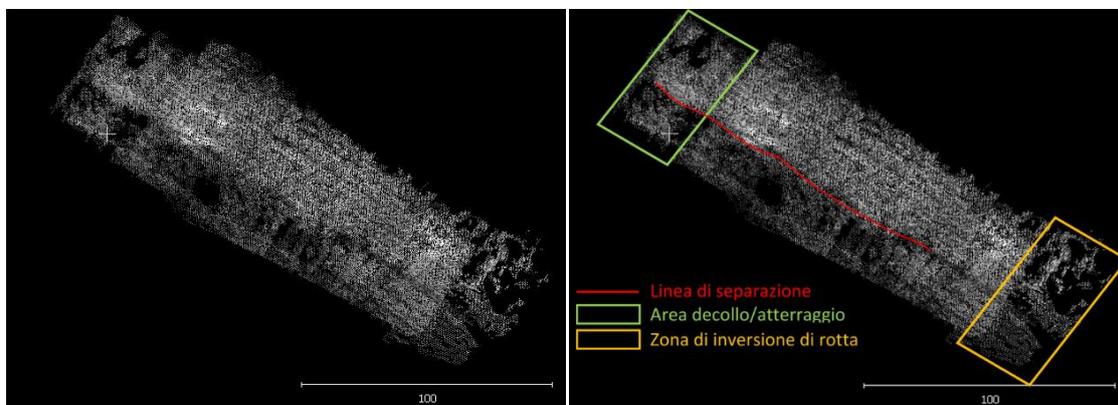


Fig. 170. - Nuvola densa del modello termico quote. A destra sono indicate le zone di interesse.

L'errore è dovuto al fatto che cambiando di quota molto velocemente sono state individuate delle corrispondenze che non rappresentavano il vero andamento morfologico del territorio (outliers) di conseguenza sono state eliminate provocando il buco relativo alla mancanza di dati (Fig. 171). Lo stesso discorso può essere applicato in prossimità del decollo.

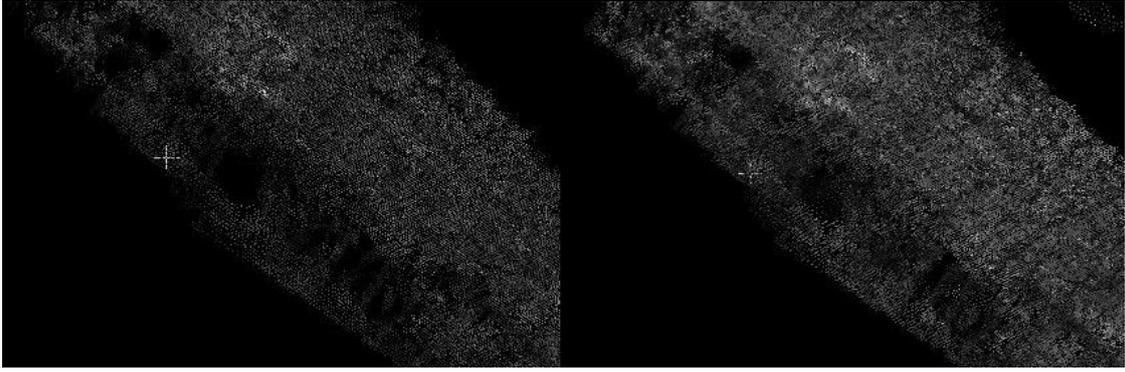


Fig. 171 - Accostamento tra il modello originale e il modello ripulito dagli outliers.

Nella porzione di modello ricostruita attraverso le foto scattate durante la fase di inversione di rotta del velivolo si nota un'alta rarefazione. Le immagini usate in questa zona sono quelle con la qualità più bassa, hanno un grado di sfocamento molto alto dovuto alla repentinità con cui il drone vira, cambiando traiettoria.

Gli stessi ragionamenti sull'influenza della variazione di altezza, in modo meno marcato, possono essere applicati anche sul modello RGB. In questo caso però durante la fase di miglioramento della qualità del modello, nel quale è stato effettuato un ulteriore processo di Image Matching concentrato solo su un ristretto numero di immagini relative alla zona con minor densità, il grosso buco generato dal picco di quota è stato quasi completamente ricoperto come si può notare dalla figura sottostante (Fig. 172).

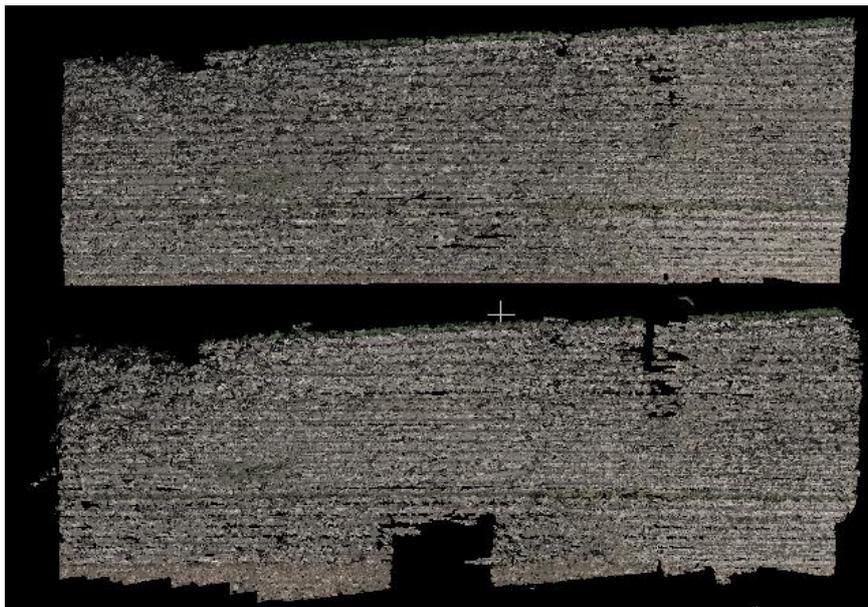


Fig. 172 - Accostamento del modello RGB iniziale (in basso) con quello ottimizzato di qualità (in alto).

Il DSM RGB, tra le nuvole ottenute con VisualSfM, risulta essere quello che rappresenta al meglio la porzione di territorio in quanto la risoluzione del dispositivo di acquisizione è maggiore. Una diretta conseguenza di ciò si ritrova nel calcolo del GSD. Il GSD è infatti il parametro migliore per confrontare la qualità di due modelli differenti e rappresenta la dimensione del pixel al suolo. Ovviamente a GSD maggiori corrispondono dimensioni del pixel maggiori che quindi forniscono un minor dettaglio della scena.

In Tabella 19 si riportano le differenze di GSD tra il modello RGB e il termico-quote valutati in corrispondenza di punti significativi riportati in Fig. 143.

Nome punto	Quota [m]	GSD RGB [mm]	GSD TERMICO [mm]
1	44,337	47,5	119,2
2	44,194	47,3	118,8
3	49,373	52,8	132,7
4	64,348	68,9	173,0
5	43,324	46,4	116,5

Tabella 19 - Confronto GSD RGB con GSD termico.

Il valore medio del GSD RGB è 52,6 mm mentre quello termico risulta di 132,1 mm, quasi tre volte maggiore. La fascia relativa al ritorno del drone (variazione di quota) presenta valori alti e molto variabili anche del GSD, essendo proporzionale alla distanza di presa. Più grande è il Ground Sampling Distance minore è la densità del modello.

Un ulteriore parametro che ha influenzato la qualità della nuvola densa è la modalità di scatto delle immagini. I filmati sono stati eseguiti con l'asse della camera inclinata rispetto al territorio e non in assetto pseudo-normale, di conseguenza le immagini esportate sono anch'esse ad assi inclinati e paralleli tra loro. Questo è riportato bene nella fase di ricostruzione dell'assetto fotografico eseguita sia da VisualSfM (Fig. 109) che da Agisoft Photoscan (Fig. 164) nella quale si percepisce bene l'inclinazione dell'immagine rispetto al territorio (Fig. 119).

Le problematiche relative alla geometria di presa e alle caratteristiche del volo sono dovute al fatto che il rilievo eseguito non era stato pensato per scopi fotogrammetrici di restituzione grafica, ma è stato fatto con il presupposto di testare il funzionamento del

prototipo di drone ESAFLY A2500 con doppio equipaggiamento con fotocamera a colori e termocamera.

## 10.1 ANALISI GEOMETRICA MODELLO RGB

Sul DSM ottenuto con la GoPro si possono eseguire delle operazioni all'interno dell'ambito CloudCompare per valutarne le caratteristiche geometriche. Utilizzando il comando "Section" è stato estratto un profilo longitudinale (Fig. 142) il quale mostra un accentuata distorsione del modello.

Analizzando le coordinate del punto centrale e de due estremi (Fig. 173) si nota che il modello realizzato rappresenta la porzione di terreno come se avesse una depressione centrale.

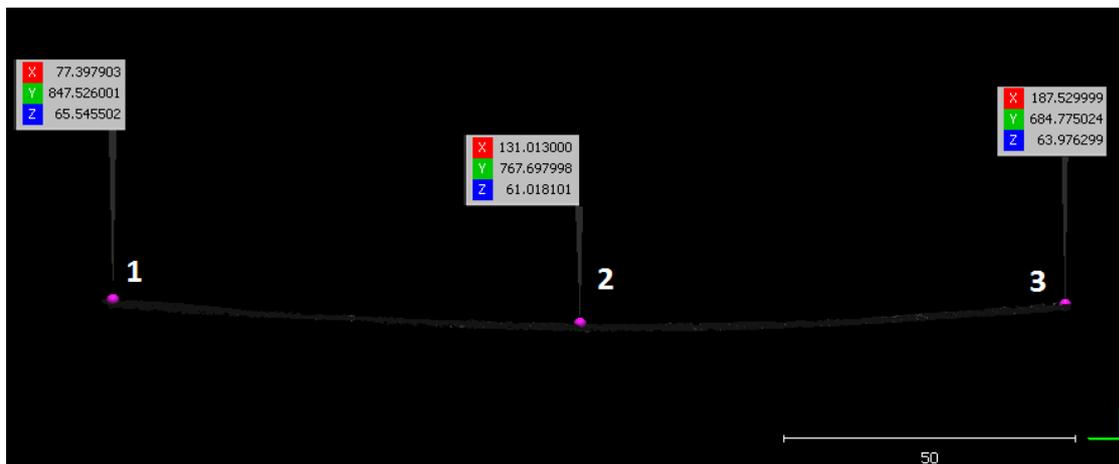


Fig. 173 - Profilo longitudinale con quote VSfM, scalimetro in metri.

Il punto 2 centrale risulta ad una quota più bassa rispetto al 1 e al 3 rispettivamente di 4,53m e 2,97m. Significa che nonostante le immagini usate per la creazione della nuvola siano state precedentemente rettificate per eliminare la distorsione radiale impressa dall'obiettivo grandangolare della GoPro, durante la fase di costruzione della nuvola densa questa distorsione è ricomparsa.

Il campo infatti in realtà non mostra una concavità verso il basso così marcata ma risulta piuttosto piano, come si può verificare dalle reali quote misurate sui punti fotogrammetrici d'appoggio riportate in Tabella 3.

Il dislivello massimo reale è presente tra il punto B (61,357m) posizionato prima dell'anomalia 1 vicino all'area di decollo/atterraggio e il punto F (61,023m) posizionato invece in prossimità dell'anomalia 2 corrispondente alla zona di inversione di rotta. La differenza di altezza tra questi due PFA è di soli 33,4 cm.

Il DSM dovrebbe quindi rappresentare un piano pressoché a quota costante leggermente più in alto rispetto al punto centrale.

Analizzando i residui sui valori di quota (Tabella 7), riferendosi ad un ipotetico sistema di riferimento locale generato nel punto di decollo, si nota che i PFA B e E posti prima dell'anomalia 1 hanno valori negativi, in quanto le coordinate trasformate in VSfM sono maggiori rispetto a quelle misurate con il GPS, mentre i residui relativi a C e D posti dopo l'anomalia 1 sono positivi. Il residuo di F, situato poco prima dell'anomalia 2 è negativo. Questo porta a pensare che i punti la cui quota è restituita correttamente siano in prossimità dell'anomalia 1 e leggermente prima rispetto al punto F.

La distorsione riscontrata deriva dal fatto che i parametri interni della camera non vengono valutati una volta sola e poi mantenuti costanti per tutte le immagini, ma sono ricalcolati differenzialmente per ogni singola presa. Inoltre VisualSfM utilizza un modello di calibrazione molto semplificato nel quale viene valutato un unico parametro di calibrazione, che equivale circa al  $k_1$  del modello di Bröwn, per la correzione della distorsione radiale rispetto ai 5 forniti dal modello di calibrazione completo. Questo modello non consente una totale correzione delle distorsioni dei fotogrammi. [Ravella, 2015]

Si utilizza quindi Photoscan, al cui interno è implementato un algoritmo di calibrazione completo che consente di eliminare la distorsione radiale. Una volta creata, la nuvola densa si esporta in formato .las ed è trattata con Cloud Compare eliminando tutti gli outliers rimasti. Il risultato ottenuto è raffigurato di seguito (Fig. 174).

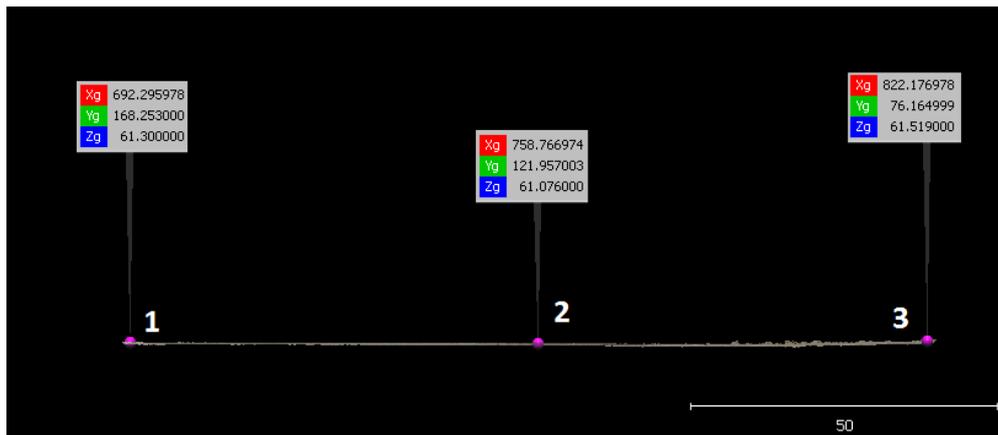


Fig. 174 - Profilo longitudinale con quote Photoscan, scalimetro in metri.

Come si può evincere dalla quote pressoché stabili la distorsione è stata eliminata.

Per analizzare nel complesso i modelli RGB ottenuti con la GoPro è stato utilizzato un software chiamato SURFER, un sistema GIS commerciale che gestisce e tratta informazione georeferenziate.

I vari DSM puliti vengono salvati in formato .txt e importati all'interno del software, nel quale è possibile creare un *GRID Data File*, un interpolazione della nuvola densa nella quale si specifica la dimensione della mesh in unita terreno (*spacing*).

L'interpolazione si effettua utilizzando una *spacing* di 0.1 il quale crea un punto ogni 10 cm. La nuvola iniziale aveva una densità maggiore ma con i dati ottenuti basta avere un punto ogni 10 cm per rappresentare al meglio il terreno.

Alla *Grid* ottenuta si applica una polilinea la cui funzione è quella di escludere dal trattamento del dato tutti i punti che non sono racchiusi al suo interno. In questo modo, se viene applicata a tutti i DSM, questi descrivono la stessa superficie di territorio e possono essere quindi raffrontati e sovrapposti.

Creato il *Grid mesh* del DSM RGB ottenuto con VisualSfM ed importato su SURFER si genera un'immagine all'interno di un sistema di riferimento bidimensionale locale che permette di risalire alle coordinate planimetriche e, attraverso l'inserimento di curve di livello, consente di percepire l'andamento altimetrico della porzione di terreno (Fig. 175).

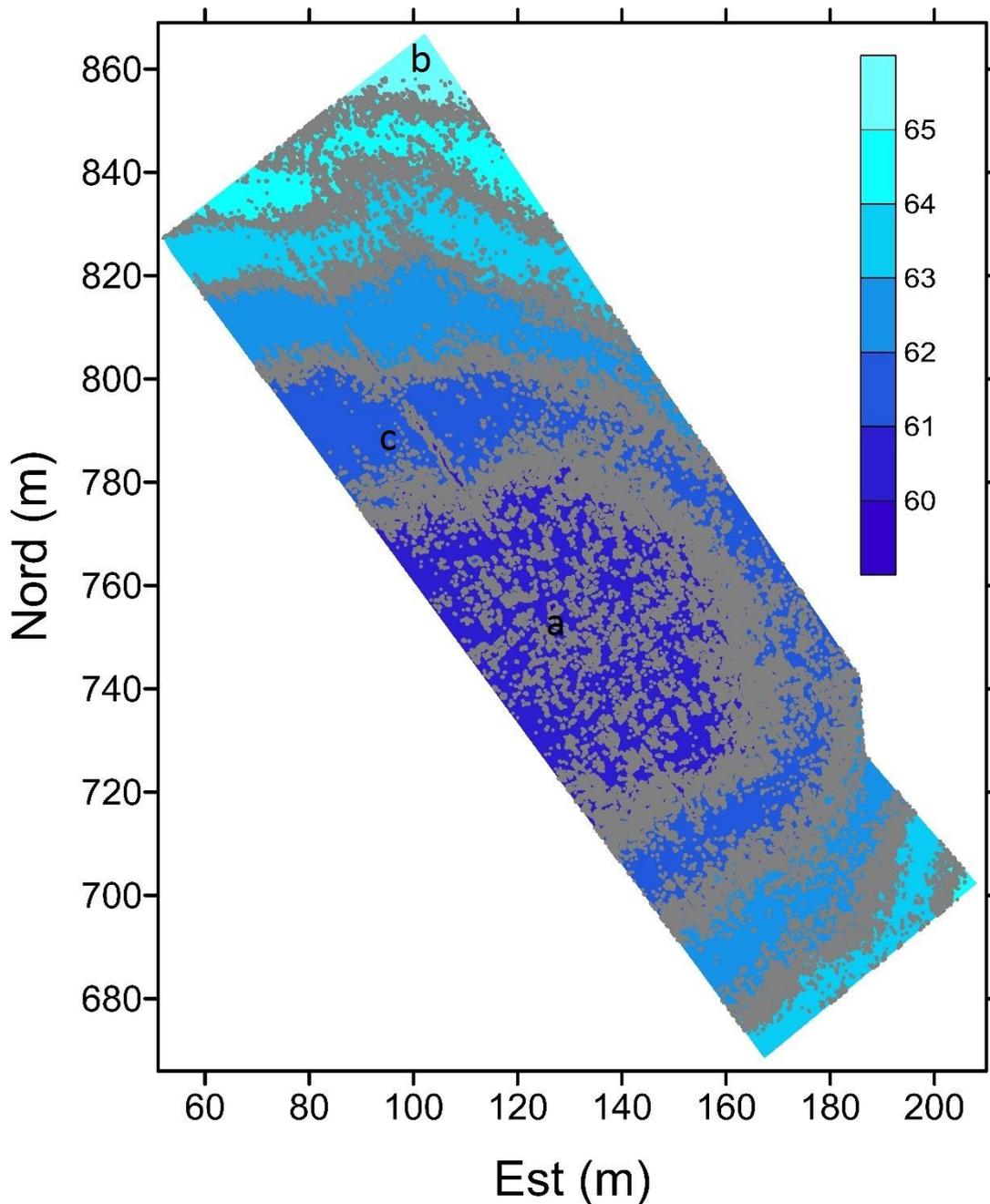


Fig. 175 - Rappresentazione Curve di livello (passo 1 m) del DSM RGB creato con VSfM, scala graduata con le tonalità del blu. A quote minori corrispondono toni di blu più scuri.

Questa immagine permette di comprendere al meglio l'andamento del modello, fornendo una visione d'insieme di tutta la nuvola che al primo impatto consente di percepire la distorsione radiale che la caratterizza.

Nella Fig. 175 sono riportate le curve di livello per ogni metro che dividono il modello in 7 aree caratterizzate da colori differenti. In base alla quota è stata assegnata una tonalità di blu più scuro alle zone più basse in modo da dare anche un senso di

profondità, mentre alle aree ad altezza maggiore è stato attribuito un tono più verso l'azzurro.

Quindi la parte centrale (a) risulta quella più profonda e allontanandosi verso l'esterno la quota cresce in modo radiale.

La zona più alta (b) è quella in alto a destra che rappresenta il punto in cui al drone viene imposto il cambio di traiettoria. I frame estratti in questa fase sono un po' sfocati in quanto la virata è molto rapida ed inoltre induce una momentanea perdita di quota probabilmente dovuta ad un piccolo vuoto d'aria.

Nella metà superiore si nota la presenza di una striscia a quota maggiore (c), non è dovuta ad un errore ma è relativa alla vegetazione presente sul campo.

Il modello presenta dei contorni molto ben definiti perché sono stati esclusi dal processo di rendering tutti i punti che non appartenevano all'area racchiusa dalla polilinea descritta in precedenza.

È stata creata anche un immagine più essenziale nella quale sono riportate solo le curve di livello (Fig. 176).

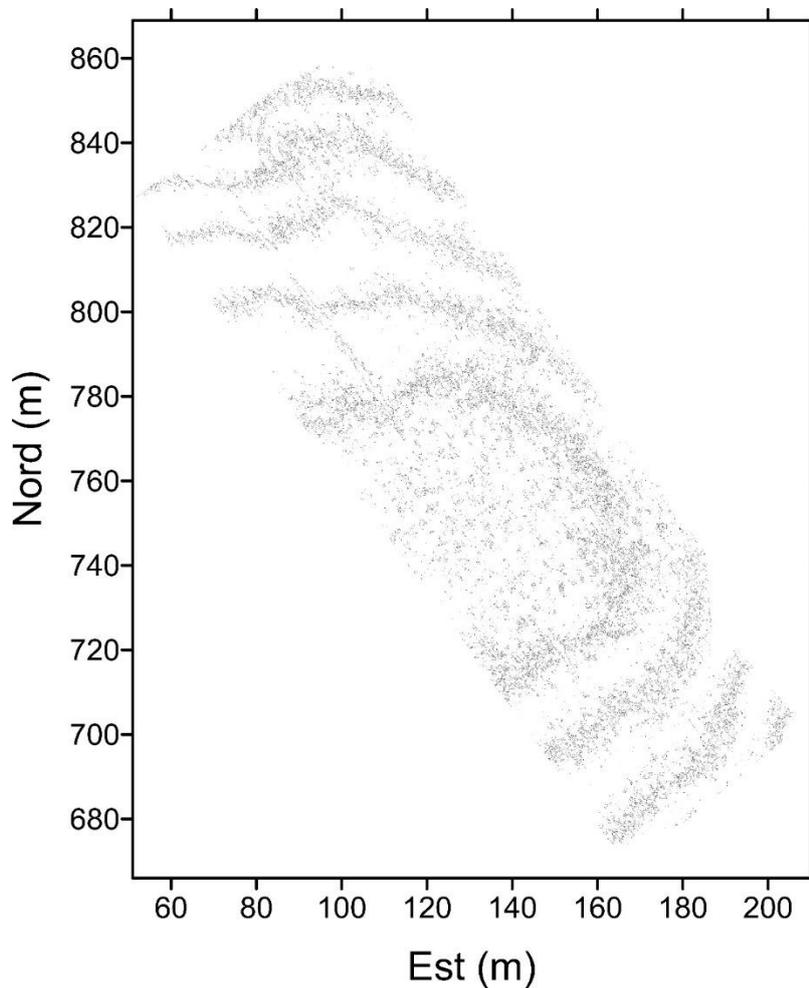


Fig. 176 - Rappresentazione delle sole Curve di livello (passo 1 m) del DSM RGB creato con VSfM.

Il software SURFER consente anche di estrarre le statistiche relative al DSM caricato, queste sono riportate in Tabella 20.

DSM RGB VSfM	
Numero di punti	70258
Somma	4336592
Minimo	58,924
Massimo	65,485
Media	61,724
Deviazione standard	0,819

Tabella 20 - Statistiche DSM RGB VSfM, misure in metri.

L'immagine a colori contenente le curve di livello è stata creata anche per il DSM RGB ottenuto con Agisoft Photoscan (Fig. 177).

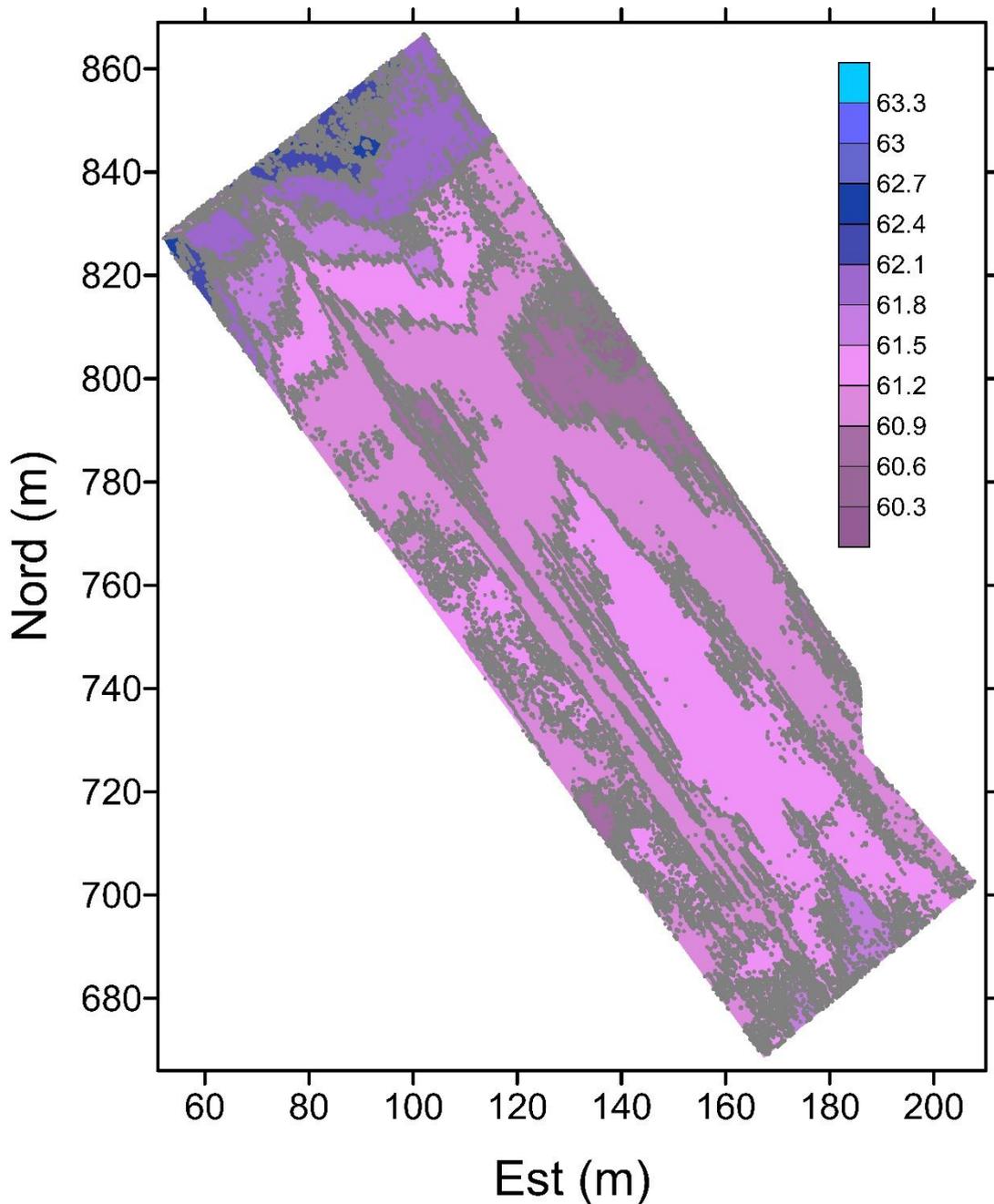


Fig. 177 - Rappresentazione Curve di livello (passo 30 cm) del DSM RGB creato con Photoscan, scala graduata con le tonalità del blu e viola.

Questa immagine conferma l'eliminazione della distorsione radiale rispetto a quanto visto su VSfM. Non esiste più una zona centrale più profonda che tende ad elevarsi radialmente verso l'esterno, e soprattutto le quote sono molto più stabili nella maggior parte del modello; l'unica parte che risulta sollevata è quella in sommità.

Siccome la maggior parte del modello risulta relativamente piana si è deciso di diminuire il passo tra le curve di livello a soli 30 cm per apprezzarne meglio l'andamento, se si fosse lasciato il passo ad 1 m ci sarebbero state solo 3 curve.

I valori di quota più bassi sono quelli rappresentati dai toni di viola più scuri poi a crescere si passa a toni più chiari ed infine al blu.

Il modello restituisce una morfologia del territorio abbastanza ondulata come ci si aspetta da un tipico campo agricolo arato (Fig. 178). Si riscontra pure in questo caso la presenza della fascia longitudinale relativa alla vegetazione che innalza la quota dei punti e che attraversa tutto il modello (Fig. 179).

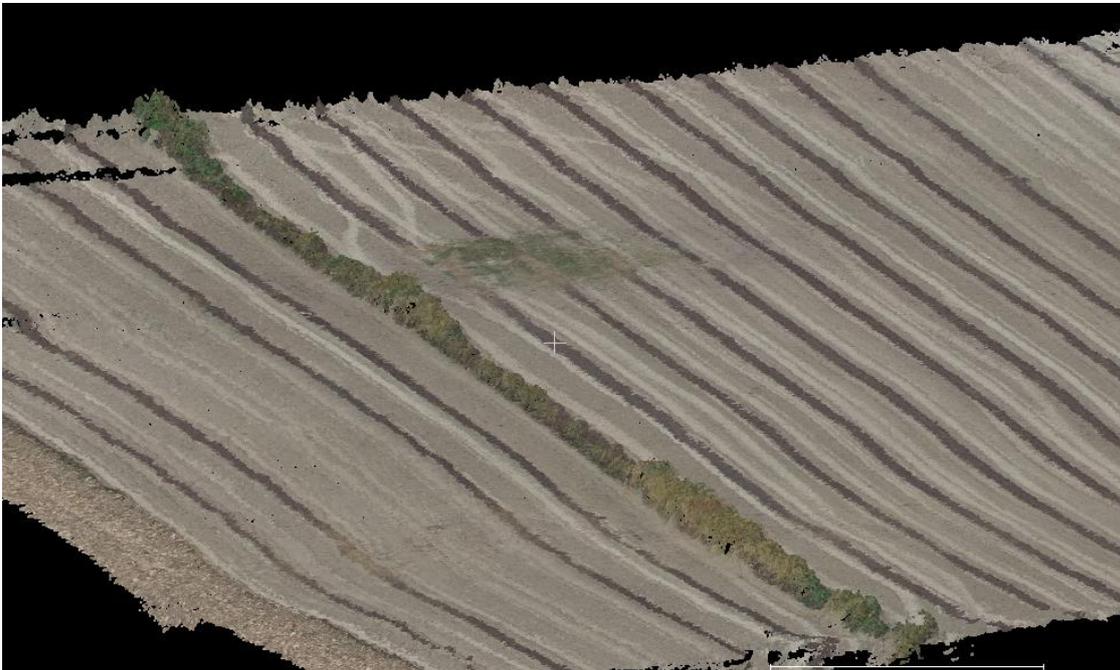


Fig. 178 - Rappresentazione grafica dell'ondulamento della superficie e della presenza di vegetazione.



Fig. 179 - Sezione che mostra il particolare della vegetazione.

L'area ad altitudine maggiore risulta ancora quella corrispondente al cambio di traiettoria. Nella nuvola densa si nota molto chiaramente come il software non sia riuscito ad individuare delle corrispondenze tra le immagini prossime al cambio di

virata, generando un gradino che innalza la nuvola di punti. Questo può essere anche dovuto alla piccola destabilizzazione di quota subita nella virata. In generale comunque questa zona risulta essere ad un'altitudine leggermente maggiore.

Il gradino è chiaramente visibile sulla nuvola densa (Fig. 180) e si riscontra anche in Fig. 175 dove la curva di livello diventa una retta

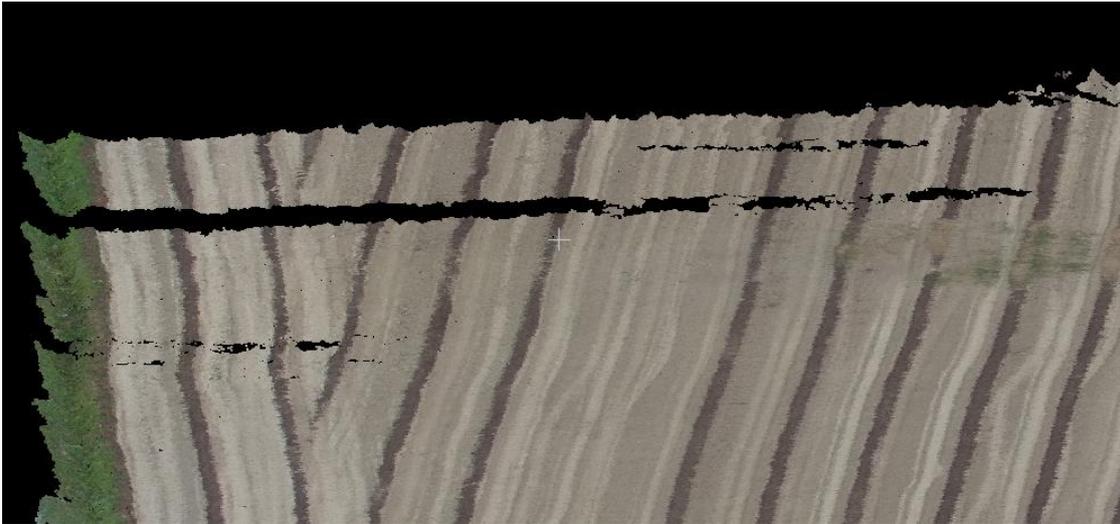


Fig. 180 - Gradino creato dalla variazione del fattore di scala.

I valori di quota maggiori di 63m sono relativi outliers perimetrali che non sono stati eliminati (Fig. 181).

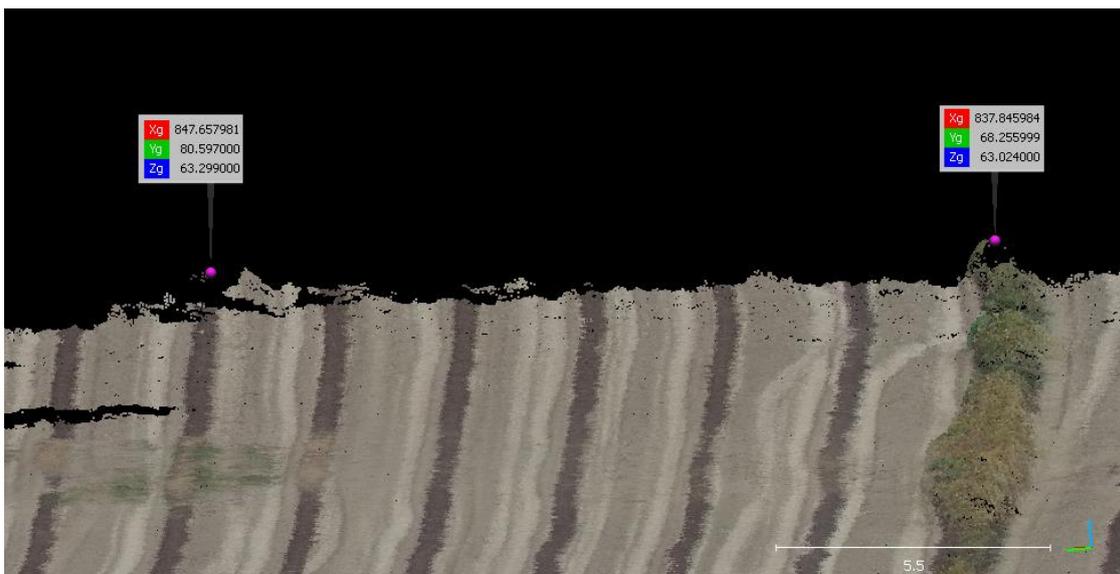


Fig. 181 - Outliers perimetrali non eliminati.

Si riportano di seguito in Tabella 21 le statistiche del DSM RGB creato Agisoft Photoscan.

DSM RGB Photoscan	
Numero di punti	1160588
Somma	71098663
Minimo	60,077
Massimo	63,306
Media	61,261
Deviazione standard	0,346

Tabella 21 - Statistiche DSM RGB Photoscan, misure in metri.

La media delle quote dei punti è minore rispetto a quanto valutato con VSfM, questo è sintomo della presenza di un sistematismo che colloca il DSM VSfM ad una quota media maggiore.

La minor variazione dei valori e quindi l'assenza della distorsione è percepibile anche dalla diminuzione della deviazione standard.

Per confrontare geometricamente i due modelli si realizza un ulteriore *Grid* nel quale vengono calcolate le differenze di quota tra i due DSM RGB.

Con SURFER è possibile creare delle Nuvole ottenute da differenze di coordinate relative a due *Grid* differenti, è stata realizzato un *Grid* ottenuto sottraendo dalle quote relative al DSM RGB Photoscan quelle del DSM RGB VSfM.

La differenza viene effettuata tra due punti con le stesse coordinate planimetriche, dove non viene trovata la corrispondenza il software fornisce un valore esageratamente alto che è da eliminare. Per farlo si apre il File DAT generato da SURFER con un programma che tratta dati tabellari come Excel e si eliminano tutti i valori anomali.

I 2 DSM originariamente hanno dimensioni differenti ma in seguito alla delimitazione effettuata con la polilinea ricoprono la stessa area, quindi la sovrapposizione è relativa a due superfici perfettamente uguali.

Il prodotto ottenuto viene riportato di seguito (Fig. 182).

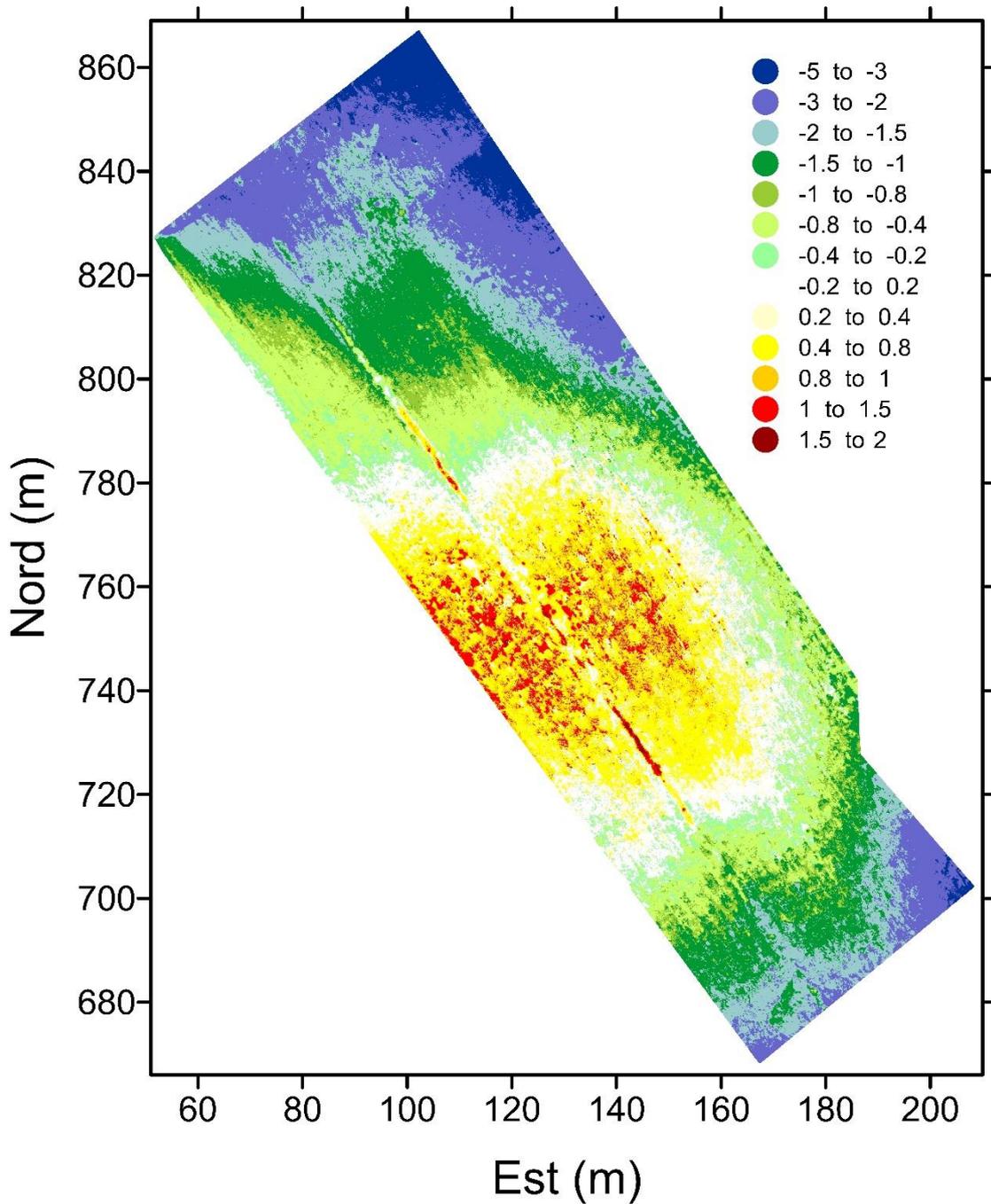


Fig. 182 - Rappresentazione delle differenze di quota tra il DSM RGB creato con Photoscan e quello creato con VSfM.

In Fig. 182 come detto viene riprodotto un Grid ottenuto dalla differenza di quota dei due RGB, sottraendo il valore ottenuto con VSfM da quello ricavato con Photoscan.

Visivamente assomiglia alle rappresentazioni delle curve di livello ma in questo caso le diverse colorazioni non sono dovute a quote assolute ma bensì a differenze.

La forma ricorda quella ottenuta Fig. 175 in quanto il DSM ottenuto con Photoscan è relativamente piano e rispecchia abbastanza fedelmente la realtà rispetto a quello creato con VSfM contenente la distorsione.

La statistica dei valori ottenuti è riportata di seguito in Tabella 22.

DSM RGB Photoscan - VSfM	
Numero di punti	1160588
Somma	-899292
Minimo	-4,825
Massimo	1,980
Media	-0,775
Deviazione standard	01,158

Tabella 22 - Statistiche DSM RGB Photoscan-VSfM, misure in metri.

Sono presenti valori positivi e negativi. I primi corrispondono a punti (aventi medesime coordinate planimetriche nei due DSM) che hanno quota maggiore nel modello Photoscan, i negativi invece caratterizzano punti che si trovano ad un'altezza maggiore nel DSM VSfM.

Ai valori positivi sono stati assegnati delle gradazioni che partono dal bordeaux e terminano con un giallo molto chiaro, ai negativi invece i toni sono sul verde e blu.

In bianco è stata evidenziata la zona dove i due modelli si sovrappongono a meno di un errore altimetrico di 20 cm.

I valori variano da -4,825 a +1,980 ma non in modo omogeneo. La maggior parte delle differenze ricadono nell'intervallo [-2 ; +1] quindi si è deciso di intensificare la classificazione all'interno di questo range e lasciarla più larga al di fuori. Questo consente di percepire meglio l'andamento nelle zone prossime alla sovrapposizione dei due modelli.

Analizzando la Fig. 182 si riscontra come nella parte centrale sono presenti i toni di giallo e rosso attribuiti ai valori positivi, questo significa che il modello VSfM ha quote minori di Photoscan infatti questa zona corrisponde alla base della concavità rilevata in (Fig. 175). Man mano che le quote crescono, allontanandosi radialmente dalla depressione, i due DSM si avvicinano fino ad intersecarsi in corrispondenza dell'area

colorata di bianco. In questa zona il discostamento massimo (positivo e negativo) tra i modelli è di 20 cm. Avanzando ancora i valori diventano negativi in quanto il DSM VSfM ha superato in quota Photoscan e i colori acquisiscono toni verdi che con l'aumentare della distanza tendono al blu.

Questo effetto è interrotto solamente dalla linea che caratterizza la vegetazione. Si nota che la sovrapposizione dei modelli è ritardata. Ciò è dovuto al fatto che Agisoft ha restituito meglio la vegetazione e non la ha appiattita sulla superficie come VisualSfM.

Ad esempio nell'area gialla si apprezzano sulla striscia vegetativa delle tonalità rosse tendenti al bordeaux, questo è sintomo del fatto che il DSM Photoscan in quei punti è più lontano, e quindi più in alto, dal modello VSfM.

Lo stesso fenomeno è percepibile anche nella zona verde superiore. In queste aree la maggior parte del VSfM ha già superato altimetricamente Photoscan, ma non lungo la linea della vegetazione dove si riscontrano valori positivi anche di 1,5m.

La somma dei valori è negativa (-899292m) in quanto nella maggior parte della superficie il DSM VSfM è posizionato sopra al Photoscan la cui quota media è 61,261m rispetto ai 61,724 di VSfM.

## 10.2 ANALISI GEO-TERMICA DEI DATI OTTENUTI

Attraverso il software SURFER è possibile anche trarre delle osservazioni ed analizzare il modello tridimensionale ottenuto con le immagini termiche.

Con lo stesso procedimento eseguito per studiare le diverse caratteristiche geometriche dei DSM RGB si crea un *Grid* file che rappresenta il modello termico.

Come file di partenza è viene utilizzato il File CSV ottenuto in seguito alla conversione del file OBJ relativo al modello termico il quale conteneva valore radiometrici i che sono stati trasformati in valore di temperatura. Il CSV ottenuto (Fig. 151) è costituito da tre colonne: le prime due sono le coordinate planimetriche EST e NORD del modello in un sistema di riferimento locale, la terza è il valore di temperatura corrispondente al singolo punto costituente la nuvola densa.

Una volta importato il CSV si esegue la funzione “*Classed Post*” con la quale il software legge le tre colonne del foglio elettronico e le plotta attribuendo alla coordinata EST della prima colonna l’ascissa, alla coordinata NORD della seconda colonna l’ordinata del sistema locale, mentre per rappresentare la terza colonna relativa alla temperatura consente di creare delle classi alle quali possono essere attribuiti diversi colori.

Il prodotto ottenuto è riportato di seguito (Fig. 183).

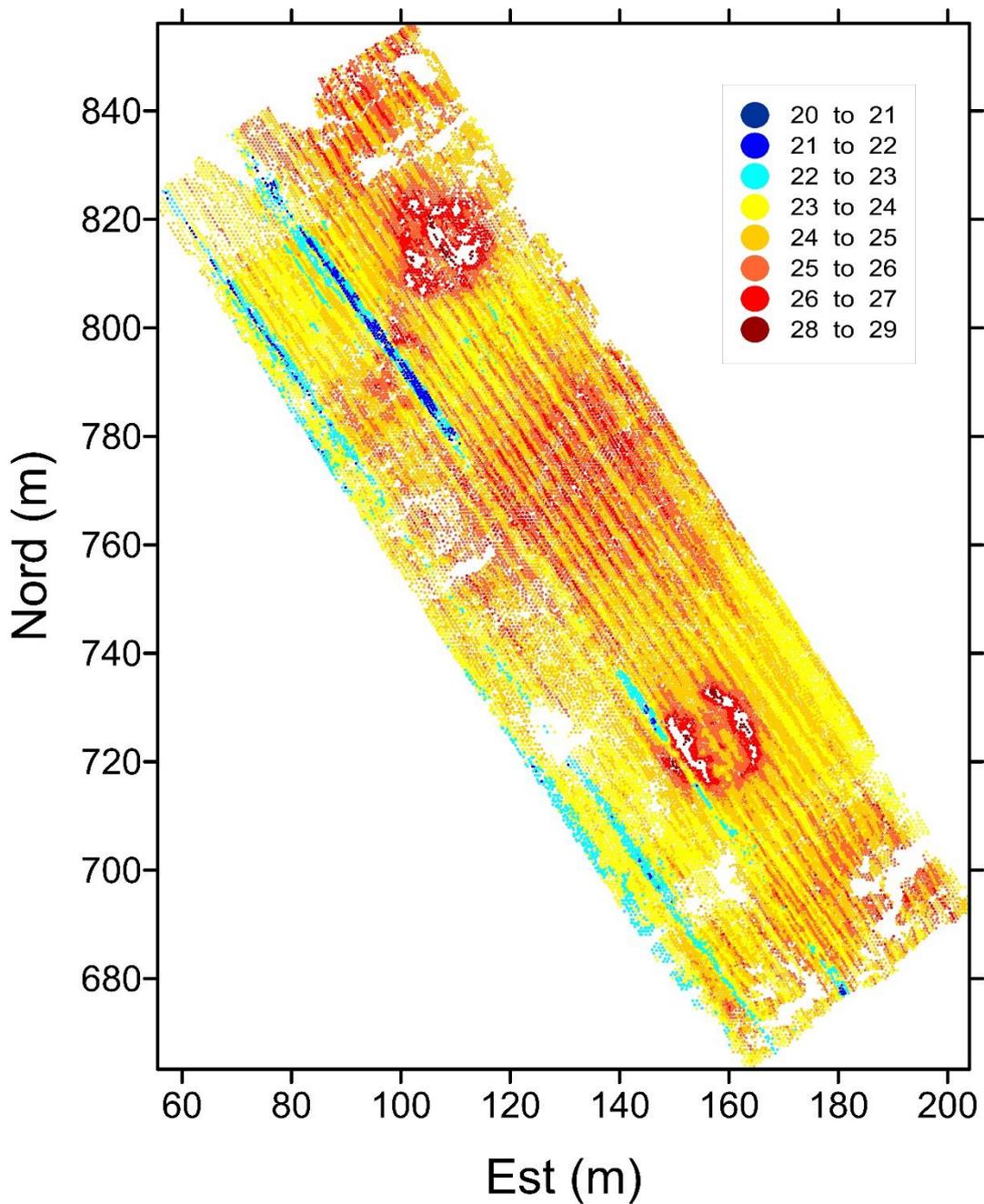


Fig. 183 - Rappresentazione del DSM termico in cui vengono evidenziate le differenti temperature attribuite ai valori radiometrici con classi di ampiezza 1 °C.

Le classi di temperatura ricoprono un intervallo di 1° ciascuna, con le gradazioni blu sono rappresentate le temperature più fredde, il rosso invece è relativo alle temperature più alte.

Come per gli altri prodotti è possibile estrarre dal *Grid* importato le statistiche, essenziali per la determinazione delle classi di temperatura. Vengono di seguito riportate in Tabella 23.

DSM termico VSfM	
Numero di punti	70258
Somma	1723498
Minimo	20,49
Massimo	28,64
Media	24,53
Deviazione standard	0,10

Tabella 23 - Statistiche DSM termico generato con VSfM, misure in gradi °C.

L'individuazione della temperatura massima e minima del modello consente di capire il range di temperature comprese nell'intero modello quindi, in base alla precisione che si vuol raggiungere, è possibile suddividere tale intervallo in più classi.

L'intervallo di temperature è tra 20,49 °C a 28,64° si è deciso quindi di creare 8 gruppi da 1 °C ciascuno.

La distribuzione delle temperature è riportata in Fig. 184 nella quale è rappresentato un istogramma che mostra il numero di punti appartenenti alle diverse classi. L'ordinata è appunto il numero di punti mentre in ascissa sono riportate le diverse classi, rappresentate nel grafico con lo stesso tono usato in Fig. 183.

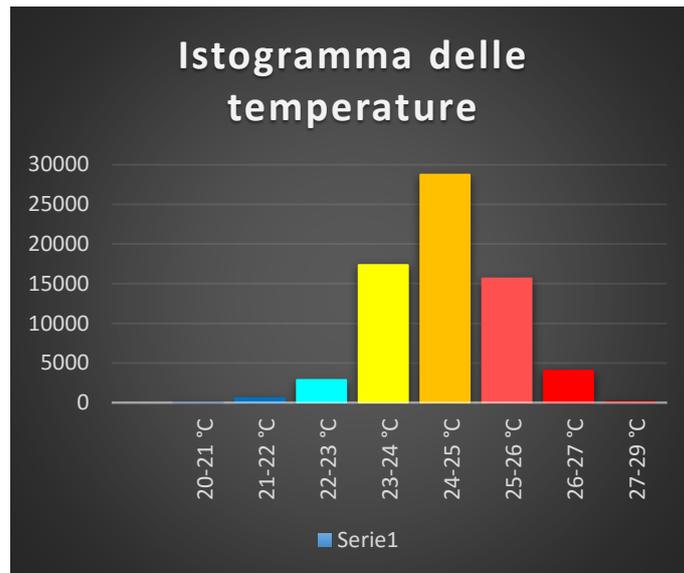


Fig. 184 - Istogramma delle temperature.

In Fig. 183 di primo impatto si notano subito le due anomalie termiche le cui temperature sono le più alte rispetto a tutto il modello.

Nella parte centrale è stato rilevato un aumento di temperatura che però non è sicuro che rappresenti esattamente la realtà. Questo probabilmente è dovuto al fatto che ogni immagine termica è costituita da un intervallo di valori di grigio circa uguale per ogni scatto. Queste non sono tarate in modalità assoluta in modo che ad un valore termico venga attribuito un solo valore di grigio, ma in modo relativo. Quindi a punti aventi la stessa temperatura su due immagini successive sono rappresentati da valori radiometrici diversi. La differenza di questi valori di grigio dipende dalla temperatura dell'oggetto che è inquadrato.

Consideriamo un'immagine in cui sono presenti punti con una temperatura molto alta, a questi saranno accostati a valori radiometrici alti (bianco) e di conseguenza punti con temperature medie sono rappresentati da toni di grigio leggermente più scuri.

Se in un'immagine seguente i punti caldi non sono più inquadrati e rimangono solo quelli a temperatura media, il massimo valore radiometrico viene shiftato verso temperature minori e quindi il tono di grigio relativo ad uno stesso punto a T costante è maggiore nella seconda immagine (Fig. 185).

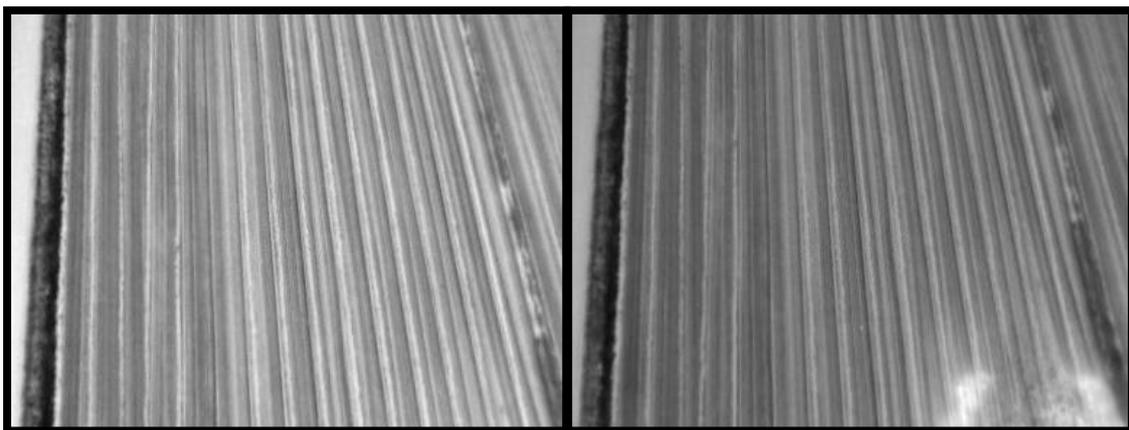


Fig. 185 - Due Foto termiche successive che inquadrano lo stessa porzione di terreno tra le due anomalie. A sinistra (più chiara) l'immagine non contiene punti appartenenti all'anomalia termica. A destra l'immagine risulta più scura in quanto tutti i valori radiometrici di grigio sono shiftati verso il basso per la presenza dell'anomalia.

Come mostrato in Fig. 185 l'aumento di temperatura riscontrato nella fascia centrale delle anomalie è dunque dovuto alla taratura relativa delle immagini termiche, che risultano più chiare (Temperature più alte) se non sono presenti i punti caldi relativi alle anomalie termiche.

Sarebbe buon uso tarare in moda assoluto la camera prima di effettuare il rilievo termico.

In Fig. 183 si nota anche la striscia di vegetazione i cui punti hanno temperatura più bassa rispetto a tutto il campo infatti sono caratterizzati da toni blu.

L'ultimo plot creato con SURFER è un immagine con effetto tridimensionale nella quale sono raccolte le informazioni sia di tipo geometrico che termico.

È costituita da un sistema di riferimento locale tridimensionale nel quale vengono riportate le coordinate plano altimetriche (EST, NORD e UP) del *Grid* RGB ottenuto con VSfM.

La Fig. 186 riporta le curve di livello, su una superficie invisibile rappresentante l'oggetto ottenuto con VisualSfM, sovrapposte ai punti classificati con la temperatura presi dal CSV convertito. Siccome i due modelli prodotti sono georeferenziati i punti hanno le stesse coordinate planimetriche.

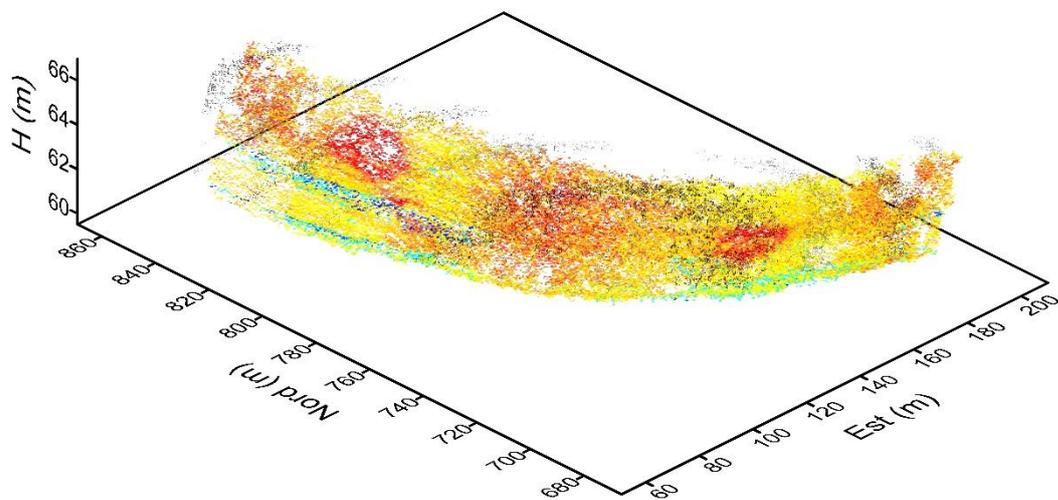


Fig. 186 - Informazione tridimensionale nella quale alle curve di livello (nere) è stata sovrapposto il dato termico.

Questa rappresenta un'informazione completa in quanto le coordinate planimetriche sono le stesse per i due modelli, la coordinata altimetrica la ricava dal DSM RGB VSfM e la temperatura dal CSV convertito.

L'informazione termica relativa ad un punto appartenente al modello termico viene legata al punto omologo avente le stesse coordinate nel modello RGB.

È stato ottenuto quindi un'immagine la cui geometria è relativa alle immagini RGB della GoPro alla quale però è collegata anche l'informazione termica ottenuta con la termocamera OPTRIS.



# CONCLUSIONI

Come già specificato nell'introduzione, in questo elaborato viene trattato il rilievo fotogrammetrico eseguito da drone con equipaggiamento multisensoriale.

L'obiettivo di questa tesi è stato quello di sperimentare un iter processuale che consenta di utilizzare i sensori termici affiancati a fotocamere digitale in ambito fotogrammetrico al fine di ottenere prodotto dal quale sono estrapolabili informazioni geometriche e termiche dell'oggetto di studio.

Per l'analisi si è adottato un rilievo UAV eseguito e messo a disposizione per motivi di ricerca, dalla SAL Engineering.

Oggetto del rilievo è stato una porzione di territorio di circa 12000 metri quadri soggetto ad anomalie termiche nei pressi di Medolla (MO).

Sono stati generati due tipi di prodotti, un filmato a colori eseguito con una Action cam GoPro Hero2 e un filmato termico creato con una termocamera ad infrarossi Optris Pi450.

Dai filmati sono stati estratti singoli frame con una frequenza tale da assicurare una sovrapposizione dell'80% su immagini successive.

La dimensione media del pixel sul terreno (GSD, Ground Sampling Distance) è stato di cm 13,2 e 5,3 cm rispettivamente per le immagini termiche e per le immagini acquisite con la Action camera.

Queste immagini sono state poi rettificare eliminandone la distorsione radiale impressa dagli obiettivi.

Conclusa la fase di trattamento dei dati sono stati creati elaborati vettoriali e raster (RGB e TERMICA) attraverso l'impiego del software di fotogrammetria digitale.

Le nuvole dense sono state trattate su una piattaforma gratuita ad interfaccia grafica (CloudCompare) per ripulire dagli outliers, identificare, selezionare zone di interesse, e per studiare geometricamente i modelli vettoriali ottenuti generando delle sezioni in +- zone significative. Le nuvole di punti restituite, caratterizzate da lacune, sono state

interpolate per creare superfici regolari uniformi che rappresentassero la morfologia e la temperatura del terreno.

Le nuvole dense di punti sono state ottenute mediante due software di fotogrammetria digitale (VisualSfM e Agisoft Photoscan). In questo modo è stato possibile effettuare dei confronti tra i diversi prodotti e valutare le potenzialità dei software stessi.

I DSM ottenuti con VSfM presentano entrambi un'elevata distorsione residua in quanto il software utilizza un modello di calibrazione molto semplificato nel quale viene valutato un unico parametro di calibrazione, che equivale circa al k1 del modello di Bröwn. Questo modello non consente una totale correzione delle distorsioni dei fotogrammi quando viene applicato per generare modelli di superfici piane, come può essere la porzione di territorio analizzata.

Il DSM ottenuto con Agisoft invece ha un andamento in apparenza molto più simile a quello reale ed è costituito da un numero di punti considerevolmente maggiore rispetto alla nuvola creata con Visual (198 punti/m<sup>2</sup> per la nuvola RGB contro i 6 punti/m<sup>2</sup> per la nuvola TERMICA).

Le immagini termiche hanno una risoluzione minore rispetto alle classiche immagini digitali a colori e pertanto a parità di distanza di presa forniscono minori informazioni dell'oggetto inquadrato.

La superficie geometrica del terreno e il modello termico sono stati georeferenziati utilizzando gli stessi punti fotogrammetrici d'appoggio. Questo ha permesso di inserire i prodotti vettoriali e raster ottenuti dai software di fotogrammetria, in un unico sistema di riferimento.

I prodotti sono stati studiati in ambiente GIS realizzando sovrapposizioni grafiche, confronti numerici, interpolazioni, sezioni e profili.

La caratteristica principale di questi modelli è l'informazione termica associata ai punti ottenuti dai fotogrammi acquisiti con la Action Camera. Questi punti sono quindi costituiti da 4 componenti, le tre coordinate plano-altimetriche, ottenuto dalla videocamera, e il valore termico misurato con la termocamera.

In questo elaborato è stato descritto un procedimento per la restituzione di elementi tridimensionali geometrici e termici da sensori integrati. Questa tecnica per studi ingegneristici potrebbe risultare molto utile in quanto consente di ottenere informazioni metriche e termiche simultanee, consentendo la georeferenziazione della variazione termica su modello tridimensionale stesso.



# BIBLIOGRAFIA

Agisoft PhotoScan User Manual – Professional Edition, Version 1.0.0, Agisoft LLC – 2013;

Balletti Caterina, Guerra Franco, Tsiouskas Vassilios, Vernier Paolo – “*Calibration of Action Cameras for Photogrammetric Purposes*” – Sensor, 2014;

Baraccani Danilo – “*La termografia: una tecnica di controllo non distruttivo*” – Università di Bologna, 2012;

Biagi L. – “*Le equazioni di osservazione del GPS*” – Politecnico di Milano;

Bitelli Gabriele, Gatta Giorgia, Alena Girelli Valentina, Vittuari Luca, Zanutta Antonio – “*Integrated Methodologies for the 3D Survey and the Structural Monitoring of Industrial Archaeology: The Case of the Casalecchio di Reno Sluice, Italy*” – 2011;

Bouguet Jean-Yves – “*Camera Calibration Toolbox for Matlab*” – 2014;

Cannarozzo, Cucchiarini, Meschieri – “*Orientamento e restituzione*” – Zanichelli, 2012;

Changchang Wu – “*Multicore Bundle Adjustment Manual*” – University of Washington;

Changchang Wu – “*SiftGPU Manual*” – University of North Carolina;

Changchang Wu – “*Towards Linear-time Incremental Structure from Motion*” – University of Washington, <http://ccwu.me/vsfm>;

CloudCompare v2.6.1 – User manual;

Dall’Alba Carlo; “*Sensori d’immagine CCD e CMOS*” – Università degli studi di Padova, 2012;

Eurodrone – “*Termografia*”;

Export To Canoma – “*SFM-Structure from motion, prima parte*” – Blogspot, 2012;

Export To Canoma – “*SFM-Structure from motion, seconda parte*” – Blogspot, 2012;

Ferreira Thiago, Rasband Wayne – “*ImageJ User Guide, IJ 1.46r*” – 2012;

Flir – “*Manuale di termografia ad infrarossi per il mercato delle costruzioni e delle energie rinnovabili*”;

Formica Federico – “*Così i droni stanno rivoluzionando l'agricoltura*” – National Geographic Italia, 2016;

Gandolfi Antonio – “*Dalla base GPS alle reti di stazioni permanente GNSS per il posizionamento di precisione in tempo reale*”;

Georobotics – “*Il rilievo fotogrammetrico 2° parte*”;

Giambattista – “*Metodologia, rilievo G.P.S. e utilizzo drone in campo topografico*” – Collegio dei Geometri, Sassari 2015;

GoPro Studio – “*User Manual for Windows Operating Systems*”;

Javier de la Torre García – “*A platform for automatic 3D object reconstruction through multi-view stereo techniques for mobile devices*” – 2013;

Kraus Karl – “*Fotogrammetria vol. 1 – Teoria ed applicazioni*”;

Landelli Niccolò, Pizzolon Mario, Boscolo Ivano – “*Microdrone IUAV, piattaforma aerea leggera a bassa quota per il monitoraggio città ambiente e territorio, rilievi di parchi, infrastrutture, aree industriali, edifici, aree in dissesto idrogeologico, applicazioni tematiche di protezione civile*” – Dipartimento IUAV per la ricerca, 2011;

Martinelli Giovanni – “*Fenomeni geologici inusuali in Emilia Romagna*” – ARPA Emilia Romagna, 2014;

Martorana Alessandro – “*Agricoltura: decolla la rivoluzione dei droni*” – International Business Time, 2015;

Migliore Davide – “*La lunga evoluzione dei Droni, i famigerati UAV della storia*” – Massacritica, 2013;

Noah Snavely – “*Bundler: Structure from Motion (SfM) for Unordered Image Collections*”;

Optris infrared thermometers – “*Operator’s manual*”;

Pier Calderan – “Droni DIY, il manuale per hobbisti e maker” – 2015;

Radiconi Fabio, Aurelio Stoppini – “*Datum e coordinate nella geodesia*” – Università degli studi di Pavia, Corso di topografia 2008/2009;

Ravella Rocco – “*Tecniche fotogrammetriche low-cost e open-source applicate al dataset PAL dell’Università di Bologna: Un’analisi comparativa*” – 2015;

Regolamento ENAC – “*Mezzi aerei a pilotaggio remoto*” – Edizione n° 2 del 16 luglio 2015;

Roncella Riccardo – “*Sviluppo e applicazioni di tecniche di automazione in fotogrammetria dei vicini*” – 2006;

Rosnell Tomi, Honkavaara Eija – “*Point Cloud Generation from Aerial Image Data Acquired by a Quadcopter Type Micro Unmanned Aerial Vehicle and a Digital Still Camera*” – Sensor, 2012;

Rubboli Matteo – “*Migliori sei droni pronti al volo riconosciuti ENAC*”;

Santagati Cettina, Inzerillo Laura, Di Paola Francesco – “Ricostruzione di una scena urbana 3D utilizzando VisualSfM - Reconstructing urban scene 3D using VisualSfM” – 2013;

SIT Puglia, Servizi di informazione Territoriale – “*Rilievi aerei con sensori iperspettrali e termici*”;

Terrelogiche – “*Gestione, integrazione ed elaborazione di dati da Rilievo 3D multiplatforma con Software Open Source: CloudCompare e Meshlab*”;

Todesco M., Sciarra A., Capaccioni B. – “*Cosa sappiamo delle terre calde di Medolla?*” – INGV Terremoti, 2015;

Università degli studi di Perugia – “*Coordinate e Datum*” – Laboratorio di Topografia;

Zanutta Antonio – “*Appunti di fotogrammetria*” – Materiale didattico, Università di Bologna, 2015;

Zanutta Antonio– “*Fotogrammetria analitica e digitale, differenze operative*” – Materiale didattico, Università di Bologna, 2015;

Zanutta Antonio– “*Introduzione alla fotogrammetria Digitale*” – Materiale didattico, Università di Bologna, 2015.

## Sitografia

<http://regione.emilia-romagna.it/>

<https://imagej.nih.gov/ij/index.html>

<http://www.eurodrone.it/default.aspx>

<http://www.georobotics.it/>

<https://www.enac.gov.it/Home/>

<http://www.cs.cornell.edu/~snavely/bundler/>

<https://ingvterremoti.wordpress.com/>

<http://phototour.cs.washington.edu/bundler/>

[http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)



# RINGRAZIAMENTI

Desidero innanzitutto ringraziare il Professor Antonio Zanutta per la grande disponibilità mostrata nei miei confronti, per la grande passione che mi ha trasmesso in questa materia e per la fiducia che ha riposto nelle mie capacità.

Ringrazio il mio correlatore l'Ing. Marco Dubbini per il materiale fornito che mi ha permesso di svolgere la parte sperimentale dell'elaborato.

Ringrazio il personale del laboratorio LARIG per essersi dimostrato sempre cortese e disponibile, in particolare L'Ing Alessandra Tini per l'aiuto fornito nei momenti di bisogno.

Grazie a tutti gli amici che ho incontrato in questo cammino che mi hanno aiutato nei momenti più complicati, specialmente al Bulbone, alla Gheis, all'Ale e a Lucone.

Ringrazio le mie amiche, Ludo, Sofi, Laura, anche se ci siamo un po' persi vi voglio bene lo stesso.

Un Grazie al mio ormai spero ex collega e amico di una vita, Cri per tutti i momenti passati, anche a parlare di niente fondamentali per distrarmi.

Ringrazio tutti i componenti della FRASCARI ALLESTIMENTI per l'enorme supporto che mi hanno dato in questo ultimo periodo; Fabio, Antonio, Silvia, Franco, Simone, Andrea e Luca, grazie davvero!

Un ringraziamento purtroppo va dato anche al Cetri e alla strana, a Demoooo e alla Yodish, alla Smer, al Baggiano e alla CUGENIA, grazie per avermi sopportato in questo percorso e avermi fatto distrarre dalle pene ingegneristiche.

Ringrazio i miei nuovi vicini Ale, Luana, Diego e Elia per le bussate improvvisate essenziali per staccare un po' la concentrazione.

Un ringraziamento va anche fatto alla vecchia Kjra per le bellissime pedinate ricevute mentre ripetevo camminando per casa!

Ringrazio tutti i miei parenti Catia, Sonia, Olly, Enzo, Dino, Ciro, Robby, Sara, Giek, Simo, Chicco, Marica, Mauro, Terry, Mariangela, Atos, per avermi sempre appoggiato e spronato, vi voglio bene.

Un ringraziamento speciale infine va alla mia fantastica famiglia e alla mia stupenda Cips, se sono riuscito a diventare quello che sono e a raggiungere questo grandissimo traguardo lo devo soprattutto a voi!

Mamma, Papà, mi avete cresciuto senza mai farmi mancare niente, mi avete appoggiato, sempre, in ogni scelta e fornito consigli indispensabili. Vi ringrazio davvero di cuore e cercherò in ogni modo di rendervi orgogliosi di quello che avete fatto, cominciando da questo giorno. Fabio vedi di curare bene quei pesci se no non te li regalo più, ti voglio bene fratello!!

Amore grazie per avermi affiancato ogni giorno in questo lungo cammino, il tuo appoggio è stato e continuerà ad essere fondamentale. In questi sette anni mi hai fatto passare momenti fantastici, divertenti, indimenticabili, e giustamente abbiamo affrontato anche periodi un po' più duri, ma nonostante tutto noi continuiamo a esserci e piano piano stiamo cominciando a porre i primi tasselli della nostra vita. Ti ringrazio perché sei riuscita a sopportare i miei impegni lavorativi e non, sono tremendamente orgoglioso di te spero tu lo sia altrettanto!