



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN "SCIENZE DELL'INGEGNERIA"

CICLO XXVIII

COORDINATORE Prof. Stefano Trillo

Il rilevamento geometrico finalizzato al restauro dei grandi siti archeologici.
Analisi metodologica applicata alla Regio VIII di Pompei

Settore Scientifico Disciplinare ICAR/06

Dottorando

Dott. Maria Paternò di Sessa

Tutore

Prof. Paolo Russo

Co-Tutore

Prof. Alberto Pellegrinelli

Anni 2013/2017

A Paolo Russo
e Alberto Pellegrinelli

Sommario

Capitolo 1 – Introduzione

1

Capitolo 2 – Il sito archeologico di Pompei

<u>2.1 Premessa</u>	<u>3</u>
<u>2.2 L'antica Pompei</u>	<u>4</u>
2.2.1 Il Vesuvio	5
2.2.2 La città antica	7
2.2.3 L'eruzione del 79 d.c.	13
2.2.4 La storia degli scavi di Pompei	14
<u>2.3 Il parco archeologico di Pompei</u>	<u>23</u>
<u>2.4 Il Catasto di Pompei</u>	<u>28</u>
<u>2.5 La rappresentazione cartografica degli scavi</u>	<u>32</u>
2.5.1 La Cartografia storica	32
2.5.2 Un progetto di cartografia moderna: la Cartografia "Morichi"	37
<u>2.6 Documentazione fotogrammetrica e laser scanning</u>	<u>41</u>
2.6.1 Un progetto di documentazione fotografica: il Progetto Neapolis	41
2.6.2 Un progetto di modellazione tridimensionale	42

Capitolo 3 – I moderni strumenti di rilievo e rappresentazione dei Beni Archeologici

3.1 Premessa	47
3.2 Sensori di rilievo tridimensionale	48
3.2.1 Le grandezze caratteristiche di un sensore 3D	50
3.3 Sensori 3D passivi	50
3.3.1 Il teodolite	50
3.3.2 La fotogrammetria	51
3.3.2.1 La fotogrammetria classica	52
3.3.2.2 Le equazioni di collinearità	55
3.3.2.3 Le prese stereoscopiche	57
3.3.2.3.1 L'orientamento	60
3.3.2.3.2 La restituzione	63
3.3.2.3.3 Le fotocamere utilizzate nella fotogrammetria classica	63
3.3.2.4. La fotogrammetria digitale	64
3.3.2.4.1 Le fotografie digitali	65
3.3.2.4.2 I metodi di autocorrelazione	69
3.3.2.4.3 Agisoft PhotoScan o software simili	74
3.3.2.4.4 Raddrizzamento ed ortoproiezione delle immagini	77
3.3.2.5 L'aerofotogrammetria da bassa quota	80
3.4 Sensori 3d attivi	84
3.4.1 La stazione totale	84
3.4.1.1 Il raggio laser	87

3.4.1.2 La misura di distanza basata sulla misura di fase	91
3.4.1.3 La misura di distanza basata sulla misura ad impulsi	93
3.4.2 I laser scanner terrestri	94
3.4.2.1 ITLS a triangolazione	96
3.4.2.1.1 TLS a triangolazione per singolo spot	98
3.4.2.1.2 TLS a triangolazione a lama di luce	100
3.4.2.1.3 TLS a triangolazione a piani luminosi multipli	101
3.4.2.2 I TLS distanziometrici	105
3.4.2.2.1 TLS a tempo di volo	106
3.4.2.2.1.1 Metodo diretto di stima del TOF	108
3.4.2.2.1.2 Metodo indiretto di stima del TOF	110
3.4.2.2.2 TLS a misura di fase	111
3.4.2.3 Le caratteristiche dei TLS	112
3.4.2.4 Applicazione dei TLS	118
3.4.2.5 Applicazione dei TLS ai Beni Archeologici	119
3.4.2.6 Metodologia di allineamento delle nuvole di punti	120
3.4.2.7 Metodologia di rilievo laser scanning di un Bene Archeologico	123

Capitolo 4 – Il Grande Progetto Pompei e il Piano delle Conoscenza

<u>4.1 Premessa</u>	<u>129</u>
<u>4.2 Il Grande Progetto Pompei</u>	<u>131</u>
4.2.1 Percorso normativo ed organizzazione del GPP	131
4.2.2 I contenuti del GPP	132
<u>4.3 Il Piano della Conoscenza</u>	<u>134</u>
<u>4.4 La linea 1 del PdC</u>	<u>137</u>
<u>4.5 L'allegato tecnico della linea 1 del PdC</u>	<u>140</u>
4.5.1 Definizione dei lotti	140
4.5.2 Rilievi geometrici	141
4.5.2.1 Rilievi e restituzione delle planimetrie	142
4.5.2.2 Rilievo e restituzione delle sezioni-prospetto	145
4.5.2.3 Rilievo laser scanning dei 5 monumenti	147
4.5.3 Documentazione fotogrammetrica	150
4.5.4 Attività ispettiva e di monitoraggio	152
4.5.5 Verifiche e collaudi	157
<u>4.6 Analisi delle richieste relative al rilievo geometrico e fotogrammetrico</u>	<u>158</u>
4.6.1 Rilevamento per la restituzione delle planimetrie e delle sezioni prospetto	160
4.6.2 Rilevamento dei PFA per la correzione geometrica delle immagini	168
4.6.3 Rilevamento laser scanning	169
4.6.4 Rilievo fotogrammetrico	171
<u>4.7 Considerazioni finali</u>	<u>175</u>

Capitolo 5 – Analisi preliminare: il contesto di Pompei e le sue criticità

<u>5.1 Premessa</u>	<u>177</u>
<u>5.2 Attività di rilevamento e rappresentazione</u>	<u>177</u>
<u>5.3 Tipologie di criticità</u>	<u>182</u>
<u>5.4 Estensioni delle aree da rilevare</u>	<u>182</u>
<u>5.5 Criticità generali: le tipologie edilizie</u>	<u>185</u>
5.5.1 Strade	186
5.5.2 Edifici commerciali	188
5.5.3 Edifici residenziali	191
5.5.4 Edifici per il culto	195
5.5.5 Edifici per il divertimento	198
5.5.6 Edifici pubblici	204
5.5.7 Necropoli	209
5.5.8 Sintesi delle criticità generali	211
5.5.9 Criticità del rilievo fotogrammetrico	216
5.5.10 Singolarità: ipogei ed ambienti stretti	216
5.5.11 Il Criterio di Parametrizzazione della Criticità (CPC)	218
<u>5.6 Criticità specifiche del lotto</u>	<u>221</u>
<u>5.7 Criticità temporale</u>	<u>222</u>
<u>5.8 Condizioni al contorno</u>	<u>223</u>
5.8.1 Presenza di visitatori	223

5.8.2 Presenza di cantieri in interferenza	224
--------------------------------------------	-----

Capitolo 6 – Analisi preliminare alla progettazione dei rilievi del lotto 6

6.1 Premessa	227
6.2 La Regio VIII	228
6.3 Il lotto 6 del PdC	230
6.3.1 La planimetria	231
6.3.2 Le sezioni prospetto	232
6.3.3 I cinque monumenti	233
6.4 Analisi preliminare del lotto 6	235

Capitolo 7 – Progettazione dei rilievi geometrico e fotogrammetrico del lotto 6

7.1 Premessa	253
7.2 Tecniche e strumenti di misura adottati nel rilievo geometrico	253
7.2.1 Rilievo di inquadramento e raffittimento	254
7.2.2 Rilievo di dettaglio	257
7.2.2.1 Implicazioni della scala di rappresentazione	257
7.2.2.2 Implicazioni della quota del piano di sezione	259
7.2.2.3 Rilievo fotogrammetrico del tempio di Iside	266
7.2.3 Rilievo laser scanning dei 5 monumenti	272
7.3 Progetto del rilievo geometrico	275
7.3.1 RUR o Rete di I livello	276
7.3.2 Rete di II livello	276
7.3.3 Rilievo di dettaglio di I e II livello	277

7.4 Progetto del rilievo fotogrammetrico	281
7.4.1 Rilievo fotogrammetrico terrestre	281
7.4.1.1 Procedura applicata agli ambienti stretti ed agli oggetti non piani	282
7.4.2 Rilievo fotogrammetrico da drone	283

Capitolo 8 – Rilievi geometrico e fotogrammetrico del lotto 6

8.1 Premessa	285
8.2 Composizione del gruppo di lavoro	285
8.2.1 Composizione delle squadre dedicate a rilevamenti e restituzioni	286
8.3 Rilievo topografico	288
8.3.1 Rilievo topografico di inquadramento e di raffittimento	289
8.3.2 Rilievo laser scanning di dettaglio di I livello	300
8.3.3 Rilievo laser scanning di dettaglio di II livello	306
8.3.4 Rilievo laser scanning dei 5 monumenti	314
8.4 Rilievo fotogrammetrico	326
8.4.1. Rilievo fotogrammetrico terrestre	326
8.4.2 Rilievo aerofotogrammetrico da drone	330

Capitolo 9 – Conclusioni

335

Bibliografia e sitografia

339

Capitolo 1 – Introduzione

La conoscenza geometrica, morfologica e colorimetrica del Patrimonio Storico Artistico, finalizzata nell'immediato al suo restauro e più a lungo termine alla sua conservazione, è un tema sempre più sentito, soprattutto in Italia, in relazione sia alla grande ricchezza dei Beni che custodisce, sia alla sua fragilità dal punto di vista idrogeologico.

Un esempio emblematico ed ambizioso di risposta alle esigenze di conoscenza, restauro e conservazione dei Beni Culturali, è rappresentato dal Grande Progetto Pompei. Si tratta di un piano operativo volto alla risoluzione, in modo metodico e programmato, delle tematiche legate alla conservazione dell'area archeologica di Pompei, uno tra i siti più noti a livello mondiale. All'interno del Grande Progetto Pompei si colloca il Piano della Conoscenza, che, per mezzo di un monitoraggio periodico dello stato di conservazione delle strutture archeologiche, si pone l'obiettivo di individuare e di progettare i lavori di consolidamento e restauro necessari alla conservazione dei monumenti: i dati della "conoscenza", dunque le informazioni derivanti dal rilievo geometrico, morfologico, colorimetrico e dalla diagnosi dello stato di degrado delle strutture, permettono di individuare le situazioni di rischio ed evidenziare le priorità d'intervento.

Lo studio presentato descrive una metodologia multi-risoluzione di rilievo e rappresentazione dei Beni Archeologici, basata sull'integrazione modulare delle tecniche di rilievo topografico e fotogrammetrico moderne, a partire dall'esperienza effettuata nel rilevamento della Regio VIII degli scavi archeologici di Pompei, proprio nell'ambito del Piano della Conoscenza.

Dopo avere esaminato in chiave critica le richieste del Piano della Conoscenza, il lavoro affronta il tema dell'analisi a priori del contesto da rilevare, come supporto per la successiva fase progettuale. In particolare, vengono isolate quelle caratteristiche intrinseche dei vari monumenti che rappresentano delle criticità dal punto di vista del loro rilievo e rappresentazione secondo le richieste del Piano della Conoscenza. La combinazione di tali

criticità all'interno delle principali tipologie di monumenti presenti negli scavi non può che contribuire a renderne più o meno complessi i rilievi e la rappresentazione. Si propone dunque un Criterio di Parametrizzazione delle Criticità intrinseche negli scavi di Pompei in relazione al rilevamento ed alla rappresentazione, con l'obiettivo di fornire una quantificazione analitica, che viene applicata al caso specifico della Regio VIII.

Nel caso in esame il Criterio di Parametrizzazione delle Criticità ha fornito la validazione al metodo di rilievo applicato, visto che l'analisi è stata messa a punto dopo il termine delle campagne di misura della Regio VIII.

I rilevamenti della Regio VIII sono stati progettati in un'ottica di ottimizzazione delle caratteristiche delle tecniche di misura topografiche tradizionali e moderne, mettendo a punto una metodologia modulare strutturata per livelli di incremento di dettaglio delle informazioni geometriche e morfologiche acquisite.

L'esecuzione delle misure e la loro elaborazione in chiave critica ha confermato la correttezza dell'approccio seguito, evidenziando ancora una volta come l'integrazione tra le varie tecniche di misura rappresenti spesso la soluzione ottimale.

Capitolo 2 – Il sito archeologico di Pompei

2.1 Premessa

Gli scavi archeologici di Pompei per la loro impressionante estensione, per la loro completezza, per l'atmosfera che si respira quando li si visita e non ultimo per la loro storia tragica, raccontata a più riprese da film, da romanzi e da servizi televisivi, rappresentano nell'immaginario collettivo l'archetipo dello scavo archeologico. Ma anche per gli addetti ai lavori, in virtù del suo eccezionale stato di conservazione dovuto alle particolari condizioni di seppellimento causato dall'eruzione del Vesuvio del 79 d.C., questo sito archeologico rappresenta un unicum che, insieme alle realtà minori di Ercolano, Oplontis e degli altri siti vesuviani, costituisce una testimonianza completa della società e della vita quotidiana in un preciso periodo storico.



Figura 2.1 - Gli scavi fotografati da drone con il Vesuvio sullo sfondo (www. pompeisites.org)

2.2 L'antica Pompei

“Si elevava una nube, ma chi guardava da lontano non riusciva a precisare da quale montagna [si seppe poi che era il Vesuvio]: nessun'altra pianta meglio del pino ne potrebbe riprodurre la forma. Infatti slanciatosi in su in modo da suggerire l'idea di un altissimo tronco, si allargava poi in quelli che si potrebbero chiamare dei rami, credo che il motivo risiedesse nel fatto che, innalzata dal turbine subito dopo l'esplosione e poi privata del suo appoggio quando quello andò esaurendosi, o anche vinta dal suo stesso peso, si dissolveva allargandosi; talora era bianchissima, talora sporca e macchiata, a seconda che aveva trascinato con sé terra o cenere. [...] Una nube nera e terribile, squarciata da guizzi serpeggianti di fuoco, si apriva in vasti bagliori di incendio: erano essi simili a folgori, ma ancora più estesi [...] Dopo non molto quella nube si abbassò verso terra e coprì il mare[...]. Cadeva già della cenere, ma ancora non fitta. [...] Scese la notte, non come quando non v'è luna o il cielo è nuvoloso, ma come quando ci si trova in un locale chiuso a lumi spenti. Udivi i gemiti delle donne, i gridi dei fanciulli, il clamore degli uomini: gli uni cercavano a gran voce i genitori, altri i figli, altri i consorti, li riconoscevano dalle voci; chi commiserava la propria sorte, chi quella dei propri cari: ve n'erano che per timore della morte invocavano la morte [...]” (Traduzione tratta dal sito ufficiale del Parco Archeologico di Pompei).

Con due celebri lettere Plinio il Giovane descrive al suo amico, lo storico Publio Cornelio Tacito, l'eruzione del Vesuvio del 79 d.C., senza dubbio la più nota eruzione del vulcano campano e forse la più famosa eruzione vulcanica della storia.

La testimonianza di Plinio il Giovane rappresenta una documentazione di notevole importanza non solamente per gli storici che si interessano dell'epoca romana, ma anche per i vulcanologi che studiano la storia delle eruzioni del passato per riuscire a riconoscerne l'evoluzione e mettere conseguentemente a punto dei sistemi di monitoraggio dei vulcani attivi.

2.2.1 Il Vesuvio

Il Somma-Vesuvio, comunemente noto come Vesuvio, è un strato-vulcano di dimensioni medie, che oggi raggiunge un'altezza massima di 1.281 m s.l.m. ed è costituito dal più vecchio vulcano del Monte Somma, la cui parte sommitale sprofondò generando una caldera, e dal più recente vulcano del Vesuvio, cresciuto all'interno di questa caldera.



Figura 2.1 - Il cratere del Vesuvio visto da drone (<http://www.naturaitalia.it>)

L'analisi dei campioni di lave antiche, estratte tramite perforazioni condotte a profondità massime di oltre 1.300 metri, hanno permesso agli scienziati dell'Osservatorio Vesuviano e dell'Istituto Nazionale di Vulcanologia di fare delle ipotesi sulla storia del Somma-Vesuvio, che appartiene ad un'area vulcanica in attività da più di 400.000 anni.

La grande eruzione flegrea dell'Ignimbrite Campana, che dovrebbe essere avvenuta indicativamente 37.000 anni fa, avrebbe causato il seppellimento di gran parte della Campania sotto una spessa coltre di tufi. L'edificio vulcanico del Somma-Vesuvio si

sarebbe gradualmente creato qualche millennio più tardi, a partire da circa 25.000 anni fa, da eruzioni di tipo effusivo ed esplosivo (in numero minore).

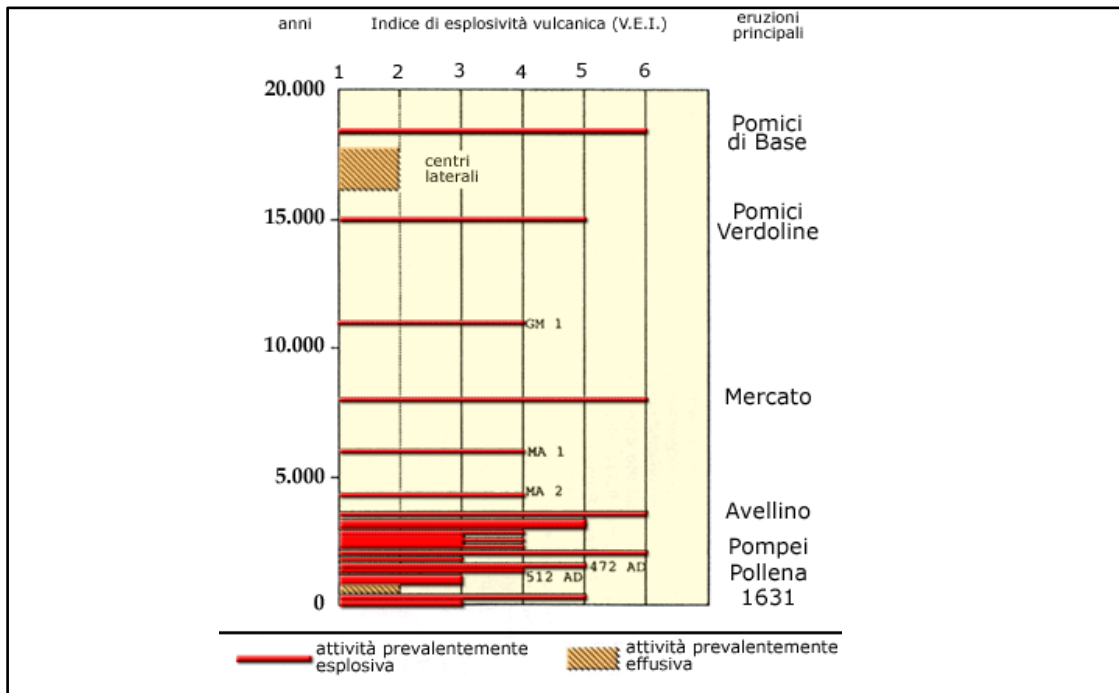


Figura 2.2 – Cronologia, tracciata dall'Osservatorio Vesuviano, delle maggiori eruzioni del Vesuvio, distinte per tipologia, prima della celebre del 79 d.C.

Gli scienziati ipotizzano che, indicativamente 19.000 anni fa, l'apparato vulcanico fosse ormai completo ed avesse più o meno il profilo che vedevano i Pompeiani prima del 79 d.C. e del quale a noi rimane solamente la parte settentrionale, rappresentata dall'attuale Monte Somma.

Successivamente si ritiene che siano avvenute cinque grandi eruzioni pliniane, intervallate da modeste eruzioni effusive e, tra le ultime due, da almeno sei eruzioni subpliniane seguite da periodi di quiescenza: l'eruzione delle Pomici di Base (indicativamente 18.300 anni fa, nel corso della quale è iniziato il collasso dell'apparato vulcanico del Somma e la formazione della caldera nella quale si accrescerà il nuovo edificio del Vesuvio) l'eruzione delle Pomici Verdoline (indicativamente 16.000 anni fa), l'eruzione delle Pomici di Mercato (indicativamente 8.000 anni fa), l'eruzione delle

Pomici di Avellino (indicativamente 3.800 anni fa) ed infine la famosa eruzione di Pompei del 79 d. C., la prima ad essere effettivamente datata e documentata grazie alle ricerche archeologiche ed alle fonti scritte.

All'eruzione che ha distrutto Pompei ed Ercolano ne sono seguite due di tipo subpliniano, nel 472 e nel 1631 ed una serie di modeste eruzioni effusive ed esplosive a bassa energia, che hanno generato colate di lava lungo i fianchi occidentali e meridionali del vulcano.

Tra l'eruzione del 1631 ed il 1944 il Vesuvio ha mantenuto un'attività a condotto sostanzialmente aperto e si sono potuti individuare, intervallati da brevi periodi di assenza di attività, 18 cicli stromboliani ciascuno di durata mai superiore ai 7 anni e caratterizzato da frequenti eruzioni dette "intermedie" fino ad una violenta eruzione detta "finale". L'ultima di queste eruzione terminali, avvenuta nel 1944, ha avuto carattere misto (sia esplosivo, sia effusivo) e con essa il vulcano ha iniziato una fase di attività a condotto ostruito. (Osservatorio Vesuviano, INGV, 2017)

2.2.2 La città antica

All'inizio del primo millennio il Vesuvio non era considerato un vulcano attivo, tanto che alle sue pendici sorgevano alcune fiorenti città, tra le quali Pompei, Ercolano e Stabia.

In particolare la posizione su cui sorge Pompei è molto fortunata: si tratta infatti di un pianoro roccioso, formatosi a seguito di colate laviche preistoriche, caratterizzato da pareti scoscese, dunque facilmente difendibili militarmente, situato a ridosso del mare, costeggiato dal fiume Sarno, che in antichità era navigabile, e circondato da terreni resi molto fertili dalle ceneri. Infatti vi sono state trovate tracce, nell'area poi occupata dal Foro Civile, di piccoli centri di pastori ed agricoltori organizzati in villaggi, risalenti all'Età del Bronzo e del Ferro.

Il primo insediamento della Pompei storica nasce nel VI secolo a. C. per mano

dell'antica popolazione campana degli Opici, secondo un'impostazione di schema assiale incentrato sull'area del futuro Foro Civile; trattandosi di un modello urbanistico insolito per gli Opici si ritiene che si siano sentite le influenze dei più raffinati etruschi. Di questo primo nucleo abitativo si ritrovano delle tracce in un anello di piccole strade, costituito da vicolo dei Soprastanti, via degli Augustali, via del Lupanare e via dei Teatri, dunque in una porzione limitata delle regioni VII e VIII degli attuali scavi. Alcuni saggi condotti lungo le mura di Pompei hanno dimostrato che, anche la prima cinta difensiva, costruita con un particolare tipo di tufo chiamato *pappamonte*, risale allo stesso secolo e già circondava l'intera superficie (di circa 66 ettari) del dosso lavico. Sembra infatti che la prima cinta muraria circondasse 5 villaggi opici e quindi comprendesse delle aree non edificate di estensione molto superiore a quelle edificate; peraltro anche nel 79 d.C. all'interno delle mura erano presenti ampie aree lasciate a verde o coltivate. Qualche storico ritiene che il nome di Pompei derivi proprio dalla parola "cinque" in lingua opica.

Tra il V ed il VI secolo a.C. in Campania sono fortemente presenti sia gli Etruschi, che dominano Capua, l'agro nolano-nocerino e quello salernitano fino a Pontecagnano, sia i Greci, che occupano invece le importanti colonie elleniche di Pitecusa, Cuma, Napoli e Pozzuoli. Indubbiamente la nuova città desta l'interesse di entrambe le popolazioni, grazie alla sua posizione che permette il controllo dei traffici tra le città dell'interno e quelle della costa, ma gli studiosi ritengono che Pompei riesca a salvaguardare la sua autonomia politica, pur intrattenendo con entrambe intensi rapporti commerciali. Altrettanto indubbio è che i pompeiani subiscono l'influenza sia degli Etruschi sia dei Greci, assimilando da entrambi delle nuove tecniche costruttive e facendo propri i loro culti sacri, come testimoniano i templi dedicati ad Apollo ed Atena e forse di Ercole nella porzione meridionale dell'abitato.

Questa situazione di relativo equilibrio cambia quando, a metà del V secolo a. C., gli Etruschi perdono definitivamente la loro guerra contro i Greci per il predominio sulla Campania ed abbandonano la regione; in un primo momento si intensificano i rapporti commerciali e le influenze culturali tra Pompei e le colonie greche di Cuma e Napoli,

in un secondo la Campania costiera diventa parte delle mire espansionistiche dei Sanniti, una popolazione originaria del centro dell'entroterra campano ed abruzzese. Certamente non è un caso se in questo periodo viene rinnovata la cinta muraria in pappamonte, affiancandone una nuova, realizzata in blocchi di calcare del Sarno, a protezione dell'abitato di Pompei.

Effettivamente nell'arco di pochi anni i Sanniti conquistano Cuma e sottomettono l'intera Campania, che diviene così parte della grande Confederazione Sannita, con Capua nuova capitale. La dominazione sannita coincide con un evidente periodo di pace e benessere economico, al quale consegue un forte aumento della popolazione di Pompei; il nucleo abitativo originario si espande quindi in direzione nord ed est, ovvero verso zone ancora libere all'interno della cinta muraria. Questa espansione della città, che la conduce gradualmente ad assumere lo schema abitativo che vediamo oggi, viene disciplinata da un vero e proprio piano regolatore, impostato ai modelli greci. In particolare lo schema urbanistico prevede delle linee direttrici costituite dalle vecchie vie extraurbane, secondo uno schema determinato dall'asse nord-sud, costituito da via Stabiana, e da due assi paralleli est-ovest, riconoscibili in via Nolana e via dell'Abbondanza, che nel IV secolo a. C. viene prolungata in direzione est oltre le Terme Stabiane, dove precedentemente terminava. I lotti di terreno, così delimitati, vengono divisi in isolati allungati, in modo che il loro lato minore affacci sulla via principale.

Verso la fine del IV sec. a.C., Roma estende il suo dominio sull'Italia meridionale, dando inizio alle guerre sannitiche, che si risolvono nel 307 a. C. con la vittoria romana. Pompei entra dunque nell'orbita di Roma, alla quale resta fedele anche quando l'esercito di Annibale invade la Campania. Tra la fine del III e gli inizi del II secolo a.C. nasce un nuovo quartiere tra via Nocera e via dell'Abbondanza, per accogliere gli abitanti di Nocera espulsi da Annibale e quelli di Capua esiliati dai romani. Proprio per fare fronte all'esercito di Annibale le mura vengono alzate e rafforzate per mezzo di una ulteriore cortina in tufo di Nocera, la creazione di torri, in opera incerta, avviene invece qualche decennio più tardi.

Alla vittoria nella II guerra punica ed alla successiva espansione romana nel bacino del

Mediterraneo, consegue un importante aumento di ricchezza per Roma e per l'Italia, grazie ai nuovi traffici commerciali con i ricchi mercati orientali. Pompei, al pari delle altre città costiere dell'Italia meridionale, non può che trarre enormi vantaggi dalla nuova situazione politico-economica e con la prima metà del II secolo a.C. si avviano degli importanti lavori di abbellimento della città, che la portano al suo momento di massimo splendore. Si arricchisce infatti di grandi opere pubbliche, di monumenti nuovi e ristrutturati, sempre seguendo i canoni estetici ispirati alla cultura ellenistica tornata in voga: uno degli interventi più importanti riguarda la piazza del Foro, che viene pavimentata con lastre di tufo, circondata da una serie di edifici pubblici e da portici a due livelli disposti lungo un asse nord-sud al centro del quale viene eretto un nuovo tempio, dedicato a Giove, che sostituisce in importanza quello più antico di Apollo. All'angolo sud-ovest della piazza viene costruita la Basilica, forse l'edificio civile più importante del Foro e che, a discapito del nome, svolge la funzione di spazio per la gestione degli affari e l'amministrazione della giustizia. Un altro intervento importante riguarda l'area del Foro Triangolare, nella Regio VIII, una delle prime edificate a Pompei: viene restaurato il tempio del VI sec. a.C., forse dedicato ad Eracle, e viene circondato da un portico che definisce un'area triangolare, alla quale viene collegato, tramite un complesso monumentale, il teatro grande.

Diversamente da quanto avvenuto in precedenza, durante la guerra sociale Pompei si schiera insieme ad altri popoli italici contro Roma, rivendicando i pieni diritti di cittadinanza. Nonostante un opportuno intervento di restauro delle mura di cinta e di rinforzo delle torri, nell'89 a. C. Pompei capitola al lungo assedio condotto da Lucio Silla, e nell'80 a. C. da municipio diventa colonia di diritto romano, assumendo il nome di *Colonia Cornelia Veneria Pompeianorum*. Una delle prime conseguenze è la sostituzione della vecchia classe politica e sociale: i magistrati sannitici vengono sostituiti dalle nuove cariche pubbliche romane (il decurionato, l'edilità, il *duovirato*) che vengono spesso esercitate dalla aristocrazia romana, mentre le terre appartenenti alla vecchia nobiltà sannita vengono distribuite ai veterani di Silla di ritorno dalla guerra contro Mitridate. Forse a scopo propagandistico, la nuova classe dirigente avvia un

grande programma di edilizia pubblica, secondo le linee guida di sviluppo urbanistico già tracciate in precedenza, anche se in questo momento il gusto romano sostituisce quello ellenico: il tempio posto a nord della piazza del Foro, in precedenza dedicato a Giove diviene il *Capitolium*, ossia viene intitolato alla Triade Capitolina (Giove, Giunone, Minerva), su un'ampia terrazza artificiale, posta in corrispondenza della porzione sud-ovest delle mura, viene edificato il Tempio di Venere, che da quel momento diventa la divinità protettrice della città. Vengono restaurate le terme Stabiane e costruite quelle del Foro, che adottarono per prime il sistema di riscaldamento ad ipocausto (consistente nella circolazione di aria, riscaldata da un unico grande forno, entro cavità poste nel pavimento e nelle pareti del luogo da riscaldare). Viene ampliato e riammodernato il quartiere dei teatri, dove viene costruito un secondo edificio di dimensioni più raccolte, probabilmente con funzione di Odeion, ossia di piccolo teatro coperto (alcuni studiosi dissentono da questa interpretazione e ritengono che fungesse da luogo di riunione deputato alle riunioni del consiglio cittadino dei coloni sillani per le decisioni politiche). Infine viene edificato l'Anfiteatro, il primo del suo genere, in posizione un po' defilata dal centro cittadino, come si addice ad un luogo che richiama molti spettatori provenienti dalle città vicine. Questa precauzione tornerà comoda nel 59 d. C. quando nell'Anfiteatro si verificherà una sanguinosa rissa tra Nocerini e Pompeiani, ricordata da Tacito negli *Annales*, in conseguenza della quale l'allora Imperatore Nerone vieterà gli spettacoli di gladiatori per dieci anni.

L'epoca imperiale, inaugurata da Augusto nel 27 a.C. e caratterizzata da stabilità politica ed economica (non a caso è definita *pax augustea*), vede la definitiva romanizzazione di Pompei e una nuova fase di rinnovamento urbanistico: l'architettura monumentale si adegua alla nuova situazione politica, al culto del nuovo imperatore ed all'appoggio alle nuove aristocrazie a lui fedeli. Ancora una volta la piazza del Foro è al centro del cambiamento: essa viene ripavimentata utilizzando lastre di calcare e viene ampliata in direzione nord con la costruzione del Tempio della Fortuna Augusta. La piazza viene dotata di statue dell'Imperatore, il tempio di Apollo, cui è devoto l'imperatore Augusto, viene restaurando arricchendone l'apparato decorativo, vengono edificati il tempio di

Vespasiano e il cosiddetto tempio dei Lari Pubblici, oltre all'edificio di Eumachia che viene decorato con le effigie dei re e degli eroi di Roma. Viene restaurato anche il Santuario di Venere, che gode di grandi favori in qualità di divinità protettrice della gens Julia, alla quale appartiene l'imperatore Augusto. Si rileva anche il rinnovamento dei materiali costruttivi, con il prepotente ingresso del marmo che, richiamando il classicismo augusteo, viene utilizzato nei monumenti più importanti per celebrare ancora una volta l'Imperatore.

Nel 62 d.C. la città viene pesantemente danneggiata da un fortissimo terremoto, seguito da un lungo sciame sismico che rallenta gli interventi di ricostruzione, che comunque cercano di rendere la città più ricca del passato, utilizzando materiali più costosi e pregiati e decori più raffinati dei precedenti. L'assetto urbanistico non viene modificato, restando sostanzialmente quello disegnato in età alessandrina, che fortunatamente prevedeva ampie aree di espansione urbana. Tra i primi edifici ad essere restaurati ci sono l'Anfiteatro ed il tempio di Iside, il secondo a testimonianza dell'importanza dei culti egizi per i pompeiani. Ma in generale la ricostruzione è talmente lenta che l'eruzione del 79 d.C. vede gran parte della città ancora in rovina e i restauri in fase di esecuzione.



Figura 2.3 - *Tabula Peutingeriana* dell'area limitrofa a Pompei. Nationalbibliothek di Vienna

L'immagine in figura 2.3 è la copia medioevale della *Tabula Peutingeriana* della costa campana, ossia una porzione di una mappa stradale dell'intero Impero Romano, risalente all'età augustea ma aggiornata fino al tardo-impero. Sulla destra si possono trovare Pompei, Stabia, Oplontis ed Ercolano, subito sopra la penisola sorrentina.

2.2.3 L'eruzione del Vesuvio del 79 d.C.

Il 24 agosto dell'anno 79 d.C. il Vesuvio rientra in attività dopo un periodo di quiete durato probabilmente circa otto secoli, riversando sulle aree circostanti, in poco più di trenta ore, circa 4 Km³ di magma sotto forma di pomici e cenere.

L'eruzione ha probabilmente inizio intorno alle 13 del 24 agosto con l'apertura del condotto, seguita da una serie di esplosioni generate dall'immediata volatilizzazione dell'acqua della falda superficiale quando viene a contatto con il magma in risalita. Successivamente una colonna di gas, ceneri, pomici e frammenti litici si solleva per circa 15 km al di sopra del vulcano. Le pomici, che ricoprono Pompei con una coltre di oltre due metri e mezzo di altezza, si depositarono intorno all'area dell'eruzione per un raggio di circa 70 chilometri.

Questa fase eruttiva, accompagnata da frequenti scosse sismiche, si protrae fino circa le 8 del mattino successivo, quando la colonna eruttiva crolla completamente, generando i flussi piroclastici che causano la distruzione totale dell'area di Pompei, Stabia ed Ercolano. Quest'ultima viene sommersa anche da una valanga di fango, generata da una violenta pioggia improvvisa, che la ricopre per ben venti metri di altezza. Intanto dalle fenditure del vulcano, createsi per la violenza dell'esplosione iniziale, fuoriescono colate di lava povera di gas che scende rapida a valle. Mentre la coltre di cenere e lapilli ricopre Pompei gli abitanti, colti di sorpresa dall'eruzione improvvisa, restano uccisi dai gas tossici delle ceneri vulcaniche o sepolti dal crollo degli edifici che collassano sotto il peso della cenere.

Nella parte terminale dell'eruzione, avvenuta probabilmente nella tarda mattinata del 25 agosto, continuano a formarsi dei flussi piroclastici, i cui depositi seppelliscono definitivamente le città vesuviane, mentre una densa nube di cenere si disperde nell'atmosfera fino a raggiungere Capo Miseno, dove vengono osservati da Plinio il Giovane e da suo zio, Plinio il Vecchio, comandante di una flotta romana. Questi decide quindi di avvicinarsi per aiutare la popolazione in fuga da Pompei Ercolano e Stabia, oltre che per studiare da vicino l'eruzione, ma in questo modo trova la morte. A sua

memoria l'eruzione del Vesuvio del 79 viene definita "pliniana", in quanto fenomeno particolarmente violento e distruttivo. (Osservatorio vesuviano, INGV).

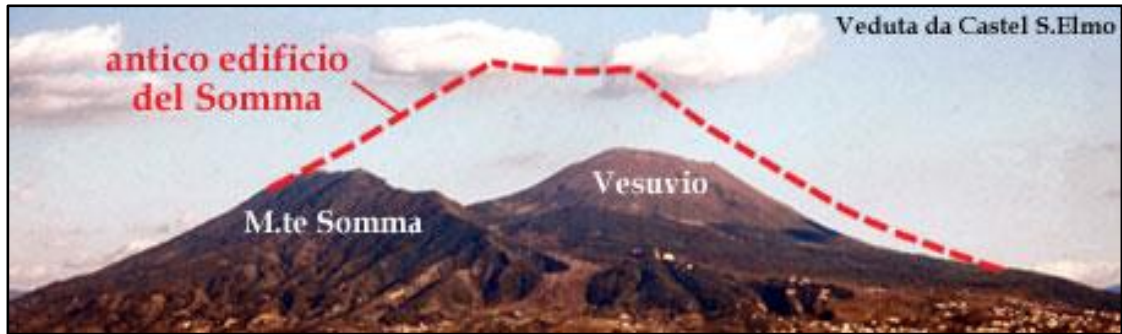


Figura 2.4 – Ricostruzione delle dimensioni del Vesuvio prima dell'eruzione del 79 d.C
basato sul lavoro di Cioni et al., 1999 (Osservatorio Vesuviano)

L'attività eruttiva del Vesuvio, che nel frattempo ha mutato forma, prosegue altri tre giorni: la sua cima, che è stata coinvolta nell'esplosione, è stata sostituita da un nuovo rilievo, il Monte Somma, ben più piccolo del precedente.

L'Imperatore Tito invia dei soccorsi da Roma, ma Pompei ormai non si vede più: è coperta da uno spessore di materiale piroclastico di altezza variabile tra i 5 ed i 7 metri. L'imperatore dispone di lasciare i beni delle persone morte senza eredi a disposizione delle opere di ricostruzione, che però interessano appena marginalmente la città sepolta, della quale si perdono le tracce.

2.2.4 Storia degli scavi di Pompei

Alla fine del 1500, durante lo scavo di un canale di deviazione del fiume Sarno vengono rinvenuti dei reperti antichi, ai quali in un primo momento non viene attribuito un particolare valore, ma che suscitano l'interesse di alcuni storici ed appassionati di antichità, che iniziano ad ipotizzare che l'altopiano di Civita nasconda l'antica Pompei. Questi restano inascoltati per quasi due secoli, fino al 1748 quando il re di Napoli, Carlo di Borbone, dopo l'involontaria scoperta dei resti di Ercolano, dispone l'avvio di un primo cantiere nella zona di Civita sotto la direzione dell'ingegnere Roque Joaquín de

Alcubierre, nel corso del quale si trovano monete, statue, affreschi oltre ad una porzione dell'anfiteatro e della necropoli di Porta Ercolano. La mancanza di oggetti preziosi tra i reperti e l'errata convinzione che si trattasse dell'antica Stabia, riporta l'attenzione dei regnanti su Ercolano, il cantiere viene sospeso fino al 1754 e le costruzioni nuovamente interrate, come usa fare in quest'epoca.

In generale l'avvio degli scavi dei siti vesuviani non è virtuoso né dal punto di vista delle finalità, né da quello delle metodologie, né infine da quello documentale. Lo scopo degli scavi in questo periodo è il ritrovamento di oggetti preziosi e decorazioni, riservando uno scarsissimo interesse agli oggetti di poco valore e di uso comune, alle rovine dei fabbricati ed alla loro storia, al punto da abbattere muri affrescati per potere procedere lo scavo.

La consuetudine è di interrare i monumenti, dopo averli riscoperti e depredati dei loro oggetti preziosi, senza lasciare traccia della loro posizione. Questo approccio ha comportato parecchie perdite dal punto di vista storico ed archeologico ad Ercolano, perché è stato il primo sito ad essere scavato, ed a Pompei, perché lo strato che ricopre le sue rovine risulta molto più cedevole di altri, essendo composto principalmente da cenere e lapilli.

Altrettanto poco attento è l'approccio della casa regnante verso i siti vesuviani, che vengono trattati come uno tra i vari loro castelli o regge: la vista agli scavi e l'accesso al museo della Reggia di Portici, dove è conservata una considerevole parte dei reperti, è un privilegio riservato a pochi ospiti illustri, ai quali comunque non è permesso prendere appunti o fare schizzi. Anche le pubblicazioni predisposte dalla Regia Accademia Ercolanese, che Carlo di Borbone fonda nel 1755, non sono destinate alla vendita ma ad omaggiare nobili e personaggi di altro rango. Ciononostante in Europa circolano informazioni, lettere, diari di viaggio e disegni tracciati a memoria degli scavi, oltre a ristampe abusive dei volumi della Regia Accademia.

L'approccio migliora leggermente tra il 1759 e 1799 quando la Regina Maria Carolina, moglie di Ferdinando I delle Due Sicilie, nomina direttore del sito Francisco La Vega,

che imposta i lavori sulla base di un sistema sistematico di scavo, stabilisce che i monumenti rimangano a vista anziché venire risepelliti e che i reperti, soprattutto gli affreschi parietali, rimangano nella posizione originale sui muri e non vengano più asportati e trasportati al museo di Portici. Nell'epoca di La Vega gli scavi procedono, viene riportata alla luce parte della zona dei teatri, del tempio di Iside e del Foro Triangolare, la Villa di Diomede, la Casa del Chirurgo e Via dei Sepolcri.

Nel 1799, con la fondazione della Repubblica Partenopea, arriva a Napoli il generale francese Championnet, uomo di cultura e conoscitore dell'area vesuviana, che incentiva le ricerche nell'area meridionale, non a caso l'area a sud del monumento è definito "quartiere Championnet".

Dopo un breve ritorno dei Borbone, nel 1806 la città di Napoli passa sotto il comando di Giuseppe Bonaparte, fratello di Napoleone, che affida la direzione degli scavi a Michele Arditi, direttore del museo di portici, che per primo apre la riflessione sui criteri da seguire negli scavi stessi.

Si inizia ad espropriare i terreni privati posti all'interno dell'area archeologica, per evitare che i proprietari si impossessino dei reperti ritrovati, si aumentano i sorveglianti, si regolamentano le visite e si limitano gli scavi isolati, concentrandosi su determinate zone, in particolare nei pressi di Porta Ercolano, dove viene scoperta la Casa di Sallustio. Vengono in questo modo per la prima volta introdotti nei siti vesuviani i criteri della Archeologia Scientifica, cioè la conduzione di scavi programmati secondo un accurato metodo volto alla conoscenza completa di un sito archeologico, che già venivano teorizzati da qualche decennio nel resto d'Europa.

Nel 1808 Napoli passa sotto il controllo di Gioacchino Murat, la cui moglie Carolina Bonaparte, si pone l'obiettivo di definirne il perimetro e dissepellire tutta la città antica, adottando l'approccio archeologico più moderno, quindi preservando, conservando e documentando i resti portati alla luce. Nell'epoca della Regina Carolina si procede allo scavo della cinta muraria, dell'Anfiteatro e della zona a sud del Foro, dove una delle domus è stata a lei intitolata.

Ma soprattutto vengono stampate varie pubblicazioni e guide che descrivono la scoperta di Pompei, tanto che l'architetto Mazois dedica alla Regina Carolina i primi due fascicoli delle *“Ruines de Pompéi”*, la prima grande opera su Pompei, divisa in quattro sezioni, la prima parte del testo descriveva la rete viaria, tombe, porte e mura, la seconda fontane e case, la terza gli edifici pubblici e la quarta teatri, templi e l'urbanistica.

Il ritorno dei Borbone segna un nuovo rallentamento degli scavi, sia dal punto di vista operativo, dato che viene ridotto il numero di squadre di scavatori, sia da quello scientifico, perché sotto Ferdinando I vengono venduti parte dei terreni precedentemente acquistati. Nonostante tutto i risultati sono premianti, dato che si completano gli scavi del Foro con il rinvenimento delle Terme del Foro e delle domus del Fauno e del Poeta tragico, più tardi anche di via Stabiana e delle Terme Stabiane.

Dal 1861, con la costituzione del Regno d'Italia, la direzione degli scavi viene affidata a Giuseppe Fiorelli, grazie alle sue idee liberali ed antiborboniche, oltre che alle sue profonde conoscenze archeologiche: era stato ispettore della Soprintendenza e del Museo di Napoli, poi, dopo avere preso parte ai moti del 1848, era stato imprigionato ed aveva scritto il primo volume della sua storia degli scavi di Pompei, la *Pompeianarum Antiquitatum Historia*.

Gli anni di direzione di Fiorelli coincidono con un'accelerazione delle ricerche condotte finalmente con rigore scientifico e con l'introduzione di alcune grandi novità: il metodo di scavo procede in modo sistematico, provando a collegare le varie aree precedentemente scavate, gli scavi vengono aperti al pubblico che può visitarli acquistando il biglietto d'ingresso, viene fondata la Scuola Archeologica di Pompei (luogo di formazione dei futuri archeologi), viene pubblicato il Giornale degli scavi, si dà vita al sistema dei calchi di gesso per ricostruire le sembianze degli abitanti sorpresi dall'eruzione del Vesuvio (ottenuti colando del gesso liquido nel vuoto lasciato dai loro corpi nella cenere, così come dai corpi di animali o di oggetti originariamente in legno quali porte, finestre, mobili o alberi, ottenendo dei calchi che sono tuttora visibili negli scavi di Pompei) ed viene istituito il Catasto pompeiano.



Figura 2.5 - Calchi di gesso dei corpi ritrovati presso Porta Nocera

La strada intrapresa da Fiorelli viene seguita dai suoi successori, Michele Ruggiero, Giulio de Petra, Antonio Sogliano e Vittorio Spinazzola, portando l'archeologia di

Pompei ad una crescita lenta e graduale, nella seconda metà dell'800 e nei primi decenni del '900. Sotto la direzione Spinazzola si raccolgono e restaurano, per la prima volta durante gli scavi, anche gli elementi architettonici relativi alla parte superiore delle case.

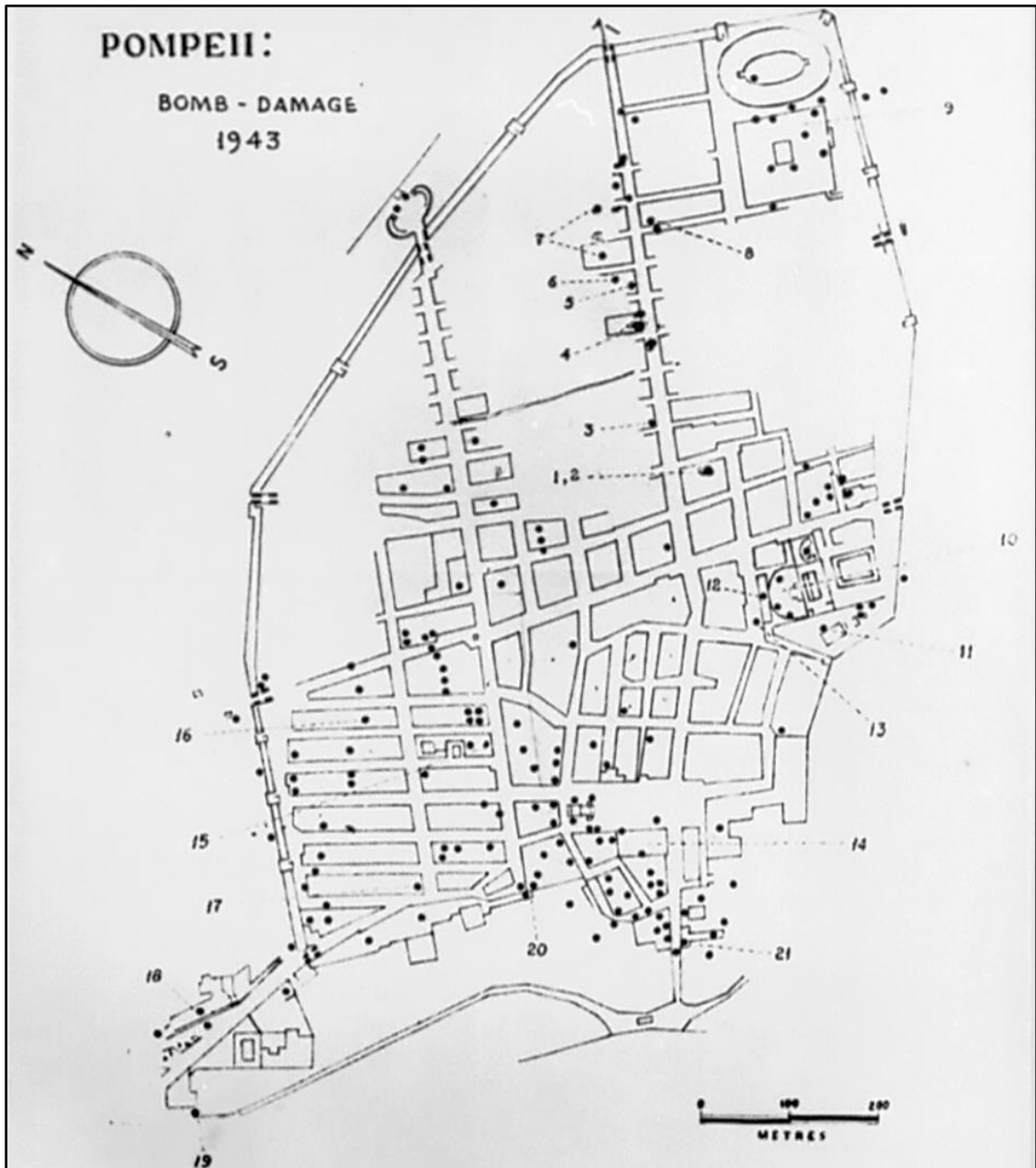


Figura 2.6 - Danni prodotti dalla II guerra mondiale (<http://pompeiiinpictures.com>)

Nel Novecento si prosegue con lo scavo seguendo le direttrici costituite dalle strade principali Via di Nola, Via di Stabia e Via dell'Abbondanza, portando alla luce gli edifici di tutta la Regione I, delle case a terrazza delle Regioni VII e VIII, delle mura, della necropoli di Porta Nocera e del suburbio a sud della città da Porta Marina all'Anfiteatro, in una zona celata sotto la terra di riporto degli scavi precedenti.

Durante la Seconda guerra mondiale, tra agosto e settembre 1943, nel corso di incursioni aeree delle forze alleate, oltre 150 ordigni vengono sganciati sulla zona degli scavi archeologici, causando danni tali da venire definito il secondo e più grave *“martirio di Pompei, col martella-mento di una e più incursioni quotidiane di giorno a volo basso, senza più timo-re di reazione antiaerea, di notte con gran lusso di razzi e bengala folgoranti e fumiganti che [...] davano a volte l'impressione terrificante dell'incendio delle rovine”*. (A. Maiuri, 1956). I bombardamenti sono soprattutto concentrati nella Regio VII (nell'area compresa tra la via delle Terme, il vicolo dei Soprastanti, via degli Augustali e la via Marina, con danni tra l'altro al Macellum, al Tempio di Giove, alle Terme del Foro, ai Granai del Foro, alla Mensa ponderaria), nella Regio III (lungo via dell'Abbondanza, con danni alla Casa di Loreio Tibutino e alla Casa della Venere in conchiglia), nella Regio VI (nell'area compresa tra la cinta muraria racchiusa tra Porta Ercolano e Porta Vesuvio e l'asse di via delle Terme e via della Fortuna, con danni ingenti tra l'altro, alla Casa del Fauno) e nella Regio VIII (il Teatro Grande e la Palestra Sannitica subiscono l'attacco di ben cinque ordigni bellici, oltre all'Antiquarium). (R. Picone, 2011). A questi si sommano i danni causati dall'eruzione del Vesuvio del 1944.

La lunga direzione di Amedeo Maiuri (dal 1924 al 1961) nonostante la Guerra rappresenta uno dei momenti più attivi degli scavi di Pompei: si inizia l'esplorazione metodica degli strati sottostanti al livello del 79 d.C., alla ricerca delle fasi più antiche di Pompei, si completano gli scavi dell'Anfiteatro, della Palestra Grande e della Villa dei Misteri, si prosegue lo scavo lungo Via dell'Abbondanza, si iniziano le indagini a Porta Nocera ed alle ville suburbane della zona meridionale e sono completamente ripristinate le antiche. Si introduce l'utilizzo della fotografia come mezzo di studio, i disegni passano da essere prettamente artistici a tecnici, inoltre le tecniche di scavo

diventano più precise e tutti gli elementi asportati, come tetti, finestre e porte, rimossi per evitare crolli agli edifici, vengono riposizionati al loro posto una volta terminata l'esplorazione.



Figura 2.7 - 1943, il Teatro Grande dopo i bombardamenti. Tratta da pompeiiinpictures.com

Figura 2.8 – Inizio '900, Porta Vesuvio in corso di scavo. Tratta da pompeiiinpictures.com

Con il successivo direttore degli scavi, Alfonso De Franciscis, invece di proseguire nell'esplorazione estensiva, ci si concentra sull'aspetto conservativo diffuso e su indagini concentrate su piccole aree (la Casa di Giulio Polibio e la Villa di Fabio Rufo).

Il terremoto dell'Irpinia del 1980, provoca notevoli ulteriori danni alle rovine e non può che accrescere l'estensione delle aree che necessitano di interventi di ripristino e restauro. Pertanto gli scavi rallentano ulteriormente e soltanto nel 1987 si riprende a lavorare nella zona della Regio IX prossima a via dell'Abbondanza.

A dicembre 1997 l'area archeologica di Pompei, insieme a quella di Ercolano ed Oplonti, entra a far parte della lista dei patrimoni dell'umanità dell'UNESCO, con la seguente giustificazione, tratta dal sito Unesco.

“Gli straordinari reperti delle città di Pompei, Ercolano, Torre Annunziata e delle città limitrofe, sepolte dalla eruzione del Vesuvio del 79 d.C., costituiscono una testimonianza completa e vivente della società e della vita quotidiana in un preciso periodo storico e non trovano equivalente in nessuna parte del mondo.”



Figura 2.9 - Crolli della Schola Armaturarum (III, 3, 6). Tratta da [www. archaeology.wiki](http://www.archaeology.wiki)

L'inizio del nuovo millennio coincide con un nuovo periodo difficile per gli scavi: l'insufficienza dei fondi economici e degli interventi di restauro puntale, oltre alla scarsa attenzione all'assetto idro-geologico dell'area degli scavi conduce a vari episodi di crolli e danneggiamenti importanti. L'anno 2010 può essere considerato l'*annus horribilis* degli scavi archeologici di Pompei:

- 6 novembre 2010 crolla la Schola *Armaturarum Iuventutis Pompeianae* (III, 3, 6),
- 30 novembre 2010 cede un muro antico funzionante da sostegno di un terrapieno sul peristilio della Casa del Moralista (III, 4, 2-3),
- 1 dicembre 2010 crollano una bottega di via Stabiana e la Domus del Piccolo Lupanare,
- 2 dicembre cede un muro del peristilio della casa di Trebio Valente.

Ma purtroppo anche gli anni successivi vedono svariati crolli di porzioni di intonaco e di murature, soprattutto in conseguenza di grandi piogge autunnali e primaverili: nel novembre 2013 interessano la Casa del Torello di Bronzo (Regio V, 1, 3-6-7-9) e le Terme Centrali (IX, 4, 5-18), nel marzo 2014 il Tempio di Venere e la tomba di Lucius Publicius Syneros (necropoli di Porta Nocera), nel febbraio 2015 la casa di Severus (VIII, 2, 30). Ma questi sono solamente i principali, nella primavera del 2014, quando è stata bandita la gara per il Piano della conoscenza, linea 1 (si vedrà meglio al capitolo 4) si erano verificati più di 30 crolli.

2.3 Il Parco Archeologico di Pompei

Johann Wolfgang von Goethe (1749 - 1832) nel suo libro "Viaggio in Italia" descrive con queste parole la sua visita agli scavi di Pompei.

"Domenica andammo a Pompei. - Molte sciagure sono accadute nel mondo, ma poche hanno procurato altrettanta gioia alla posterità. Credo sia difficile vedere qualcosa di più interessante. Le case sono piccole e anguste, ma tutte contengono all'interno elegantissime pitture. Notevole la porta cittadina, con l'attiguo sepolcreto; la tomba di una sacerdotessa è a forma di panca circolare, con una spalliera di pietra dov'è incisa un'iscrizione in lettere

capitali. Guardando oltre la spalliera si vede il mare e il sole al tramonto. Un posto mirabile, degno di sereni pensieri.” (Traduzione tratta dal sito ufficiale del Parco Archeologico di Pompei).

Pompei si estende su di una superficie di circa 66 ettari ed è circondata da una cinta muraria lunga 3.200 metri, sulla quale si aprono 7 porte (forse a queste se ne aggiunge una, la cui esistenza non è stata accertata perché posta nell’area ancora da scavare) e si innalzano 12 torri.



Figura 2.10 - Mappa ufficiale degli Scavi versione 2017. Tratta da pompeiiinpictures.com

L’impianto della città integra i concetti dell’urbanistica ellenica e romana, anche se, rispetto alle regole di Ippodamo da Mileto, presenta delle irregolarità: le dimensioni degli isolati non sono costanti e gli angoli tra le strade non sono perfettamente retti.

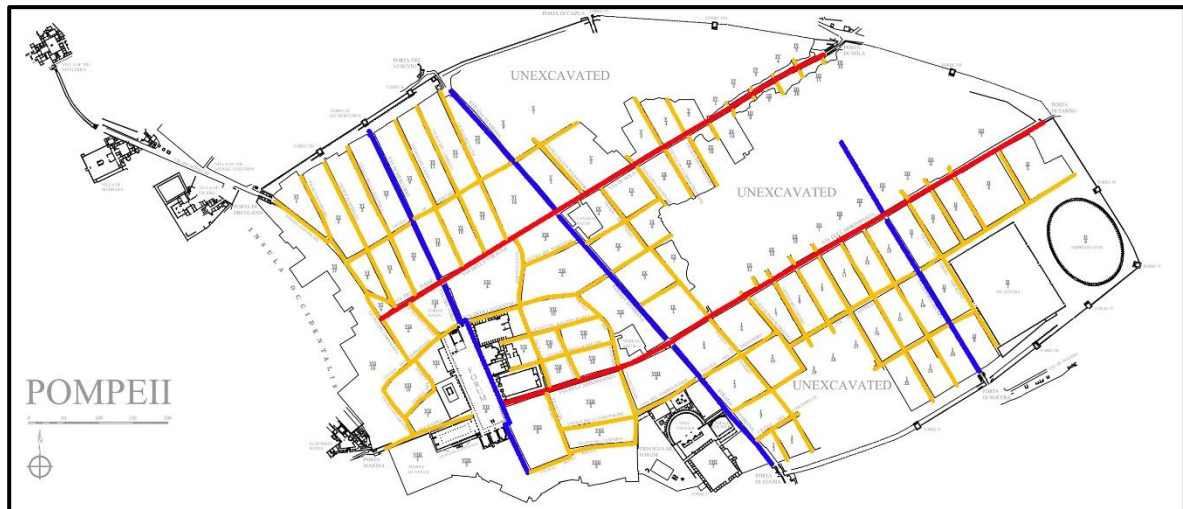


Figura 2.11 - Rete stradale interna a Pompei (in rosso i decumani principali, in blu i cardini principali)

Pompei segue uno schema assiale incentrato sul Foro Civile, posto all'incrocio tra il decumano maggiore (via dell'Abbondanza) disposto sull'asse est/ovest ed uno dei cardini (via del Foro – via delle Scuole) disposto sull'asse nord-sud. Sono poi presenti un altro decumano, via Nolana, ed altri cardini, via Stabiana e via Nocera; per il resto la rete stradale è organizzata in modo da mettere in comunicazione i complessi monumentali con le porte e, quindi, con le zone extraurbane.

In epoca romana, grazie alla stabilità politica conquistata, vengono edificate anche le aree esterne alla cinta muraria più vicine alle strade di comunicazioni: nelle immediate vicinanze di Porta Marina le terme suburbane e la Villa Imperiale, in direzione nord ed est alcune ville e terme. Oltre a queste al di fuori delle mura si trovano le necropoli, poste in prossimità delle sue porte, ed il porto, a circa 1 km da porta Stabia.

Le denominazioni delle case e delle strade, quando non ne sia noto il proprietario, sono state coniate dagli scavatori in base a criteri "moderni", dunque a particolari ritrovamenti o ad altre circostanze. Un esempio celebre è via dell'Abbondanza, il cui nome deriva da un bassorilievo che orna una fontana posta nel tratto iniziale, in prossimità del Foro, e che presenta il volto di una donna con grandi occhi, orecchini ai lobi, una morbida tunica e una cornucopia. Studi recenti hanno messo in luce che il bassorilievo rappresenta la dea della Concordia e non la dea dell'Abbondanza, come si era erroneamente pensato a causa della cornucopia.



Figura 2.12 - Formella posta su un muro di via dell'Abbondanza

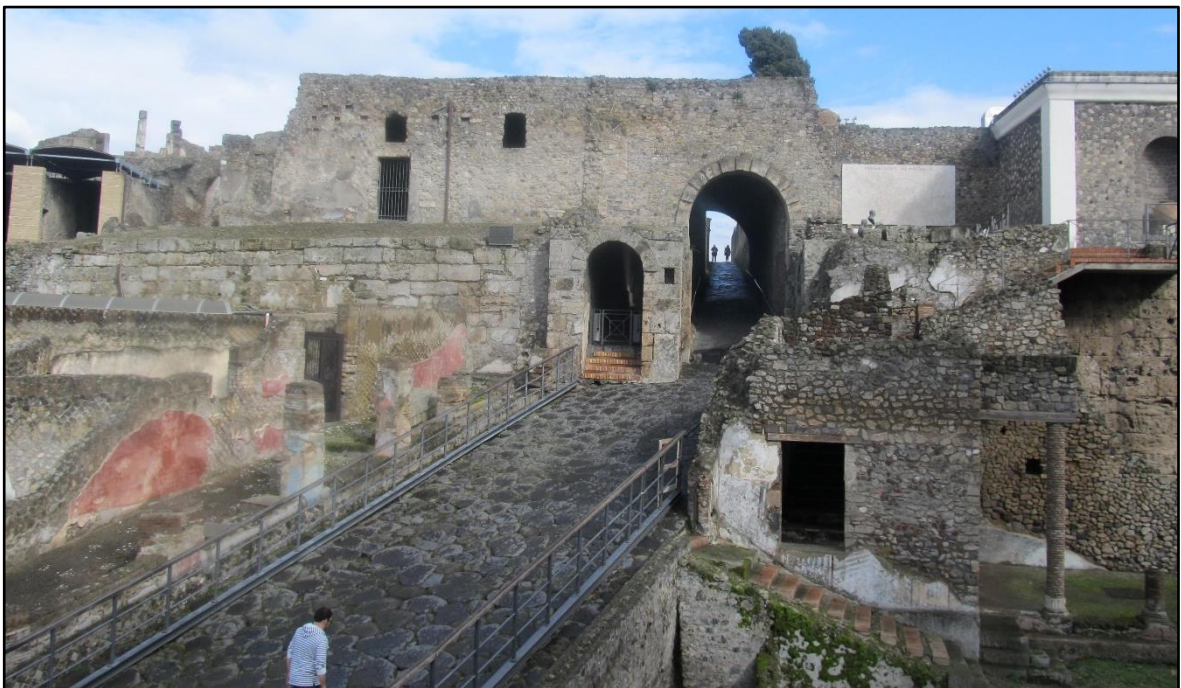


Figura 2.13 - Ingresso di Porta Marina

Oggi gli ingressi agli scavi avvengono tramite tre punti: Porta Marina, piazza Esedra (e quindi il quadriportico dei Teatri) e piazza dell'Anfiteatro.

I numeri di Pompei sono impressionanti:

- 66 ettari circoscritti dalla cinta muraria, dei quali 44ha scavati ed i restanti composti dall'antica città ancora da scavare e da strutture recenti, 33ha aperti al pubblico,
- 242.000 mq di superfici murarie,
- 20.000 mq di intonaci,
- 17.000 mq di dipinti,
- 12.000 mq di superficie di pavimenti di pregio,
- 20.000 mq di copertura.

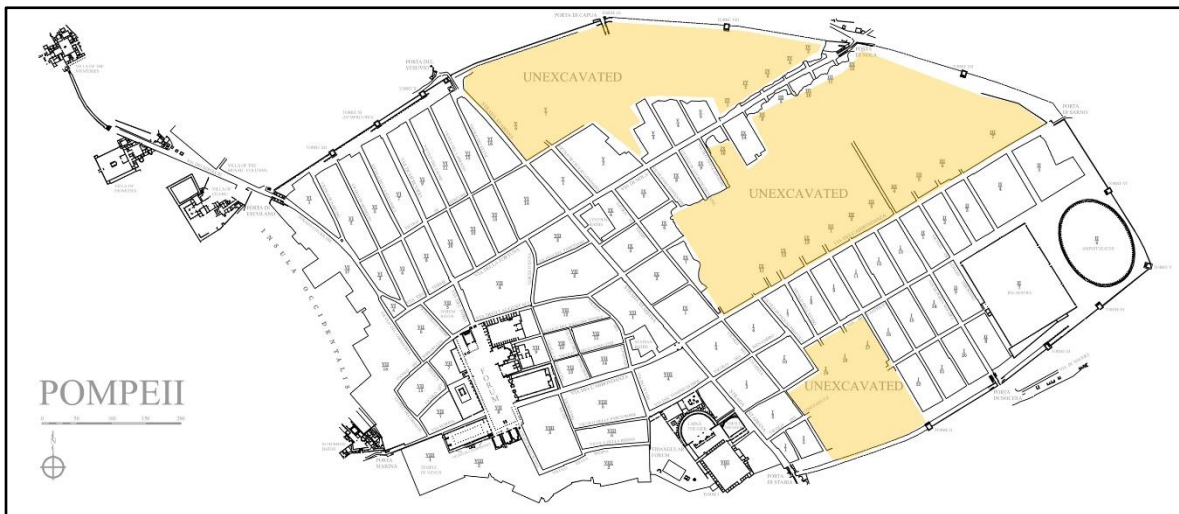


Figura 2.14 - Area non scavata in giallo

Ma soprattutto l'area archeologica di Pompei può dirsi l'unica in grado di restituire l'immagine di una città romana nella sua interezza, dagli edifici di governo e di culto, a quelli di svago, come teatri e palestre, alle botteghe commerciali ed infine alle ville e le case residenziali. Proprio questa è la motivazione che, come si è già visto, nel 1996 ha reso Pompei sito Unesco e che la rende uno degli emblemi del patrimonio culturale mondiale, tanto che la sua difesa dagli agenti atmosferici, nonché da eventi eccezionali legati al rischio idrogeologico e sismico, vede un grande impegno collettivo da parte delle istituzioni.

2.4 Il Catasto di Pompei

Tra le varie conseguenze dell'introduzione dell'Archeologia Scientifica (paragrafo 2.2.4) c'è l'esigenza di dare una collocazione geografica ai vari reperti portati alla luce, che risulti intuitiva e sintetica, così da potere diventare parte integrante della documentazione di scavo. Una delle possibilità è l'utilizzo di coordinate cartesiane, assolute o relative, ma così facendo diventa impossibile collocare velocemente la posizione del reperto all'interno degli scavi. L'alternativa è di uscire dallo schema cartesiano e trattare Pompei come una città moderna, tra l'altro urbanisticamente molto ordinata, quindi munirla di un vero e proprio Catasto.

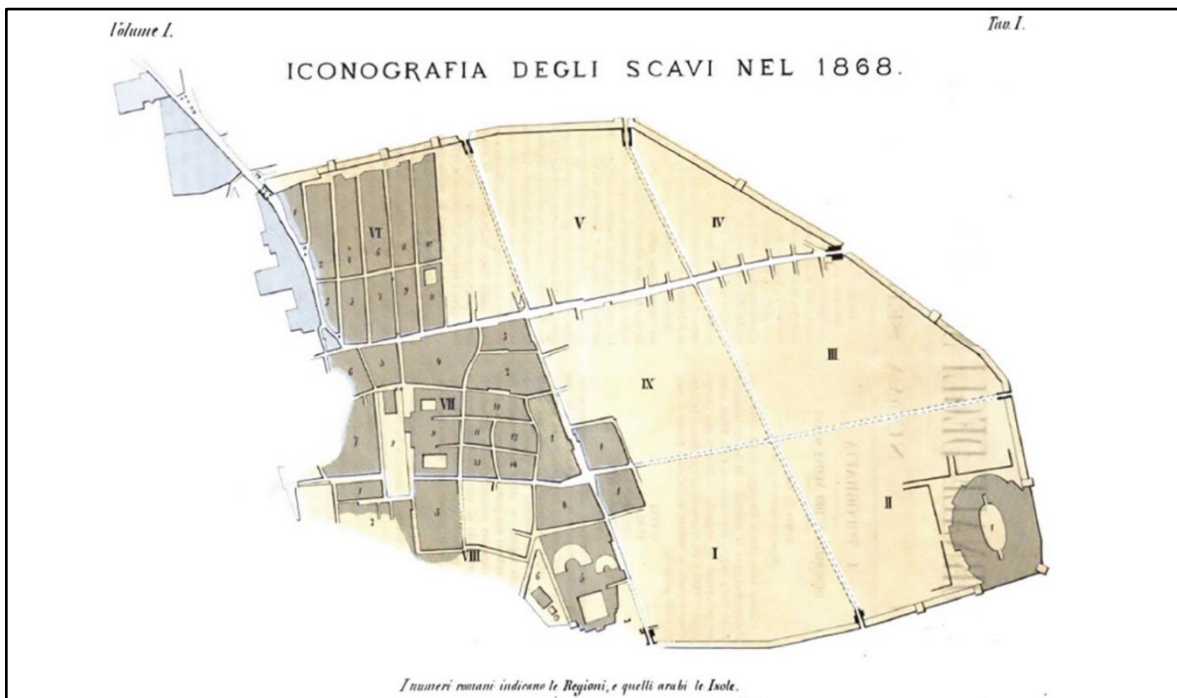


Figura 2.15 - Planimetria del 1868 con confini di Regiones ed Insulae. Tratta da pompeiiinpictures.com

Le basi del Catasto pompeiano sono state poste nel 1858 dall'archeologo Giuseppe Fiorelli (1823-1896), direttore degli scavi dal 1861, che ha studiato una suddivisione della città antica partendo da quelli che era la distribuzione urbanistica originaria. Ha dunque individuato 9 aree piuttosto estese, dette *Regiones*, che ricalcano gli antichi quartieri romani (ognuno dei quali aveva la propria festa rionale, programmi elettorali e caratteristiche commerciali proprie) ed ha indentificato ciascuna di esse con un numero romano da I a IX.

Ogni Regio è suddivisa in un certo numero di Insulae, simili ai moderni isolati, ognuna delle quali è circonscritta da strade o piazze ed è abbastanza omogenea dal punto di vista dell'epoca costruttiva e della destinazione d'uso.

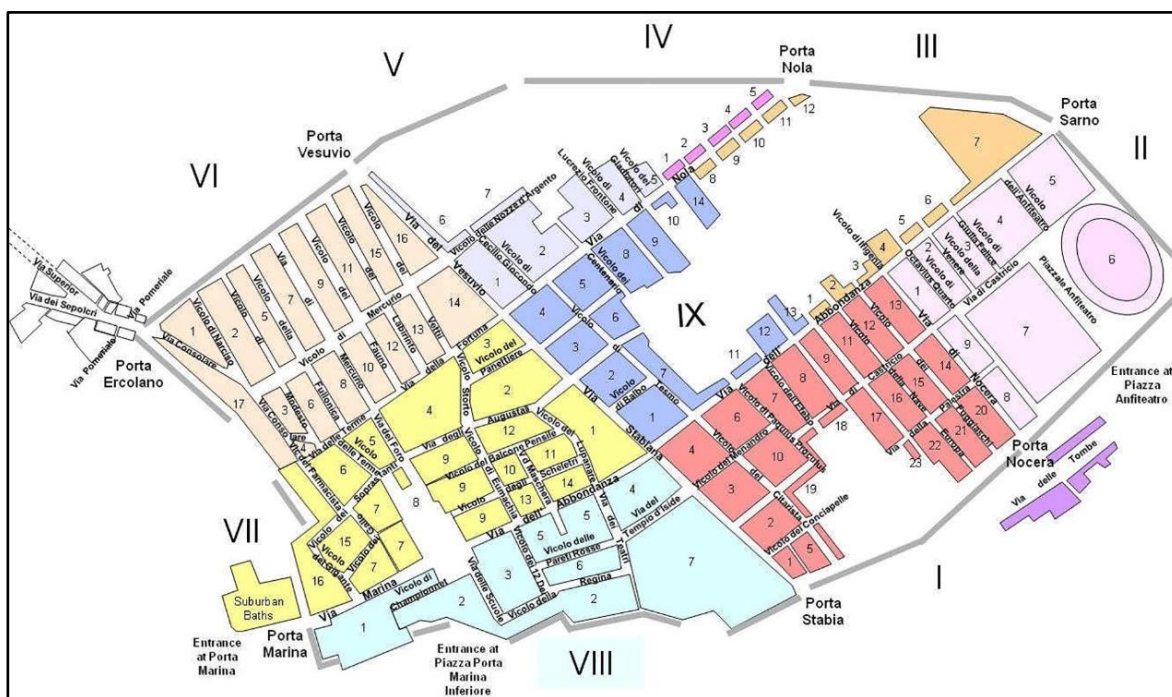


Figura 2.16 - Schema degli scavi con Regiones ed Insulae. Tratta da pompeiiinpictures.com

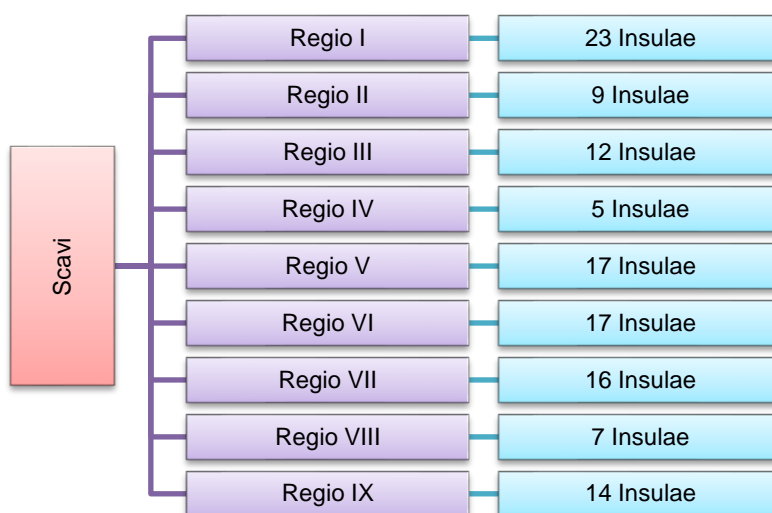


Figura 2.17 – Suddivisione degli scavi in Regiones ed Insulae

Ogni Insula è identificata da un numero arabo, che viene sempre associato alla Regio di appartenenza. All'interno delle Insulae sono stati assegnati dei numeri progressivi a tutti gli accessi alle unità catastali, una sorta di numero civico, indifferentemente dalla loro destinazione d'uso. Può capitare che una domus importante od un edificio pubblico abbia più di un accesso e quindi più numeri civici, tra i quali la Soprintendenza, sulla base di valutazioni storiche, ne ha individuato uno principale. Ogni civico è identificato da un numero arabo a partire da 1, che viene sempre associato alla Regio ed all'Insula di appartenenza.

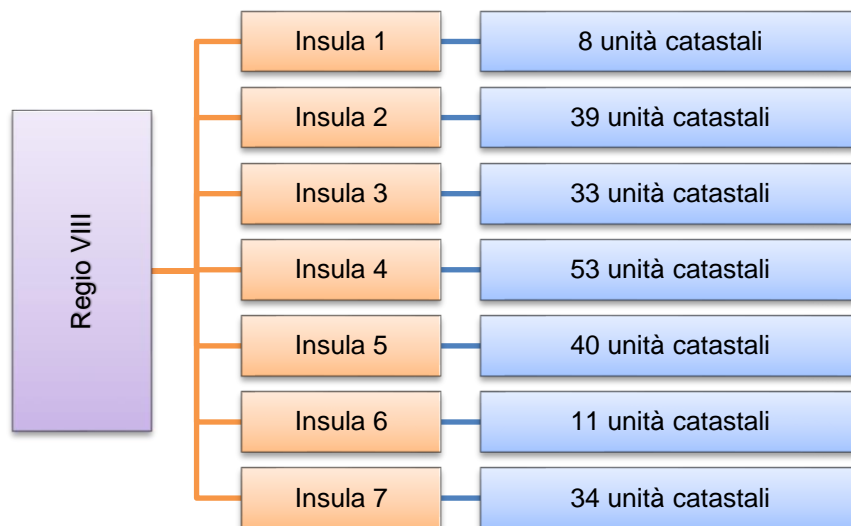


Figura 2.18 - Suddivisione della Regio VIII in 7 Insulae

Quindi ogni unità catastale risulta univocamente individuabile grazie ad un codice formato da tre numeri: *Regione Insula Civico*. Per esempio la casa “VI, 12, 2” (casa del Fauno) è quella che ha ingresso al civico 2 dell’Insula 12 della Regio VI. Complessivamente si contano 112 Insulae e circa 1500 ingressi. Esiste un ulteriore grado di discretizzazione, rappresentato dai vani delle unità catastali, ciascuno identificato con una lettera o con un numero. La figura 2.20 mostra ad esempio l’Insula 6 della Regio VIII, nella quale sono presenti 11 unità catastali, ognuna contraddistinta da un numero civico (indicato con la freccia rossa), all’interno delle quali i vani sono contraddistinti alle volte da lettere alle volte da numeri.



Figura 2.19 - Insula 6 della Regio VIII

Infine anche i principali arredi (termine con il quale si intendono gli elementi non strutturali, come le fontane, i forni, i pozzi etc.) ed oggetti erratici (in questo caso si intendono i vari oggetti che ora si trovano in una posizione diversa e quindi errata rispetto a quella originale, per esempio i capitelli delle colonne) che sono conservati all'interno dei vani sono stati identificati con un loro codice.

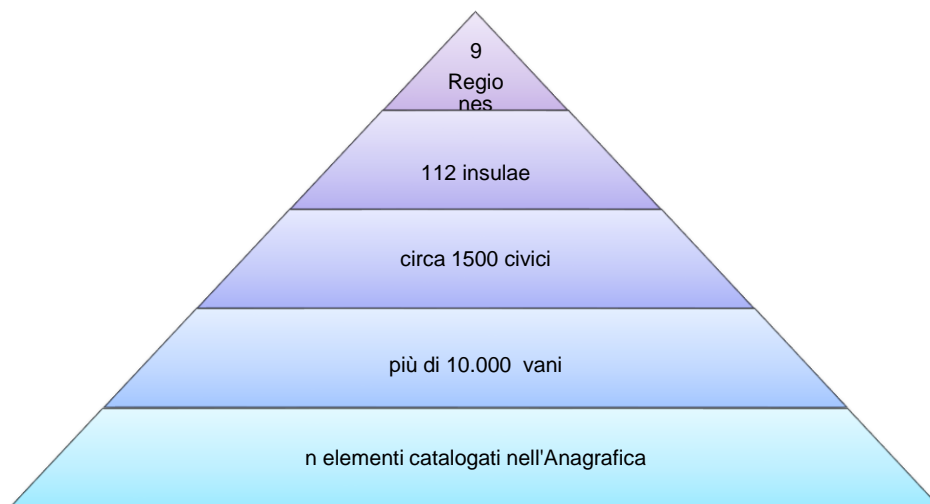


Figura 2.20 - Grafico riassuntivo del catasto pompeiano

Il codice completo che identifica i singoli elementi strutturali, oggetti erratici ed arredi prende il nome di anagrafica ed è così strutturato: REGIO, INSULA, CIVICO, VANO, ELEMENTO. Se ci si vuole riferire ad una dei suoi prospetti si arricchisce il codice con il punto cardinale verso il quale è orientato.

2.5 La rappresentazione cartografica degli scavi

Gli scavi di Pompei sono probabilmente tra i luoghi più rappresentati al mondo, in questo paragrafo si vogliono brevemente presentare i primi tentativi di creare una cartografia degli scavi, a costo di grandi sforzi da parte dei geodeti dell'epoca, e la cosiddetta "Cartografia Morichi", l'ultima rappresentazione completa prima del Grande Progetto Pompei.

2.5.1 La Cartografia storica

Come anticipato nel paragrafo 2.2.4 la prima fase di scavi, indicativamente fino alla fine del Settecento, è stata caratterizzata da un basso livello di scientificità e di attenzione per gli aspetti storici ed archeologici dei reperti portati alla luce. Come conseguenza di questo approccio, la principale documentazione che i direttori degli scavi erano tenuti a produrre consisteva in un registro, chiamato Giornale degli scavi, su cui venivano inseriti gli oggetti ritrovati di maggior pregio artistico, trascurando quelli che non erano destinati al Museo dei Portici. Questo non deve indurre nell'errore di pensare che nella seconda metà del 1700 e nel 1800 i tecnici del Reale Ufficio Topografico, ovvero l'Istituto Statale per le misurazioni, non fossero in grado di rilevare e restituire delle planimetrie con accuratezza compatibile con una scala 1:500. E' evidente che la grande criticità della rappresentazione degli scavi di Pompei fosse già allora la loro estensione e quindi la difficoltà di inquadrare monumenti distanti, soprattutto quando gli scavi non erano ancora connessi tra loro.

Francesco Piranesi, nella sua pianta di Pompei datata 1785, probabilmente una delle poche se non l'unica del Settecento, collega in modo generico le zone dell'Anfiteatro,

del Teatro e di Porta Ercolano, verosimilmente perché non era riuscito ad effettuare una triangolazione sufficientemente estesa.



Figura 2.22 - Pianta di Pompei, 1785, F. Piranesi. Tratta da pompeiiinpictures.com

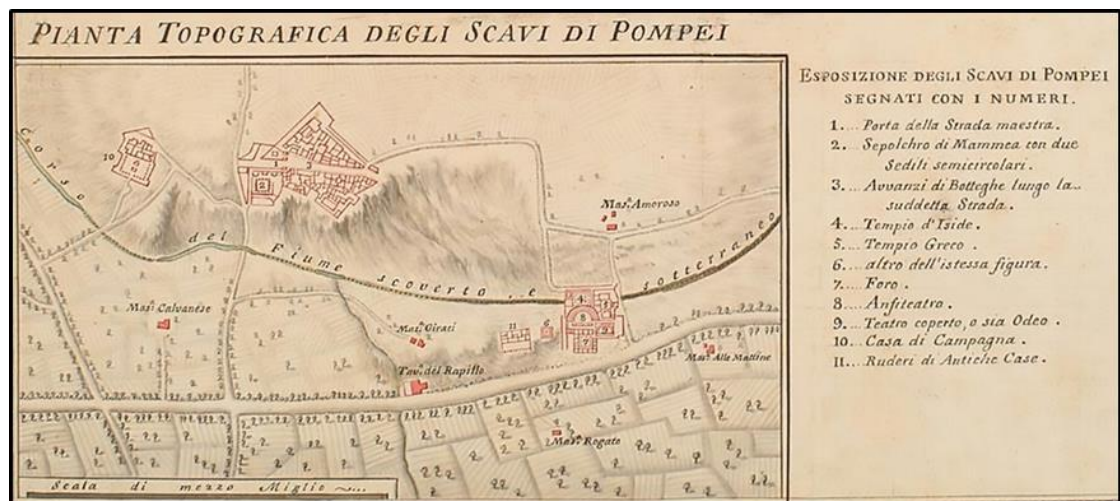


Figura 2.21 - Pianta di Pompei, 1800 Francesco La Vega Tratta da pompeiiinpictures.com

Lo stesso discorso vale per la pianta, in scala 1:880, redatta tra il 1760 ed il 1800 da Francesco La Vega e che risulta più accurata da un punto di vista del reperto, perché l'autore dispone di una documentazione amministrativa molto vasta, ma il dato

geometrico si dimostra quasi subito piuttosto inesatto. (2005, Kockel).

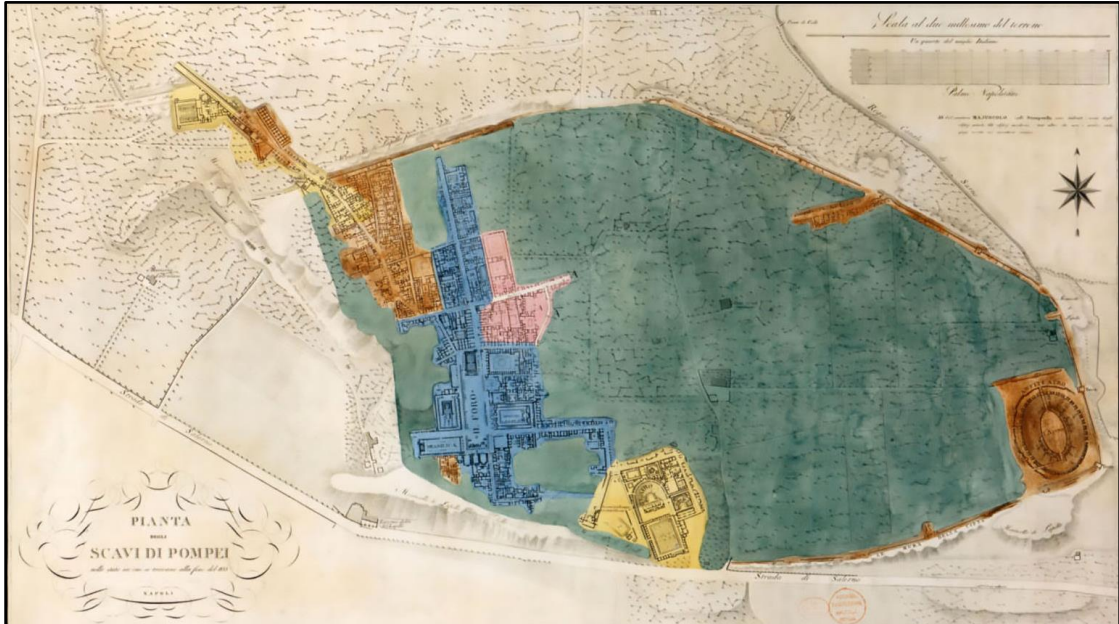


Figura 2.24 – Planimetria di Pompei di Giosuè Russo, 1833. Tratta da pompeiiinpictures.com



Figura 2.25 – Pianta degli scavi di Pompei aggiornata al 1827 di G. Marchesi, 1828. AIGM 82, 61

Forse è questo il motivo per il quale nel 1815 l'Ingegnere Giosuè Russo, impiegato dell'Istituto Cartografico Ufficiale del Regno, viene incaricato di ripetere le misure e

redigere una planimetria in scala 1:2000. Il risultato è un elaborato decisamente più accurato dei precedenti, anche se non privo di inesattezze, per esempio sul perimetro urbano dell'area orientale non ancora scavata o sul corretto orientamento rispetto al nord geografico. Fino al 1821 è documentata la presenza di Russo negli scavi, mentre dal 1825 viene sostituito da un altro geodeta Gaspare Marchesi, anche egli impiegato presso il Reale Ufficio Topografico di Napoli e anche egli incaricato di produrre una nuova pianta complessiva di Pompei, su scala 1:1000 e di aggiornarla regolarmente ogni primavera. (2005, Kockel).



Figura 2.23 - Plan of Pompeii in 1848 by Bonucci. Tratta da pompeiiinpictures.com

Prima ancora di essere nominato direttore degli scavi, Giuseppe Fiorelli svolge una sistematica attività di documentazione degli scavi a partire dall'epoca borbonica, finalizzata alla pubblicazione della *Pompeianarum antiquitatum historia* (1860-64). Dal 1861 dà inizio alla pubblicazione dei "Giornali degli scavi" e dal 1876 della rivista "Notizie degli Scavi di Antichità", a riprova del cambiamento dei tempi e del nuovo

desiderio di divulgare i progressi e le scoperte.

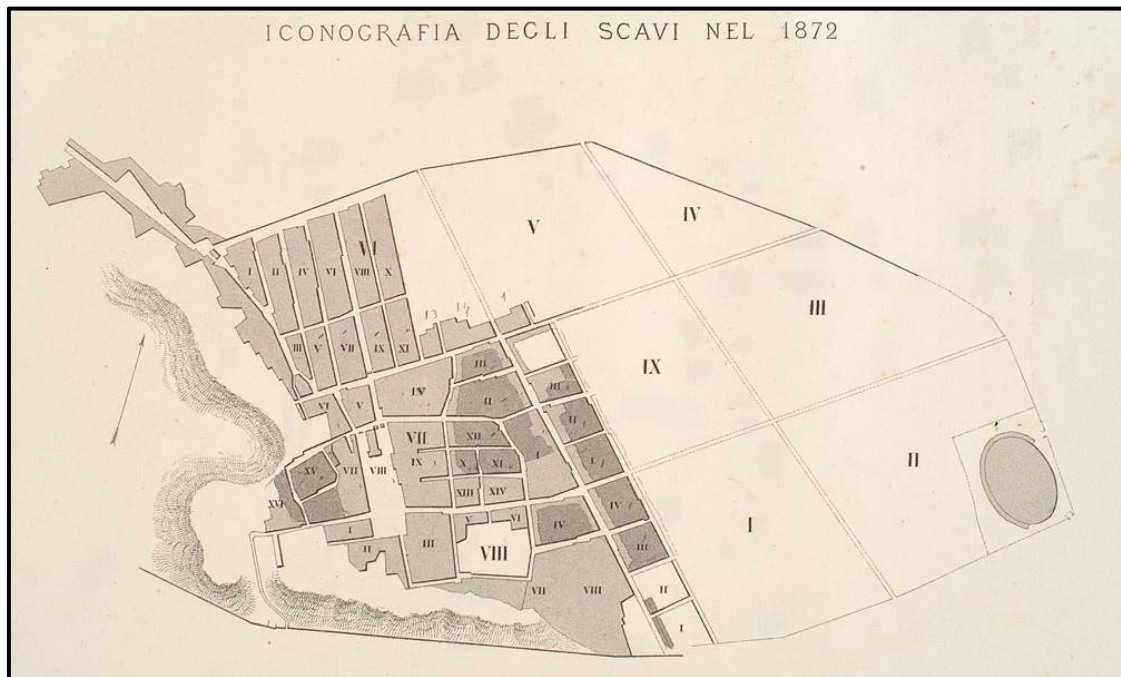


Figura 2.24 - Iconografia di Pompei, 1872, Giuseppe Fiorelli. Tratta da pompeiiinpictures.com

Nel 1870 il geodeta Giacomo Tascone assume l'incarico di ingegnere nell'ufficio tecnico degli scavi di Pompei e si occupa di realizzare una nuova grande Pianta generale di Pompei (1870-1885) che in seguito viene più volte aggiornata e ristampata.

Tra il 17 ed il 27 agosto 1910, utilizzando un pallone aerostatico munito di attrezzatura fotografica, viene effettuato il primo volo aerofotogrammetrico sugli scavi di Pompei e nel febbraio 1911 viene terminata la restituzione di una nuova planimetria in scala 1:1000, formata con un mosaico di una ventina di foto (2014, Russo). Ma questo è solo il preludio dei voli aerofotogrammetrici, diventati comuni nel secondo del dopoguerra, e del progetto chiamato la "Fabbrica della Conoscenza", che si vedrà al paragrafo 2.5.3.

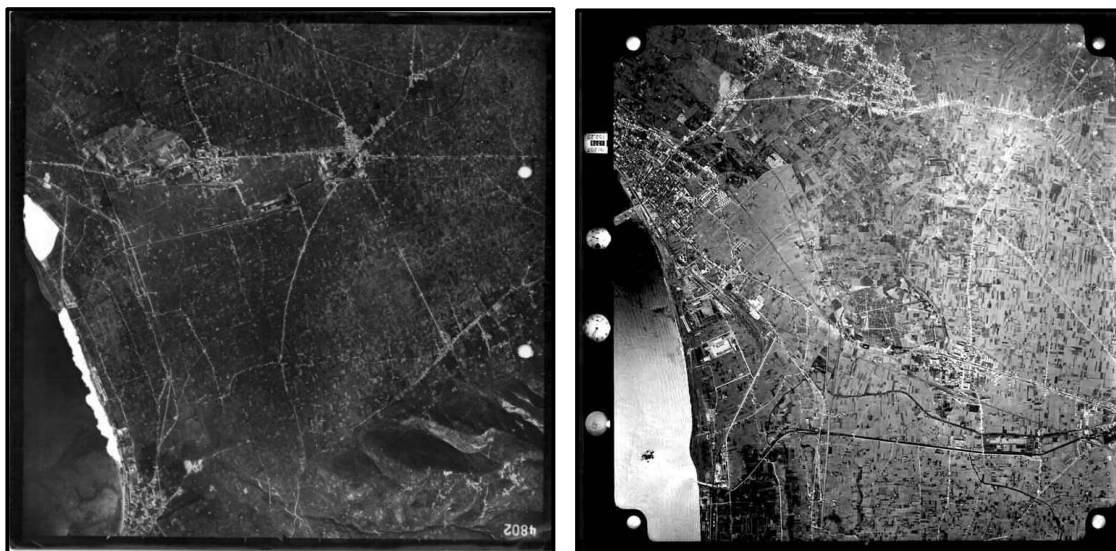


Figura 2.28 - A sinistra: IGM 1954: Strisciata 117B, Fotogramma 4082, Foglio 185. A destra: IGM 1956, Strisciata 1, Fot. 1775, 1776, 1777, 1778, Foglio 185. Immagini tratte da campuspompei.it

2.5.2 Un progetto di cartografia moderna: la cartografia “Morichi”

L'allegato tecnico del Sistema informativo del Grande Progetto Pompei prova a fornire un quadro dello stato dell'arte nell'ambito della Cartografia digitale degli scavi e di conseguenza dei GIS esistenti.

“A partire dalla fine degli anni '80 del secolo scorso si è tentato più volte di creare un sistema informativo unico su base geografica, nel quale collegare tutti i dati disponibili. Tali tentativi hanno portato alla realizzazione di tre diverse cartografie:

1. *Cartografia 'Neapolis', da fotorestituzione, scala nominale 1:1000 (1988);*
2. *Cartografia 'Un Piano per Pompei' da fotorestituzione, scala nominale 1:1000 (1997-2005);*
3. *Cartografia 'Morichi', rilievo digitale, scala nominale 1:500 (2008).*

In realtà l'unico rilievo planimetrico ad oggi utilizzato, per il maggior grado di precisione ed affidabilità, è la cartografia "Morichi", in scala 1:500, agganciata ad una poligonale georeferenziata; sulla base di questa cartografia è stato realizzato un rilievo DWG, anch'esso georeferenziato, sul quale inoltre sono riportati il rilievo della rete sotterranea (cavità), alcuni rilievi di dettaglio di unità immobiliari ed i progetti di restauro."

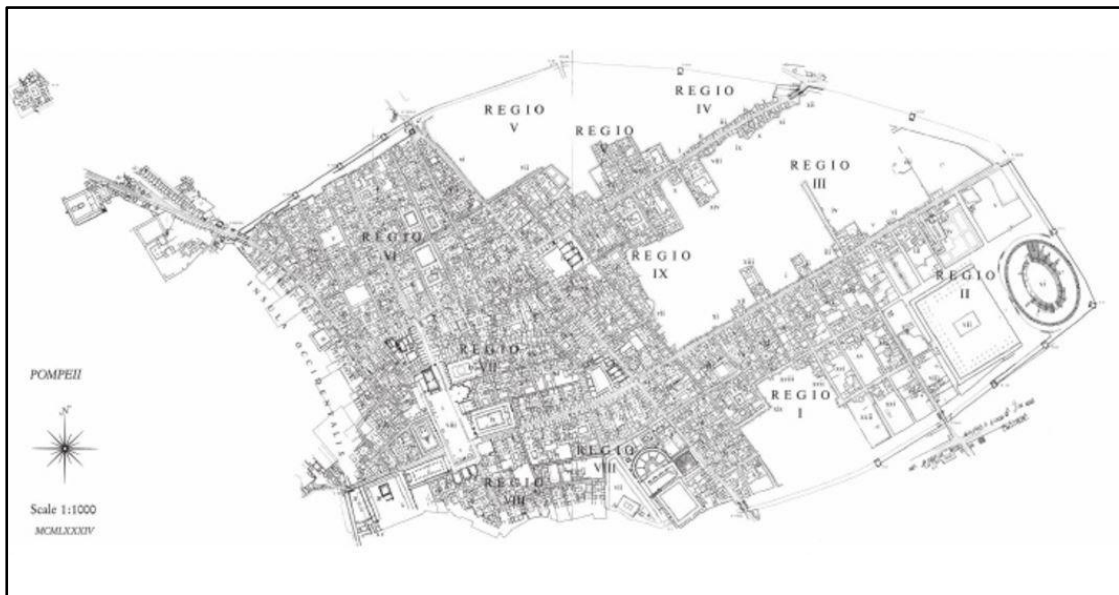


Figura 2.29 – Le RICA maps di Pompei

Alla base della "Cartografia Morichi" ci sono le RICA (Research in Campanian Archaeology) maps of Pompei, un progetto commissionato nel 1982 dall'Università di Austin (Texas - USA) ad un gruppo di architetti napoletani (Morichi, Paone, Rispoli e Federico). Il risultato consiste in una nuova planimetria generale degli scavi di Pompei, che nel 1984 viene integralmente pubblicata in scala 1:1000, mentre nel 1986 il progetto di ripubblicarla in scala 1:500 non viene portato a termine (2004, R. Morichi, P. Rispoli). Le planimetrie delle singole Insulae sono state ottenute tramite un rilievo aerofotogrammetrico, eseguito dalla ditta Nistri con grado di dettaglio compatibile con una scala di rappresentazione 1:250, pur essendo poi stata assemblata in un elaborato unico in scala 1:1000.

Nel 2006 vede la luce un nuovo progetto che dovrebbe portare a colmare la lacuna lasciata dalla mancata pubblicazione completa della RICA maps, ossia una cartografia digitale in scala 1:500 dell'intera area degli scavi. Questo nuovo progetto cartografico viene terminato nel 2009 e prevede l'istituzione di una nuova rete di inquadramento che ad oggi è considerata e definita la *Rete Topografica di Riferimento Ufficiale della Soprintendenza Speciale per i Beni Archeologici di Napoli e Pompei*. Tale rete è costituita da 98 vertici, dei quali:

- 85 nuovi vertici materializzati, per mezzo di chiodi in ottone, preferibilmente in corrispondenza degli incroci delle strade ed in altri luoghi giudicati strategici dal punto di vista dei rilievi e delle ricerche archeologiche in corso o in programma,
- 2 nuovi vertici, materializzati allo stesso modo, ma in posizioni sopraelevate, così da potere essere rilevati con tecniche GNSS, ma intervisibili tra loro in modo da costituire una base topografica nota: in particolare ST GPS 001 è posto sulla Torre di Mercurio, mentre ST GPS 002 sulla copertura del Teatro Grande,
- 9 vertici già esistenti nell'area dei Teatri, che è stata oggetto nel 2001-2002 di un'attività di rilievo e rappresentazione in scala 1:50 dei singoli monumenti (teatro Grande, Odeion, Quadriportico dei Gladiatori) e in scala 1:200 di tutto il complesso.

Nel 2006 è stato effettuato il rilevamento di 83 vertici, dei quali 71 interni al perimetro delle mura e 12 al di fuori di esse, disposti lungo la direttrice porta Ercolano-Villa dei Misteri, secondo uno schema modulare: ad una rete del primo ordine costituita da 6 vertici (tra i quali i due vertici GPS), sono state agganciate 2 poligonali chiuse del secondo ordine ed altre 2 del terzo ordine, oltre a 4 poligonali aperte. Le misure sono state effettuate con una stazione totale Topcon GTS 226 ed elaborate tutte insieme utilizzando il software commerciale Topcon Meridiana 352.

Nel 2009 la rete è stata integrata con una poligonale aperta costituita di 16 vertici posti al di fuori delle mura cittadine, per riallacciare le zone delle necropoli.

A partire dai vertici della rete è stato quindi realizzato un rilievo di dettaglio che ha

permesso la determinazione dei confini delle Insulae, ottenendo così una planimetria al fil di ferro dei loro perimetri, all'interno dei quali sono stati inserite le geometrie già restituite dalle RICA maps, previa verifica puntuale della loro correttezza, integrate con alcune informazioni che precedentemente non erano state inserite (tra queste gli architravi, le soglie, le coperture, le finestre) e delle porzioni scavate dopo il 1982. Infine sono stati rilevati ex-novo i piani diversi dal piano terra, siano essi ipogei o piani in elevazione, e restituiti per la prima volta in un unico elaborato grafico. (2011, Morichi et al.)

Il risultato di questo progetto è quindi una cartografia vettoriale in ambiente Cad in scala 1:500, strutturata su un sistema modulare di layer tematici, uguale per tutti i piani, dall'ipogeo a quelli fuori terra, che distingue le strutture sezionate da quelle a vista, le attuali da quelle esistenti al momento degli scavi e poi rimosse.

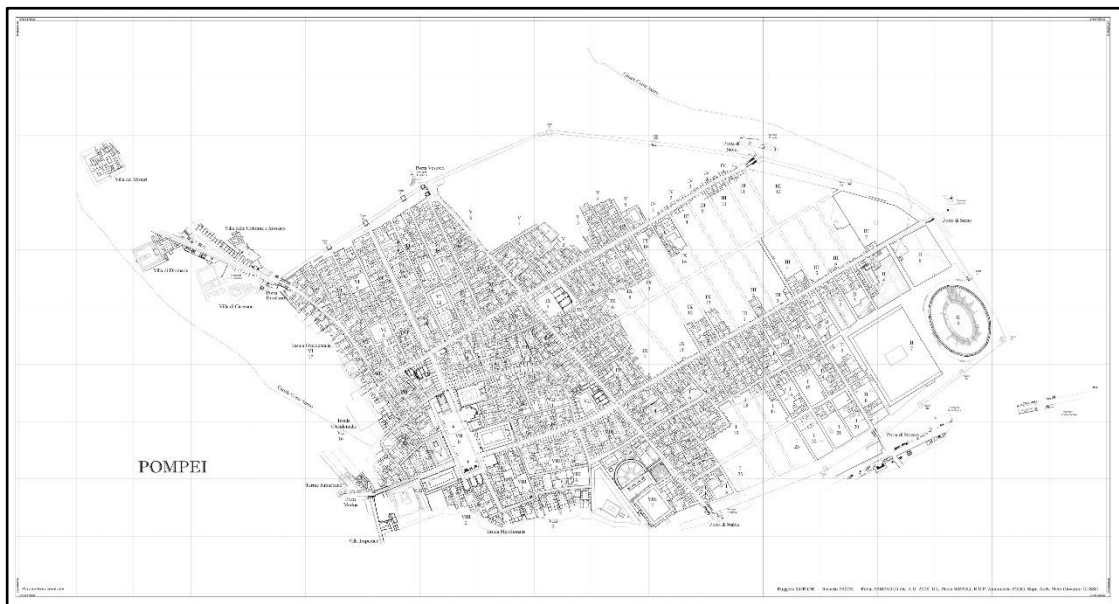


Figura 2.30 - La cartografia del 2006-2009. (2011, Morichi et. al)

2.6 Documentazione fotogrammetrica e laser scanning

La nascita e l'evoluzione della fotografia hanno cambiato in modo radicale la modalità di registrazione delle attività sui Giornali di scavo, andando gradualmente a sostituirsi la tradizionale prassi di riprodurre i reperti tramite disegni a mano libera, che risultava frequentemente poco oggettiva.

Lo stesso si può dire sia avvenuto in seguito alla diffusione della fotogrammetria prima (nel paragrafo precedente non a caso sono stati presentati diversi progetti cartografici derivanti da aerofotogrammetria), del rilievo tridimensionale tramite scansione laser poi ed infine della fotogrammetria digitale.

Anche in questo caso i progetti non si contano, ci si limita dunque a citare quelli ritenuti più interessanti dal punto di vista del Grande Progetto Pompei.

2.6.1 Un progetto di documentazione fotografica: il Progetto Neapolis

Il progetto "Neapolis: progetto sistema per la valorizzazione integrale delle risorse ambientali ed artistiche dell'area vesuviana", è il naturale prosieguo di un articolato programma di documentazione fotografica iniziato nel 1977, con l'obiettivo di fotografare e schedare le pareti dipinte ed i pavimenti degli scavi, e terminato poco prima del sisma del 1980, risultando così un importante punto di riferimento per i successivi interventi di tutela e restauro.

Il 1987 ha avuto quindi inizio il progetto "Neapolis" attraverso il quale sono stati catalogati parte dei beni archeologici (pitture e mosaici) e censiti quelli artistici, ambientali e territoriali dell'area vesuviana e la relativa documentazione d'archivio. Dal 1995 è iniziata la schedatura del patrimonio architettonico, attraverso l'esame di dettaglio delle pareti costitutive dei singoli monumenti.

Sempre all'interno del progetto "Neapolis" è stata realizzata l'omonima cartografia informatizzata di Pompei e di tutta l'area vesuviana.

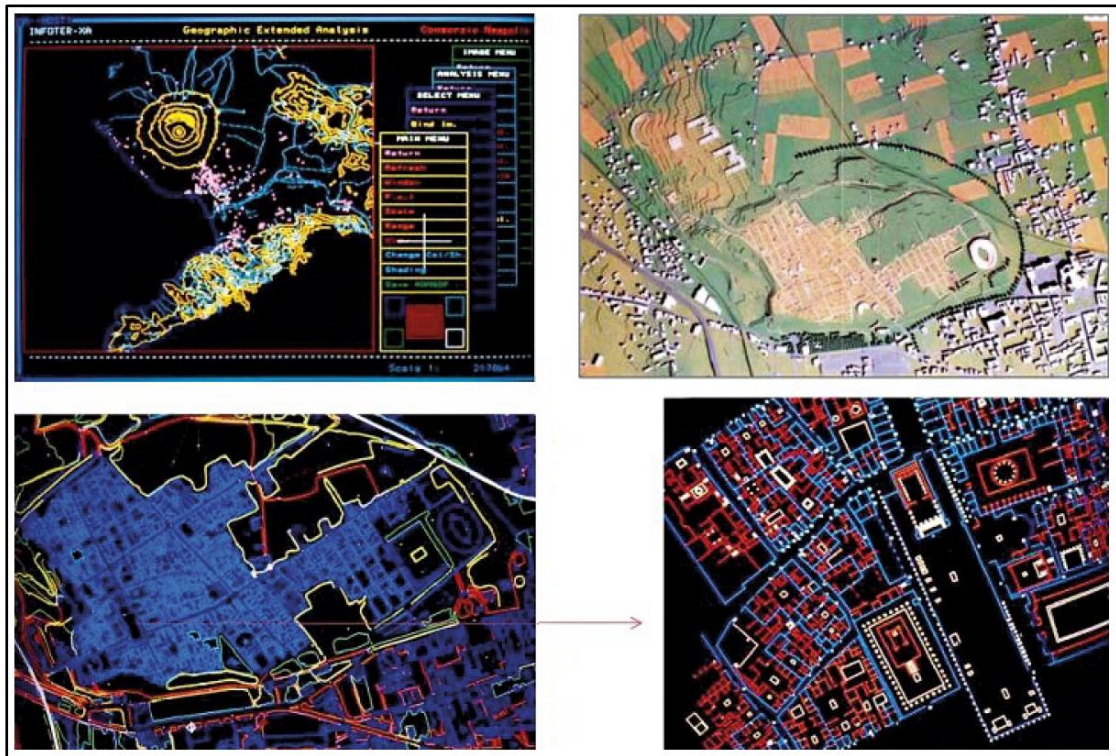


Figura 2.31 - Progetto Neapolis: da sinistra in alto a destra in basso: la basi cartografiche del territorio vesuviano con evidenziate le aree archeologiche; una ripresa aerofotogrammetriche; la mappa cartografica numerica generale e di dettaglio di Pompei (Miele, 2010)

2.6.2 Un progetto di modellazione tridimensionale

Il progetto è primariamente finalizzato alla realizzazione di un modello tridimensionale multi-risoluzione del Foro Civile e secondariamente alla stesura di una proposta di linee guida in ambito di rilievo e modellazione tridimensionale dei siti archeologici, che possano garantire un'elevata qualità scientifica dei dati ed una corretta interazione tra i modelli 3D e il Sistema Informativo.

Nell'aprile del 2009, al termine del progetto, si è quindi ottenuto un modello tridimensionale multi-risoluzione del Foro Civile di Pompei, nato dall'integrazione di uno complessivo della piazza, realizzato dal dipartimento INDACO dal Politecnico di Milano (acronimo di Industrial Design, delle Arti, della Comunicazione e della moda) in collaborazione con il gruppo di fotogrammetri della fondazione Bruno Kessler di

Trento, e di vari altri modelli, di scala di dettaglio maggiore, corrispondenti ai vari reperti ed elementi architettonici presenti nel Foro e creati dall'Università Alma Mater di Bologna, dipartimento di Architettura DA (ex DAPT).



Figura 2.32 - Foro civile di Pompei

Il rilevamento è stato progettato utilizzando un approccio “top-bottom”, ossia integrando l'impiego di più strumenti e tecniche di misura topografica e fotogrammetrica, ciascuna caratterizzata da un'accuratezza e un livello di dettaglio differenti, con una duplice finalità: acquisire un numero sovrabbondante di informazioni geometriche così da potere intercettare eventuali errori del modello e soprattutto rispondere ai vari livelli di dettaglio richiesti dagli archeologi, che, per portare a termine i loro studi e progetti, necessitano di un modello finale che possa passare dalla scala territoriale (1:250) a quella archeologica (1:10) (Guidi, 2009).

I dati di partenza sono stati:

- 3 immagini aeree acquisite con asse di presa nadirale in scala 1:3.500 (già in possesso della Soprintendenza),
- alcune immagini aeree acquisite con asse di presa inclinato per la texturizzazione del modello,

- due serie di scansioni acquisite tramite una coppia di laser scanner a tecnologia TOF (HDS 3000 e HDS 6000 entrambi di Leica, il primo dedicato all'inquadramento, il secondo al rilievo di dettaglio),
- circa 3.600 immagini acquisite da terra tramite fotocamere reflex digitali, utilizzate sia per colmare le lacune lasciate dal rilevamento laser scanner, sia per documentare gli oggetti più piccoli con la risoluzione idonea al livello di dettaglio richiesto (Remondino et al. 2008).



Figura 2.33 – Modello tridimensionale del foro romano di Pompei (Remondino, 2010)

Le scansioni sono state allineate tra loro utilizzando un congruo numero di punti omologhi, ovvero sia acquisiti nel corso del rilievo laser scanning, sia rilevati con tecniche topografiche terrestri e satellitari, ottenendo infine una nuvola di punti complessiva costituita da 18 milioni di punti con risoluzione 25cm. Questa nuvola ha avuto la funzione di definire lo “scheletro” dell’intero modello, sul quale sono stati in seguito rototraslati i vari modelli 3d dei singoli manufatti. La risoluzione ottenuta da questo complesso sistema integrato di strumenti spazia da 25 cm a pochi millimetri per quel che riguarda la geometria e da 15 cm a pochi millimetri per la texture.

Questo caso di studio rappresenta un chiaro esempio di come possono venire integrate correttamente diverse tecniche di acquisizione 3D e come venga gestito il contenuto informativo del modello fino alla definizione di un sistema digitale multi-risoluzione.

Capitolo 3 – I moderni strumenti di rilevamento dei Beni Archeologici

3.1 Premessa

La topografia è la disciplina che si pone come fine quello di descrivere, in modo quantitativo, la realtà che ci circonda (Barzagli, Pinto, 2014).

Come si può immaginare la necessità di tracciare delle mappe per descrivere il terreno e le strade che lo attraversano, per definire i confini delle proprietà, per capire la morfologia di un luogo sul quale costruire è insito nell’Uomo e quindi non stupisce che la Topografia abbia origini molto antiche.

Il Ventesimo secolo e l’avvento del digitale hanno profondamente cambiato la Topografia, rivoluzionandone le tecniche tradizionali di misura ed introducendone di nuove, permettendo così il raggiungimento di precisioni di misura e soprattutto di velocità di rilevamento che erano impensabili con la strumentazione ottico-meccanica tradizionale.

Purtroppo è nata l’idea che i nuovi strumenti, a tutti gli effetti piccoli computer di utilizzo estremamente intuitivo, permettano a chiunque di effettuare dei rilevamenti di precisione. Niente di più falso, come si cercherà di evidenziare in questo capitolo, la Topografia di precisione resta una scienza complessa, che presuppone la conoscenza della Geometria e della Statistica e di molta esperienza di misura e trattamento dei dati.

Nel presente capitolo si presenteranno quindi gli strumenti e le tecniche, privilegiando i più moderni, di rilevamento e rappresentazione dei Beni Culturali, con particolare attenzione ai Beni Archeologici,

3.2 Sensori di rilievo tridimensionale

I sensori tridimensionali sono strumenti che consentono di generare un modello tridimensionale della scena inquadrata; frequentemente questa coincide con la superficie esterna di un oggetto, più raramente con quanto racchiuso all'interno di un volume delimitato da tale superficie.

I sensori tridimensionali moderni attualmente impiegati nel rilevamento metrico dei Beni Archeologici e in generale Culturali sono molteplici e possono essere catalogati secondo vari criteri, tra i quali la tecnologia utilizzata dal sensore stesso, oppure le caratteristiche del bene da rilevare (p.e. dimensione, morfologia, particolarità) o ancora la finalità del rilevamento richiesto (p.e. la scala di rappresentazione, le accuratezze attese dal rilievo).

In figura 3.1 si propone la più classica tra le catalogazioni degli strumenti dedicati all'acquisizione tridimensionale e si basa sulla loro modalità di rilievo: distingue i sensori che riescono a rilevare le geometrie degli oggetti senza necessità di toccarli (senza contatto) da quelli che invece presuppongono il contatto (Russo, Remondino, Guidi – 2010).

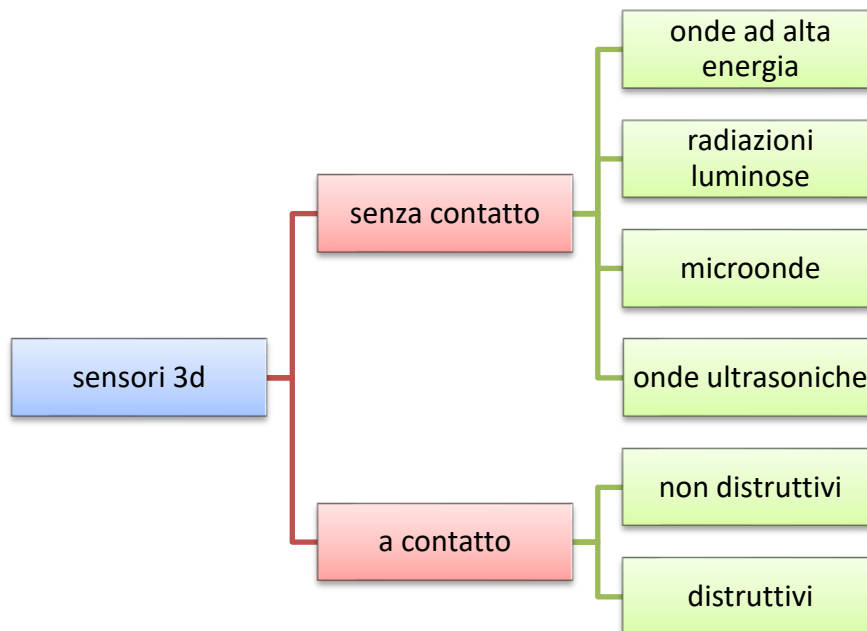


Figura 3.1 - Strumenti per l'acquisizione 3d

I sensori dei quali si tratta in questo lavoro appartengono alla famiglia dei sensori senza contatto, che utilizzano radiazioni luminose per acquisire la geometria degli oggetti; si tratta di un gruppo cospicuo di strumenti, come si vede in figura 3.2.

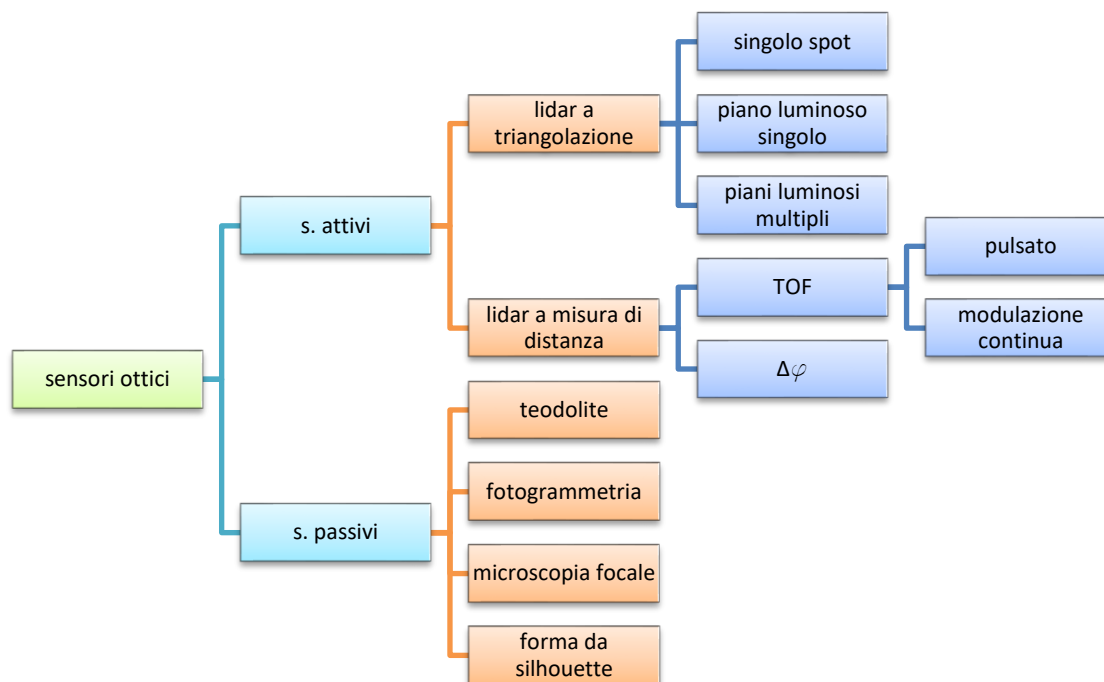


Figura 3.2 - Sensori ottici per l'acquisizione 3D

La prima grossa distinzione è tra i sensori passivi, che impiegano la luce naturale (sia solare, sia artificiale) per acquisire le informazioni geometriche di un oggetto, ed i sensori attivi, che, allo stesso fine, apportano una codifica alla luce, trasformandola così in un soggetto attivo di rilevamento. Applicando questo criterio agli strumenti topografici tradizionali, risulta che i teodoliti sono strumenti passivi, mentre le stazioni totali sono strumenti attivi, perché i distanziometri elettronici che consentono a queste ultime di misurare le distanze utilizzano delle onde elettromagnetiche.

3.2.1 Le grandezze caratteristiche di un sensore 3D

Le principali grandezze che descrivono il funzionamento dei sensori, e che quindi permettono di esprimere un giudizio sulla loro “bontà”, sono:

- la risoluzione: la frazione più piccola dell’oggetto da rilevare che viene misurata;
- l’accuratezza: l’errore tra la misura di una quantità ed il suo reale valore;
- la precisione di misura o incertezza: la dispersione delle misure attorno alla loro media. Consente di stimare la componente casuale dell’errore, nel caso di misure ripetute si valuta come scarto quadratico medio tra le singole misure e la loro media.

3.3 Sensori 3d passivi

Questa classe di sensori non elabora la luce naturale, ma si limita a sfruttare la sua capacità di illuminare e quindi di permettere lo svolgimento di operazioni di misura.

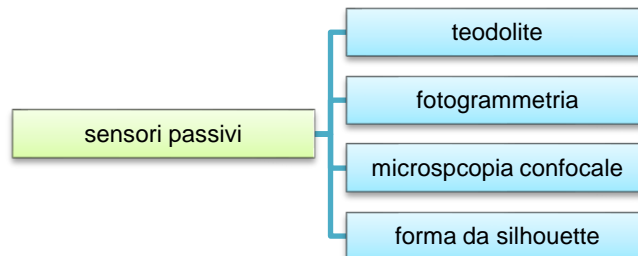


Figura 3.3 - Sensori passivi

3.3.1 Il teodolite

Nella topografia tradizionale i rilievi tridimensionali venivano effettuati impiegando i teodoliti, degli strumenti ottico-meccanici che permettono la misura indiretta degli angoli azimutale e zenitale. I moderni teodoliti sono corredati di distanziometri e prendono il nome di stazioni totali, se ne rimanda la descrizione al paragrafo 3.4.1.

3.3.2 La fotogrammetria

La fotogrammetria è una tecnica di rilevamento topografico che consente di ottenere informazioni sulle dimensioni, sulla forma e sulla posizione di oggetti tridimensionali, attraverso l'interpretazione e la misura di immagini fotografiche riprese da punti diversi.

Questa definizione non deve trarre in inganno, i fondamenti analitici della fotogrammetria sono molto antichi e risiedono nei principi della prospettiva inversa, o più in generale della geometria descrittiva, che, attraverso una opportuna costruzione grafica, permettono di determinare le posizioni nello spazio di punti singolari a partire da due o più rappresentazioni prospettiche di una scena. E' chiaramente necessario che i punti siano distinguibili dal contesto, quindi coincidenti con irregolarità geometriche o cromatiche (Guidi, Russo, Beraldin, 2010).

La nascita della fotogrammetria come tecnica di rilievo è comunque collegato all'invenzione delle fotocamere e delle pellicole, quindi nella seconda metà dell'Ottocento; poco dopo, con l'invenzione dei primi aerostati, viene sperimentata la fotogrammetria da foto aeree (aerofotogrammetria). Fino alla fine degli anni '80 la fotogrammetria è una tecnica molto complessa e raffinata, che richiede a chi la esercita un'elevata conoscenza pratica e teorica della materia, quindi nel complesso è utilizzata solamente da personale altamente specializzato e qualificato; il progresso informatico, a partire dagli anni '90, trasforma profondamente anche la tecnica fotogrammetrica, sviluppando procedure ed algoritmi che consentono un alto grado di automazione, rendendola di conseguenza più semplice e diffondendone l'utilizzo.

La maggiore distinzione della fotogrammetria moderna si basa della posizione dei punti di presa delle fotografie e distingue:

- fotogrammetria terrestre, se le prese vengono effettuate con le fotocamere posizionate a terra e gli oggetti rilevati sono architetture o parti di queste,
- fotogrammetria aerea (aerofotogrammetria), quando l'acquisizione avviene da piattaforma aerea. In questo caso la camera si trova a bordo di aeromobili e l'oggetto inquadrato è il territorio.

Tradizionalmente si indica con il termine “fotogrammetria dei vicini” (Close-Range Photogrammetry) la fotogrammetria applicata ad oggetti posti a meno di 300 metri dalla fotocamera, e con “Fotogrammetria dei lontani” quando gli oggetti interessati risultano situati ad una distanza superiore a 300 metri. Il limite dei 300 metri nasce dalla aerofotogrammetria, trattandosi della quota di sicurezza per le riprese da aeromobile.

In passato è stato utile distinguere le tecniche fotogrammetriche anche in base al tipo di supporto della fotografia: quindi la fotogrammetria classica, che utilizzava fotografie impressionate su pellicola, da quella digitale, che sfruttava fotografie digitali. Ad oggi questa classificazione è superata, visto che la fotogrammetria digitale ha soppiantato quella classica.

3.3.2.1 La fotogrammetria classica

Si introducono due importanti definizioni:

- spazio oggetto: l’oggetto da rilevare nella sua volumetria
- spazio immagine: la ripresa fotografica dell’oggetto da rilevare.

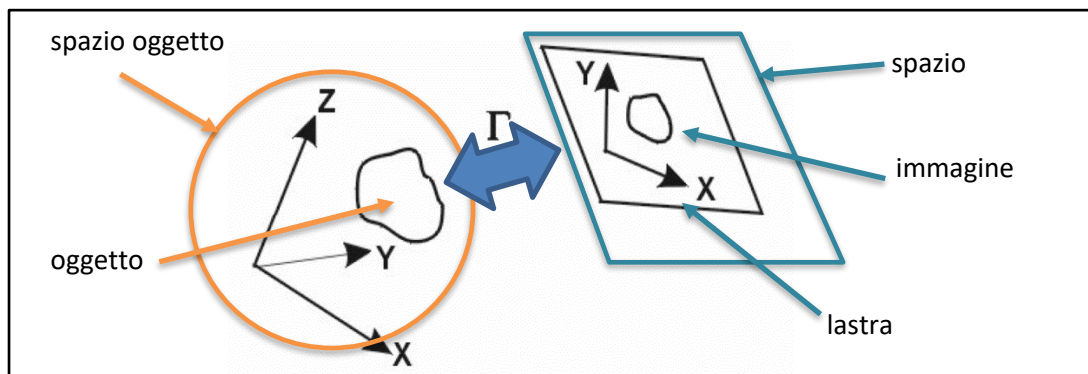


Figura 3.4 - Lo spazio oggetto e lo spazio immagine, legati dai parametri di orientamento

Applicare la fotogrammetria significa riuscire a mettere in relazione in maniera univoca lo spazio oggetto tridimensionale con lo spazio immagine bidimensionale; per farlo si utilizzano un certo numero di punti noti in entrambi gli spazi, detti Punti Fotografici di Appoggio (PFA) o Ground Control Points (CGP), così da risolvere la

relazione e potere poi risalire da un qualsiasi punto dello spazio immagine al corrispondente punto nello spazio oggetto.

Come schematizzato in figura 3.4, le grandezze coinvolte sono di tre tipi:

- (X, Y, Z) , coordinate tridimensionali dell'oggetto inserite in un sistema di riferimento tridimensionale cartesiano ortogonale;
- (x, y) , coordinate bidimensionali dell'immagine inserite in un sistema di riferimento bidimensionale cartesiano ortogonale solidale al fotogramma;
- i valori dei parametri di orientamento Γ , che regolano i rapporti fra lo spazio oggetto 3D e quello immagine 2D e sono funzione delle caratteristiche del mezzo fotografico e la posizione della presa rispetto ai due spazi.

I prodotti che il procedimento fotogrammetrico è in grado di generare sono di due tipi:

- b) prodotti immagine, derivanti dall'applicazione alle immagini di trasformazioni geometriche più o meno complesse:
 - raddrizzamento di immagini o fotoproiezione: procedimento applicabile ad oggetti piani o comunque caratterizzati da variazioni altimetriche molto contenute, tali da comportare, nel ritenerli piani, errori trascurabili alla scala di rappresentazione scelta,
 - ortofoto: processo che, attraverso un modello geometrico tridimensionale, permette la correzione dell'immagine (passando dalla prospettiva di acquisizione ad una proiezione ortogonale) in modo che la scala sia uniforme;
 - mosaici: accorpamenti di immagini singole raddrizzate od ortorettificate per realizzare una copertura unitaria dell'area di interesse;
- c) prodotti numerici puntuali o vettoriali nei quali la restituzione passa attraverso la determinazione di punti oggetto in un sistema di riferimento tridimensionale:
 - cartografie: planimetrie corredate da informazioni altimetriche (punti quotati o curve di livello) o cartografie 3D;

- disegni architettonici vettoriali in proiezione ortogonale (principalmente prospettivi di facciate o di interni);
- profili (rispetto ad un piano orizzontale o verticale di riferimento).

Il processo fotogrammetrico classico si può sintetizzare in tre passaggi, nei quali le tre grandezze appena elencate sono presenti secondo relazioni sempre diverse:

1. fase di presa: se la fotocamera utilizzata è metrica sono noti i parametri di orientamento interno (paragrafo 3.3.2.1.3) in resto, dunque le coordinate (X, Y, Z) dell'oggetto nello spazio oggetto, i parametri di orientamento della fotocamera Γ e le coordinate dell'oggetto nello spazio immagine, sono incognite,
2. fase di orientamento: a partire dalle coordinate note dei PFA sia nello spazio oggetto, sia nello spazio immagine, si determinano i parametri di orientamento Γ . Nella fotogrammetria classica, l'orientamento si suddivide in 3 momenti successivi: orientamento interno, orientamento relativo ed orientamento assoluto,
3. fase di restituzione: con i parametri Γ ormai noti, si possono trasformare le coordinate bidimensionali (x, y) in coordinate tridimensionali (X, Y, Z) restituendo così l'oggetto rilevato.

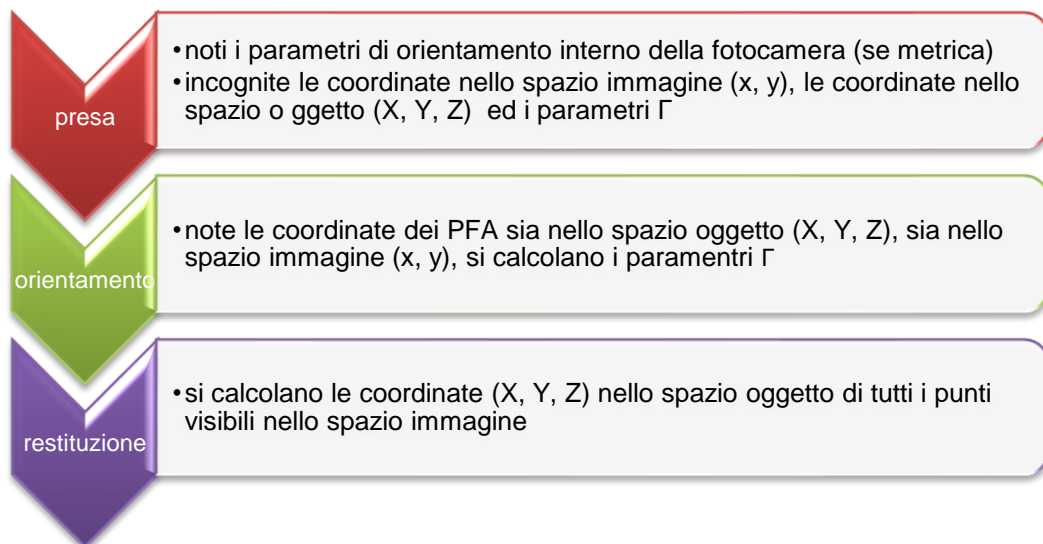


Figura 3.5 - Fasi della fotogrammetria classica

3.3.2.2 Le equazioni di collinearità

La relazione tra spazio immagine e spazio oggetto si chiama proiettività e segue precise relazioni matematiche e geometriche chiamate equazioni di *collinearità*.

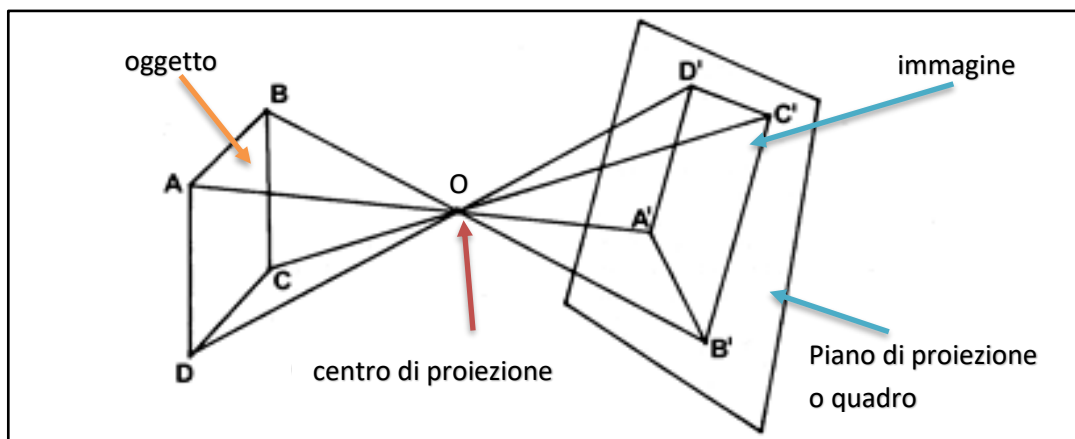


Figura 3.6 - Schema di proiezione centrale

Il problema è risolvibile sia per via analitica sia grafica, applicando le leggi della geometria descrittiva: da un punto di vista ottico geometrico la fotografia è assimilabile ad una proiezione centrale dell'oggetto fotografato: a partire dal centro di proiezione O, l'insieme dei punti che descrivono un generico oggetto viene proiettato su un piano di proiezione (detto quadro), definendo così un equivalente insieme di punti proiettati, costituente l'immagine dell'oggetto fotografato. Il piano di proiezione non è altro che il piano della pellicola nella fotografia classica e il sensore in quella digitale, il centro di proiezione è in entrambi i casi rappresentato dal centro dell'obiettivo della fotocamera e le rette proiettanti sono i raggi luminosi che attraversando l'obiettivo formano l'immagine.

Invece da un punto di vista analitico, si può affermare che fra i due spazi esiste una relazione di proiettività quando è possibile trovare una matrice di parametri A, che permette di effettuare una trasformazione tale per cui ad ogni generico punto oggetto P, che descrive lo spazio oggetto 3D, ne corrisponda uno P' che descrive lo spazio immagine 2D.

$$P' = A P$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Il sistema di equazioni che esplicita l'espressione matriciale è composto dalle 6 equazioni di collinearità, che permettono di determinare i 6 parametri contenuti nella matrice A. Dato che ogni PFA noto permette di scrivere 2 equazioni, per risolvere il sistema servono almeno 3 punti di coordinate note in entrambi gli spazi.

La figura 3.7 illustra il motivo per il quale non è sufficiente una sola immagine per applicare la tecnica fotogrammetrica, a meno che non si pongano particolari vincoli sulla forma dell'oggetto del rilievo: come si può osservare tutti i punti appartenenti alla retta congiungente il centro di proiezione O ed il punto immagine A' potrebbero essere il punto oggetto A la cui immagine è A'. In termini analitici, se viene utilizzata una sola immagine, il rapporto tra punto oggetto e punto immagine non è univocamente determinato

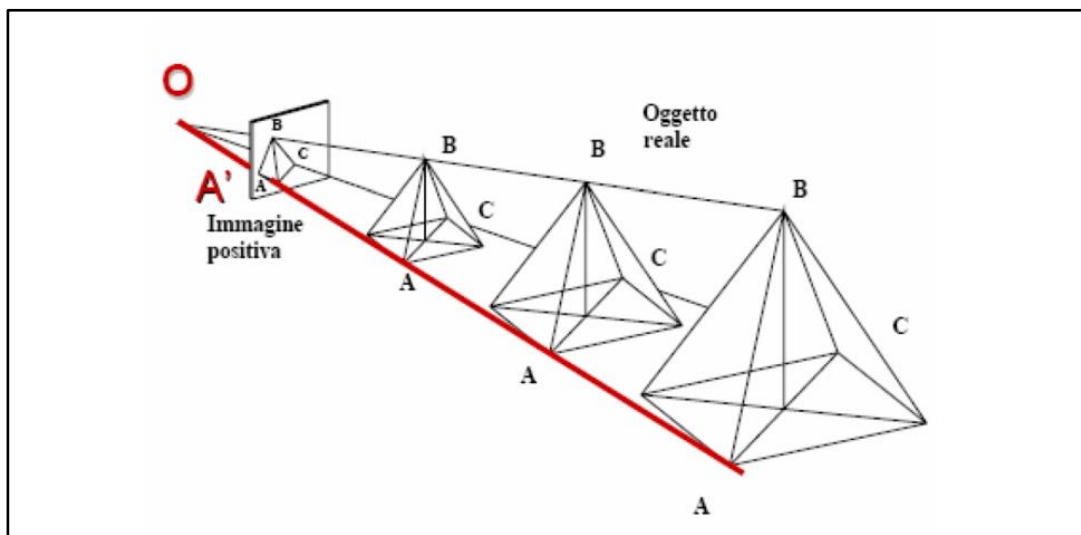


Figura 3.7 – Limite della geometria proiettiva

La figura 3.8 mostra invece che questo limite viene superato se si utilizzano due o più immagini:

- A'- A'' (così come B'-B'' e C'-C'') sono detti *punti omologhi* perché sono entrambi i punti immagine, su due immagini diverse, corrispondenti al punto oggetto A (gli altri rispettivamente ai punti oggetto B e C),
- O' ed O'' sono i centri di proiezione delle due immagini e per essi passano tutte le rette proiettive della rispettiva immagine, che prendono il nome di stelle o fasci proiettivi.

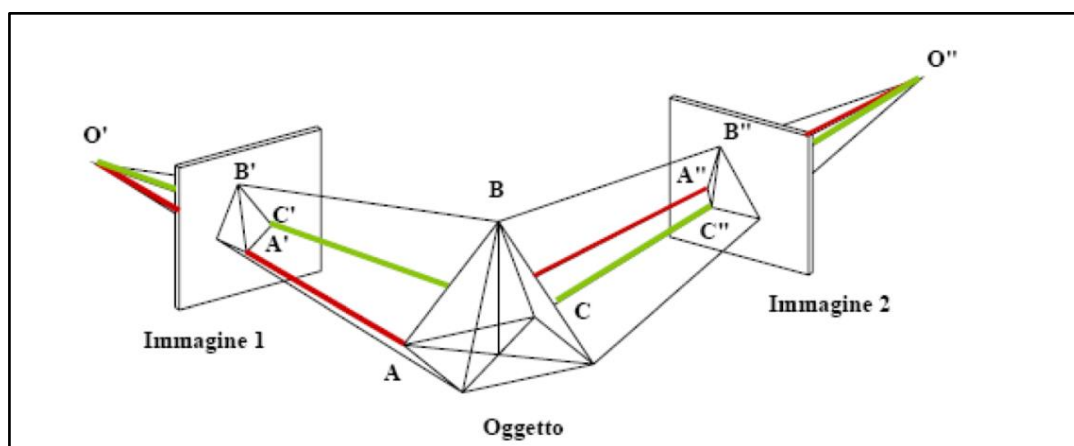


Figura 3.8 – Utilizzo di una coppia di immagini

3.3.2.3 Le prese stereoscopiche

In definitiva, si possono effettuare misure tridimensionali di un oggetto se si dispone di più fotografie di esso; in questo caso il sistema di equazioni sarà risolto non più da 6 PFA nello spazio oggetto e in uno spazio immagine, ma da 6 PFA nello spazio oggetto e in più di uno spazio immagine. In analogia alla visione stereoscopica della vista umana, guardando un oggetto da due punti di vista diversi se ne riesce a percepire la tridimensionalità: noti la base b compresa tra i due punti di osservazione (nella visione umana, la distanza inter-pupillare è in genere compresa tra i 60 e i 70 mm) e l'angolo di parallasse angolare ϕ è possibile determinare la posizione tridimensionale del punto osservato. Si può dimostrare geometricamente che se la base b ha dimensione compresa tra $1/3$ e $1/4$ della distanza D i risultati sono migliori.

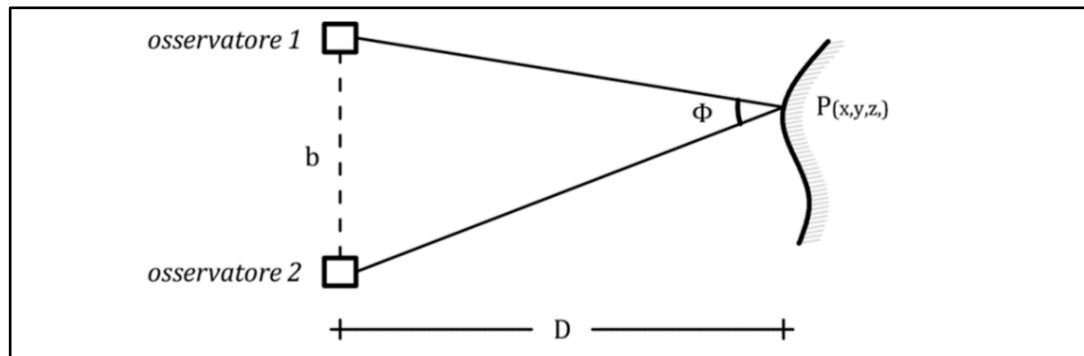


Figura 3.9 - Schema di visione stereoscopica

Per stabilire il criterio più corretto di acquisizione delle immagini, si introduce il concetto di “scala del fotogramma”, funzione della distanza tra il punto di presa dell’immagine e l’oggetto, ovvero il rapporto tra la lunghezza L di un elemento lineare misurato sull’oggetto e la lunghezza l dello stesso elemento misurato sull’immagine.

Nel caso ideale di un obiettivo fotografico esente da distorsioni e di un oggetto da rilevare piano, la scala del fotogramma si manterrebbe costante su tutta la superficie della fotografia. Invece nei casi reali la scala varia all’interno del fotogramma in funzione della distanza dal centro della fotocamera, quindi non ci sono alternativa e definire un valore medio della scala del fotogramma.

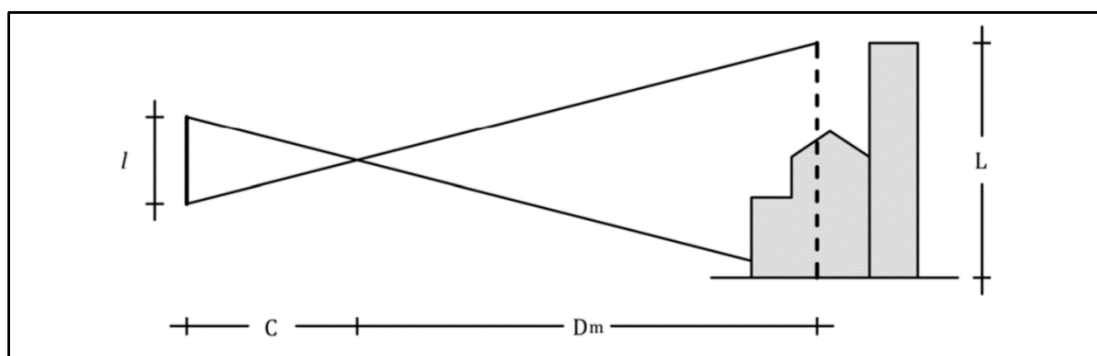


Figura 3.10 - Scala media del fotogramma

Quindi detti C la distanza compresa tra il punto principale del fotogramma ed il centro di prospettiva (focale), D_m la distanza tra quest'ultimo e l'oggetto ed H la quota di volo nell'aerofotogrammetria, la *scala media del fotogramma* (s. m. f.):

$$s. m. f. = \frac{l}{L} = \frac{C}{D_m} = \frac{C}{H}$$

Tenendo presente che la superficie acquisita in ogni immagine è variabile in funzione della lunghezza focale f dell'obiettivo, per mantenere più o meno costante la superficie acquisita, la distanza tra fotocamera ed oggetto deve variare in relazione alla diversa lunghezza focale. A questa considerazione bisogna aggiungerne una sulla distanza della base b tra i punti di presa, che deve essere tale da consentire la presenza su immagini successive di un certo numero di punti omologhi ma anche da garantire la visione stereoscopica: se i due punti di presa sono ravvicinati (valore piccolo di b) l'area omologa tra coppie di fotogrammi successivi è ampia, la restituzione è agevole, ma la visione stereoscopica è compromessa, al crescere del valore di b diventa minore l'area omologa e quindi è più complessa la restituzione ma si facilita la visione stereoscopica.

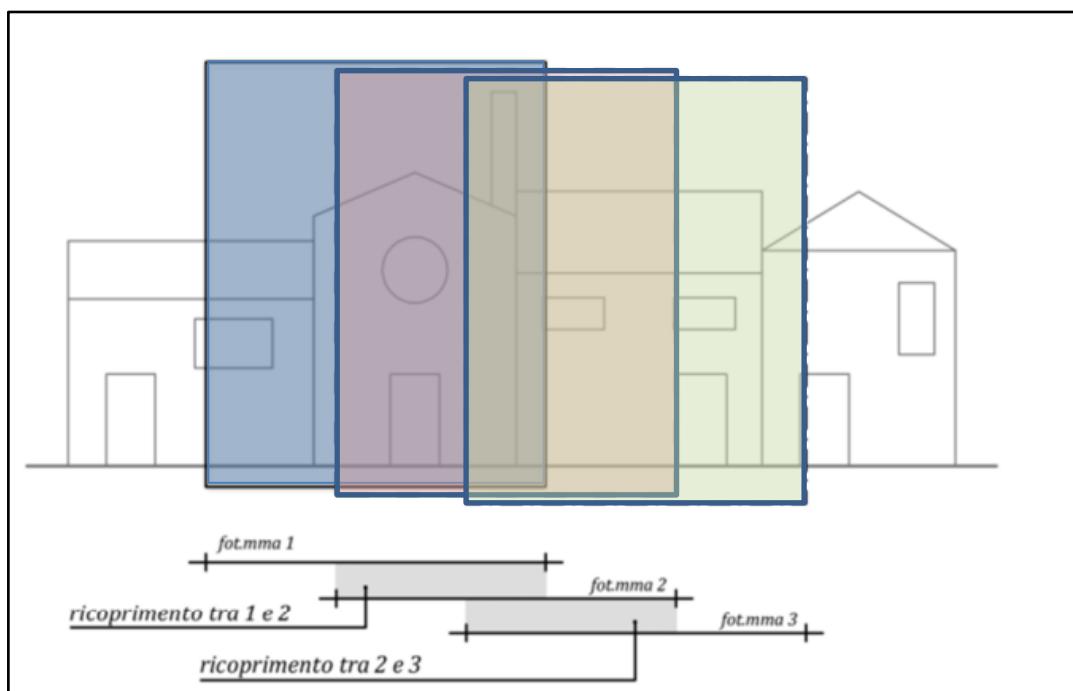


Figura 3.11 - Schema di prese fotogrammetriche

In definitiva l'esperienza indica che un rapporto base/distanza di ripresa ottimale varia tra 1/5 e 1/10 e che la sovrapposizione tra scatti successivi non deve essere inferiore al 60%.

3.3.2.3.1 L'orientamento

La fase dell'orientamento è suddivisa in tre momenti, che possono ridursi a due nel caso in cui l'orientamento relativo ed assoluto avvengano contemporaneamente, prendendo il nome di orientamento esterno.

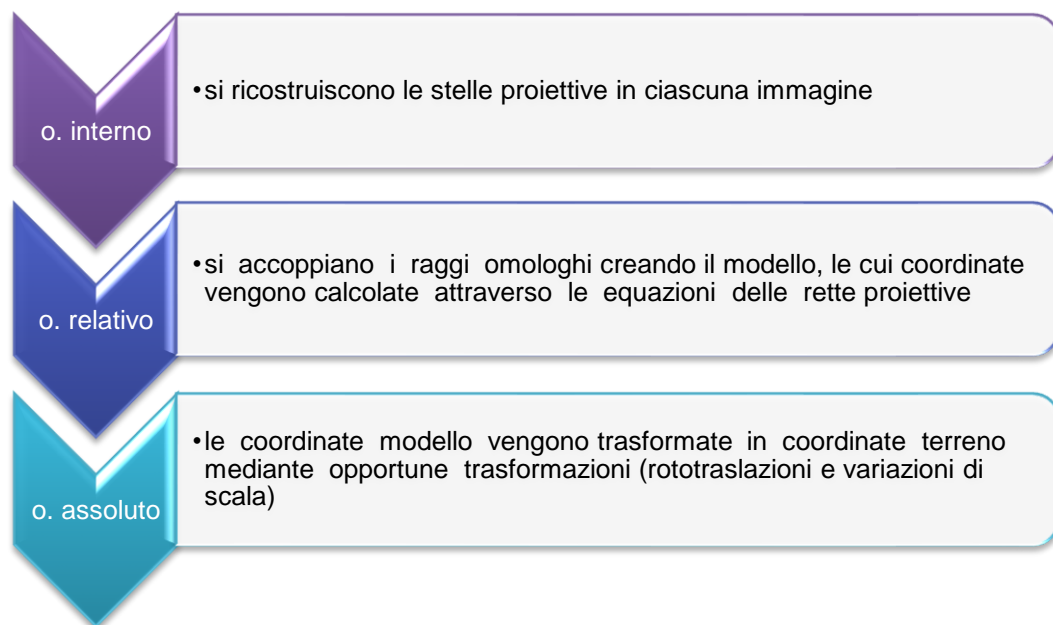


Figura 3.12 - Schema dei momenti dell'orientamento

L'orientamento interno è il processo che permette di determinare le caratteristiche geometriche della camera fotografica, ossia:

- il centro di proiezione O ,
- il punto principale P_p ,
- la distanza principale C ,
- le distorsioni dell'immagine.

La posizione di P_p è vincolata ad un sistema di riferimento appartenente al piano dell'immagine (nella fotogrammetria classica, era individuato a priori dalla posizione di marche fiduciali impresse sulla pellicola al momento della presa).

Indicando con C la distanza principale, con D la distanza dall'oggetto e con f la distanza focale, in base alla prima legge sulle lenti sottili, anche nota come legge di Gauss, si ha:

$$\frac{1}{D} + \frac{1}{C} = \frac{1}{f}$$

Quindi solamente nel caso di distanze di presa D molto grandi (per esempio nel caso della aerofotogrammetria) si avrà $C \sim f$.

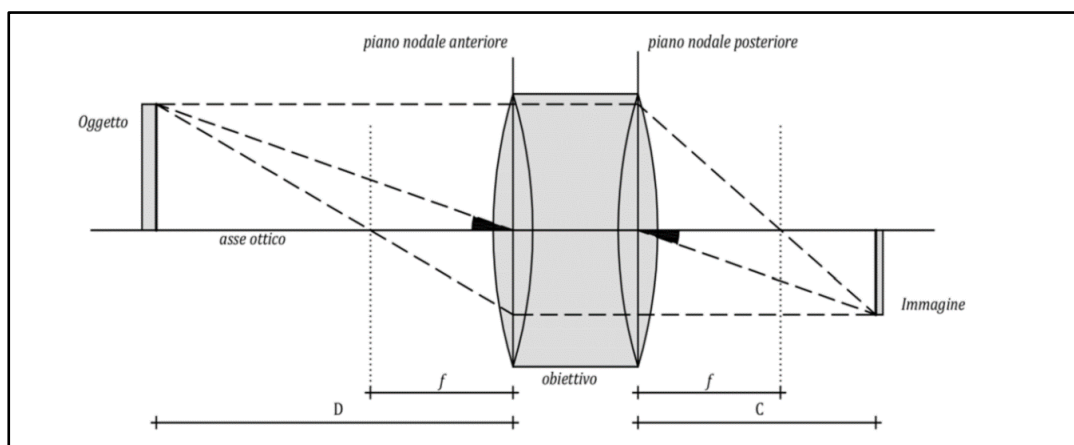


Figura 3.13 – Legge di Gauss per lenti ideali

In figura 3.13 si mostra come la legge di Gauss potrebbe applicarsi ad un obiettivo fotografico ideale: il generico raggio incidente il sistema di lenti incontra i due piani nodali definiti dall'alternanza aria-vetro-aria, ma si comporta ignorando la distanza tra essi.

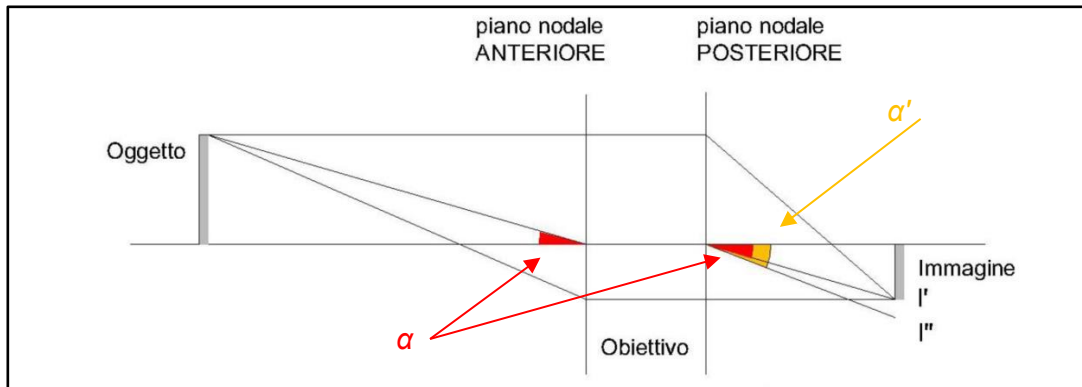


Figura 3.14 – Distorsione indotta da un obiettivo reale

Nella realtà gli obiettivi fotografici non rispecchiano precisamente la condizione geometrica ideale: è stato infatti dimostrato che il raggio incidente il piano nodale anteriore proveniente dall'oggetto forma con l'asse ottico un angolo α nella parte esterna dell'obiettivo che è diverso dall'angolo α' che il raggio uscente dal secondo punto nodale (nella parte interna dell'obiettivo) forma sempre con l'asse ottico. Il generico punto I ha la propria immagine nel punto I'', anziché nel punto I', a causa della distorsione δ indotta dall'obiettivo.

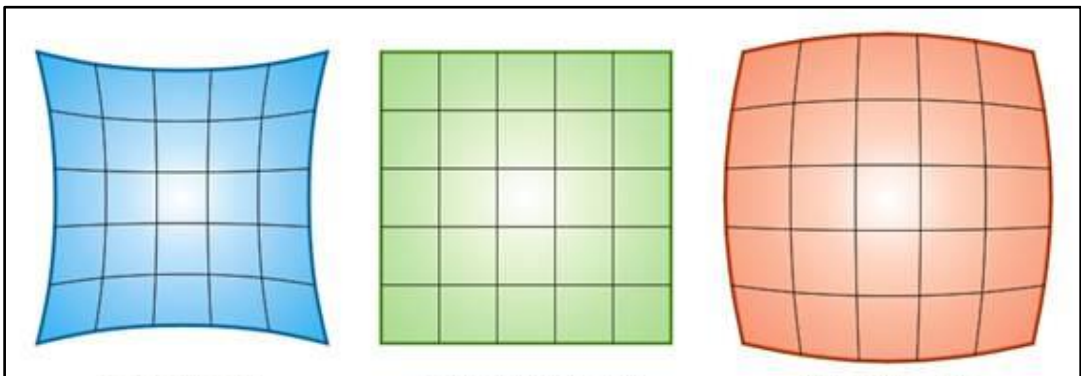


Figura 3.15 - Tipi di distorsione radiale

La distorsione δ indotta dall'obiettivo si può scomporre in due componenti:

- la distorsione radiale δ_r , disposta lungo la congiungente P con I',
- la distorsione tangenziale δ_t , disposta perpendicolarmente alla congiungente P con I'.

La distorsione radiale ha un effetto preponderante sulla distorsione complessiva e varia proporzionalmente alla distanza principale C , secondo due schemi:

- distorsione a barilotto (barrel shaped), tipica degli obiettivi grandangolari,
- distorsione a cuscinetto (pincushion distortion), presente nei teleobiettivi.

Terminato l'orientamento interno si passa a quello esterno, nel quale i raggi proiettivi vengono ricollocati nella posizione all'interno dello spazio oggetto che occupavano all'atto della presa: per ciascun fascio bisogna quindi determinare tanti parametri quanti sono i parametri che definiscono la posizione di un corpo rigido nello spazio, ovvero 3 rotazione e 3 traslazioni. Dato che per ricostruire lo spazio oggetto occorrono almeno 2 fotogrammi, per il loro orientamento bisogna determinare complessivamente 12 parametri.

Come detto l'orientamento esterno si può o meno scomporre in due passaggi successivi: orientamento relativo ed assoluto. Nel primo, per ogni coppia di fotogrammi si individuano almeno 5 coppie di raggi, provenienti da altrettanti punti omologhi, e si ricrea il modello stereoscopico dell'oggetto inquadrato in un sistema di riferimento modello (x, y, z) . Nel secondo, grazie a 3 punti di coordinate note in entrambi i sistemi di riferimento, si orienta tale modello nel sistema di riferimento dell'oggetto tridimensionale (X, Y, Z) , applicando una trasformazione conforme nello spazio. Quindi 5 dei 12 parametri incogniti vengono risolti nella fase di orientamento relativo, i restanti 7 nella fase di orientamento assoluto.

3.3.2.3.2 La restituzione

Una volta individuata la posizione dei fasci proiettivi e ricostruito il modello attraverso l'intersezione dei raggi provenienti dai punti omologhi, si può procedere all'estrazione di informazioni metriche riguardanti i punti dell'oggetto.

3.3.2.3.3 Le fotocamere utilizzate nella fotogrammetria classica

La fotogrammetria tradizionale può usare fotocamere metriche, semi-metriche o amatoriali.

- **Fotocamere metriche:** vengono appositamente prodotte per usi fotogrammetrici e presentano pertanto alcune caratteristiche che permettono di ottenere le precisioni massime dal procedimento fotogrammetrico (distorsioni trascurabili, planarità ed inestensibilità del supporto). In ogni caso sono fornite calibrate dal produttore.
- **Fotocamere semi-metriche:** non nascono per fini metrici, sono caratterizzate da distorsioni non trascurabili, ma vengono modificate con un apposito elemento calibrato su banco ottico e solidale all'immagine acquisita, che permette di determinare e correggere i parametri dell'orientamento interno. Sono accompagnate da un certificato di calibrazione fornito dalle case costruttrici, riportante i parametri di distorsione determinati tramite delle procedure standardizzate di misura di laboratorio e di calcolo.
- **Camere non metriche, o amatoriali:** sono del tutto prive di informazioni sulla distorsione ed è pertanto necessaria una fase di post elaborazione per definire modelli matematici che quantifichino le correzioni da dover apportare alle coordinate immagine.

3.3.2.4 La fotogrammetria digitale

A partire dalla seconda metà degli anni '80 la fotogrammetria classica è stata gradualmente sostituita da quella digitale, che si differenzia dalla precedente per due ordini di ragioni:

- utilizza immagini digitali al posto delle immagini analogiche,

- adotta nuovi algoritmi e nuove procedure per una gestione automatizzata dei processi fotogrammetrici analitici, che già erano di gran lunga più automatici di quelli analogici.



Figura 3.16 - Evoluzione della fotogrammetria

Se il passaggio alla fotogrammetria digitale si fosse limitato all'introduzione delle immagini digitali, mantenendo quindi inalterate le tradizionali procedure ed algoritmi di fotogrammetria analitica, i reali benefici sarebbero stati molto limitati. Invece l'aspetto più notevole ed innovativo della fotogrammetria digitale consiste proprio nell'elevata automazione di svariate fasi del processo, che la rendono di semplice utilizzo e le consentendo una diffusione del tutto inedita.

3.3.2.4.1 Le fotografie digitali

Un'immagine digitale, chiamata anche immagine raster, è fondamentalmente una matrice costituita da pixel, piccoli elementi di dimensioni finite, strutturati su righe e colonne, ai quali è associato un contenuto radiometrico (il valore bianco o nero, un livello di grigio o un valore RGB (Red Green Blue)). Ciascun pixel è individuato univocamente all'interno dell'immagine da due numeri che ne rappresentano la posizione (riga e colonna) all'interno della matrice; l'origine del sistema di riferimento è fissata in uno degli angoli dell'immagine, convenzionalmente in alto a sinistra.

Due sono le grandezze che caratterizzano le immagini raster:

- la risoluzione radiometrica, ossia il numero di bit utilizzati per descrivere il valore radiometrico di ciascun pixel; generalmente questi variano da 1 bit, nel caso di un'immagine in bianco e nero (0 se bianco e 1 se nero), ad 8 bit nel caso della scala di grigio, che consente di rappresentare 256 livelli cromatici. La maggiore parte delle immagini a colori sono descritte applicando la sintesi additiva, definita RGB, che presuppone l'utilizzo di 24 bit per ogni pixel: ogni colore viene scomposto nelle tre componenti fondamentali (rosso, verde e blu) ad ognuna delle quali sono associati 8 bit (0 in assenza di colore e 255 in saturazione di colore,
- la risoluzione geometrica, ovvero il numero di pixel contenuti in un'opportuna unità di lunghezza, dunque in un certo senso la dimensione del singolo pixel (risoluzione geometrica e dimensione del pixel sono legati da una relazione di proporzionalità inversa). La risoluzione geometrica è espressa in dpi (dot per inch, ossia punti per pollice) e dà indicazioni in merito alla possibilità di visualizzare i particolari più piccoli e dunque sulla precisione geometrica conseguibile durante le operazioni di orientamento. In genere si usano pixel quadrati e quindi risoluzioni uguali nelle due direzioni del sistema di riferimento interno, comunque esiste un parametro addizionale detto "*share factor*" che tiene conto dell'eventuale diversità della dimensione del pixel e che si può stimare durante il processo di calibrazione della camera.
- Soprattutto alla fine degli anni '90, quando la fotografia digitale era ancora una tecnologia nuova e non diffusa come oggi, poteva capitare di dovere utilizzare dei fotogrammi tradizionali digitalizzati tramite degli scanner cosiddetti "fotogrammetrici" perché dotati di un'ottica digitale particolare, caratterizzata da un'elevata risoluzione geometrica e radiometrica.

Direttamente legata alla dimensione del pixel è la definizione del sistema di riferimento interno dell'immagine; infatti se si vuole utilizzare un'immagine digitale per scopi fotogrammetrici, bisogna definire la relazione fra la posizione del pixel e il

sistema di coordinate immagine. Il sistema di riferimento dello spazio immagine, all'interno del quale ciascun punto ha coordinate cartesiane (x_i, y_i) viene convenzionalmente così definito:

- asse x parallelo al lato superiore dell'immagine e orientato verso destra,
- asse y parallelo al lato sinistro dell'immagine e orientato verso il basso

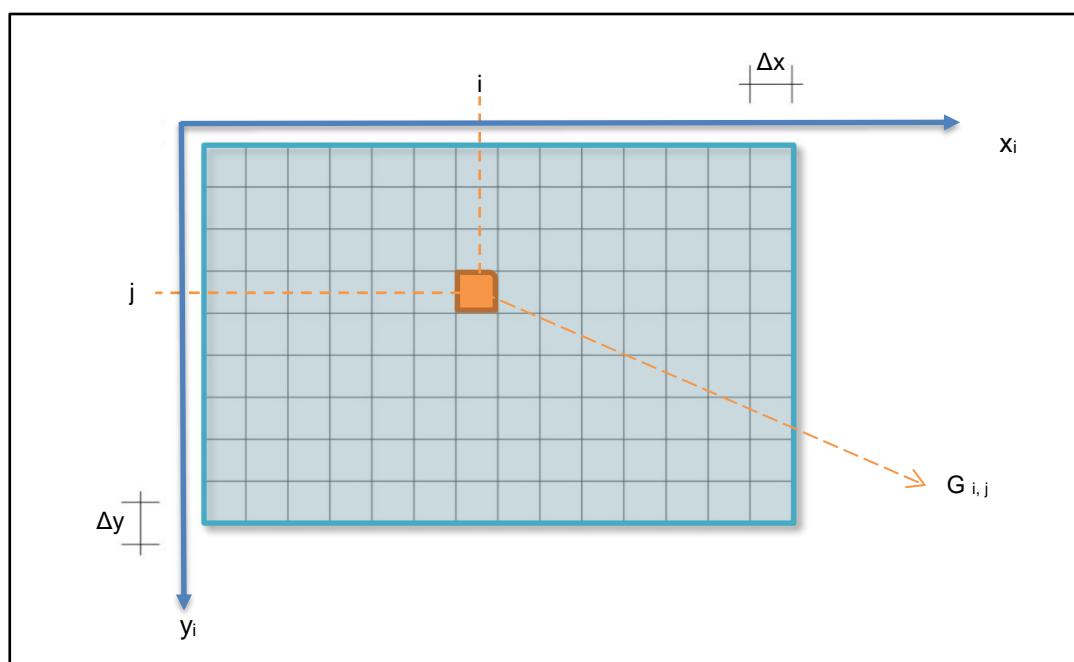


Figura 3.17 - Sistema di riferimento delle immagini digitali

Le comuni camere e video-camere digitali montano principalmente due tipologie di sensori, entrambi costituiti da serie di fotodiodi capaci di convertire la luce in carica elettrica, disposti secondo una matrice bidimensionale; ciò che differenzia i due tipi è la modalità con cui avviene la trasformazione della carica elettrica in tensione ed il suo trasferimento dal chip alla camera:

- CCD, acronimo di *Charged Coupled Device* (dispositivo a carica accoppiata): la carica elettrica di ogni pixel viene trasferita a pochi "nodi" di uscita (chip), viene quindi convertita in voltaggio ed esce dal sensore come segnale analogico. Tutti i fotodiodi del sensore sono dedicati esclusivamente alla lettura della luce e l'uniformità del segnale generato è alta;

- CMOS, acronimo di *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (semiconduttore a metallo ossido complementare): ogni fotodiodo è accompagnato da un convertitore che trasforma l'energia luminosa in voltaggio, e spesso anche da amplificatori di segnale, riduttori di rumore e circuiti di digitalizzazione, cosicché il segnale in uscita dal sensore è in formato digitale. La presenza di altri circuiti intorno al fotodiodo riduce lo spazio dedicato alla cattura della luce e l'uniformità del segnale è minore rispetto a quella dei sensori CCD.

Ognuna delle due tecnologie ha quindi punti di forza e di debolezza che le rendono più adatte per certe applicazioni e non altre. Le differenze principali possono essere così riassunte:

- il CCD crea un'immagine di alta qualità e basso livello di rumore, mentre il CMOS è più suscettibile al rumore,
- il CCD consuma una grande quantità di energia, molta di più del CMOS,
- i sensori di tipo CCD sono più costosi dei CMOS,
- i sensori CMOS hanno una maggiore complessità costruttiva dei CCD.

I sensori CCD hanno a lungo rappresentato la soluzione migliore, dunque destinata alle fotocamere reflex professionali e più in generale a tutti i casi nei quali prevale la necessità di avere immagini di alta qualità rispetto al maggiore dispendio di energia e alle maggiori dimensioni dei sistemi; per i motivi opposti, ossia per il minor consumo di energia e per gli ingombri ridotti, i sensori CMOS erano utilizzati per le fotocamere dei cellulari. Negli ultimi anni i produttori dei due sensori hanno lavorato per superarne i rispettivi limiti, con il risultato che, mentre i dorsi digitali montano esclusivamente sensori CCD per la maggiore precisione cromatica e qualità dell'immagine a discapito di dimensioni e consumi, il mondo delle reflex digitali professionali ha visto un proliferare di fotocamere con sensori CMOS a fianco di quelle che montano CCD.

3.3.2.4.2 I metodi di autocorrelazione

Come già scritto la fotogrammetria contemporanea applica delle procedure fortemente automatizzate, basate su sistemi di autocorrelazione detti di “*image matching*” sempre più accurati, che, attraverso il riconoscimento di valori o elementi noti nei vari fotogrammi, consentono di individuare in maniera automatica i punti omologhi. Tali procedure permettono di riconoscere i punti omologhi con precisioni inferiori alla dimensione dei pixel (autocorrelazione sub-pixel) e quindi, a fronte di immagini ad alta risoluzione.

Le parole chiave degli algoritmi di autocorrelazione sono:

- entità coniugate: punti, linee ed aree coniugati;
- entità di autocorrelazione: ciò che viene messo a confronto nelle due immagini per trovare entità coniugate;
- misura di similarità: ossia della “bontà” della corrispondenza tra le entità di autocorrelazione può essere stimata tramite il coefficiente di autocorrelazione o la deviazione standard nell’autocorrelazione ai minimi quadrati;
- metodo di autocorrelazione esegue la misura di similarità delle entità di autocorrelazione,
- strategia di autocorrelazione: comprende l’analisi dell’ambiente di autocorrelazione, la selezione del metodo scelto ed il controllo della qualità del processo.

I vari metodi di autocorrelazione traggono il loro nome dalle entità considerate.

- Algoritmi ABM, acronimo di *Area Based Matching*, è associato alla correlazione dei livelli di grigio su piccole aree delle due immagini, dette *image patches*, la similarità è ottenuta con una semplice correlazione (*Cross Correlation*) o applicando la tecnica ai minimi quadrati (LSM, *Least Squares Matching*).
- Algoritmi FBM, acronimo di *Feature Based Matching*, si basa sulla correlazione di elementi caratteristici (punti, linee, spigoli) delle immagini.

- Il Matching relazionale (o *symbolic matching*), si fonda sulla costruzione di strutture, cioè sulla connessioni di elementi semplici, e cerca le corrispondenze sulla base del tipo di relazioni fra di essi (spaziale, topologica, radiometrica, ecc.).

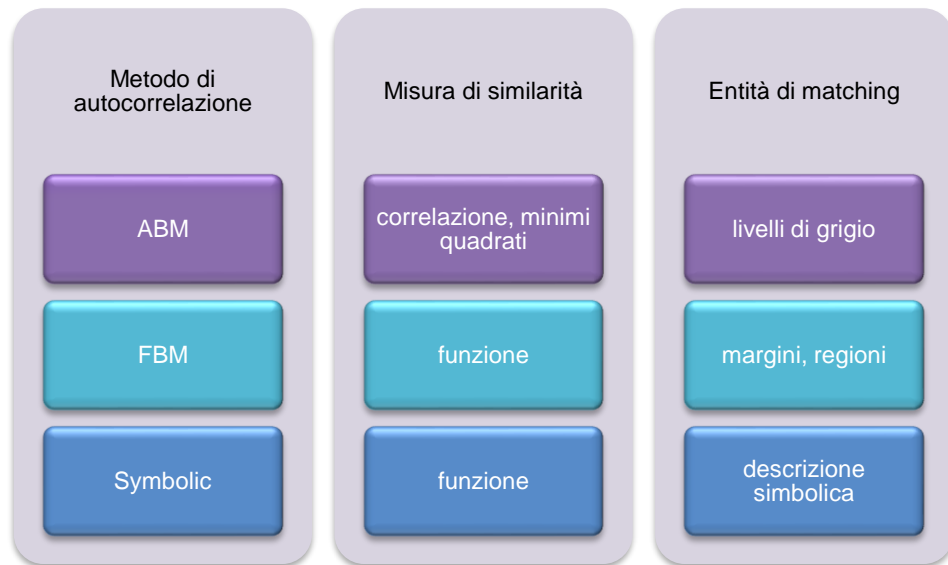


Figura 3.18 - Metodi di autocorrelazione

La maggior parte dei programmi di fotogrammetria utilizzano gli algoritmi ABM, il cui funzionamento, nel caso semplificato di due sole immagini, può essere così schematizzato:

1. selezione della entità per la correlazione sulla prima immagine,
2. individuazione della corrispondente entità sulla seconda immagine,
3. a partire dalle coordinate delle due entità nello spazio immagine, calcolo della posizione tridimensionale dell'entità nello spazio oggetto tramite le equazioni di collinearità o similari,
4. valutazione della qualità della correlazione.

Questo processo include una serie di criticità, per esempio il criterio con il quale scegliere le coppie di immagini, oppure da quale porzione di immagine iniziare la ricerca, ma soprattutto la complessità di calcolo della correlazione, quando la misura

di similarità tra le entità di correlazione viene calcolata sull'intera immagine, e l'ambiguità, quando l'entità scelta non è una caratteristica sufficientemente unica.

La scelta della porzione di immagini da cui iniziare la ricerca è risolto con l'adozione di particolari operatori matematici, detti di interesse, che consentono di individuare su ogni fotogramma digitale i punti che meglio si prestano alla correlazione.

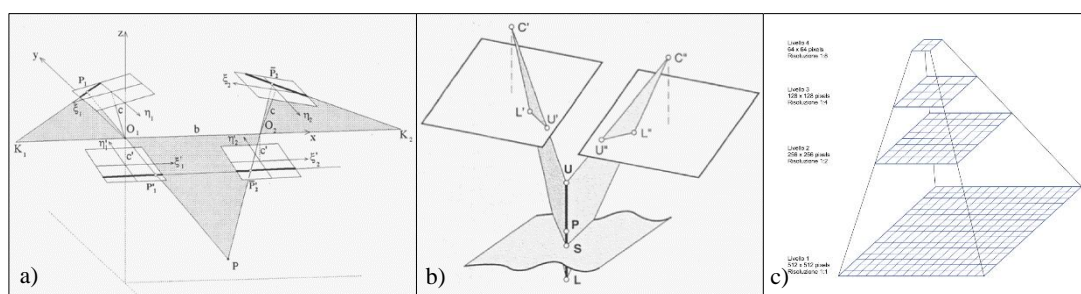


Figura 3.19 – Soluzioni al problema di riduzione dello spazio di memoria, tramite: a) la geometria epipolare, b) il concetto di vertical line locus, c) approccio gerarchico

Per ridurre lo spazio immagine di ricerca dell'algoritmo ABM, garantendo così una buona approssimazione al processo di matching, si possono utilizzare diverse tecniche, tra le quali le più utilizzate sono tre:

- la geometria epipolare, si basa sulla condizione teorica per la quale coppie di punti omologhi, coppie di centri di presa e punto oggetto si trovano su uno stesso piano, chiamato piano epipolare, la cui intersezione con i due piani immagini definisce due rette, dette linee epipolari; il procedimento di correlazione, una volta individuato un primo punto immagine, può essere limitato, sulla seconda immagine, alla sola retta epipolare;
- il *vertical line locus*, una volta stimata la quota del punto oggetto P viene stabilito un intervallo di incertezza in quota all'interno del quale si trovi tale punto, limitando così l'area di ricerca;
- l'approccio gerarchico, applicando il quale l'immagine originale viene ricampionata in una serie di immagini a risoluzione via via ridotta, denominate immagini piramidali. Il processo di correlazione viene avviato nell'immagine

a risoluzione più bassa e la posizione calcolata viene utilizzata come area di ricerca per l'immagine successiva, di risoluzione leggermente maggiore; questo processo viene ripetuto fino a quando la correlazione non viene eseguita sull'immagine originale.

Infine, per quanto riguarda l'unicità dell'entità di correlazione, nel caso di utilizzo dei gradi di grigio, l'unicità delle aree di ricerca aumenta proporzionalmente alla loro grandezza, ma sfortunatamente aumentano anche le distorsioni geometriche. Quindi non esiste una soluzione al problema dell'unicità, ma un compromesso tra questa e la presenza di distorsioni.

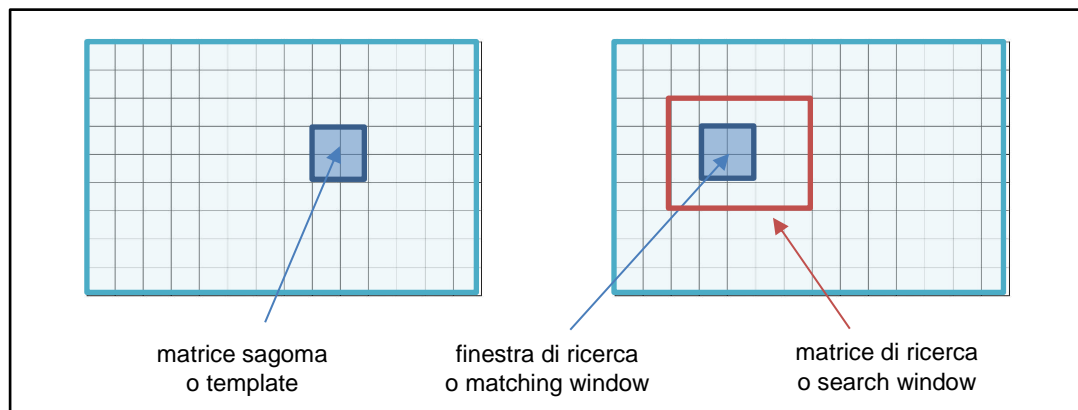


Figura 3.20 – Image patches nel metodo ABM

Il metodo di autocorrelazione ABM si basa sul confronto tra i livelli di grigio di piccole porzioni omologhe delle immagini (dette image patches), delle quali una, detta matrice sagoma (target o template), viene tenuta fissa sulla prima immagine mentre l'altra, detta matrice di ricerca (*search matrix* o *search window*), viene fatta muovere sulla seconda immagine fino a trovare il miglior accordo in base ad un determinato criterio; i più diffusi sono il Cross-Correlation ed il Least-Squares Matching (LSM).

Il criterio di Cross-Correlation permette di ottenere una precisione pari al pixel e si basa sul criterio statistico della “massima correlazione” tra i livelli radiometrici della matrice sagoma e della matrice di ricerca: vengono calcolati i valori del coefficiente

di correlazione per tutte le possibili posizioni della matrice di ricerca nell'immagine, la posizione cercata è quella a cui corrisponde il valore massimo.

La tecnica LSM consente di raggiungere delle precisioni maggiori (sub-pixel) e si fonda sulle differenze geometriche e radiometriche esistenti tra la matrice sagoma e quella di ricerca: queste spesso corrispondono ad immagini acquisite da due punti di presa distinti, nelle quali sono sufficienti piccole variazioni di illuminazione, di scala o rotazioni tra i due fotogrammi ad introdurre delle differenze. Ipotizzando di analizzare piccole porzioni di immagini, si può ritenere che la radiometria vari secondo una relazione lineare e che la variazione geometrica tra le matrici sagoma e di ricerca possa essere rappresentata da una trasformazione affine. La tecnica LSM è una procedura iterativa in cui i parametri calcolati durante le prime interazioni vengono utilizzati nei calcoli successivi, ma per fornire risultati corretti è necessario che i valori iniziali della posizione della matrice di ricerca siano approssimati con una precisione sufficientemente elevata (circa ± 2 pixel).

Le due tecniche possono essere ottimizzate utilizzandole assieme: la Cross Correlation per un primo posizionamento sommario dei punti (a livello del pixel), la LSM per il posizionamento con precisione maggiore (sub-pixel).

Oltre al criterio statistico per la determinazione della correlazione, il metodo ABM presuppone di affrontare alcune questioni:

- il posizionamento della matrice sagoma, una scelta sfortunata può infatti condurre al fallimento del processo di correlazione;
- dimensione della matrice sagoma, come già scritto all'aumentare delle sue dimensioni aumenta il livello di unicità, ma crescono le distorsioni;
- posizione e dimensione della finestra di ricerca,
- criteri di accettabilità, il risultato ottenuto tramite la misura di similarità fra il template e la finestra di ricerca deve essere analizzato; quindi è fondamentale determinare dei criteri di accettabilità, che in generale potranno essere diversi anche per diverse parti di una stessa immagine,

- Controllo della qualità: esso comprende una dichiarazione riguardo l'accuratezza e l'attendibilità delle posizioni coniugate; la consistenza della soluzione trovata deve ovviamente essere confrontata con tutte le informazioni e conoscenze che si hanno dello spazio oggetto.

Per semplicità espositiva si è mantenuta l'ipotesi iniziale della correlazione su due sole immagini, nella realtà il metodo ABM viene frequentemente utilizzato nella variante chiamata MGCM (*Multi-Photo Geometrically Cosnstrain Metching*) che considera contemporaneamente tutte le finestre omologhe in cui è presente un dato punto e compensa congiuntamente le equazione del matching e le equazioni di collinearità usate come vincolo: pertanto le coordinate immagine vengono determinate dal matching in modo che i relativi raggi proiettivi si incontrino in uno e uno solo medesimo punto oggetto. Il vantaggio di questo metodo consiste nella riduzione dei *blunders* dovuti a convergenza su minimi locali, in quanto questi dovrebbero presentarsi in più fotogrammi (Girelli, 2007).

3.3.2.4.3 Agisoft PhotoScan o software similari

Ad oggi si tratta del programma più utilizzato nella creazione di modelli tridimensionali a partire dall'elaborazione fotogrammetrica delle immagini digitali.

Il processo ricostruttivo si articola in tre passaggi:

- allineamento dei fotogrammi,
- costruzione della geometria,
- creazione della texture.

La tecnica di allineamento delle immagini utilizzata da PhotoScan è chiamata *Structure From Motion* (SFM) e deriva dalla computer vision, consente la ricostruzione della geometria tridimensionale di un oggetto, oltre che delle posizioni della fotocamera all'atto della presa, grazie all'utilizzo di una sequenza di fotogrammi consecutivi e parzialmente sovrapposti che abbraccino tutto l'oggetto.

Per operare la ricostruzione, l'algoritmo SFM individua dei punti caratteristici dell'immagine bidimensionale (come i bordi dell'oggetto, i punti caratteristici o altri dettagli specifici) e rintraccia gli stessi punti nelle immagini successive. Al termine di questo processo, il programma fornisce tre tipologie di dati:

- un modello per punti (detta nuvola di punti) che descrive la geometria dell'oggetto,
- le posizioni della fotocamera all'atto dell'acquisizione dei fotogrammi,
- i parametri interni di calibrazione della fotocamera: lunghezza focale, posizione del punto principale P_p , tre coefficienti di distorsione radiale e due tangenziale.

Uno dei punti di forza di questo programma è la possibilità di utilizzare delle fotocamere amatoriali, i cui parametri di calibrazione interna vengono calcolati dal programma stesso; nel caso in cui si disponga di una camera metrica, si possono inserire manualmente i relativi parametri, migliorando l'accuratezza della ricostruzione finale. Il programma, grazie ad algoritmi di creazione di superfici triangolate (mesh), permette di passare dal modello per punti a quello per superfici ed infine attribuire al modello la tessitura superficiale, ripresa direttamente dalle fotografie.

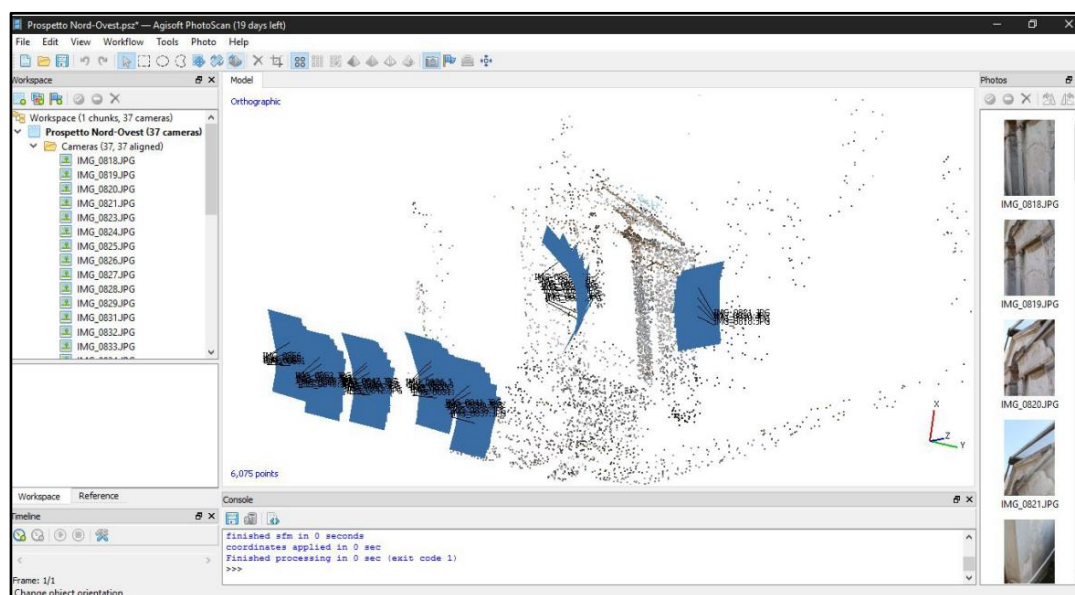


Figura 3.21 - PhotoScan: autoallineamento delle fotografie



Figura 3.22 - PhotoScan: nube densa di punti di un prospetto (chunk)



Figura 3.23 – PhotoScan: allineamento delle chunk a formare il modello 3D



Figura 3.24 – PhotoScan: ortofoto

3.3.2.4.4 Raddrizzamento ed ortoproiezione delle immagini

Oltre ai metodi fotogrammetrici finora descritti ed applicabili nella determinazione della geometria tridimensionale di un oggetto a partire da due o più fotografie che lo ritraggono, esistono due tecniche che permettono di determinare le coordinate bidimensionali dei punti di un oggetto a partire da una singola immagine fotografica: il raddrizzamento e l'ortoproiezione.

Il raddrizzamento consente di trasformare la fotografia di un oggetto piano, presa con un assetto qualsiasi, in una proiezione ortogonale dell'oggetto stesso sul piano che meglio lo approssima. Si necessita dunque che l'oggetto da rilievo sia piano od assimilabile ad un piano: in questo caso i due sistemi di coordinate, oggetto ed immagine, sono entrambi bidimensionali. Lo scopo del raddrizzamento è quello di trasformare le coordinate immagine di un punto nelle sue coordinate oggetto, applicando una trasformazione piana che consenta di collegare questi due mondi: il modello matematico utilizzato è una trasformazione piana ad 8 parametri chiamata

“omografia”, che deriva dalle equazioni di collinearità nel caso di oggetti piani. Servono quindi 4 punti noti nel sistema oggetto e nel sistema immagine per riuscire a calcolare gli 8 parametri della trasformazione, dopo di che il rapporto tra spazio oggetto e spazio immagine è determinato.

Semplici considerazioni di similitudine conducono alla conclusione che l’errore di non planarità diminuisce al crescere della distanza principale della camera e al diminuire della distanza dell’immagine fotografica del punto considerato dal punto principale. Dunque, è ammissibile applicare la tecnica del raddrizzamento ad oggetti non piani, purché il valore dell’errore di altezza sia trascurabile rispetto alla scala grafica di restituzione.

Le tecniche del raddrizzamento sono molto impiegate soprattutto nel rilevamento architettonico delle facciate degli edifici, che in molti casi possono essere ritenute piane, anche in virtù della presenza di diversi programmi, di utilizzo intuitivo, per l’esecuzione in forma digitale dei raddrizzamenti (detti anche fotopiani).

L’ortoproiezione (o raddrizzamento differenziale) consente invece di trasformare la fotografia di un oggetto qualunque nella sua proiezione ortogonale, a condizione però di conoscerne la morfologia. Se l’oggetto da rappresentare non è piano, oppure non è possibile ritenerlo tale in base a quanto scritto al paragrafo precedente, si ricorre alla tecnica dell’ortoproiezione: il raddrizzamento non viene eseguito in modo omogeneo sull’intera immagine, ma questa viene idealmente scomposta in porzioni corrispondenti ad elementi piani dell’oggetto, ognuna di esse viene raddrizzata rispetto ad un piano opportuno ed infine tutte le varie porzioni vengono mosaicate in un’unica immagine, che è la migliore rappresentazione possibile della proiezione ortogonale dell’oggetto ripreso.

L’ortoproiezione trova il suo massimo impiego nell’aerofotogrammetria, anche per la presenza di molti programmi automatici di modellazione digitale del terreno.

L'utilizzo combinato delle immagini digitali e dei moderni programmi fotogrammetrici consente di ottenere in modo rapido delle immagini raddrizzate e

ortoproiettate.

La procedura di raddrizzamento digitale è così sintetizzabile:

- calcolo dei parametri dell'omografia che consente di passare dalle coordinate oggetto alle coordinate immagine;
- scomposizione dell'area compresa tra i quattro PFA, in una griglia di maglie quadrate di dimensioni pari al pixel dell'immagine che si vuole generare;
- trasformazione, per mezzo dell'applicazione dei parametri dell'omografia, delle coordinate del baricentro di ogni maglia nel sistema immagine e determinazione delle sue coordinate relative sull'immagine di partenza;
- assegnazione ad ogni pixel dell'immagine raddrizzata del valore radiometrico dello stesso sull'immagine originale, sfruttando la trasformazione di coordinate al punto precedente.

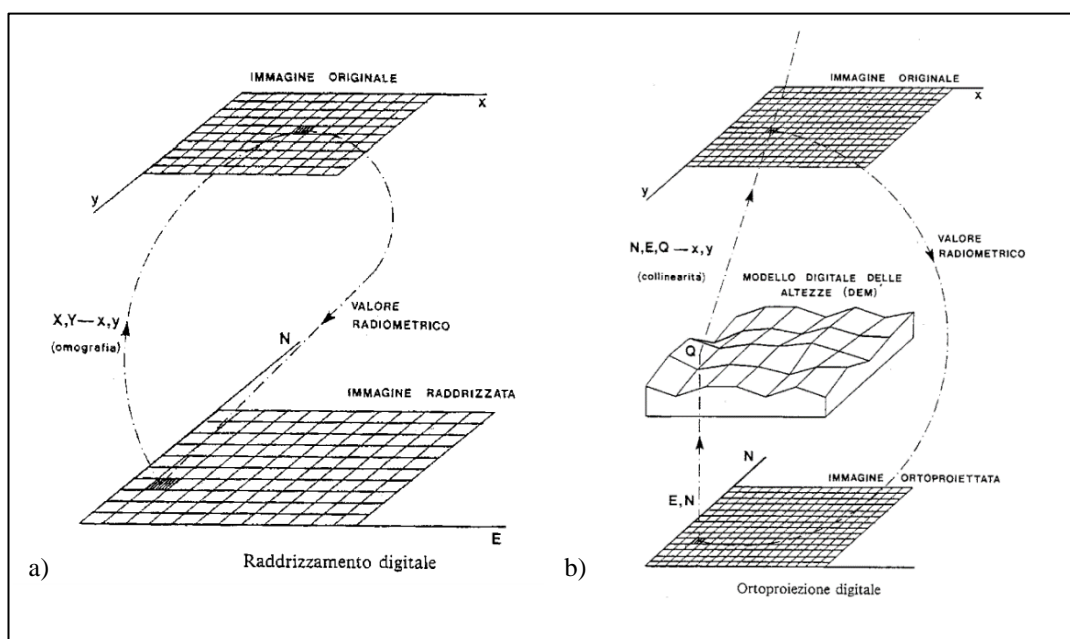


Figura 3.25 - Schema di: a) raddrizzamento digitale, b) ortoproiezione digitale

La procedura di ortoproiezione digitale, avendo a disposizione un'immagine a orientamento esterno noto e di un DEM dell'oggetto, è così sintetizzabile:

- scomposizione dell'area dell'ortoproiezione in pixel di dimensioni opportune;

- determinazione delle coordinate terreno X, Y del baricentro del primo pixel e della quota Z mediante un'interpolazione sul DEM;
- correzione delle coordinate X, Y, Z utilizzando le equazioni di collinearità e determinazione delle sue coordinate relative sull'immagine di partenza,
- assegnazione ad ogni pixel dell'immagine raddrizzata del valore radiometrico dello stesso sull'immagine originale, sfruttando la trasformazione di coordinate al punto precedente.

3.3.2.5 L'aerofotogrammetria da bassa quota

Gli aeromobili a pilotaggio remoto, comunemente detti droni, sono piattaforme volanti senza pilota a bordo, comandati a distanza da una “ground station”.



Figura 3.26 – a) un quadricottero Phantom 4, b) un esacottero Aibotix X6, c) un ala fissa Bat-1

I droni nascono per fini militari ma che trovano svariate applicazioni civili, a partire da tutte le situazioni emergenziali nelle quali sia preferibile l'assenza di un pilota sul mezzo, fino ad arrivare al rilevamento dei Beni Culturali e dei siti archeologici; possono essere suddivisi in:

- droni multirottore, molto simili a piccoli elicotteri perché caratterizzati dalla presenza di uno o più rotori, i più utilizzati sono i quadricotteri e gli esacotteri,
- droni ad ala fissa, simili a piccoli aerei, solitamente muniti di un solo motore, posteriore od anteriore, e di ali.

I droni utilizzati in fotogrammetria vengono dotati di sensori e strumenti utili all'acquisizione delle immagini ed al posizionamento del centro di presa:

- una fotocamera, meglio se collegata al drone per mezzo di un gimbal (un giunto cardanico (o un sistema di giunti) che permette la stabilizzazione della fotocamera su uno o più assi);
- un ricevitore GNSS,
- un sistema inerziale,
- un giroscopio,
- una bussola,
- un barometro.

L'impiego combinato di immagini acquisite da drone e di un programma di elaborazione fotogrammetrica come PhotoScan, che come scritto non richiede ottiche calibrate, consente l'utilizzo di qualsiasi tipo di fotocamera, anche commerciale, purché dotata di un sensore di caratteristiche compatibili con il rilievo da effettuarsi. Dal momento che i droni vengono alimentati da dei pacchetti di batterie, il cui consumo è proporzionale al peso trasportato, spesso si privilegia l'utilizzo di fotocamere leggere, a discapito della maggiore distorsione ottica, che comunque viene quasi completamente risolta dall'utilizzo di software fotogrammetrici digitali

moderni. In ogni caso la durata dei pacchetti di batterie di un drone commerciale, dotato di fotocamera leggera, si attesta intorno a qualche decina di minuti.

La stessa combinazione descritta in precedenza di immagini acquisite da droni ed elaborate con Photoscan o programmi simili, permette di ottenere vari elaborati grafici descrittivi dell'oggetto rilevato, elencati in ordine di produzione:

- modelli per punti (le cosiddette nuvole di punti),
- modelli per superfici, ottenuti per triangolazione dei precedenti, texturizzati,
- modelli digitali del terreno DTM (Digital Terrain Model) e DEM (Digital Elevation Model),
- ortofoto,
- cartografia vettoriale.

A parte l'autonomia di volo limitata, l'utilizzo dei droni in fotogrammetria presenta altri svantaggi, oltre ad una serie di vantaggi, come schematizzato in figura 3.27.

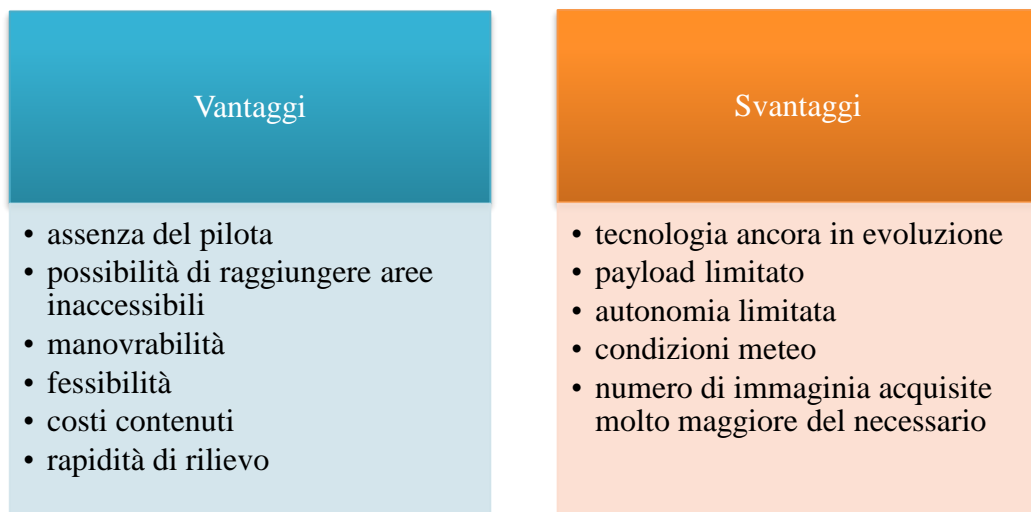


Figura 3.26 - Vantaggi e svantaggi dell'utilizzo dei droni APR

La scelta di utilizzare droni multirottore o ad ala fissa è generalmente legata all'estensione dell'area da rilevare ed alla scala di rappresentazione degli elaborati

finali, come riassunto in figura 3.28. In tutti i casi non elencati si ricorre ancora al rilievo fotogrammetrico da aeromobile tradizionale.

Drone multirottore	Drone ad ala fissa
<ul style="list-style-type: none">• aree da rilevare di dimensioni contenute (indicativamente al di sotto dei 10 ettari)• rappresentazione del rilievo a grande o grandissima scala (1:200 o superiore)	<ul style="list-style-type: none">• aree da rilevare di dimensioni non superiori a qualche decina di ettari• rappresentazione del rilievo a grande scala (indicativamente superiore a 1:1000)

Figura 3.27 - Utilizzo dei vari tipi di drone in base alle caratteristiche del rilievo

Sempre nell'ambito del rilevamento, anche se non più strettamente fotogrammetrico, è possibile utilizzare il drone per acquisire vari tipi di informazioni geometriche e radiometriche, dotandolo di fotocamere termiche o multispettrali o sensori LiDAR leggeri appositamente studiati per i droni.

L'utilizzo dei droni è normato dall'ENAC (Ente Nazionale Aviazione Civile) al pari di altri velivoli, anche se la sua introduzione è recente e quindi suscettibile di rapidi cambiamenti.

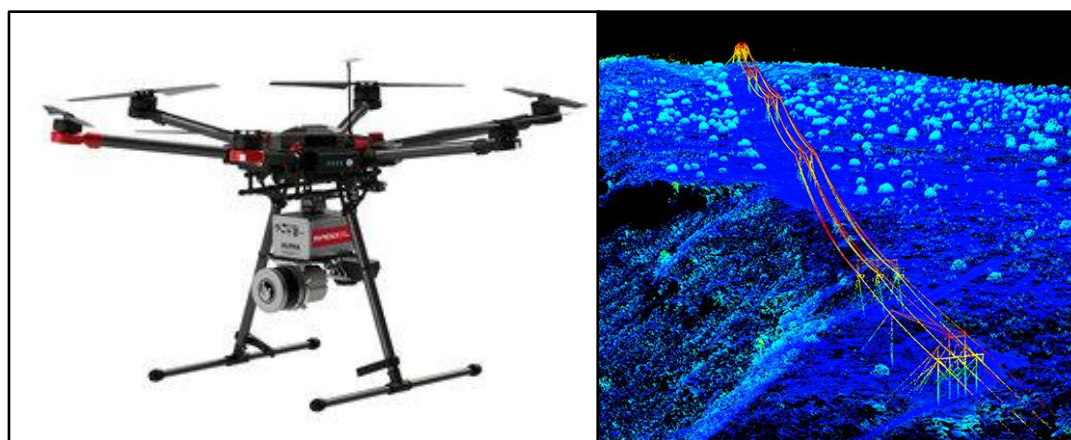


Figura 3.28 - A sinistra Phoenix LiDAR system, a destra nuvola di punti del terreno

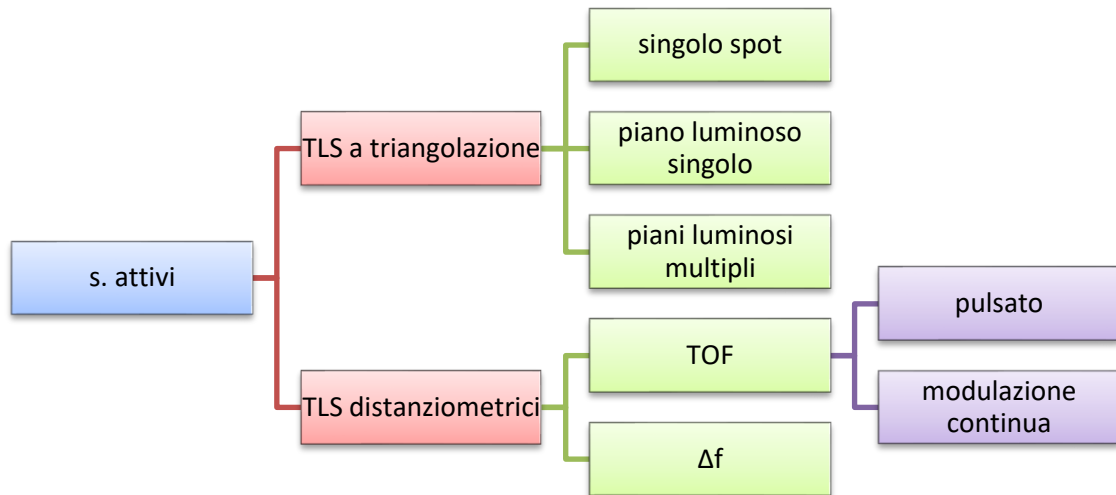


Figura 3.29 - Sensori attivi\

3.4 Sensori 3d attivi

I sensori attivi apportano una codifica alla luce e quindi svolgono un ruolo, appunto, attivo nel processo di misura: ne fanno quindi parte i laser scanner terrestri, le stazioni totali, gli strumenti a proiezione di luce naturale ed altri.

3.4.1 La stazione totale

La stazione totale, così come il teodolite del quale rappresenta l'evoluzione, è uno strumento costruito attorno a tre assi (detti assi principali) che, in condizioni di rettifica, dovrebbero incontrarsi nel punto C, detto *centro dello strumento*:

- il primo asse s, detto l'*asse primario*, deve essere reso verticale con l'ausilio delle livelle sferica e torica presenti sullo strumento,

- il secondo, l'asse *secondario*, dovrebbe risultare perpendicolare all'asse primario,
- il terzo, l'asse di *collimazione*, materializzato dal cannocchiale, dovrebbe essere perpendicolare all'asse secondario. (Barzagli, Pinto - 2014).

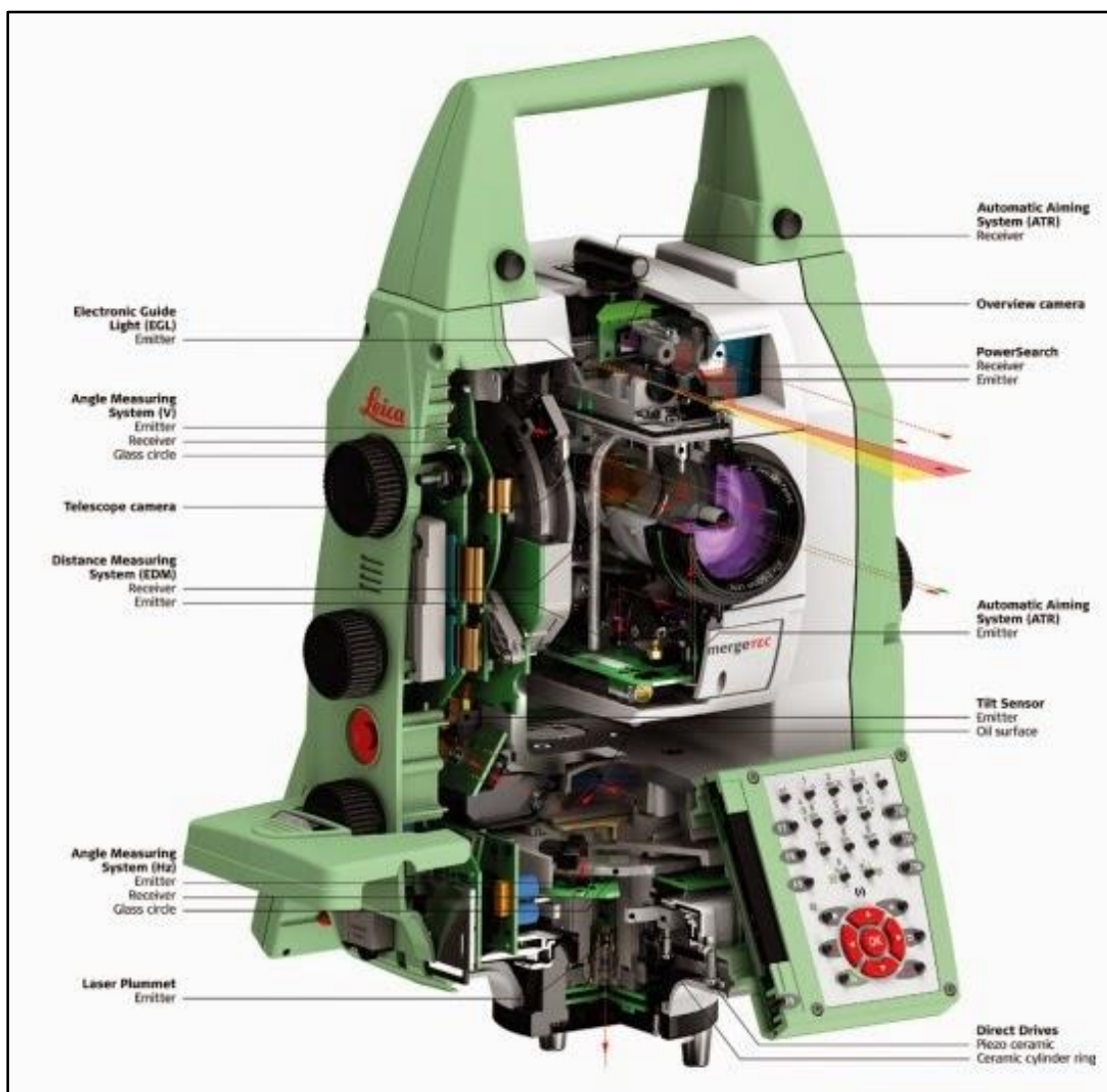


Figura 3.30 - Stazione totale Leica Nova MS 50: schema costruttivo

In entrambi gli strumenti, si possono riconoscere tre elementi principali:

- a) la *base*: contiene il cerchio degli angoli azimutali, che deve risultare centrato ed ortogonale all'asse principale dello strumento; porta la livella sferica, tre viti calanti, che consentono la messa in stazione dello strumento, una ulteriore vite che

permette di vincolare lo strumento ad un pilastrino o ad un treppiede ed il piombino ottico, che permette di vedere nadiralmente in direzione dell'asse principale e quindi la messa in stazione dello strumento in corrispondenza di un vertice materializzato a terra;

- b) l'*alidada*: ruota intorno all'asse principale dello strumento, porta il cannocchiale ed in uno dei suoi 2 bracci è alloggiato il cerchio degli angoli zenitali, che deve risultare centrato ed ortogonale all'asse secondario dello strumento; porta inoltre la livella torica;
- c) il *cannocchiale*: ruota attorno all'asse secondario dello strumento e ne materializza l'asse di collimazione.

La stazione totale si differenzia dal teodolite ottico-meccanico per la presenza di:

- un distanziometro elettronico (EDM, *Electronic Distance Measurement*) che permette di misurare la distanza compresa tra il centro dello strumento ed un punto utilizzando le onde elettromagnetiche emesse dallo strumento;
- due cerchi codificati in sostituzione di quelli graduati: le misure angolari si ottengono a partire dalla misura della intensità di energia passante fra i tratti della graduazione dei cerchi e quelli di un opportuno micrometro che funge da indice e provvede alla interpolazione;
- un microprocessore che permette la memorizzazione delle misure e delle loro accuratezze, la correzione degli errori strumentali del teodolite ed alcune elaborazioni (distanza ridotta all'orizzonte, determinazione del punto di stazione, calcolo delle coordinate polari e cartesiane dei punti rilevati, calcolo delle coordinate dei vertici di una poligonale).

Dal punto di vista delle grandezze misurate, la differenza tra teodolite e stazione totale è che il primo misura degli angoli azimutali (orizzontali) e zenitali (verticali), mentre la seconda, oltre agli angoli, misura la distanza compresa tra il suo centro ed un generico punto. Entrambi gli strumenti, definito un appropriato sistema di riferimento tridimensionale, permettono la determinazione delle coordinate dei punti misurati: ma mentre la stazione totale riesce ad ottenerle per singole misure, il teodolite necessita

dell'applicazione dei tradizionali metodi di misura, basati sulla geometria e sulla trigonometria (intersezione dirette ed inverse).

Per quanto appena scritto è evidente che l'utilizzo della stazione totale, rispetto a quello di un teodolite ottico-meccanico di analoga precisione sulla misura angolare, permette una riduzione dei tempi di esecuzione dei rilievi ed un aumento dell'accuratezza dei risultati.

La misura di distanza si può ottenere applicando due diversi principi: la misura di fase o la misura ad impulsi. Tradizionalmente il primo metodo garantiva rispetto al secondo maggiori accuratezze e rapidità di acquisizione, a discapito della portata di misura.

3.4.1.1 Il raggio laser

I raggi laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) usati negli strumenti topografici sono radiazioni elettromagnetiche coerenti, comprese nell'intervallo di lunghezze d'onda tra 180 nm e 1 mm, essenzialmente generate con il fenomeno dell'emissione stimolata.

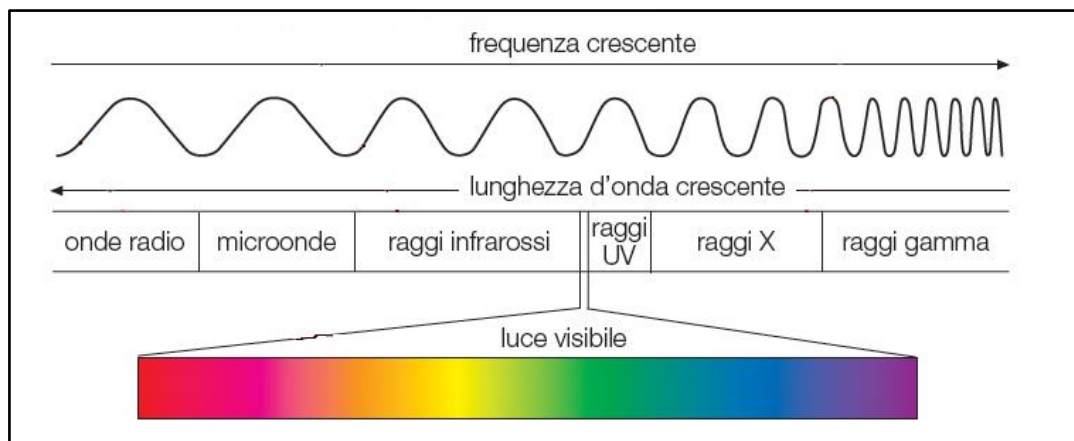


Figura 3.31 - Spettro elettromagnetico, lunghezza d'onda e frequenza

Le caratteristiche fondamentali di una radiazione elettromagnetica sono la lunghezza d'onda λ , la frequenza ν ; detta c la velocità della luce, vale la relazione:

$$c = \lambda \cdot \nu$$

Un raggio laser, per essere definito tale, deve godere di tre proprietà:

1. monocromaticità: deve quindi essere formato da una sola frequenza di luce,
2. coerenza spaziale o unidirezionalità: deve propagarsi anche a grande distanza con estrema direzionalità,
3. coerenza temporale: deve essere costituito da onde della medesima frequenza e fase, che si sommano potendo essere così acquisire grande intensità e potenza.

Inoltre, deve avere un'elevata brillantezza, definita come la potenza emessa dall'unità di superficie sotto un angolo solido unitario d'osservazione Ω , per potere concentrare una notevole potenza in uno spazio ridottissimo.

Nella realtà è molto difficile riuscire ad ottenere un raggio laser perfettamente unidirezionale: sono sempre presenti una leggera divergenza dei fasci del raggio ed una perdita di nitidezza ai bordi, come conseguenza la zona di incidenza del raggio su di una superficie non è un punto ma una piccola area.

Le lunghezze d'onda utilizzabili nei raggi laser sono:

- Ultravioletta (0.2-0.4 μm)
- Visibile (0.4-0.7 μm)
- NIR (0.7-1.3 μm)

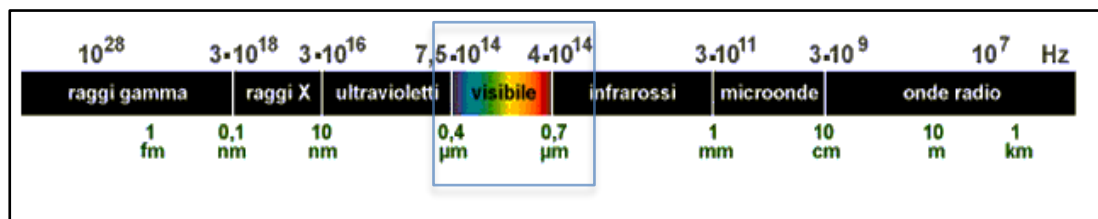


Figura 3.32 – Lunghezze d'onda utilizzate per il laser

La lunghezza d'onda dell'emissione dipende dal materiale attivo utilizzato, che può essere gassoso (p.e. anidride carbonica, miscela di elio e neon), liquido (p.e. solventi, come metanolo, etanolo o glicole etilenico, ai quali sono aggiunti coloranti chimici

come cumarina, rodamina e fluoresceina), solido (p.e. rubino, neodimio, semiconduttori). Il materiale attivo più utilizzato negli strumenti topografici è un semiconduttore.

La generazione del raggio laser avviene tramite un diodo che fornisce energia a del materiale ottico attivo, che possiede la capacità di emettere radiazioni elettromagnetiche (fotoni) quando attivato, all'interno di una cavità ottica con pareti interne riflettenti ed una zona di uscita semiriflettente. Il raggio così prodotto viene successivamente elaborato e direzionato attraverso una serie di lenti e specchi in modo che acquisisca la posizione, la concentrazione e l'ampiezza desiderate.

Al pari di altre onde elettromagnetiche, il laser può comportare un rischio biologico e pertanto la normativa europea CEI EN 60825 del 2014 introduce una suddivisione in 7 classi:

- Classe 1: il fascio laser è considerato innocuo in qualsiasi condizioni d'uso,
- Classe 1M: il fascio laser è considerato innocuo, a meno che nel caso di utilizzo di strumenti ottici all'interno del fascio,
- Classe 2: il fascio laser può essere potenzialmente pericoloso ma la sua potenza è sufficientemente bassa da consentire, con un'azione di riflesso (per esempio palpebrale) di evitare esposizioni inattese,
- Classe 2M: il fascio laser differisce da quello della classe 2 per il fatto di essere pericoloso nel caso di utilizzo di strumenti ottici all'interno del fascio,
- Classe 3R: la visione diretta del fascio o di sue riflessioni speculari è pericolosa con o senza strumenti ottici,
- Classe 3B: il fascio laser è in grado di danneggiare l'occhio e la pelle nel caso di esposizione,
- Classe 4: sono i laser più potenti e pericolosi, oltre ad avere una potenza tale da causare seri danni ad occhi e pelle anche se il fascio è diffuso, possono costituire un potenziale rischio d'incendio.

Quando una radiazione colpisce la superficie di un corpo, viene in parte assorbita, in parte trasmessa ed in parte riflessa. Si possono definire tre coefficienti adimensionali (variabili tra 0 e 1), che misurano le interazioni tra energia e materia:

- assorbività (α): rapporto tra l'energia assorbita da una superficie e quella incidente,
- riflettanza (ρ): rapporto tra l'energia riflessa da una superficie e quella incidente;
- trasmissività (τ): rapporto tra l'energia trasmessa all'interno di una superficie e quella incidente. (Sgrenzaroli, Vassena, 2007).

Tutte le strumentazioni laser si basano sulla capacità che ha la materia di riflettere una radiazione elettromagnetica legata alle sue caratteristiche intrinseche, come la distanza tra gli atomi che la compongono o il colore o la ruvidità della sua superficie. In figura 3.34 si mostra una classificazione delle superfici sulla base del tipo di riflessione che offrono: si passa dalle superfici riflettenti, a quelle diffondenti, dette di Lambert. A queste è necessario aggiungere le superfici retroriflettenti, nelle quali il raggio riflesso si propaga lungo la stessa direzione di quello incidente: si tratta infatti del principio su cui si basano i prismi utilizzati in topografia.

La riflessione è anche funzione della lunghezza d'onda incidente e dell'angolo di incidenza rispetto alla superficie.

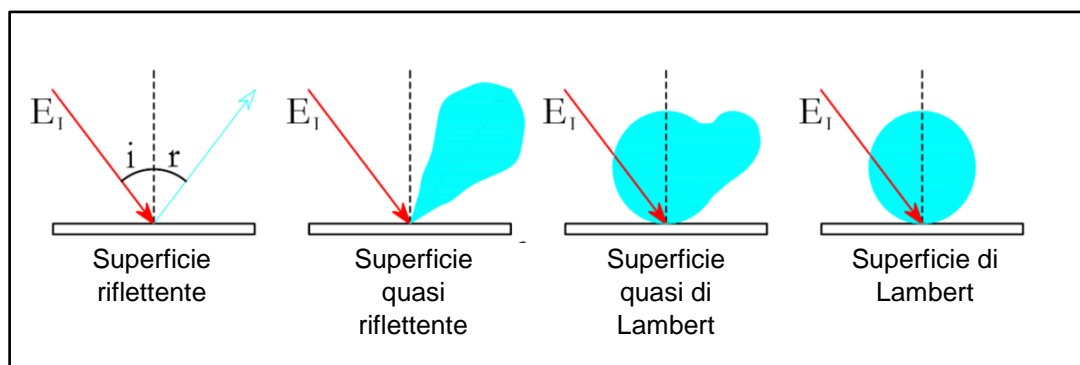


Figura 3.33 - Classificazione delle superfici in base alla riflettanza

3.4.1.2 La misura di distanza basata sulla misura di fase

Gli EDM a misura di fase utilizzano come campione di misura la lunghezza d'onda di un segnale sinusoidale modulato su una portante infrarossa con la tecnica della modulazione di ampiezza: la lunghezza d'onda deve essere contenuta per mantenere concentrata l'energia emessa e riceverne una buona parte di ritorno e deve essere metrica per misurare la fase con precisione.

Il distanziometro emette un fascio di luce infrarossa modulata in ampiezza con legge sinusoidale, il fascio di luce colpisce una superficie che lo rinvia indietro, la luce compie quindi un percorso di andata e ritorno. Un dispositivo interno, chiamato comparatore o discriminatore di fase, permette di confrontare la fase del segnale emesso con quella del segnale riflesso, determinando lo sfasamento angolare $\Delta\lambda$ tra le due sinusoidi.

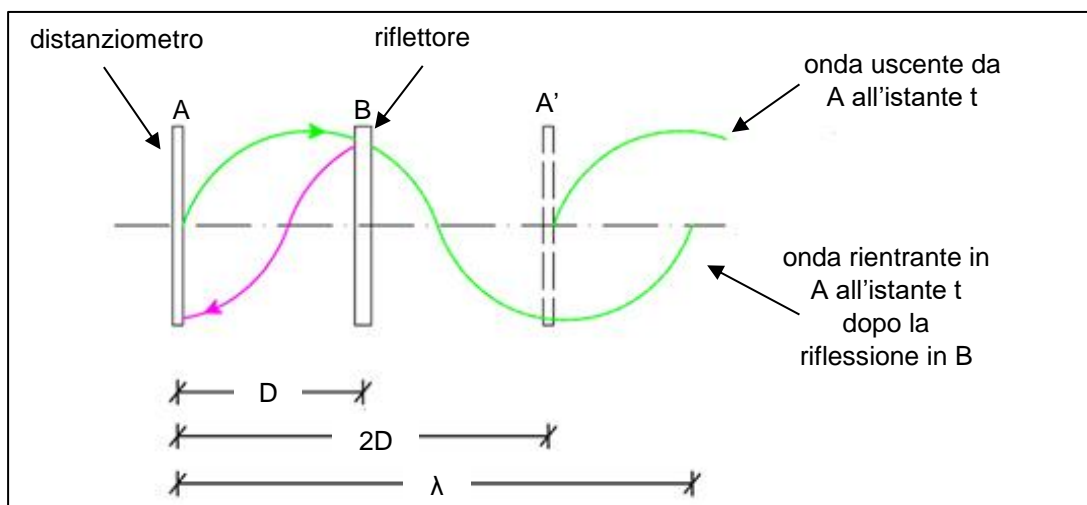


Figura 3.34 - Schema di lettura di distanza basata sulla misura di fase

Nel percorso di andata e ritorno da A a B (pari $2D$, dove D è la loro distanza) risulta quindi compreso un numero intero k di lunghezze d'onda, più una frazione $\Delta\lambda$ di lunghezza d'onda corrispondente allo sfasamento. L'equazione fondamentale dei distanziometri a misura di fase è:

$$2D = k \lambda + \Delta \lambda$$

Il segnale che ritorna allo strumento posto in A è pari a quello emesso un intervallo di tempo Δt prima, legato a D dalla velocità v di propagazione dell'onda nell'aria:

$$\Delta t = \frac{2D}{v}$$

L'ampiezza d'onda è:

$$I(t) = I_0 \sin(\omega(t - \Delta T) + \varphi_0) = I_0 \sin(\omega t + \varphi_0 - \Delta\varphi)$$

Dove T è il periodo dell'onda, φ_0 è la fase iniziale, mentre $\Delta\varphi$ è lo spostamento dell'onda entrante ed uscente all'istante t, definito nel seguente modo:

$$\Delta\varphi = \omega \Delta t$$

Dal momento che:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\lambda = vT$$

Segue che:

$$\Delta\varphi = \omega \Delta t = \frac{2\pi}{T} \frac{2D}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2D$$

Se l'onda emessa ha lunghezza λ maggiore di 2D, vale:

$$\Delta\lambda = 2D \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda$$

In generale se $\lambda < 2D$:

$$2D = k\lambda + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda$$

Da cui:

$$D = k \frac{\lambda}{2} + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \frac{\lambda}{2}$$

La quantità effettivamente misurata è $\Delta\varphi$, ossia lo sfasamento tra l'onda uscente e quella che ritorna allo strumento, con precisioni dell'ordine di 10^{-3} di 2π . (Barzaghi, Pinto, 2014)

3.4.1.3 La misura di distanza basata sulla misura ad impulsi

Gli EDM ad impulsi determinano la distanza misurando il tempo di viaggio di un impulso di luce infrarossa nel percorso dallo strumento al riflettore e ritorno.

Il distanziometro ad un certo istante t_i emette un impulso elettromagnetico (costituito da un fascio di luce molto sottile e concentrato), che compie il percorso di andata e ritorno alla velocità di propagazione v nell'atmosfera e nell'istante t_r torna allo strumento.

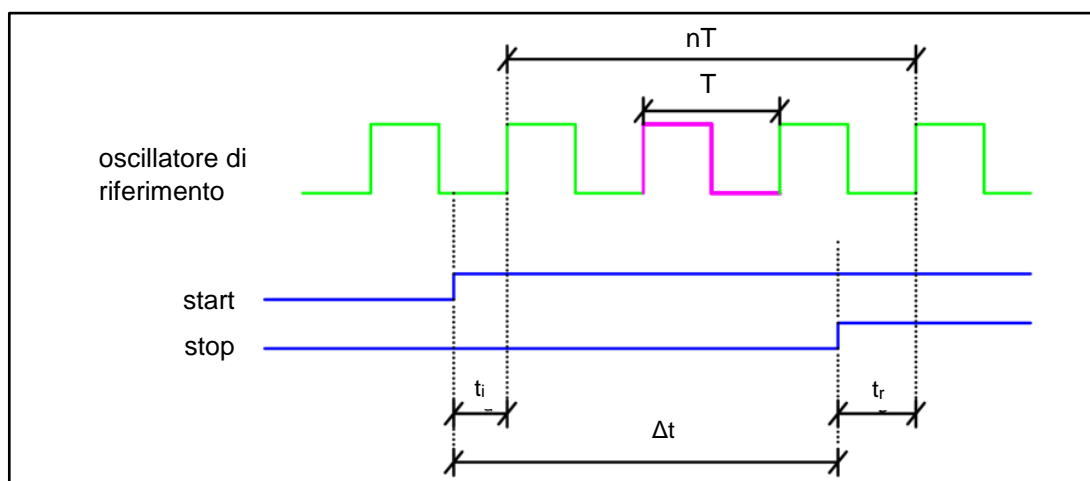


Figura 3.35 - Schema di lettura di distanza basata sulla misura ad impulsi

Ipotizzando che la velocità v sia costante tra il distanziometro e la superficie rilevata e che sia una funzione delle condizioni atmosferiche, la distanza D è proporzionale al tempo $\Delta t = t_r - t_i$ necessario all'impulso a compiere il percorso di andata e ritorno:

$$D = \frac{v \Delta t}{2}$$

L'uso combinato di oscillatori al quarzo compendati con un convertitore tempo-tensione permette di misurare i tempi residui con precisioni dell'ordine di 10^{-12} s, consentendo delle precisioni dell'ordine del millimetro nella determinazione della distanza. Chiamando T il periodo di oscillazione dei riferimenti:

$$\Delta t = kT + t_i - t_f$$

La misura si ottiene mediando i risultati di un elevato numero di impulsi. I distanziometri ad impulsi sono meno precisi di quelli a misura di fase, ma riescono a lavorare anche con un segnale riflesso debole (Barzaghi, Pinto, 2014).

Il un primo momento la lettura della distanza era possibile unicamente rispetto a degli apparati costituiti da specchi convergenti, chiamati prismi; adesso praticamente tutte le stazioni totali hanno l'opzione *mirrorless*, che permette di misurare la distanza rispetto ad una qualsiasi superficie, anche se è tuttora conveniente l'adozione di prismi nei rilevamenti di alta precisione (reti di inquadramento o monitoraggio).

I parametri da considerare nella valutazione di una stazione totale sono:

- precisione della misura angolare (deviazione standard come da ISO-17123-3),
- precisione della misura di distanza (deviazione standard come da ISO-17123-4) con e senza prisma,
- precisione del compensatore biassiale,
- range di misura con prisma e senza prisma.

Sulla base di questi parametri si distinguono due principali famiglie di stazioni totali: gli strumenti da cantiere e gli strumenti di alta precisione. A questi si aggiungono le stazioni totali motorizzate, che sono dotate di sistemi di automazione che permettono agli strumenti la collimazione automatica ai prismi.

3.4.2 I laser scanner terrestri (TLS)

I LiDAR (*Light Detection And Ranging o Laser Imaging Detection And Ranging*) sono strumenti introdotti alla fine del secolo scorso, che hanno completamente rivoluzionato il mondo del rilevamento geometrico. Il maggior aspetto di innovatività consiste nella velocità di acquisizione diretta di considerevoli moli di informazioni geometriche di oggetti complessi. I sensori utilizzati rientrano nella categoria dei sensori ottici attivi, ossia dei sensori che permettono di ottenere direttamente la posizione spaziale della

superficie o del punto rilevato, a volte accoppiata all'informazione del colore, che può essere registrata dal sensore stesso o da una fotocamera digitale esterna ad integrazione dello strumento (Russo, Remondino, Guidi, 2011).

I LiDAR si suddividono in:

- strumenti utilizzati da aeromobile, comunemente chiamati LiDAR,
- strumenti terrestri, ribattezzati *laser scanner terrestri* (nel seguito più brevemente TLS).

Il nome “scanner” nasce dalla modalità di acquisizione dei dati secondo specifici criteri di acquisizione ed organizzazione dei dati raccolti analoghi a quelli degli strumenti di scansione tradizionali, come ad esempio uno scanner piano, ovvero:

- capacità di operare in modo automatico e sistematico,
- velocità elevata di acquisizione (fino a milioni di punti al secondo),
- possibilità di avere accesso ai dati in tempo reale.

Un TLS è dunque uno strumento in grado di acquisire le coordinate spaziali della superficie di un oggetto in modo automatico, sistematico e molto veloce, secondo un principio molto semplice: un raggio laser viene proiettato su un oggetto e ne viene riflesso, dall'analisi del segnale di ritorno si determina la distanza tra lo strumento ed il singolo punto. È in questa seconda fase che si differenziano i diversi principi operativi dei diversi TLS:

- TLS distanziometrici (*ranging scanners*): l'emettitore e il ricevitore d'onda coincidono, per determinare la distanza tra centro dello strumento ed oggetto si utilizza uno dei due criteri già descritti per gli EDM delle stazioni totali;
- TLS a tempo di volo, detti brevemente TOF (Time Of Flight): la distanza viene determinata misurando il tempo impiegato dal segnale emesso a ritornare al sensore,
- TLS a differenza di fase: la distanza deriva dalla comparazione della fase del segnale emesso con quella del segnale ricevuto;
- TLS a triangolazione (*triangulation scanners*): l'emettitore e il ricevitore d'onda non sono più coincidenti, ma sono posti ad una distanza nota, le coordinate dei

punti vengono ricavate applicando la trigonometria. viene ricavata per triangolazione.

In tutti i casi il prodotto di una scansione laser, chiamato *nuvola di punti*, è sostanzialmente un modello per punti metrico e in scala reale (1:1) delle superfici acquisite dal TLS da ogni singola posizione di scansione: la misura di tempo o la differenza di fase vengono convertite in misure di distanza tra il punto di emissione del segnale laser (posizione dello strumento laser) e gli oggetti colpiti dal raggio laser. La conoscenza degli angoli azimutali e zenitali del sensore laser al momento dell'emissione del raggio, consente di rappresentare i punti misurati nello spazio secondo una griglia ordinata, determinata dal regolare spostamento del raggio laser (grazie alla rotazione di specchi interni allo strumento o alla rotazione dello strumento stesso) che scansiona in modo regolare l'oggetto da rilevare. Naturalmente minore è la dimensione della maglia della griglia di scansione e maggiore è il grado di dettaglio della nuvola di punti dell'oggetto rilevato (Sgrenzaroli, Vassena, 2007).

Oltre alle coordinate spaziali, alcuni scanner determinano per ogni punto acquisito anche il valore della riflettanza, ossia la proporzione di luce incidente che una data superficie è in grado di riflettere (paragrafo 3.4.1).

Nel caso di TLS muniti di fotocamere integrata, per ciascun punto rilevato è possibile acquisire oltre alle informazioni geometriche ed al dato di riflettanza, il cosiddetto dato colore, ossia le informazioni radiometriche tradotte in una terna di numeri secondo lo schema RGB. In alternativa è possibile attribuire il dato colore alle nuvole di punti in un momento successivo a quello del rilievo, a partire da fotografie opportunamente orientate e proiettate sulla nuvola di punti.

3.4.2.1 I TLS a triangolazione

I TLS basati sul principio della triangolazione sono strumenti che, per la determinazione della posizione di punti appartenenti ad un oggetto, sfruttano il

principio, molto utilizzato in topografia tradizionale, dell'intersezione in avanti.

Questi strumenti sono costituiti da un raggio laser che, deflesso secondo un passo incrementale mediante uno specchio rotante, colpisce l'oggetto secondo una griglia regolare; il segnale riflesso (punto o linea laser) viene catturato da uno o più sensori di immagine a stato solido CCD o CMOS, posti ad una distanza prefissata e calibrata b , detta base, rispetto al punto da cui il laser viene inviato all'oggetto; il laser ed il sensore sono contenuti in un'unica unità chiamata "scanner head".

Il sistema garantisce un'accuratezza nella descrizione della superficie estremamente elevata se la base b è dello stesso ordine di grandezza della distanza tra strumento e superficie dell'oggetto da rilevare, quindi viene impiegato per oggetti di piccole dimensioni.

Le caratteristiche tecniche dei TLS a triangolazione sono:

- accuratezza ed incertezza di misura: tra 1/1000 ed 1/10 millimetri
- velocità di acquisizione: tra 100.000 e 2.000.000 punti al secondo
- portata massima: tra 2 e 10 metri.

Questi sistemi ancor oggi dimostrano notevoli vantaggi: l'intera lunghezza del sensore CCD può essere ottimizzata per un certo volume di misure, consentendo elevate risoluzione ed accuratezza. Sono però sistemi molto costosi, poiché necessitano di dispositivi meccanici e componenti specializzati.

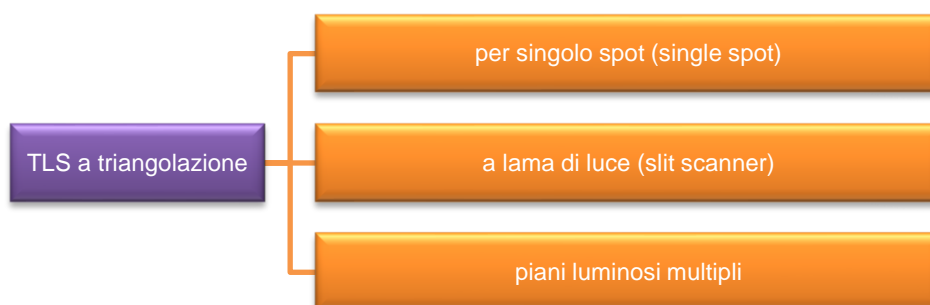


Figura 3.36 - TLS a triangolazione

Il TLS è opportunamente calibrato, quindi sono noti:

- la base b tra sorgente luminosa e sensore,
- la distanza focale f , ossia la distanza tra la lente ed il piano di ripresa del sensore su cui si ferma la traccia luminosa,
- l'angolo α , definito dal raggio uscente dalla sorgente e la normale al piano dello strumento.

Sono invece incogniti:

- l'angolo β , definito dal raggio riflesso dalla superficie e la normale al piano dello strumento,
- la distanza verticale p , compresa tra il centro ottico del sensore ed il punto sul quale effettivamente si stampa l'immagine del punto rilevato,
- la componente verticale z_P della distanza tra la sorgente luminosa e il generico punto oggetto P,
- la componente orizzontale x_P della distanza tra la sorgente luminosa e il generico punto oggetto P.

L'angolo β viene ricavata in modo indiretto, nota la focale f della lente, dalla misura di p direttamente sul sensore CCD o CMOS:

$$\beta = \arctg \frac{f}{p}$$

Le coordinate di P si ottengono invece dalla geometria dei triangoli:

$$z_A = \frac{b}{\tan \alpha + \tan \beta}$$

$$x_A = z_A \cdot \tan \alpha = \frac{b}{1 + \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}}$$

A parità di angolo di proiezione α , la differenza di profondità viene rilevata, all'atto della lettura sul sensore di posizione, con una correzione $\Delta\beta$ sul valore dell'angolo β .

3.4.2.1.2 TLS a triangolazione a lama di luce

La relazione che lega il TLS a singolo spot e quello a lama di luce è molto intuibile schematizzandolo come il rapporto tra una misura puntuale ad una misura lineare

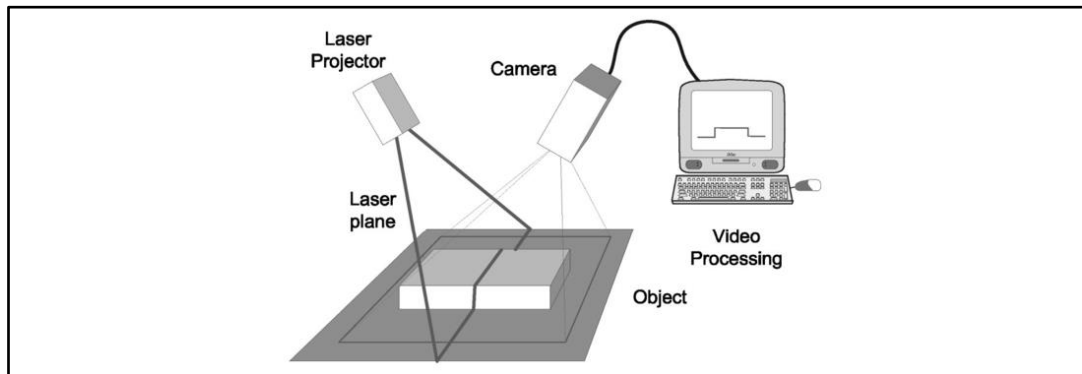


Figura 3.38 - Funzionamento dei TLS a lama di luce

Il funzionamento dei TLS a lama di luce parte dal principio analitico e geometrico applicato sul singolo punto nel TLS a singolo spot, ma lo estende ad una serie di punti allineati che, visti nel loro insieme, definiscono un segmento luminoso: ogni punto dell'insieme visualizzato sul sensore CCD bidimensionale viene isolato dagli altri, trattato come visto al paragrafo precedente, se ne determinano le coordinate e infine, raccogliendoli tutti nuovamente insieme, si ottengono le coordinate complessive del segmento illuminato.

In questo tipo di TLS il laser viene riflesso tramite uno specchietto rotante od una lente cilindrica, generando così una lama di luce che viene proiettata sull'oggetto da rilevare, dando origine ad un segmento luminoso che si adatta alla forma della superficie investita.

Definendo β_x e β_y rispettivamente le componenti orizzontale e verticale dell'angolo β , valgono le relazioni:

$$\tan \beta_x = \frac{p_x}{f}$$

$$\tan \beta_y = \frac{p_y}{f}$$

Le coordinate tridimensionali dei punti del profilo si ottengono:

$$z_s = \frac{b}{\tan \alpha + \tan \beta}$$

$$x_s = z_s \tan \alpha = \frac{b}{1 + \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}}$$

$$y_s = z_s \tan \gamma = \frac{b}{\frac{\tan \alpha}{\tan \gamma} + \frac{\tan \beta}{\tan \gamma}}$$

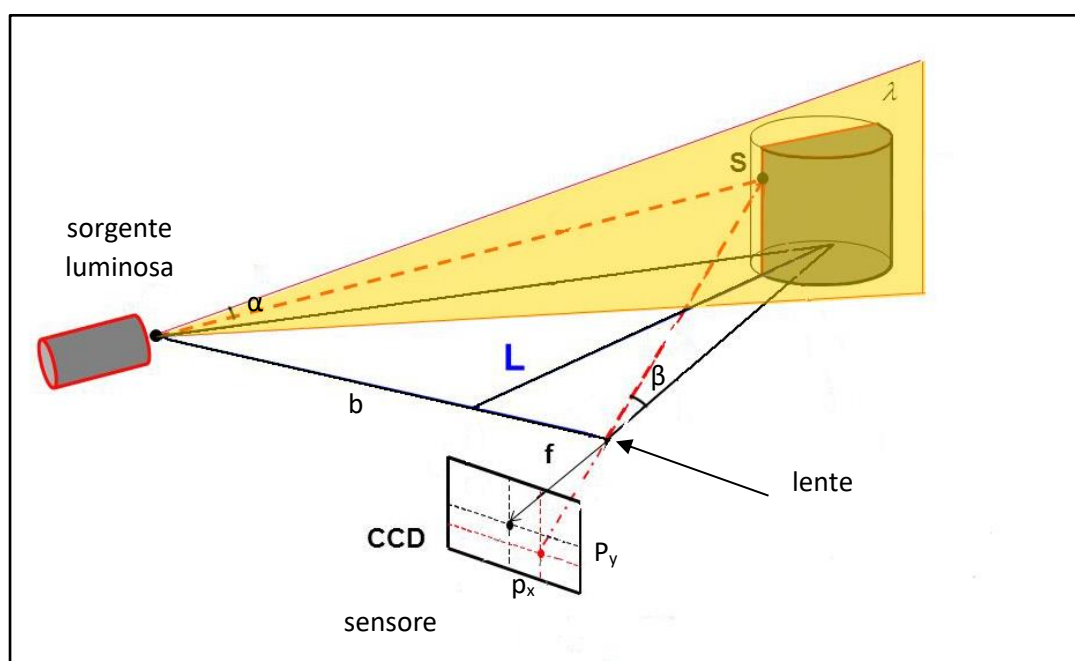


Figura 3.39 - Schema di TLS a triangolazione a lama di luce

3.4.2.1.3 TLS a triangolazione a piani luminosi multipli

La relazione che lega il TLS a piani luminosi ai due precedenti è ancora una volta schematizzabile con il rapporto tra una misura areale, rispetto alla lineare del TLS a lama di luce ed a quella puntuale del TLS a singolo spot. I TLS a lama di luce le misure effettuano il rilievo di una superficie tramite la proiezione di raggi laser che, intersecandola, definiscono dei segmenti luminosi; la copertura totale della superficie

dell'oggetto da rilevare si ottiene traslando il segmento luminoso, rispetto a piani paralleli tutti a giacitura orizzontale, ma a quota variabile. I TLS a piani luminosi, invece, grazie ad un apposito sensore che genera luce strutturata, proiettano contemporaneamente tutte le lame di luce necessarie a rilevare l'oggetto ed acquisiscono l'immagine della superficie investita dai pattern luminosi tramite delle camere digitali.

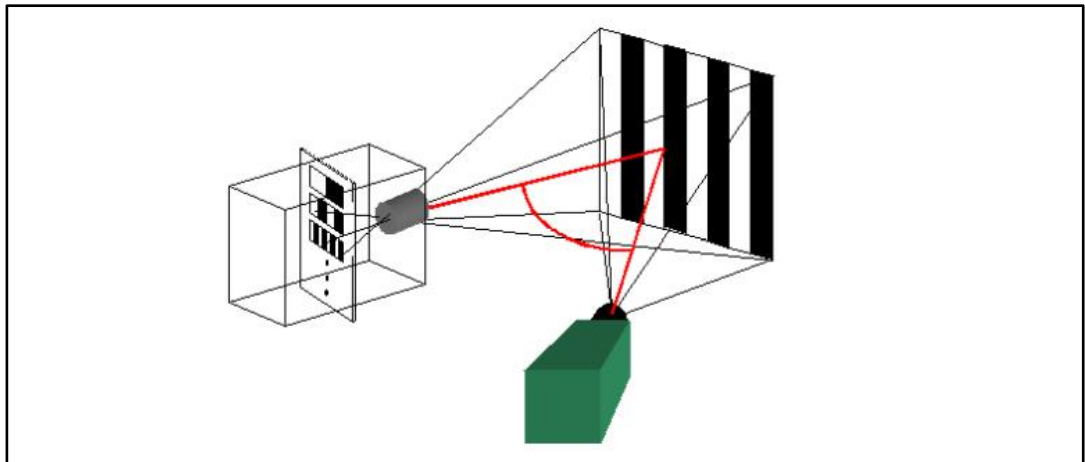


Figura 3.40 - Funzionamento del TLS a piani luminosi multipli

Da un punto di vista geometrico i TLS a piani luminosi ricalcano i precedenti: è anche in questo caso presente il disaccoppiamento tra la camera e la sorgente, che definiscono la base calibrata di tantissimi triangoli aventi per vertice uno dei punti della superficie. Si differenziano invece da essi perché non proiettano più sull'oggetto un punto o una linea luminosa, bensì una sequenza di luce di forme codificate, ad esempio un grigliato di linee alternate chiare e scure; il proiettore può essere visto come l'equivalente della seconda camera in un approccio stereoscopico in fotogrammetria.

I sistemi più diffusi si possono distinguere in base al tipo di proiezione:

- a frange codificate, in cui immagini a codice binario multiplo sono create con risoluzione crescente; tutte le linee proiettate sono numerate ed i numeri sono codificati con il cosiddetto “*Gray – Code*”, in cui linee adiacenti differiscono

esattamente per un bit (0/1): una linea chiara rappresenta uno “0” e una scura un “1”; tutte le linee sono proiettate in mezzo secondo;

- a tecnica di Moirè: due coppie di reticoli sono proiettati per modulare spazialmente l’ampiezza della luce proiettata; la camera demodula le frange sovrapposte le cui fasi sono proporzionali alla distanza dall’oggetto (Girelli).

È possibile estrarre coordinate in un sistema a proiezione di pattern anche mediante tecniche che prevedano forme differenti dalle come ad esempio, la proiezione di cerchi in bianco e nero, strisce verticali colorate, pattern pseudo-casuali o griglie rettangolari, ma per semplicità espositiva si procede con il sistema a frange codificate.

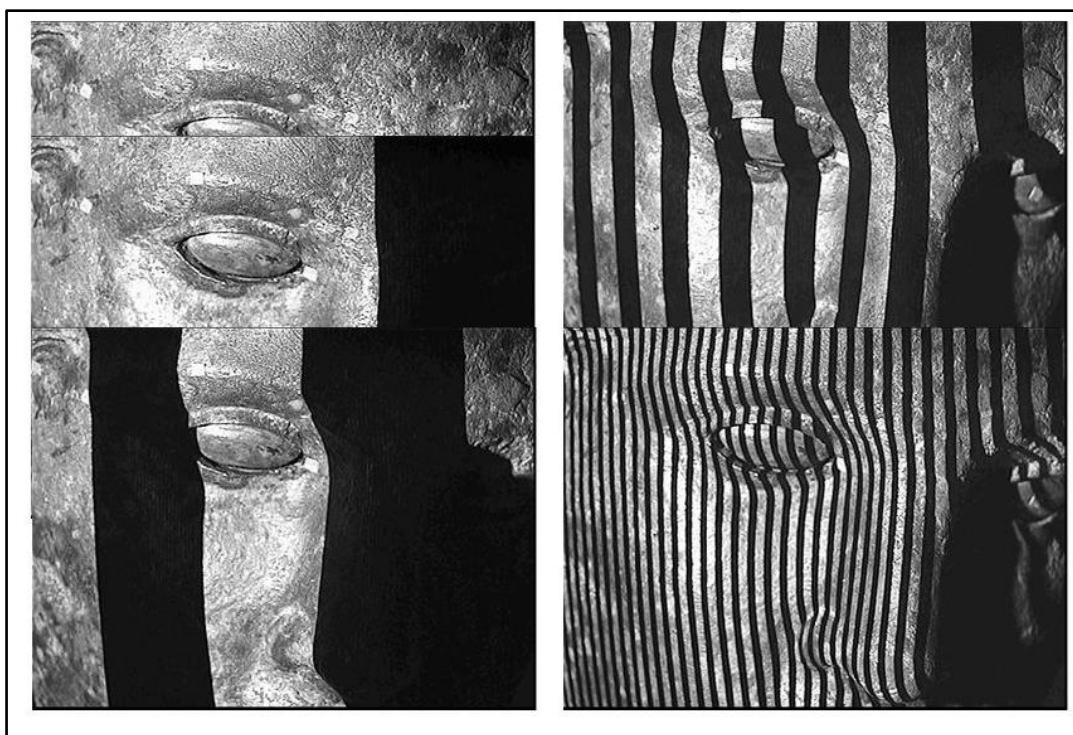


Figura 3.41 – Schema dell’applicazione del codice

Nel caso dunque del sistema a frange codificate, supponendo che l’immagine prodotta dal proiettore sia una sequenza di strisce verticali alternate bianche e nere, l’immagine vista dalla camera sarà una sequenza di strisce se la proiezione avviene

su di una superficie piana, viceversa se questa ha un andamento non piano le strisce tenderanno a distorci assecondando la forma della superficie. Ogni transizione tra bianco e nero ha la funzione della lama di luce dei TLS visti al paragrafo precedente; maggiori sono tali transizioni e maggiore è la risoluzione del rilievo, ma se le strisce fossero troppo sottili si rischierebbe di non potere più identificare la singola frangia.

Proprio per risolvere questa ambiguità, i TLS di questo tipo proiettano più pattern in sequenza, secondo un opportuno codice:

- proiezione di un primo pattern ad una sola transizione bianco-nero, acquisizione e memorizzazione da parte della camera digitale dell'immagine dell'oggetto su cui si proietta il pattern,
- proiezione di un secondo pattern nero-bianco-nero-bianco, con analogia acquisizione e memorizzazione dell'immagine,
- proiezione di un terzo pattern nero-bianco-nero-bianco-nero-bianco-nero-bianco analogia acquisizione e memorizzazione dell'immagine,
- altre proiezioni, acquisizioni e memorizzazioni raddoppiando progressivamente il numero di strisce verticali, fino a raggiungere la massima frequenza di alternanza nero-bianco (Guidi, Russo, Beraldin, 2010).

Il numero di immagini relative ai diversi livelli di raffittimento del pattern variano in base alla qualità dell'ottica ed alla risoluzione del sensore.

Esistono una serie di variante dei tre tipi di TLS a triangolazione precedentemente esposti, tra queste si citano:

- i TLS a singolo spot muniti di un sistema a doppia camera, che acquisiscono misure in numero sovrabbondante, consentendo un aumento dell'accuratezza della misura e l'eliminazione del fenomeno di riflessione speculare generale dal sole su superfici altamente riflettenti;
- i TLS a singolo spot dotati di una sola camera CCD ma con l'inserimento, vicino al diaframma, di una maschera con due aperture, in modo che la camera CCD misuri una doppia immagine di ogni singola linea luminosa,

- i TLS “sincronizzati”, costruiti in modo che l’emettitore laser ed il fotodiode ricevitore siano sincronizzati, mentre la lunghezza focale delle lenti varia in base alla profondità di campo che si vuole ottenere; questi strumenti consentono maggiori precisioni nella misura della componente di profondità, che combina un campo di azione più ampio, pur rimanendo piccola la base.

3.4.2.2 I TLS distanziometrici

I TLS distanziometrici sono così chiamati perché basano la procedura di rilievo sulla misura della distanza fra il centro dello strumento e il primo punto appartenente alla superficie da rilevare che il raggio incontra, questa, insieme alla conoscenza dei due angoli di emissione del raggio, consente di determinare per coordinate polari la posizione del punto in questione.



Figura 3.42 - TLS distanziometrici

La grande differenza tra questi strumenti ed i precedenti consiste nel fatto che nei TLS distanziometrici la sorgente luminosa e il sensore di acquisizione del raggio riflesso sono coassiali: la posizione dei punti non viene quindi più determinata applicando i principi della geometria, ma misurando le coordinate polari dei punti. Vengono quindi a cadere le limitazioni sulla dimensione degli oggetti del rilievo e sulla distanza di acquisizione viste nella trattazione dei TLS a triangolazione, ma diventa possibile rilevare oggetti di dimensioni decisamente maggiori: i TLS distanziometrici trovano infatti applicazioni nel campo dell’Ingegneria,

dell'Architettura e soprattutto dei Beni Culturali, visto che possono descrivere compiutamente gli elementi decorativi oltre a quelli strutturali.

A questa famiglia appartengono due tipologie di strumenti, che operano secondo principi di funzionamento molto diversi: gli scanner che operano con differenza di fase e con tempo di volo.

3.4.2.2.1 TLS a tempo di volo

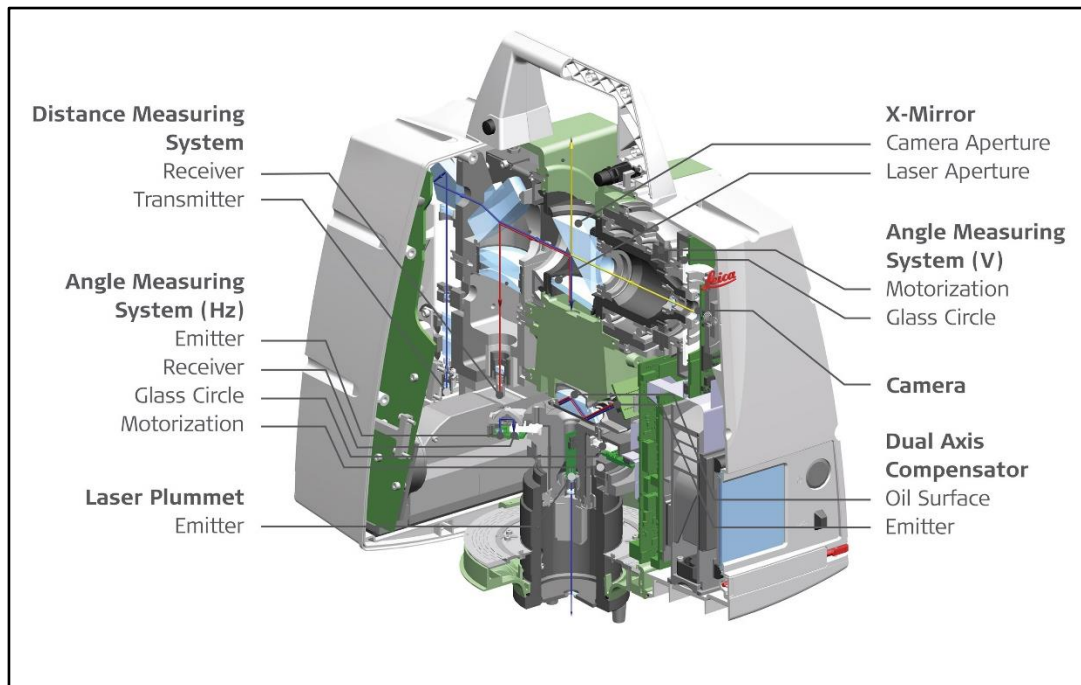


Figura 3.43 - Leica C10: schema costruttivo

Lo schema costruttivo di un laser scanner a tempo di volo, o più brevemente TOF, acronimo di Time Of Flight, prevede i seguenti componenti:

- una sorgente laser, che emette impulsi di luce infrarossa, indirizzati e convogliati da una lente di emissione,
- un sistema di specchi rotanti, necessari per deflettere il raggio,

- una lente di ricezione che capta la parte del segnale di eco del raggio laser riflesso dalla superficie di impatto dell'oggetto,
- un diodo ricevitore chiamato "a valanche" (a valanga, poiché indica un processo cumulativo in cui un elettrone che si muove velocemente ne genera rapidamente degli altri per collisione) che produce un segnale di ricezione elettrico,
- un orologio stabilizzato al quarzo, che misura l'intervallo di tempo tra segnale emesso e riflesso.

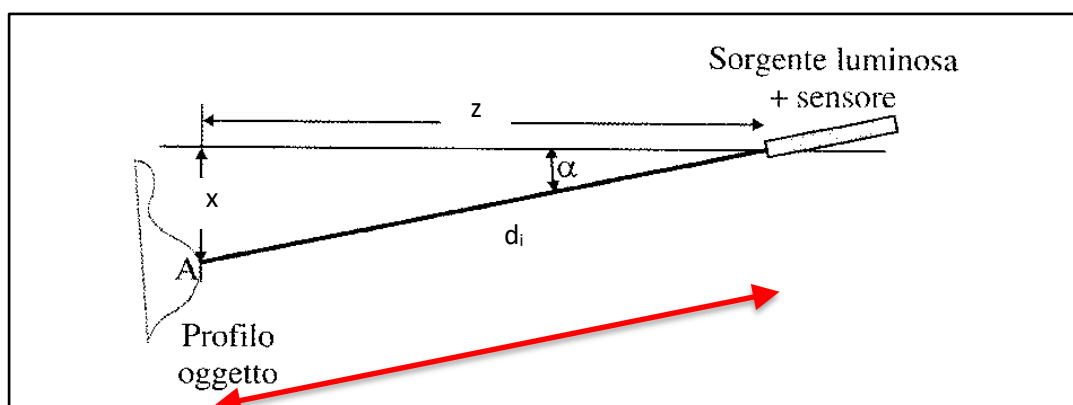


Figura 3.44 - Determinazione delle coordinate polari nel LiDAR a TOF

Proprio la misura del tempo intercorso tra il segnale emesso e quello riflesso, detta c la velocità di propagazione della luce nel vuoto, permette di determinare la distanza compresa tra il centro dello strumento e ciascun punto appartenente all'oggetto da rilevare:

$$d = \frac{c}{2} \cdot TOF$$

Una volta determinata la distanza inclinata d_i , noto l'angolo α definito dalla direzione del raggio rispetto al piano orizzontale passante per il centro strumentale, si possono determinare le coordinate x e z di un qualsiasi punto A della superficie dell'oggetto:

$$x_A = d_i \sin \alpha$$

$$z_A = d_i \cos \alpha$$

Chiamando β la componente dell'angolo solido fuori dal piano dello schema di figura 3.44, la coordinata y deriva da:

$$y_A = d_i \sin \beta$$

Il principio utilizzato per la determinazione delle distanze è il medesimo visto al paragrafo 3.4.1.3 applicato nei distanziometri ad impulso.

Per la determinazione o, come è più corretto scrivere, per la stima, del tempo di volo TOF vengono utilizzati due criteri, uno di stima diretto, chiamato PW (“Pulsed Wave”), l'altro di stima indiretta, detto CW (“Continuous Wave”). Il primo è il metodo classico di stima del TOF, applicato anche negli EDM ad impulsi, il secondo invece è di introduzione più recente e, in modo forse un po' schematico lo si può descrivere come l'integrazione dei metodi di lettura ad impulsi e a differenza di fase, dato che applica il principio della differenza di fase al calcolo del TOF.

3.4.2.2.1.1 Metodo diretto di stima del TOF

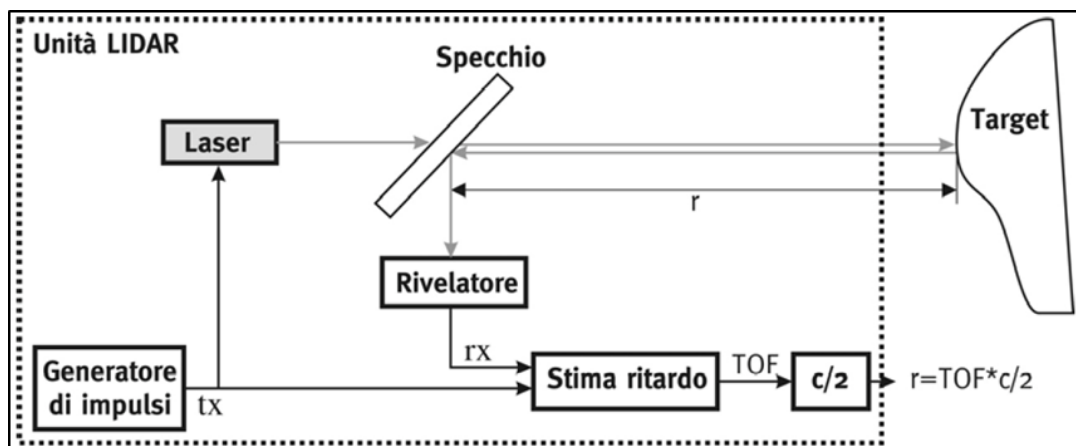


Figura 3.45 - Schema del sistema di stima diretta del TOF

Il metodo di stima del TOF si definisce PW quando l'impulso viene inviato alla superficie da misurare ed il rivelatore converte l'intensità luminosa, registrata, in segnale elettrico direttamente proporzionale ad essa.

Si applica la formula già vista al paragrafo precedente, in cui la distanza d che separa la sorgente dalla superficie è funzione della velocità della luce nel vuoto c e dell'intervallo di tempo che impiega l'impulso luminoso per andare e tornare dalla superficie da rilevare:

$$d = \frac{c}{2} \cdot TOF$$

Chiaramente la stima della distanza d è strettamente dipendente da quella del TOF : se quest'ultimo è affetto da imprecisioni, anche la stima della distanza non potrà che risultare imprecisa.

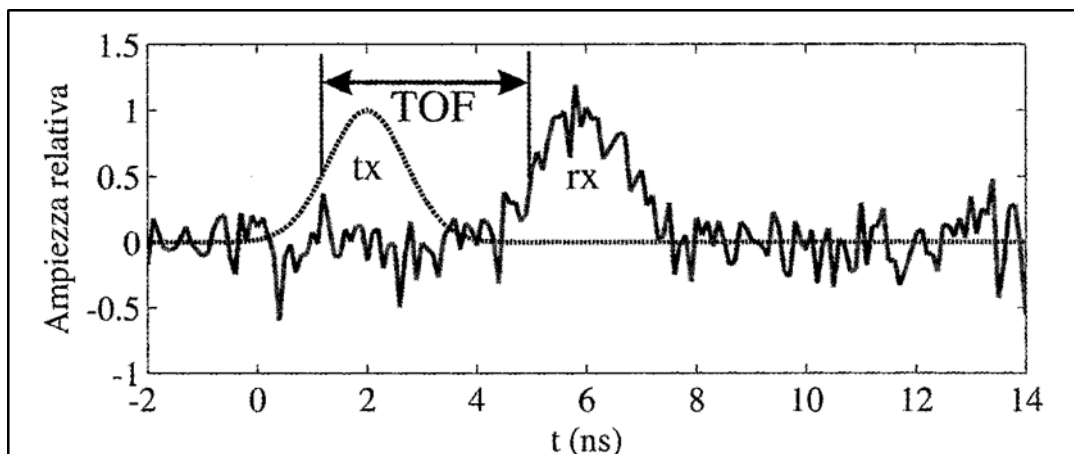


Figura 3.46 – Stima diretta del TOF

Tali imprecisioni sono ascrivibili a cause ottiche ed elettroniche, le prime delle quali generano il fenomeno sinteticamente chiamato “rumore” del segnale di ritorno.

Va tenuto presente che, dopo la riflessione su una qualsiasi superficie (a meno che non si tratti di uno specchio teorico), la luce laser presenta dei contributi di luce sovrapposti, generati dai percorsi multipli caratterizzati da lunghezze d'onda diverse: il risultato è un'interferenza tra i diversi contributi di luce, che conduce ad irregolarità di intensità luminosa, che rende meno accurata la sua lettura. Le cause elettroniche

consistono invece nella difficoltà di definire, per mezzo di un contatore, il momento di emissione del segnale e quello di ricezione del segnale riflesso: quindi nello stabilire il momento di attivazione dato dall'impulso trasmesso tx ed il momento di stop dato dall'impulso ricevuto rx. Questo secondo istante viene fissato al superamento dell'impulso con intensità pari al 50% del massimo segnale, il comando di conseguenza si considera valido quando il segnale supera questa soglia.

3.4.2.2.1.2 Metodo indiretto di stima del TOF: modulazione AM

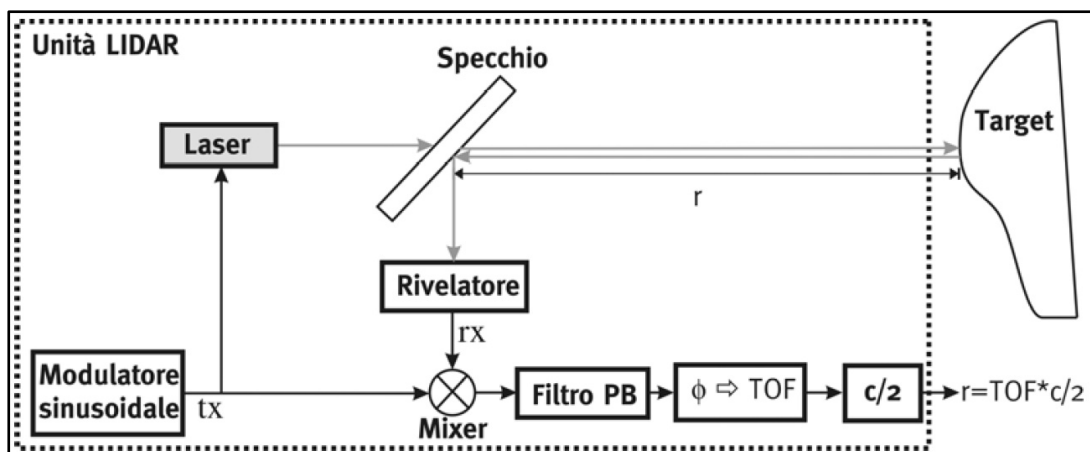


Figura 3.47 - Schema del sistema di stima indiretta del TOF

Il metodo di stima del TOF si definisce CW quando l'invio del segnale luminoso sfrutta una radiazione continua, modulata in intensità; la stima del ritardo avviene tramite la codifica del segnale luminoso che a sua volta consente la valutazione dello sfasamento. La modulazione si può ottenere lavorando sull'ampiezza dell'onda (*Amplitude Modulation, AM*) o sulla sua frequenza (*Frequency Modulation FM*).

Nel primo caso la modulazione prevede di mantenere fissa la frequenza della radiazione e modularla nel tempo in ampiezza: si sfrutta quindi la combinazione moltiplicativa di due sinusoidi sfasate, per ottenere una risposta proporzionale all'entità dello sfasamento. Il segnale si ripete periodicamente e quindi lo sfasamento non dovrebbe oltrepassare un ciclo di sinusoidi, ma nel momento in cui la fase

dovesse superare tale limite si introdurrebbe un'ambiguità pari ad un periodo di ciclo. In conclusione, più la periodicità è breve, ovvero maggiore è la frequenza di modulazione, tanto minore è la distanza oltre la quale si produce un'ambiguità; anche la risoluzione spaziale risulta peraltro essere tanto migliore quanto più ampia la frequenza di modulazione.

Nel secondo caso la modulazione interviene sulla frequenza, che subisce un lineare aumento all'interno di un certo intervallo di valori, e la ricezione si basa su una demodulazione coerente.

Questi sistemi, recentemente perfezionati, hanno permesso di introdurre una nuova categoria di strumenti che, anche se inadatti a lavorare su lunghe distanze, consentono nelle misure comprese tra i 2 e i 20 metri di ottenere incertezze di misura inferiori al millimetro.

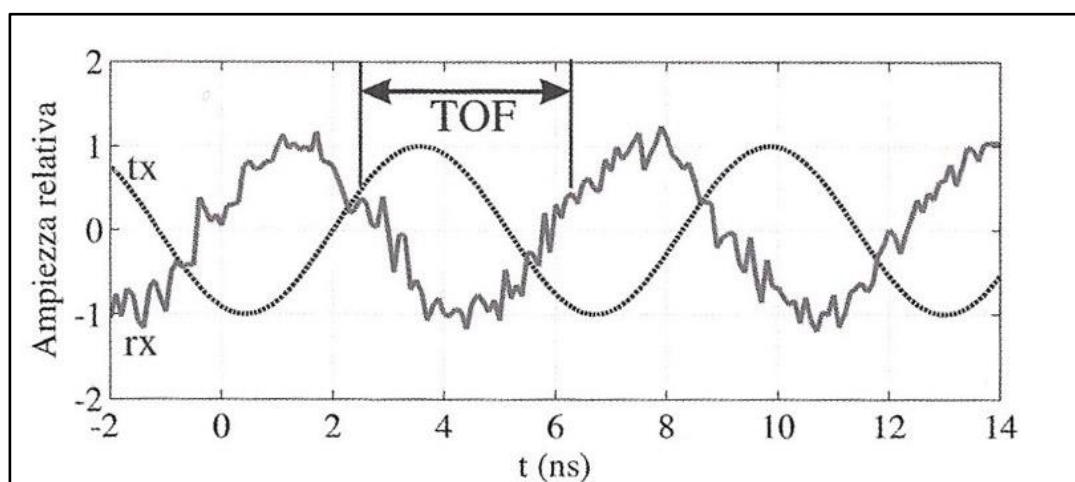


Figura 3.48 – Stima indiretta del TOF

3.4.2.2.2 TLS a misura di fase

I TLS a differenza (o misura) di fase applicano il medesimo criterio degli EDM a misura di fase visti al paragrafo 3.4.1.2. Il raggio laser, modulato con un'onda armonica, viene deflesso da un sistema di specchi e proiettato su una superficie da rilevare, questa lo riflette verso lo strumento ed il raggio viene ricevuto da un sensore: la distanza tra il centro dello strumento ed il punto di riflessione viene determinato

mediante un circuito che misura la differenza di fase tra l'impulso emesso e quello riflesso e, di conseguenza, il tempo necessario all'onda per percorrere la distanza da calcolare.

Se $\Delta\varphi$ è la differenza di fase, f_{AM} la modulazione di frequenza e c la velocità della luce nel vuoto, la distanza d è determinata dalla relazione:

$$z = \frac{c}{4\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{f_{AM}}$$

L'elaborazione di questo dato è piuttosto complessa, motivo per cui il tempo richiesto per il calcolo è maggiore rispetto ad altri sistemi, ma consente di ottenere precisioni migliori. Un limite di questo principio è la necessità di avere un segnale di ritorno che sia dotato di adeguata potenza, con conseguente riduzione della portata dello strumento e la possibilità di avere, all'interno della griglia di acquisizione, un numero consistente di punti non definiti (Girelli, 2007).

3.4.2.3 Le caratteristiche dei TLS

A conclusione della descrizione dei vari laser scanner, si prova a dare una visione complessiva delle principali caratteristiche tecniche di questi strumenti.

- Accuratezza

Consiste nell'errore esistente tra una misura ed il suo reale valore. Deriva dalla combinazione delle accuratezze ottenute nella misura angolare e di distanza e non è indifferente alle caratteristiche intrinseche all'oggetto rilevato e dalle condizioni ambientali:

- accuratezza angolare: l'impulso laser viene direzionato sull'oggetto mediante la rotazione di specchi deflettori o di prismi, la conoscenza degli angoli di rotazione nelle due direzioni, orizzontale e verticale, associata alla misura di range, permette di risalire alla posizione del punto nello spazio. Ad ogni deviazione angolare, intesa come rotazione degli

specchi affetta da errore, corrisponderà un errore di posizionamento: il punto, nel caso degli scanner distanziometrici, risulterà essere appartenente alla sfera di raggio pari alla distanza oggetto-ricevitore, ma si troverà in un punto della superficie non corrispondente a quello reale;

- accuratezza nella misura delle distanze: nei laser scanner distanziometrici, nei quali la distanza compresa tra oggetto e ricevitore viene determinata mediante il principio del TOF oppure mediante le differenze di fase, l'accuratezza varia in modo lineare rispetto alla distanza e con valori massimi legati al tipo di strumento. Negli scanner a triangolazione invece l'accuratezza diminuisce con il quadrato della distanza scanner-oggetto, secondo un andamento di tipo parabolico, con la curvatura della parabola crescente al diminuire della base di triangolazione (base che, per ragioni pratico-costruttive deve comunque restare contenuta in poche decine di centimetri).

- Risoluzione

Si tratta della capacità di un laser scanner di rilevare e rappresentare oggetti di dimensioni minime, ovvero la densità massima della nuvola di punti. Tecnicamente sono due le caratteristiche che concorrono alla determinazione della risoluzione:

- il minimo incremento angolare possibile degli organi di direzione (specchi, prismi, parti meccaniche);
- le dimensioni dello spot laser.

Un ridotto passo angolare permette di contenere le distanze tra i punti della nuvola e le dimensioni contenute dello spot permettono di determinarne con minore ambiguità il suo centro. Questi due aspetti devono essere considerati insieme: sarebbe infatti inutile ridurre il valore del minimo incremento angolare se poi lo spot laser avesse dimensioni tali da confondere i due centri successivi.

- Portata

Consiste nella distanza massima a cui il sensore può effettuare la misura di distanza. Gli scanner al momento presenti in commercio hanno portate comprese tra alcune decine di centimetri e varie centinaia di metri; il valore massimo raggiungibile dipende dalle caratteristiche del segnale emesso, dalla direzione con cui il raggio laser colpisce la superficie dell'oggetto, ma soprattutto dalle caratteristiche di riflettività della superficie. Materiali con elevato potere radio-assorbente e superfici molto inclinate, riducono l'intensità del segnale di ritorno allo strumento, limitandone la portata. Conviene sempre tenere presente che all'aumentare della distanza di scansione diminuiscono la risoluzione nel rilievo delle superfici e l'accuratezza nella determinazione delle posizioni dei punti.

- Caratteristiche del segnale laser

Le caratteristiche del segnale emesso dallo strumento (generalmente laser nelle lunghezze d'onda dell'infrarosso vicino o del colore verde) possono subire disturbi ed interferenze in presenza di sorgenti luminose artificiali, luce solare ed altre radiazioni luminose prodotte dal riflesso di oggetti vicini, mentre non vengono influenzate da sorgenti radio di alcuna frequenza. Altre situazioni che possono influire sulle caratteristiche dell'impulso laser sono:

- caratteristiche di riflettività del materiale: materiali con elevate capacità radio-assorbenti, o materiali che sono attraversati dal segnale luminoso limitano le misure di range;
- condizioni d'umidità della superficie;
- condizioni ambientali: un elevato grado d'umidità nell'atmosfera causa una forte dispersione del segnale e la sua conseguente riduzione d'intensità;
- costante dielettrica del materiale;

- materiali con caratteristiche di assorbimento in alcune lunghezze d'onda possono risultare di difficile misurabilità con strumenti laser che lavorino in tali lunghezze d'onda.
- Campo visivo
Coincide con la quota parte di spazio tridimensionale che viene acquisita in modo automatico in un'unica scansione.
Rispetto a questa caratteristica si possono individuare tre tipi di strumenti:
 - camera scanner: hanno un campo visivo limitato, paragonabile a quello di una fotocamera, infatti l'intervallo angolare di scansione è limitato, sia sul piano orizzontale che verticale. Questo tipo di scanner è pratico per utilizzi legati al rilevamento ambientale, e quindi per scansioni di superfici situate a lunga distanza.;
 - panorama scanner: hanno un campo visivo quasi sferico, limitato unicamente dalla base dello strumento. La quasi totale copertura del campo visivo rende questo tipo di strumento molto adatto alle scansioni di interni di edifici, di gallerie;
 - scanner intermedi tra i precedenti.

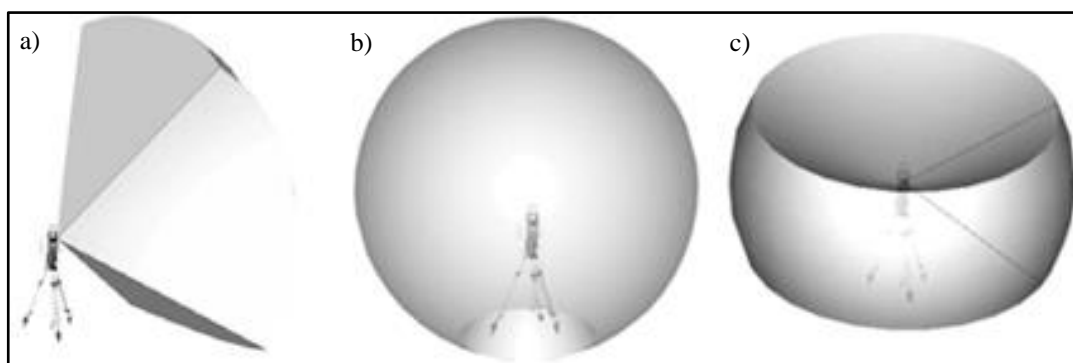


Figura 3.49 – a) Camera scanner, b) Panorama scanner, c) scanner intermedio

- Velocità di acquisizione
La durata di una scansione può variare da alcuni secondi ad alcune decine di minuti, dipende dai seguenti fattori:
 - campo visivo di acquisizione,

- passo angolare,
 - principio di misura del range (tempo di volo, differenza di fase, triangolazione),
 - distanza dell'oggetto,
 - velocità dei sistemi meccanico-ottici di puntamento e deflessione.
- Dotazione di camere digitali interne od esterne



Figura 3.50 - Un TLS Riegl con fotocamera integrata e un sistema fotografico Istar per la produzione di fotografie sferiche

L'acquisizione delle prese fotografiche, necessarie per la realizzazione della nuvola di punti colorata e del modello triangolato mappato con la texture, può avvenire in tre modi differenti.:

- fotocamera interna allo scanner: l'immagine digitale viene acquisita dal CCD interno allo strumento, contemporaneamente alla scansione. Generalmente, in questi casi, l'immagine acquisita presenta una qualità piuttosto bassa, a causa della limitatezza dell'apparecchiatura

fotografica;

- fotocamera esterna ma integrata al sistema laser scanner: viene montata una fotocamera calibrata in modo solidale alla testa dello scanner e viene comandata dallo stesso software di gestione;
- fotocamera esterna utilizzata direttamente dall'operatore: si rende necessario un software che riesca a proiettare la foto, creando un'immagine sferica che possa essere messa in correlazione con i punti acquisiti in ciascuna scansione.

- Peso e facilità di trasporto

La praticità e la semplicità di trasporto dello strumento, oltre al suo peso risultano essere fattori determinanti nel caso si debbano realizzare scansioni di zone difficilmente raggiungibili con adeguati mezzi di trasporto. Le principali caratteristiche di cui tener conto sono:

- peso e dimensioni dello strumento;
- resistenza ad urti e vibrazioni che possono verificarsi durante il trasporto;
- qualità della custodia fornita a corredo dell'apparecchiatura;
- possibilità di utilizzare dispositivi di protezione dello strumento quando posto in stazione.

- Software di acquisizione e gestione dei dati laser scanner

I moderni TLS sono dotati di uno schermo di interfaccia e/o un tablet esterno sul quale si installano delle applicazioni dedicate, in modo da potere comandare, programmare e verificare l'avanzamento dei lavori. In precedenza, le medesime funzioni erano svolte da un PC collegato via cavo allo strumento. In tutti i casi, alcune sono le caratteristiche che rendono fruibile il software di acquisizione e gestione dei dati:

- interfaccia intuitiva,
- facile consultazione del menù,
- disponibilità di una preview delle scansioni,
- visualizzazione della stima del tempo di scansione,

- possibilità di lavorare contemporaneamente su finestre di presa a differente risoluzione,
- opzione di acquisizione automatica dei target. (Sgrenzaroli, Vassena, 2007)

3.4.2.4 Applicazioni dei TLS

Il campo di applicazione dei TLS è molto vario e in continua evoluzione: si passa dal controllo di qualità nella meccanica di precisione al rilievo dei Beni Culturali, passando per l'Architettura, l'Ingegneria Civile ed Industriale e la Reverse Engineering. Per ciascuno di questi settori è stato messo a punto un sistema in grado di rispondere al meglio alle finalità del rilevamento, alle richieste in materia di restituzione e gestione del dato metrico ed alle condizioni di lavoro. Esistono scanner statici e scanner dinamici, forse il più famoso è il sistema Pegasus di Leica, un sistema da installare su vari mezzi di trasporto in grado di effettuare il rilevamento tridimensionale in movimento. Esistono scanner fissi e scanner mobili. Esistono scanner che utilizzano un braccio meccanico per registrare la posizione del sensore durante la scansione ed altri che si servono di guide magnetiche (magnetic trackers) per consentire il movimento dello scanner all'interno delle guide stesse.

I TLS a singolo spot sono utilizzati in settori industriali ove sia richiesta elevata produttività associata ad elevata precisione; sono stati presentati dei sistemi che indicano precisioni nominali fino a 2,25 μm e velocità di acquisizione fino a 5 milioni di punti tridimensionali al secondo.

I TLS a lama di luce sono di solito montati su di un piatto traslabile proprio perché acquisiscono l'intero profilo, hanno velocità di acquisizione più contenute degli scanner a single spot e trovano applicazione nel rilievo del l'intero corpo umano per misure antropometriche.

I TLS a piani luminosi multipli consentono di acquisire un'immagine 3D completa senza la necessità di un apparato complesso, ma a parità di profondità forniscono un'accuratezza inferiore rispetto agli altri TLS a triangolazione (Girelli, 2007).

Ma certamente i TLS distanziometrici sono gli strumenti più versatili, che permettono di adattarsi a un maggior numero di contesti di rilevamento.

3.4.2.5 Applicazioni dei TLS ai Beni Archeologici

I TLS si prestano molto bene al rilevamento dei Beni Culturali, perché riescono in modo automatico e rapido ad acquisire la geometria, la morfologia e la colorimetria di oggetti di dimensioni molto variabili: si passa dai piccoli manufatti rilevati con i TLS e triangolazione, ai grandi palazzi acquisiti con i TLS distanziometrici.

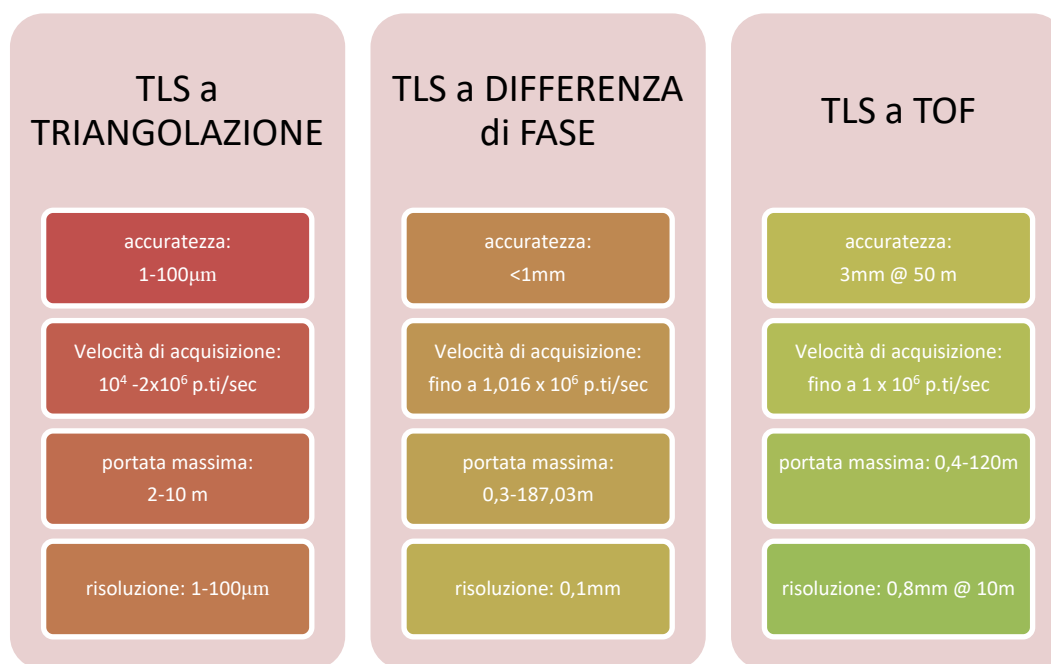


Figura 3.51 - Caratteristiche dei TLS usati in Archeologia

Lo stesso può dirsi per il sottoinsieme dei Beni Archeologici, che per loro stessa natura presentano una elevata multiscalarità, ossia la possibilità di passare dalle scale di rappresentazione proprie dell'architettura (1:100-1:200) alle scale di rappresentazione 1:2-1:5.

3.4.2.6 Metodologia di allineamento delle nuvole di punti

Per completare la descrizione dei TLS bisogna introdurre il tema dell'allineamento delle nuvole di punti: molto raramente una sola scansione permette di raccogliere tutte le informazioni geometriche e morfologiche utili a descrivere l'oggetto del rilevamento, ma ne occorrono molteplici, acquisite da vari punti di stazione, ognuno caratterizzato da un punto di vista differente e limitato, la cui somma deve permettere la copertura completa dell'oggetto. Ad ogni punto di scansione corrisponde almeno una nuvola di punti caratterizzata da un sistema di riferimento locale proprio, avente origine coincidente con il centro strumentale ed assi orientati secondo dei criteri propri di ogni strumento (in presenza di un compensatore biassiale l'asse z è sostanzialmente coincidente con la verticale, normalmente l'asse x è diretto come l'asse di collimazione in fase di inizializzazione dello strumento e l'asse y completa la terna destrorsa). Dunque, è necessario applicare una procedura chiamata di allineamento o registrazione, che permetta la fusione di tutte le singole nuvole di punti, dando luogo ad una nuvola di punti complessiva, inquadrata in un unico sistema di riferimento da definirsi.

Nei primi laser scanner l'operazione di allineamento avveniva scegliendo una nuvola da utilizzare come riferimento (nuvola fissa) e rototraslando tutte le altre (nuvole mobili) nel suo sistema di riferimento; la rototraslazione è una trasformazione a sei parametri, determinabili quindi a partire dalla conoscenza delle coordinate di almeno tre punti naturali o meglio di appositi target in ciascuna nuvola. Questo primo tipo di allineamento presupponeva delle operazioni in fase di rilevamento, ossia la materializzazione dei target e la loro scansione secondo una procedura che ne

permettesse il riconoscimento automatico durante la seconda fase, quella di trattamento dei dati. L'allineamento così effettuato occupava una percentuale importante del tempo dedicato sia alla fase di campagna, sia a quella di trattamento dei dati, quindi si sono studiati dei sistemi più automatici, che si esauriscono, o quasi, in uno solo di questi due momenti:

- allineamento in post-elaborazione: a sequenze di nuvole di punti caratterizzate da una sovrapposizione tra nuvole successive di almeno il 30%, è possibile applicare degli algoritmi di allineamento automatico, demandando così in corpo della procedura di allineamento alla fase di trattamento del dato in laboratorio,
- allineamento diretto, ossia contestuale al rilievo: l'inserimento all'interno dei TLS di una serie di apparati e sensori di natura topografica e l'implementazione del software di gestione dello strumento, permette di acquisire delle nuvole di punti già inserite nel sistema di riferimento finale, quindi non necessitando di ulteriori procedure di registrazione.

Tra i vari algoritmi di allineamento automatico, ci si sofferma solamente a descrivere i più diffusi oltre che i primi sviluppati.

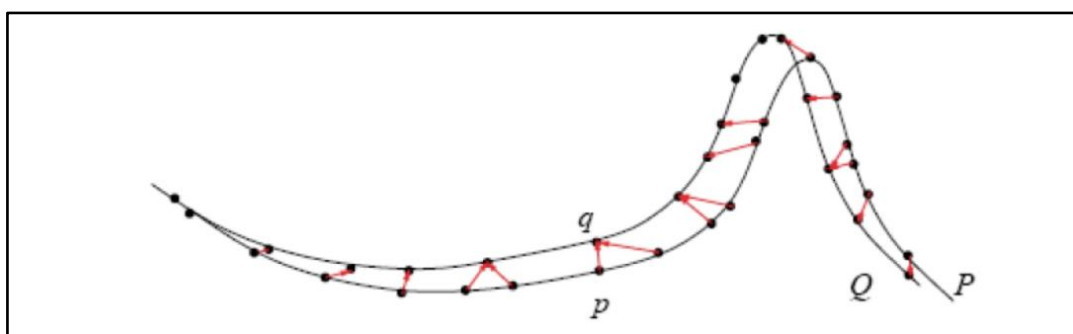


Figura 3.52 – Metodo punto-punto. (Girelli, 2007)

L'algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP), sviluppato negli anni '90 da Besl e da McKay, rappresenta una delle prime risposte all'esigenza dell'allineamento automatico e rientra nei metodi detti punto-punto (point to point). Considerata una

coppia di nuvole, l'ICP applica in modo iterativo una rototraslazione rigida nello spazio ad una delle due nuvole (nuvola mobile), affinché si sovrapponga all'altra (nuvola fissa) nel miglior modo possibile, ovvero applicando il criterio dei minimi quadrati alle distanze tra punti corrispondenti sulle due nuvole (un punto della nuvola fissa e quello più vicino appartenente alla nuvola mobile).

Per ogni punto della nuvola mobile vengono ricercati, all'interno della nuvola fissa, i punti contenuti all'interno di una sfera di un certo raggio (multiplo di un parametro introdotto dall'utente, normalmente fissato al doppio della distanza media tra i punti della nuvola) e di questi viene tenuto il più vicino, che sarà considerato il punto corrispondente (closest point); sommati i quadrati delle distanze relative, si ottiene il valore che sarà poi quello da minimizzare muovendo con delle rototraslazioni rigide la nuvola che si è scelta mobile. E' altamente improbabile che l'allineamento vada a buon fine al primo tentativo e quindi si succedono varie iterazioni successive (riducendo successivamente il raggio della sfera di ricerca) fino a quando la variazione della matrice di rototraslazione tra due iterazioni successive è minore di una certa percentuale. Le coppie di punti corrispondenti che si sono formate sono quelle all'interno della zona di sovrapposizione e in questo modo sono automaticamente esclusi tutti quei punti delle nuvole che non devono prendere parte al processo (punti di rumore o più generalmente fuori dalla zona di sovrapposizione).

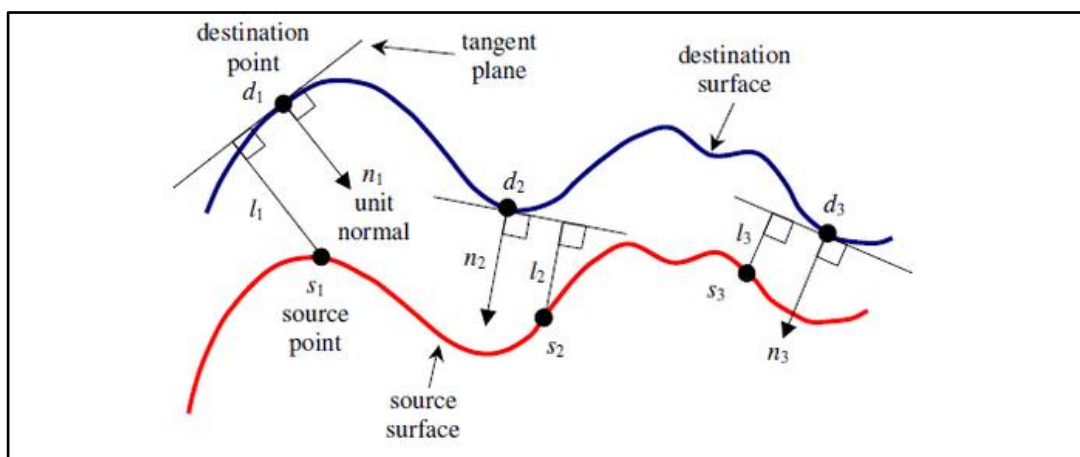


Figura 3.53 – Metodo punto-piano

Gli algoritmi punto-piano hanno un approccio molto simile, ad eccezione per le geometrie utilizzate: minimizzano infatti non più le distanze tra punti, ma quelle tra i punti di una nuvola ed i piani di best-fit passanti per i punti dell'altra.

Ad ogni punto della nuvola mobile viene associato un certo numero di punti appartenenti alla fissa, ottenuti scegliendoli tra quelli più vicini alla normale uscente dal punto della nuvola mobile; questi vengono quindi utilizzati per fare un best-fit, ossia per trovare un piano che meglio li approssimi, secondo il criterio dei minimi quadrati, così che ad ogni punto della nuvola mobile venga associato un piano sulla nuvola fissa. (Girelli, 2007)

Le varie evoluzioni degli algoritmi originali prevedono la possibilità di non procedere all'allineamento per coppie di nuvole, ma di effettuare un allineamento globale di tutte le nuvole insieme, ridistribuendo e minimizzando così l'errore residuo di registrazione fra tutte le scansioni.

Una consistente riduzione dei tempi di allineamento è ottenibile anche eseguendo le scansioni direttamente da vertici di coordinate note. Affinché questo sia possibile è necessario che i TLS siano dotati di compensatori biassiali e di sistemi di centramento, oltre che di software di natura topografica che permettano di impostare le coordinate dei punti di stazione e di quelli di orientamento, nonché di misurare dei punti avanti. Questi strumenti permettono, contestualmente al rilievo, di realizzare delle vere e proprie poligoni aperte e chiuse, con relativa compensazione degli errori di chiusura.

3.4.2.7 Metodologia di rilievo laser scanning di un Bene Archeologico

La scelta di effettuare un rilievo adottando la tecnologia laser scanner presenta dei vantaggi e degli svantaggi e non sempre i primi superano i secondi.

Il TLS è uno strumento topografico automatico, che consente l'acquisizione di una grande quantità di coordinate spaziali in un intervallo di tempo molto contenuto. Al contrario delle altre tecniche di rilevamento, applicando le quali è necessario effettuare in campagna la discretizzazione dell'oggetto da rilevare, tramite l'individuazione degli elementi essenziali per descriverlo, il laser scanner consente di rilevare completamente le geometrie dell'oggetto, rimandando alla fase di elaborazione dei dati in ufficio, l'estrazione degli elementi caratteristici e la riduzione della nuvola di punti ad elementi classificabili e rappresentabili graficamente. Permette il rilevamento di geometrie complesse (elementi architettonici, strutture industriali, fronti rocciosi con geometrie distribuite), limitando le dimenticanze in fase di rilievo e riducendo gli errori dovuti ad una scorretta interpretazione degli elementi fondamentali per la rappresentazione dell'oggetto rilevato. Per contro non permette di fare selezione sui punti rilevati: la nuvola di punti contiene quindi una alta percentuale di informazioni completamente inutili sia perché frutto delle interferenze (passaggio di mezzi o persone durante le scansioni), sia perché ridondanti rispetto alle finalità del rilievo. Ma soprattutto il risultato del rilievo laser scanner è un database metrico che può essere consultato in momenti successivi, permettendo più livelli di approfondimento. Le situazioni nelle quali l'utilizzo del TLS risulta conveniente sono quindi numerose, ma sarebbe un errore abusarne.

Preliminarmente alla progettazione del rilievo è fondamentale effettuare un accurato sopralluogo dell'oggetto da rilevare e delle aree limitrofe, per comprenderne le dimensioni e la complessità geometrica, morfologica e cromatica, valutare l'accessibilità alle aree e le eventuali criticità. Contemporaneamente è necessario stabilire con chiarezza quali siano le finalità del rilevamento, in modo da potere definire quale siano l'accuratezza e la risoluzione richieste alle misure e quali elaborati grafici e numerici vadano prodotti per descrivere compiutamente l'oggetto rilevato.

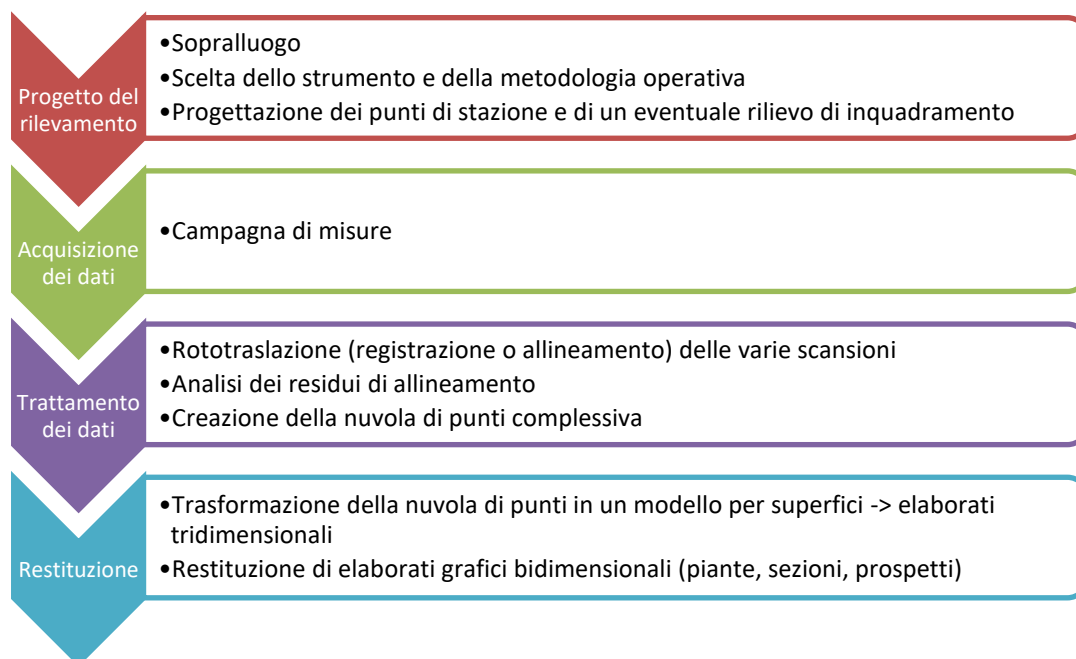


Figura 3.54 - Fasi di rilievo e restituzione laser scanner

Subito dopo si può dare inizio alla fase progettuale, che comprende la scelta dello strumento o degli strumenti da utilizzare, perché è molto frequente l'utilizzo spesso integrato di varie tecniche di misura, la definizione delle metodologie di rilevamento e di allineamento delle scansioni.

Nell'ipotesi che la metodologia di misura più adatta a rilevare l'oggetto sia la tecnica laser scanning, si tratta di decidere quale TLS utilizzare. Analogamente a quanto avviene nella topografia tradizionale, il primo e più importante parametro da valutare è l'accuratezza dello strumento, che dovrebbe essere pari, o ancora meglio, di un ordine di grandezza superiore alla precisione richiesta dal rilevamento. Il secondo parametro è la risoluzione del TLS, che deve essere tale da consentire l'acquisizione di tutti i punti necessari a descrivere compiutamente l'oggetto, quindi è strettamente legato alla finalità del rilevamento ed alla scala di rappresentazione richiesta agli elaborati grafici descrittivi; questo è un parametro che non esiste nella topografia tradizionale, ma nasce con i laser scanner ed è dipendente dal fatto che i TLS, essendo

strumenti automatici di misura, non permettono di discretizzare per punti l'oggetto da rilevare, quindi bisogna avere la ragionevole certezza che la nuvola di punti acquisita contenga tutti i punti utili a descrizione dell'oggetto.

Altri parametri sono invece legati alla logistica del rilevamento: la portata, la velocità di misura e la trasportabilità del TLS se non valutati accuratamente, possono complicare notevolmente l'esecuzione del rilievo. La portata ha un ruolo importante nel caso di oggetto molto esteso o accessibile da pochi punti dai quali diventa necessario rilevare una ampia porzione dell'oggetto. La velocità di misura diventa fondamentale se i tempi di esecuzione dei rilevamenti sono brevi, altrimenti è un parametro più legato alla produttività che a valutazioni teoriche. Infine, in situazioni particolari, come nel rilievo di uno spazio angusto e difficilmente accessibile (si pensi al caso sottotetto di una chiesa a cui si accede attraverso una scala e pioli ed una botola), a parità di caratteristiche tecniche del TLS, è consigliabile l'utilizzo di uno strumento di dimensioni e peso contenuti.

Dopo avere scelto lo strumento da utilizzare si può iniziare la fase progettuale, che è fortemente influenzata dalla modalità di registrazione delle nuvole di punti:

- allineamento tramite algoritmi di autocorrelazione: è da prevedere un elevato numero di scansioni, perché si necessitano di ampie aree (non meno del 30%) di sovrapposizione tra scansioni successive;
- inquadramento delle singole scansioni realizzando una poligonale: è necessario materializzarne, anche in forma temporanea, i vertici, che debbono essere interscambiabili a coppie.

Dal punto di vista del tempo di rilevamento, a parità di velocità di acquisizione del TLS, i due metodi sono abbastanza confrontabili: il primo richiede un numero notevolmente maggiore di punti di scansione e quindi il tempo dedicato al rilievo è più elevato, mentre il secondo permette un minore numero di scansioni, ma presuppone una serie di operazioni per la misura della poligonale.

Nel caso in cui la nuvola di punti ottenuta dal rilevamento debba essere inquadrato in un determinato sistema di riferimento cartografico globale o locale, si rende necessario un rilievo di inquadramento realizzato con tecniche satellitari o tramite stazione totale a partire da vertici di coordinate note.

Terminate le acquisizioni, si può passare alla fase di trattamento delle nuvole di punti, che comprende:

- il controllo della correttezza e completezza dei dati acquisiti,
- eventuale rimozione del rumore e filtraggio dei dati,
- allineamento delle nuvole di punti,
- analisi ed accettazione dei residui di allineamento.

Infine, il processo termina con l'elaborazione bidimensionale o tridimensionale delle nuvole di punti, ottenendo gli elaborati grafici metrici 2D e 3D individuati all'inizio dei lavori. Nell'ambito dei Beni Archeologici vengono utilizzati soprattutto gli elaborati bidimensionali, quindi planimetrie, sezioni e prospetti, ricavabili a partire dalla nuvola di punti in ambiente Cad. Meno richiesti per il momento sono i modelli tridimensionali, meshati e texturizzati, ottenibili tramite l'applicazione di appositi programmi di modellazione.

