

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**  
**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE**

*DISTART – Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle  
Acque, del Rilevamento, del Territorio*

**TESI DI LAUREA**  
Insegnamento: TELERILEVAMENTO LS

**UTILIZZO METRICO DI IMMAGINI**  
**PANORAMICHE SATELLITARI CORONA**

CANDIDATO:  
**Stefano Neri**

RELATORE:  
**Chiar.mo Prof. Gabriele Bitelli**

CORRELATORI:  
**Ing. Giorgia Gatta**  
**Ing. Valentina Alena Girelli**

Anno Accademico 2006/2007  
Sessione III

---

**INDICE**

<b>CAPITOLO 1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO 2</b>	<b>IL PROGETTO CORONA</b>	<b>5</b>
2.1	<i>Aspetti generali</i>	5
2.2	<i>Caratteristiche delle piattaforme e descrizione della missione tipo</i>	7
2.3	<i>Generalità sulle camere impiegate</i>	11
2.4	<i>L'evoluzione delle missioni CORONA negli anni</i>	16
2.5	<i>Due sistemi paralleli al CORONA : Argon e Lanyard</i>	24
<b>CAPITOLO 3</b>	<b>LE IMMAGINI PANORAMICHE CORONA</b>	<b>27</b>
3.1	<i>Le immagini panoramiche e il problema delle distorsioni</i>	27
3.2	<i>La correzione delle distorsioni nelle immagini panoramiche</i>	34
3.3	<i>Il sistema di coordinate immagine nei fotogrammi CORONA</i>	41
<b>CAPITOLO 4</b>	<b>IL SITO ARCHEOLOGICO DI TILMEN HÖYÜK</b>	<b>43</b>
4.1	<i>Informazioni generali</i>	43
4.2	<i>Descrizione del sito archeologico</i>	44
<b>CAPITOLO 5</b>	<b>ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI</b>	<b>53</b>
5.1	<i>Informazioni preliminari</i>	53
5.2	<i>La fase di Import</i>	56
5.2.1	<i>La valutazione dei parametri di start ed end scan angle</i>	62

---

5.3	<i>La fase di triangolazione aerea</i>	65
5.4	<i>La generazione dell'ortofotomosaico</i>	71
5.4.1	<i>Terminologia e aspetti generali</i>	71
5.4.2	<i>La missione SRTM ed il relativo DEM</i>	74
5.4.3	<i>L'ortofotomosaico prodotto con le immagini CORONA</i>	78
<b>CAPITOLO 6</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>88</b>
<b>CAPITOLO 7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>91</b>
<b>APPENDICE A</b>		<b>94</b>

## CAPITOLO 1 INTRODUZIONE

Il lavoro presentato è relativo all'utilizzo a fini metrici di immagini satellitari storiche a geometria panoramica; in particolare sono state elaborate immagini satellitari acquisite dalla piattaforma statunitense CORONA, progettata ed impiegata essenzialmente a scopi militari tra gli anni '60 e '70 del secolo scorso, e recentemente soggette ad una declassificazione che ne ha consentito l'accesso anche a scopi ed utenti non militari.

Il tema del recupero di immagini aeree e satellitari del passato è di grande interesse per un ampio spettro di applicazioni sul territorio, dall'analisi dello sviluppo urbano o in ambito regionale fino ad indagini specifiche locali relative a siti di interesse archeologico, industriale, ambientale.

Esiste infatti un grandissimo patrimonio informativo che potrebbe colmare le lacune della documentazione cartografica, di per sé, per ovvi motivi tecnici ed economici, limitata a rappresentare l'evoluzione territoriale in modo asincrono e sporadico, e con "forzature" e limitazioni nel contenuto informativo legate agli scopi ed alle modalità di rappresentazione delle carte nel corso del tempo e per diversi tipi di applicazioni. L'immagine di tipo fotografico offre una rappresentazione completa, ancorché non soggettiva, dell'esistente e può complementare molto efficacemente il dato cartografico o farne le veci laddove questo non esista.

La maggior parte del patrimonio di immagini storiche è certamente legata a voli fotogrammetrici che, a partire dai primi decenni del '900, hanno interessato vaste aree dei paesi più avanzati, o regioni di interesse a fini bellici. Accanto a queste, ed ovviamente su periodi più vicini a noi, si collocano le immagini acquisite da piattaforma satellitare, tra le quali rivestono un grande interesse quelle realizzate a scopo di spionaggio militare, essendo ad alta risoluzione geometrica e di ottimo dettaglio. Purtroppo, questo ricco patrimonio è ancora oggi in gran parte inaccessibile, anche se recentemente sono state avviate iniziative per permetterne l'accesso a fini civili, in considerazione anche dell'obsolescenza del dato e della disponibilità di altre e migliori fonti di informazione che il moderno telerilevamento ci propone.

L'impiego di immagini storiche, siano esse aeree o satellitari, è nella gran parte dei casi di carattere qualitativo, inteso ad investigare sulla presenza o assenza di oggetti o fenomeni, e di rado assume un carattere metrico ed oggettivo, che richiederebbe tra l'altro la conoscenza di dati tecnici (per esempio il certificato di calibrazione nel caso delle camere aerofotogrammetriche) che sono andati perduti o sono inaccessibili. Va ricordato anche che i mezzi di presa dell'epoca erano spesso soggetti a fenomeni di distorsione ottica o altro tipo di degrado delle immagini che ne rendevano difficile un uso metrico. D'altra parte, un utilizzo metrico di queste immagini consentirebbe di conferire all'analisi del territorio e delle modifiche in esso intercorse anche un significato oggettivo che sarebbe essenziale per diversi scopi: per esempio, per potere effettuare misure su oggetti non più esistenti o per potere confrontare con precisione o co-registrare le immagini storiche con quelle attuali opportunamente georeferenziate.

Il caso delle immagini Corona è molto interessante, per una serie di specificità che esse presentano: in primo luogo esse associano ad una alta risoluzione (dimensione del pixel a terra fino a 1.80 metri) una ampia copertura a terra (i fotogrammi di alcune missioni coprono strisce lunghe fino a 250 chilometri). Queste due caratteristiche "derivano" dal principio adottato in fase di acquisizione delle immagini stesse, vale a dire la geometria panoramica scelta appunto perché l'unica che consente di associare le due caratteristiche predette e quindi molto indicata ai fini spionaggio. Inoltre, data la numerosità e la frequenza delle missioni all'interno dell'omonimo programma, le serie storiche di questi fotogrammi permettono una ricostruzione "ricca" e "minuziosa" degli assetti territoriali progressi, data appunto la maggior quantità di informazioni e l'imparzialità associabili ai prodotti fotografici.

Va precisato sin dall'inizio come queste immagini, seppur rappresentino una risorsa "storica" notevole (sono datate fra il 1959 ed il 1972 e coprono regioni molto ampie e di grandissimo interesse per analisi territoriali), siano state molto raramente impiegate a scopi metrici. Ciò è probabilmente imputabile al fatto che il loro trattamento a fini metrici non è affatto semplice per tutta una serie di motivi che saranno evidenziati nei capitoli successivi. La sperimentazione condotta nell'ambito della tesi ha avuto due obiettivi primari, uno generale ed uno più particolare: da un lato il tentativo di valutare in senso lato le potenzialità dell'enorme patrimonio rappresentato da tali immagini (reperibili ad un costo

basso in confronto a prodotti simili) e dall'altro l'opportunità di indagare la situazione territoriale locale per una zona della Turchia sud orientale (intorno al sito archeologico di *Tilmen Höyük*) sulla quale è attivo un progetto condotto dall'Università di Bologna (responsabile scientifico il Prof. Nicolò Marchetti del Dipartimento di Archeologia), a cui il DISTART collabora attivamente dal 2005. L'attività è condotta in collaborazione con l'Università di Istanbul ed il Museo Archeologico di *Gaziantep*.

Questo lavoro si inserisce, inoltre, in un'ottica più ampia di quelle esposta, dello studio cioè a carattere regionale della zona in cui si trovano gli scavi archeologici di *Tilmen Höyük*; la disponibilità di immagini multitemporali su un ampio intervallo temporale, nonché di tipo multi sensore, con dati multispettrali, doterebbe questo studio di strumenti di conoscenza di altissimo interesse per la caratterizzazione dei cambiamenti intercorsi.

Per quanto riguarda l'aspetto più generale, mettere a punto una procedura per il trattamento metrico delle immagini CORONA può rivelarsi utile all'intera comunità che ruota attorno al "mondo" dei *GIS* e del telerilevamento; come prima ricordato tali immagini (che coprono una superficie di quasi due milioni di chilometri quadrati) rappresentano un patrimonio storico fotografico immenso che potrebbe (e dovrebbe) essere utilizzato sia a scopi archeologici, sia come supporto per lo studio, in ambiente GIS, delle dinamiche territoriali di sviluppo di quelle zone in cui sono scarse o addirittura assenti immagini satellitari dati cartografici pregressi.

Il lavoro è stato suddiviso in 6 capitoli, di cui il presente costituisce il primo.

Il secondo capitolo è stato dedicato alla descrizione sommaria del progetto spaziale CORONA (progetto statunitense condotto a scopo di fotoricognizione del territorio dell'ex Unione Sovietica e delle aree Mediorientali politicamente correlate ad essa); in questa fase vengono riportate notizie in merito alla nascita e all'evoluzione di tale programma, vengono descritti piuttosto dettagliatamente gli aspetti concernenti le ottiche impiegate e le modalità di acquisizione delle immagini, vengono riportati tutti i riferimenti (storici e non) utili a chi volesse approfondire la conoscenza di questo straordinario programma spaziale.

Nel terzo capitolo viene presentata una breve discussione in merito alle immagini panoramiche in generale, vale a dire le modalità di acquisizione, gli aspetti geometrici e prospettici alla base del principio panoramico, i pregi ed i difetti di questo tipo di

immagini. Vengono inoltre presentati i diversi metodi rintracciabili in bibliografia per la correzione delle immagini panoramiche e quelli impiegati dai diversi autori (pochi per la verità) che hanno scelto di conferire un significato metrico (quindi quantitativo e non solo qualitativo come è accaduto per lungo tempo) alle immagini CORONA.

Il quarto capitolo rappresenta una breve descrizione del sito archeologico di *Tilmen Höyük*; collocazione geografica, cronologia delle varie campagne di studio che l'hanno riguardato, monumenti e suppellettili rinvenute nell'area e che hanno reso possibili una ricostruzione virtuale dell'aspetto originario della città ed una più profonda comprensione della situazione delle capitali del Mediterraneo durante il periodo del Bronzo Medio.

Il quinto capitolo è dedicato allo "scopo" principe del lavoro affrontato, vale a dire la generazione dell'ortofotomosaico relativo alla zona di cui sopra. Dopo un'introduzione teorica in merito alla produzione di questo tipo di prodotto (procedure e trasformazioni utilizzabili, metodi di interpolazione dei pixel, qualità del *DEM* utilizzato), vengono presentati e commentati i risultati ottenuti, cercando di evidenziare le correlazioni fra gli stessi e le problematiche di diversa natura incontrate nella redazione di questo lavoro di tesi.

Nel sesto ed ultimo capitolo sono contenute le conclusioni in merito al lavoro in questa sede presentato.

Nell'appendice A vengono riportate le tabelle dei punti di controllo utilizzati in fase di orientamento esterno dei fotogrammi.

## CAPITOLO 2 IL PROGETTO CORONA

### 2.1 Aspetti generali

Il termine CORONA indica una missione partita nel 1958 e promossa dalla *Central Intelligence Agency (CIA)* e dal presidente *Eisenhower*, al fine di lanciare in orbita satelliti in grado di “fotografare” la superficie terrestre. In particolare tale missione era nata al fine di reperire, in segreto, informazioni strategiche sul territorio dell’URSS così da permettere all’Intelligence americana di monitorare continuamente i progressi degli “avversari sovietici” in merito allo sviluppo di arsenali militari in genere e nucleari in particolare. Il progetto CORONA rappresentava, inoltre, la “risposta americana” al lancio del satellite sovietico Sputnik nell’Ottobre del 1957.

Le missioni all’interno del progetto CORONA furono svariate; come immaginabile le primissime non andarono a buon fine a causa di problemi ai razzi vettori oppure a problemi nelle ottiche dei sensori. Per mantenere la segretezza del progetto, i lanci dei primi satelliti CORONA vennero in realtà identificati come missioni *DISCOVERER*; queste in realtà non erano limitate a compiti di sorveglianza, ma comprendevano test volti a verificare le soluzioni tecniche adottate e a reperire telemetria in merito ai problemi che si potessero palesare durante le missioni vere e proprie.

Il primo satellite CORONA venne lanciato il 29 Febbraio 1959; tuttavia la prima missione conclusasi con successo (vale a dire della quale è stata recuperata la pellicola impressionata) risale al 18 Agosto 1960 ed ha prodotto 3000 piedi di pellicola (circa 948 m), coprendo più di 1.65 milioni di miglia quadrate di territorio dell’URSS.

In totale le missioni CORONA furono 144, delle quali 102 ebbero esito positivo.

Grazie al programma CORONA, durato 12 anni, vennero acquisiti più di 880.000 fotogrammi per una copertura totale fra i 600 e i 750 milioni di miglia nautiche quadrate ( $\text{nmi}^2$ ), vale a dire fra 1,5 e 2 milioni di chilometri quadrati di superficie terrestre. Ciascuna immagine copre una zona a terra di circa 10x120 miglia, vale a dire di circa 18x220 chilometri.

Tali fotogrammi, come ricordato in precedenza, interessano principalmente il territorio russo e le zone del Medio Oriente.

Ciascuna missione fu differente dalla precedente in merito al progetto del razzo vettore utilizzato, alle camere ed ai filtri impiegati; tali differenziazioni erano volte al miglioramento della stabilità e dell'affidabilità dei velivoli impiegati, all'incremento della copertura a terra, all'aumento della durata delle missioni e al miglioramento della risoluzione a terra.

Dal 24 Febbraio 1995 le immagini CORONA (così come quelle dei progetti *ARGON* e *LANYARD*) sono state declassificate e rese disponibili per scopi civili; la "comunità" del telerilevamento identifica questo tipo di immagini con l'acronimo *DISP (Declassified Intelligence Satellite Photographs) image*.

L'ente che si è occupato di rendere effettivamente disponibili queste immagini è lo *U.S.G.S. (U.S. Geological Survey)*; sono disponibili i negativi, le diapositive dei positivi, le stampe in bianco e nero dei fotogrammi nonché la "scansione" diretta della pellicola (ovvero i fotogrammi direttamente in forma digitale).

Tutti questi prodotti sono ordinabili on-line dal sito web dell'*EROS Data Center (Earth Resources Observation System Data Center)*:  
<http://edc.usgs.gov/products/satellite/corona.html>.

Assieme ai fotogrammi è possibile acquistare anche i cosiddetti metadata, vale a dire il file, associato al fotogramma, in cui sono contenuti una serie di dati associati al fotogramma stesso. Altri dati correlati alle immagini acquistate, come per esempio il *Mission Coverage Plot (MCP)*, il *Photographic Evaluation Report (PER)* ed altri simili, sono rintracciabili tramite il *NARA (National Archives and Record Administration)*. Ulteriori informazioni in merito ai prodotti acquistati sono ottenibili dal sito del *NRO (National Reconnaissance Office)* tramite una procedura standard denominata *FOIA (Freedom of Information Act)*.

Un confronto diretto con altre immagini di qualità (intesa come *ground resolution*) paragonabile a quella delle CORONA mostra come queste ultime siano le più economiche; costano, infatti, circa 1 centesimo di dollaro/chilometro quadrato, contro i 29 centesimi di dollaro/chilometro quadrato delle *IKONOS* ed i 35 cent. di dollaro/chilometro quadrato delle *SPIN-2*.

## 2.2 Caratteristiche delle piattaforme e descrizione della missione tipo

I satelliti del progetto CORONA furono i primi satelliti impiegati in operazioni di *photo-reconnaissance* (acquisizione di fotogrammi a scopo di intelligence) dallo spazio; essi utilizzavano razzi vettori del tipo *Thor-Agena* dei quali si riporta un esempio in figura 2.1.



Figura 2.1: Esempio di razzo vettore *Thor-Agena*

Tali veicoli erano composti da due “stadi”: il primo stadio era costituito dal missile balistico di tipo *Thor*, mentre il secondo era rappresentato dall’*Agena*.

Inizialmente l’*Agena* doveva essere accoppiato al razzo vettore *Atlas*, ma il lancio dello Sputnik da parte dei sovietici spinse la *U.S. Air Force* ad accelerare lo sviluppo di quello che sarebbe diventato il “*Thor*”; quest’ultimo fu il primo *IRBM (Intermediate Range Ballistic Missile)* equipaggiato con testata termonucleare in possesso della *U.S. Air Force*. Era alto 65 piedi (circa 20 metri) ed aveva un diametro di 8 piedi (cioè circa 2.4 metri), per un peso di circa 50 tonnellate. Dal *Thor* derivarono diversi tipi di veicoli per il lancio nello spazio, quelli che noi oggi conosciamo come “famiglia *Delta*”.

L’*Agena*, come appunto prima accennato, costituiva il secondo stadio del veicolo costituente il satellite CORONA; a tale stadio veniva assicurato l’apparato dei sensori (vale a dire le camere per l’acquisizione dei fotogrammi) e il cosiddetto *SRV (Satellite Recovery Vehicle)* deputato al recupero della pellicola impressionata.

Tali informazioni sugli “stadi” costituenti sono reperibili sulla pagina web di *Wikipedia* e su quella del Museo Nazionale dell’aviazione Americana (*USAF*) <http://www.nationalmuseum.af.mil/index.asp>.

La sequenza di lancio è descritta nei minimi particolari nella prima parte (pagine 27 e seguenti) del libro “*CORONA: America’s First Satellite Program*” edito da *Kevin C. Ruffner*.

I due stadi, lavorando congiuntamente, portavano il satellite in orbita (distanza dal suolo da un minimo di 150 km ad un massimo di 450 km); il primo stadio veniva distaccato dal resto del velivolo fino a che non aveva esaurito il carburante. Una volta distaccatosi il *Thor*, al secondo stadio spettava portare il satellite alla orbita voluta. Una volta raggiunta l’altezza d’orbita prefissata, lo stadio rimanente (vale a dire l’*Agena*) veniva fatto ruotare di 180° in modo tale che l’*SRV* venisse a trovarsi sul retro della piattaforma satellitare. Tale manovra consentiva di risparmiare combustibile per la fase di re-orientamento nella fase di rientro della missione; inoltre proteggeva lo scudo termico dal surriscaldamento subito nelle fase finale della missione.

L’inizio della fase di rientro era segnato dall’inclinazione di 60° verso il basso dell’*Agena* in modo che potessero essere acceso il razzo posteriore dell’*SRV*. Di seguito il “veicolo di recupero” si distaccava dall’*Agena*, mantenendo l’inclinazione assegnatagli grazie all’accensione dei razzi di spinta laterali. Il razzo posteriore, accendendosi, spingeva l’*SRV* verso il basso in modo che acquisisse una traiettoria discendente.

Il rallentamento del velivolo avveniva grazie all’accensione di un *de-spin rocket* (cioè un razzo che spingeva all’indietro). Una volta rallentato il velivolo, si distaccavano sia i razzi che lo scudo termico e si apriva il paracadute attaccato al *bucket* (capsula con la pellicola) in modo che questo planasse dolcemente sulla “zona di recupero”.

Essendo la fase di recupero piuttosto delicata, era necessario che il distacco dello *SRV* venisse effettuato in tempi rigorosi e che la decelerazione data dal *de-spin rocket* fosse adeguata; infatti ogni secondo di errore nel tempo di espulsione spostava il punto di recupero di 5 miglia, mentre un errore di inclinazione superiore a 10° del *de-spin rocket* poteva compromettere il recupero.

La missione si concludeva con successo con il recupero del *bucket*; per la fase di recupero vennero previste due possibilità.

La prima opzione possibile consisteva in un recupero “a mezz’aria” effettuato con aerei (inizialmente C119 poi C130) appositamente attrezzati: su tali velivoli, infatti, veniva montato una sorta di un uncino con forma trapezoidale che “agganciava” l’SRV a mezz’aria. Era previsto che tali operazioni avvenissero sopra l’Oceano Atlantico. Gli addetti ai lavori, per rendere effettivamente praticabile questa sequenza, dovettero simularla svariate volte; si rese addirittura necessaria la realizzazione di un apposito paracadute che consentisse al bucket di rallentare sufficientemente per aumentare la possibilità di un “aggancio”.

La capsula contenente la pellicola, comunque, era equipaggiata anche per galleggiare per un certo periodo di tempo nel caso fosse fallito il recupero aereo. Nella capsula, infatti, era presente un “valvola” comunicante con un piccolo serbatoio contenente sale; trascorsi 3 (tre) giorni di galleggiamento tale valvola si apriva, consentendo all’acqua di entrare nel serbatoio e sciogliere il sale, determinando così l’affondamento della capsula.

Di seguito viene riportata una serie di figure che illustrano ciò che è stato appena spiegato.

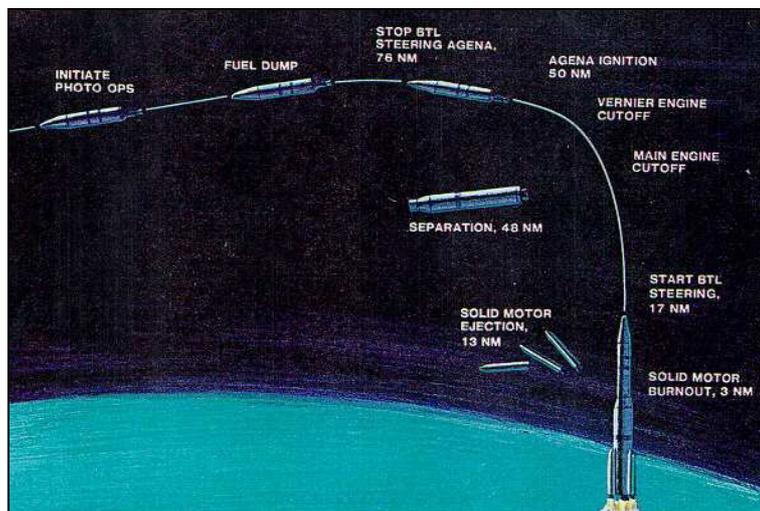


Figura 2.2 : Sequenza di lancio del satellite CORONA

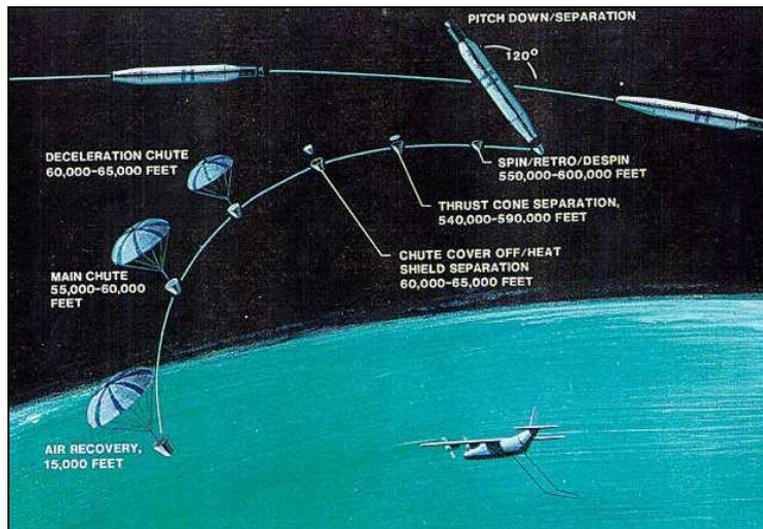


Figura 2.3 : Sequenza di recupero del bucket



Figura 2.4 : Momento dell'aggancio da parte dell'aeromobile attrezzato

Le orbite dei satelliti CORONA erano quasi polari e circolari; seppure l'inclinazione dell'orbita e l'ora di passaggio sull'equatore variassero da missione a missione non c'era una copertura sistematica della superficie terrestre.

L'angolo di inclinazione variava fra i 60 e i 100 gradi (misurati dall'equatore); tuttavia per molte missioni fu adottato un angolo di inclinazione attorno agli 80 gradi.

Il periodo orbitale era all'incirca di 90 minuti, indipendentemente dalla altezza dell'orbita e variava fra gli 87 e i 108 minuti a seconda dei comandi assegnati alla telemetria dalla stazione di controllo a terra.

I satelliti viaggiavano ad una velocità di 17.000 miglia/ora vale a dire di circa 8.75 km/s.

Sia le operazioni compiute dalla piattaforma che quelle compiute dalle camere erano controllate dalla telemetria.

Uno fra i tanti problemi affrontati dai progettisti coinvolti nel programma CORONA fu quello di mantenere invariato il peso dei satelliti. Per fare ciò, ad esempio, fu deciso di evitare la pressurizzazione del modulo che conteneva la (o le) camere e tale scelta comportò l'adozione di una pellicola speciale realizzata dalla *Kodak* (come verrà spiegato dopo). Sempre nell'intento di conservare il peso del velivolo vennero adottati solo provvedimenti "passivi" per il controllo della temperatura. In sostanza l'unica cosa impiegata fu una vernice termica che veniva "variata" (nel senso del tipo) a seconda della porzione del velivolo.

### ***2.3 Generalità sulle camere impiegate***

Tutti i satelliti CORONA montavano camere di tipo *panoramico*: secondo tale principio se una lente ruota attorno ad un asse passante per il suo secondo punto nodale l'immagine di un oggetto lontano non si muove. Grazie a questo principio è possibile avere un ampio *swath* (cioè dimensione a terra della immagine) accoppiato ad una alta risoluzione a terra (cioè un *pixel* avente lato a terra di circa 1 o 2 metri). Però ottenere questo risultato è altresì indispensabile che la pellicola si trovi non su una "piastra" (come succede nelle tradizionali camere) ma bensì su un "tamburo" di forma cilindrica, sul quale viene fatta "scorrere" la pellicola. Lo studio condotto da *Slama et al. (1980)* dimostrò che, essendo l'ampiezza dello *swath* lungo la linea di volo correlata alla velocità di scansione della camera, le camere panoramiche erano le più indicate per acquisire immagini da altitudini elevate.

Il principio panoramico venne impiegato per la prima volta nel 1957 con la *HYAC camera* (*high aquity camera*) sviluppata dalla Università di Boston. Tale camera fu la prima a “realizzare” una risoluzione di 100 lp/mm (*line pair/millimeter*) per elevate altitudini; la focale era lunga 12” (cioè circa 30,48 cm) e l’ottica era composta da tre lenti f/5. In figura è presentato lo schema realizzativo di questo tipo di camera.

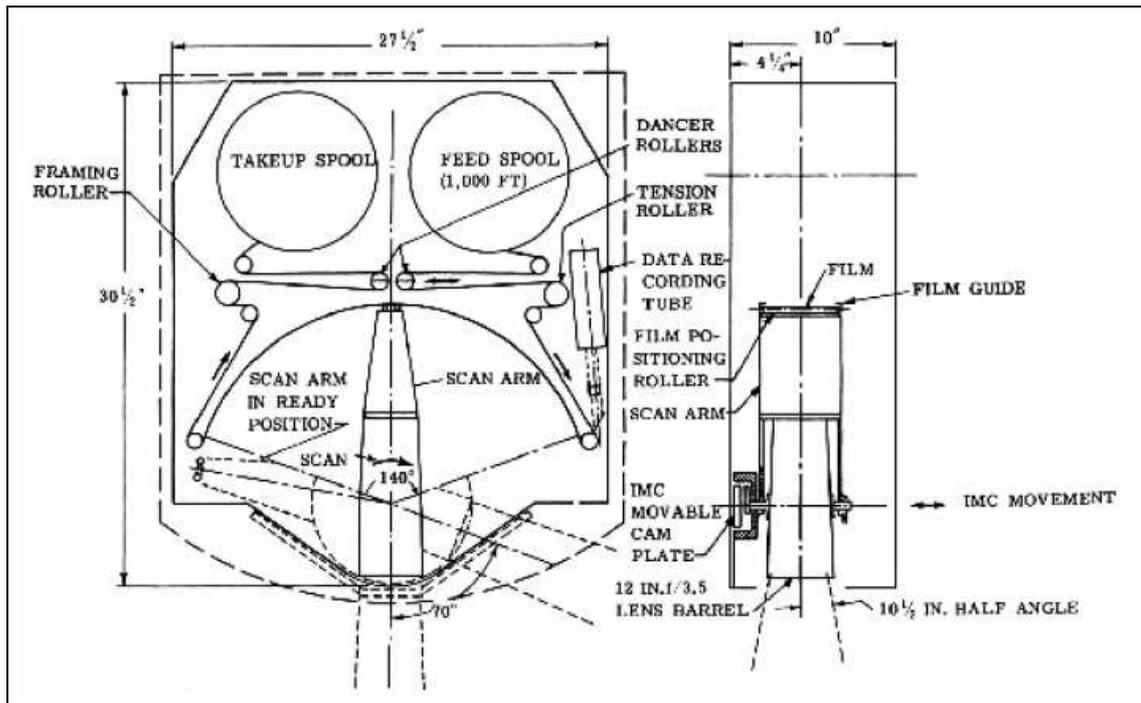


Figura 2.5 : Camera panoramica HYAC (tratto dal manuale americano di fotogrammetria)

Un “sistema di lenti” montato su un apposito braccio di scansione acquisiva in direzione trasversale alla linea di volo mentre la pellicola si muoveva in direzione parallela a quella di scansione con velocità compatibile con quella del veicolo rispetto a terra in modo da assicurare la continuità di copertura lungo la linea di volo.

Altro principio impiegato nelle camere montate sui satelliti CORONA è la cosiddetta *lente Petzval*, inventata da Josef Petzval nel 1839. Tale lente consisteva in due lenti accoppiate (*doublet lens*) fra le quali era posto un dispositivo per la regolazione della luce in entrata (*aperture stop*). La “lente” frontale era esente da *spherical aberrations* (cioè un difetto, presente in un’immagine, dovuto all’incremento della rifrazione della luce che attraversa la lente) ma introduceva *coma*; il difetto di *spherical aberrations* è presentato in figura 1.6.

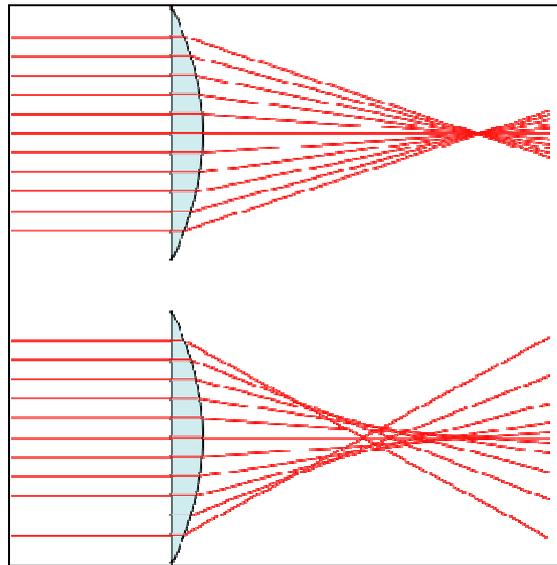


Figura 2.6 : Rifrazione in una lente normale (in alto) e in una affetta da *spherical aberration* (in basso)

Il difetto illustrato in figura 2.6 è proporzionale al diametro elevato alla quarta potenza ed inversamente proporzionale alla focale elevato alla terza potenza; è quindi molto pronunciato per lenti cosiddette veloci (*fast lens*), cioè quelle lenti aventi un piccolo *focal ratio* (detto anche *f-number*). Il termine *focal ratio* rappresenta il rapporto fra la focale e il diametro di apertura (il *pupil diameter*); tale rapporto è adimensionale e definisce, appunto, la “velocità” della lente. In figura 2.7 si riportano alcuni esempi di *focal ratio*.

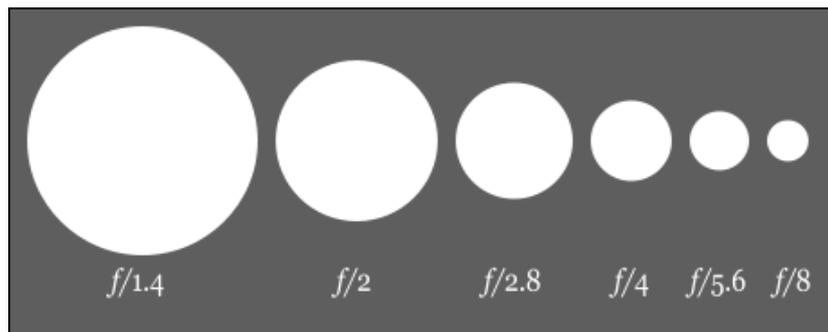


Figura 2.7 : Esempi di differenti *focal ratio*

Ad esempio una lente nella quale il “*pupil diameter*” sia 16 volte più grande della focale avrà un “*focal ratio*” di  $f/16$ .

La “lente posteriore” del sistema Petzval correggeva i difetti introdotti dalla lente frontale; il dispositivo di *aperture stop* correggeva, invece, il difetto di astigmatismo.

Restavano comunque i difetti di curvatura della immagine (*field curvature*) e quello di *vignetting* (cioè una riduzione della luminosità della immagine), illustrato in figura 2.8



Figura 2.8 : Difetto di vignetting

Nei satelliti CORONA le lenti Petzval impiegate erano cinque in “formazione” tre-due (figura 2.9); tre elementi del diametro di 7” (17.78 cm) posizionati sul fronte della camera, due elementi di diametro 5.5” (circa 14 cm) posizionati sul retro del gruppo ottico. Il tutto era contenuto in un elemento cilindrico lungo 22” (55.88 cm).

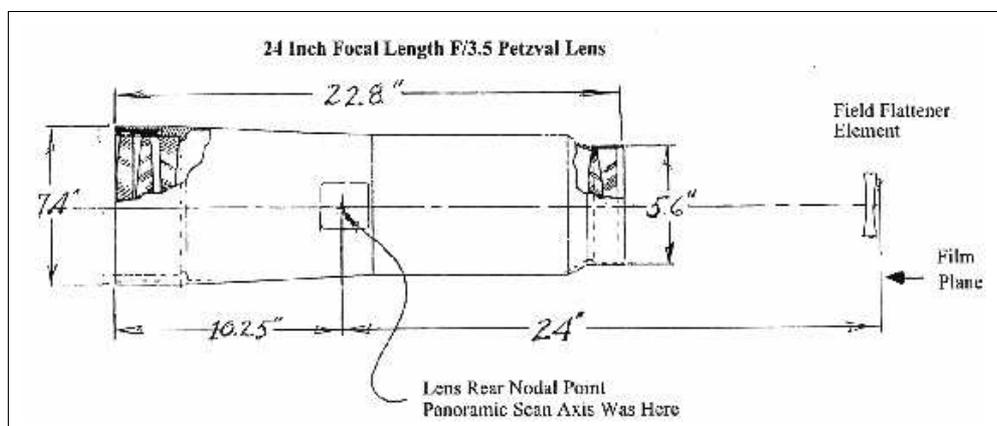


Figura 2.9 : Lo schema di lente *Petzval* impiegato nel progetto CORONA

La lente ruotava attorno ad un asse distante circa 10" (25.40 cm) dal fronte della camera. Ad un distanza di 0.25" (0.635 cm) dal retro dell'ottica, invece, era posizionata una piccola lente appiattente (*field flattening narrow lens*), aggiunta per mitigare gli effetti di curvatura che il sistema *Petzval* "introduceva" sistematicamente su ciascun fotogramma.

Il peso complessivo della camera così realizzata era di circa 20 *pounds* (vale a dire circa 9 kg.); il sistema così strutturato fornì, in test di laboratorio, una risoluzione che variava fra i 280 lp/mm (sugli oggetti ben contrastati) ed i 190 lp/mm (sugli oggetti con contrasto basso).

In condizioni operative di aria pulita e secca il sistema aveva una potenza di risoluzione di circa 200 lp/mm, che consentiva l'identificazione di oggetti di dimensione pari a 6-8 "piedi" (1.83-2.44 m) da una quota di 100 miglia nautiche (circa 185 km). (Galiatsatos, 2004)

Durante i 12 anni di durata del progetto CORONA vennero apportate modifiche a tutti gli aspetti tecnologici delle piattaforme satellitari; l'evoluzione più grande, comunque, riguardò i tipi di camere impiegate. Infatti, con il passare degli anni, vennero incrementate la risoluzione a terra e la durata delle missioni, venne modificata la pellicola impiegata ed il tempo di esposizione per ciascun fotogramma.

Le uniche grandezze che non vennero modificate furono la focale della camera (sempre pari a 24 pollici cioè circa 61 cm), la "disposizione" dei vari elementi costituenti l'ottica e l'angolo "spazzato" dal sistema di lenti in direzione trasversale alla linea di volo cioè il cosiddetto *scan angle* (che venne sempre preso pari a  $71^{\circ}.16$  come suggerisce McDonald 1997).

Altro "aspetto" che non subì modifica fu il prefisso indicante le diverse missioni, vale a dire la nomenclatura *KH* che sta per *Key Hole* ( letteralmente chiave buco); si pensa che tale acronimo stia ad indicare che i "creatori" del progetto si servissero di un piccolo "*key hole*" sulla lente per spiare il mondo intero (Dashora, Lohani et Malik, 2007).

Una scena intera veniva acquisita con "esposizioni" successive della pellicola durante una "scansione". A seguito del movimento relativo tra camera e terreno durante ogni singola esposizione, il fotogramma risultava mosso; questo tipo di distorsione è conosciuta come *image motion* ed il dispositivo impiegato per la correzione è chiamato *IMC (Image Motion Compensation)*.

Anche questo dispositivo ha subito delle modificazioni con il susseguirsi delle missioni negli anni.

Di seguito verrà illustrata, per sommi capi, l'evoluzione delle camere impiegate in missioni successive; le differenti missioni vengono identificate con il numero posto di seguito alla sigla KH della quale è già stata rivelata l'origine.

#### **2.4 L'evoluzione delle missioni CORONA negli anni**

**KH-1** indica, ovviamente, la prima missione operante fra il 25 Giugno 1959 ed il 13 Settembre 1960; essa "registrò" un unico successo coprendo, comunque, una area più grande rispetto alle precedenti missioni con razzi U2.

Questa missione montava la *C camera*, cioè una HYAC con lente *Tessar f/5* e focale di 24" (circa 61 cm). La pellicola, larga 2.10" (5.33 cm), era collocata a fianco della camera invece che sopra ad essa; la camera "spazzava" un angolo simmetrico di 70° lungo la linea di volo ed il veicolo avanzava "all'indietro" (*backwards*). L'oscillazione della camera "avanti-indietro" (*back and forth*) durante l'acquisizione del fotogramma determinava dei movimenti indesiderati di tutta la piattaforma; per contrastare questo sgradevole effetto, i progettisti decisero di montare un meccanismo che si muovesse in opposizione alla camera.

La pellicola a base acetica (*acetate film*) presentò subito problemi di rottura dovuti alle condizioni di vuoto nelle quali si veniva a trovare la camera; in tale situazione i solventi della pellicola si volatilizzavano immediatamente rendendo la pellicola fragile e suscettibile alla rottura. Per questo venne chiesto alla *Eastman Kodak* di realizzare una pellicola a base di poliestere che fosse più stabile e sottile; con questa "modifica" molte più missioni registrarono esito positivo. La quantità di pellicola a bordo consentiva missioni della durata di 1 giorno.

La missione KH-1 aveva una risoluzione a terra di 40 piedi (12.20 m); la piattaforma poteva volare ad una quota fissa in quanto il "tempo di esposizione" per ogni fotogramma (*cycling rate*) era costante ed il dispositivo *IMC* operava ad una velocità pari al rapporto velocità/quota (*velocity – over-height ratio*).

La seconda missione (**KH-2**) registrò 3 successi dal 26 Ottobre 1960 al 23 Ottobre 1961 e montava la *C'* (*C prime*) camera. In questa missione il dispositivo IMC operava con velocità che variava ad ogni passo della acquisizione, consentendo così al satellite di lavorare su differenti orbite. Il pixel aveva una dimensione a terra pari a 25 piedi, cioè 7.62 metri. Le missioni della “famiglia” KH-2 duravano da 2 a 3 giorni.

Anche nella seconda missione, così come nella prima, rimaneva irrisolto il problema del *chromatic blur*, il cosiddetto “spettro secondario”. L’ottica impiegata era la medesima della prima missione.

Nella **KH-3** il suddetto problema venne risolto con l’utilizzo della succitata lente *Petzval f /3.5* e di tutti gli accorgimenti (esempio il *field flatten*) necessari per ottenere una immagine panoramica di qualità migliore possibile. Questa nuova configurazione della camera venne definita *C'''* (*C Triple Prime*) ed operò dal 30 Agosto 1961 al 13 Gennaio 1962, con 5 successi all’attivo.

Le variazioni nella *C'''* camera furono principalmente 5:

- Il design venne modificato per evitare l’influenza negativa delle variazioni termiche sui componenti della camera.
- I comandi della camera furono resi più affidabili.
- Le procedure per la “misurazione” e l’archiviazione della pellicola, così come la manutenzione del dispositivo di focamento, vennero migliorati. L’adattamento dell’*IMC* alle caratteristiche dell’orbita consentì di operare con orbite più basse e maggiore risoluzione a terra.
- Il disegno del “braccio di scansione” (*scan arm*) venne migliorato: la sezione più bassa della *C'''* camera conteneva le lenti più pesanti che potevano ruotare di 360° mentre la parte alta del braccio oscillava “avanti-indietro” su un arco di 70°. Tale configurazione obbligava ad allineare e bloccare il braccio e la lente prima delle acquisizione del fotogramma; il risultato venne conseguito con uno spillo a V, caricato da una molla, che si muoveva in concomitanza alla lente. Il braccio veniva “accelerato” in modo che avesse la stessa velocità della lente. Tutte queste

modifiche mitigarono notevolmente le vibrazioni conseguenti al movimento della camera.

- Venne impiegato un sistema di lenti più “veloce” e con apertura maggiore, il che permise l’uso di una pellicola più “lenta” e quindi di avere immagini con la massima risoluzione possibile; si arrivò infatti ad avere un pixel a terra di 12 piedi (3.66 m)

Anche la durata delle missioni venne migliorata, arrivando fino a 4 giorni.

In queste prime tre missioni era presente una piccola camera che acquisiva una immagine dell’orizzonte alla fine di ogni fotogramma (*frame*); da questa immagine potevano essere dedotti l’orientamento del veicolo e la “posa” della camera panoramica. Queste prime missioni furono utilizzate a scopo di *intelligence* piuttosto che per ottenere mappe.

Con la missione **KH-4** i satelliti CORONA “ampliarono” la loro versatilità, in quanto furono i primi ad offrire una copertura **stereoscopica**; ciò era possibile grazie alla cosiddetta configurazione *Mural camera* (fig. 2.10).

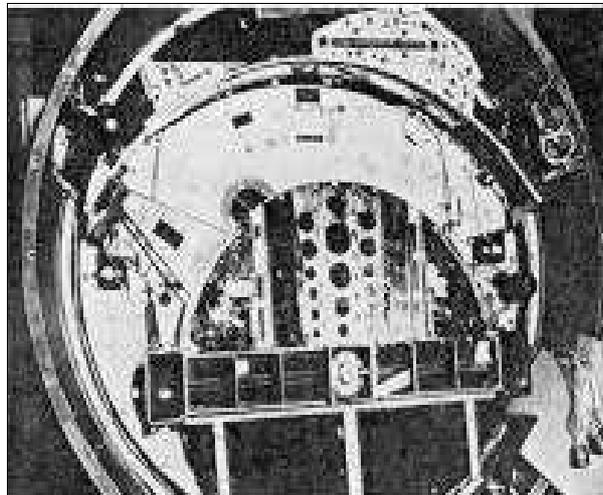


Figura 2.10 : Esempio di configurazione *Mural camera*

Tale tipologia di camera consisteva in una coppia di camere *C''* montate su un telaio a forma di M; una camera inclinata di 15° all’indietro (*afterward*) rispetto alla verticale e l’altra inclinata di 15° in avanti (*forward*), così come illustrato in figura 2.11. Le direzioni indietro ed avanti sono riferite alla direzione di volo; la camera forward era posizionata “in

testa” al veicolo ma, poiché questo volava all’indietro, tale camera acquisiva effettivamente l’immagine “avanti”. A partire dal 18 Maggio 1965, però, le piattaforme vennero fatte volare “in avanti” (*fly nose*).

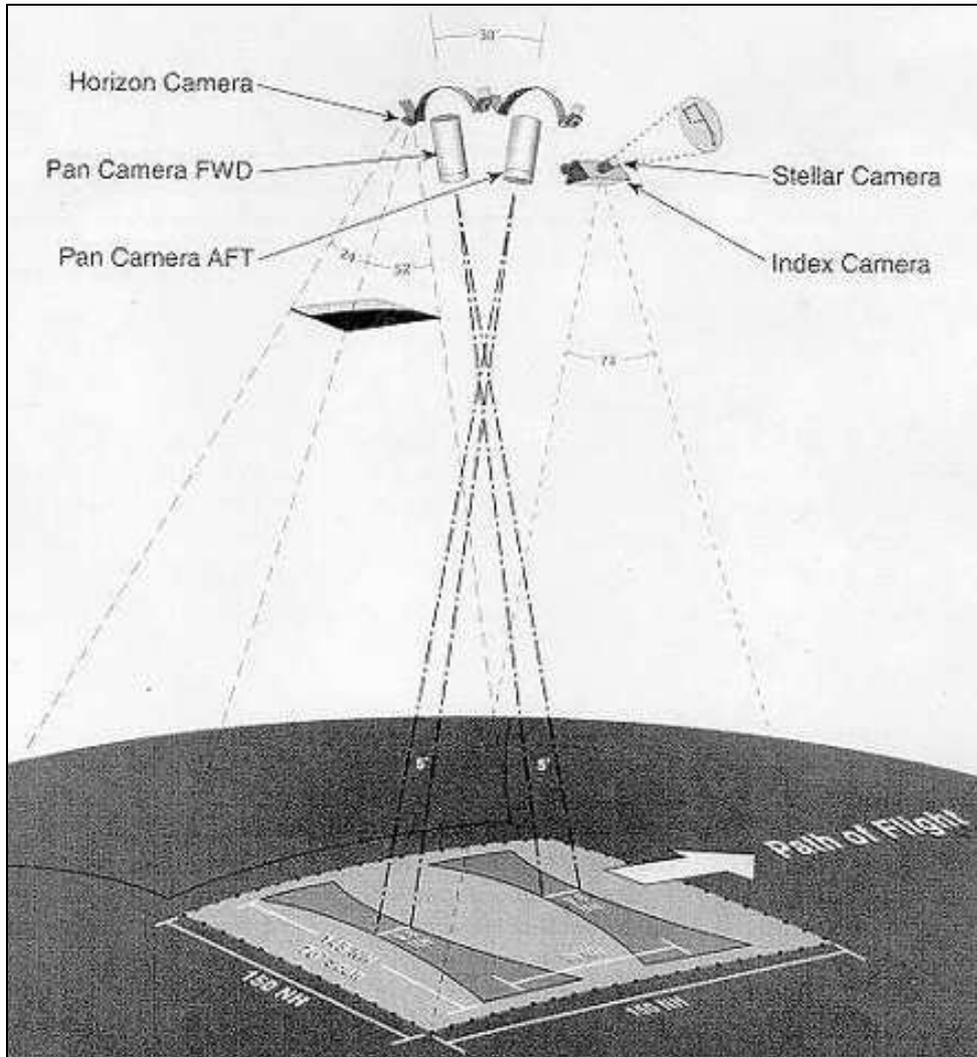


Figura 2.11 : Schema di presa di una stereo coppia

La *Mural camera* disponeva di due bobine di pellicola, ciascuna del peso di 40 libbre (circa 18 kg) ed aveva un “autonomia” superiore a 4 giorni. Ciascuna area a terra veniva, ovviamente, fotografata due volte; il ritardo fra le esposizioni era pari a 6 *frames*.

La prima camera di questo tipo venne lanciata il 27 Febbraio 1962 ma si verificò una anomalia nella procedura di rientro; in totale vennero realizzate 26 missioni di cui solo 20 portate a termine con successo.

Oltre alla *horizon camera* erano presenti anche *stellar* e *index camera*; la prima osservava in direzione di 5° sopra l'orizzonte, mentre la seconda guardava in basso e forniva un "inquadramento ampio" della superficie terrestre. Risulta quindi chiaro come dalla *stellar* fosse possibile dedurre i parametri di rollio, beccheggio e deriva della piattaforma (*roll, pitch, yaw*) servendosi anche dei *reseau* impressionati sul fotogramma; dalla *index*, invece, si poteva intuire la "posizione nel mondo" dei fotogrammi acquisiti e si potevano correggere le varie distorsioni del fotogramma (avvalendosi anche in questo caso dei *reseau* presenti sul fotogramma).

La missione KH-4 operò dal 27 Febbraio 1962 al 24 Marzo acquisendo 239 299 piedi di pellicola (circa 73 km); mentre le missioni precedenti erano focalizzate sull'area dell'URSS, la KH-4 aveva una copertura globale anche se principalmente focalizzata sulle cosiddette *denied areas*, ovvero le aree sulle quali era vietato il sorvolo.

La risoluzione a terra variava fra i 10 ed i 25 piedi (3.05 – 7.62 m); la durata di ogni singola missione venne prolungata fino a 6-7 giorni grazie al maggior quantità di pellicola a bordo delle piattaforme.

La KH-4 rappresentò il nuovo "standard" del sistema CORONA; infatti le missioni successive vennero identificate con le sigle KH-4A e KH-4B.

Per la missione **KH-4A** venne impiegata la configurazione *J-1*; essa differiva dalla *Mural* in quanto presentava una "capacità doppia" di pellicola immagazzinata. Per ottenere tale obiettivo venne aggiunto una seconda capsula (*bucket*) che comportò però l'aggiunta di un secondo veicolo per il "ricovero" e di un nuovo "percorso" della pellicola all'interno del piccolo diametro del veicolo. In figura 2.12 viene presentata la nuova configurazione con "doppia bobina".

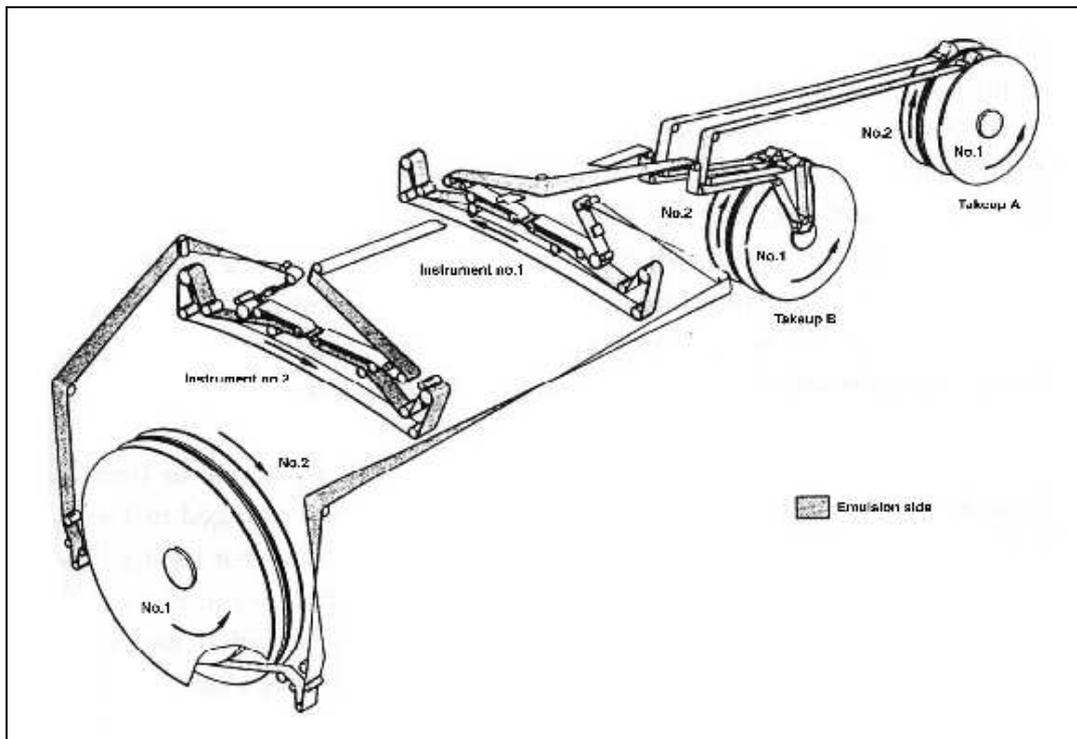


Figura 2.12 : Meccanismo per la movimentazione della pellicola nelle missioni KH- 4 A

I progettisti predisposero una rotella di trasferimento all'interno dell'*hub* della bobina di sollevamento nel secondo veicolo di ricovero (*RV-2*), il quale era a ridosso delle camere. Inoltre installarono una rotella intermedia la quale venne montata su una "paratia di veicolo" appena davanti alla camera *forward*. Appena la pellicola lasciava la camera, essa si avvolgeva attorno alla rotella intermedia e da qui all'interno del *RV-2*, poi passava attraverso un meccanismo per il taglio e di seguito nel *RV-1* (primo veicolo di ricovero); qui veniva "connessa" alla bobina di sollevamento. Nel momento in cui entrambe le bobine di sollevamento all'interno del *RV-1* erano piene oppure quando i controllori a terra stabilivano che il contenuto della pellicola fosse "critico" (vale a dire segreto), i controllori stessi inviavano alla piattaforma l'ordine di tagliare la pellicola. Le estremità frontali delle due strisce di film venivano sovrapposti sulla bobina del *RV-2*. A questo punto il primo veicolo di ricovero veniva distaccato dalla piattaforma, lasciando il secondo veicolo libero di ricevere la pellicola dalle due camere. In figura 2.13 è rappresentata una *J-1 camera*.

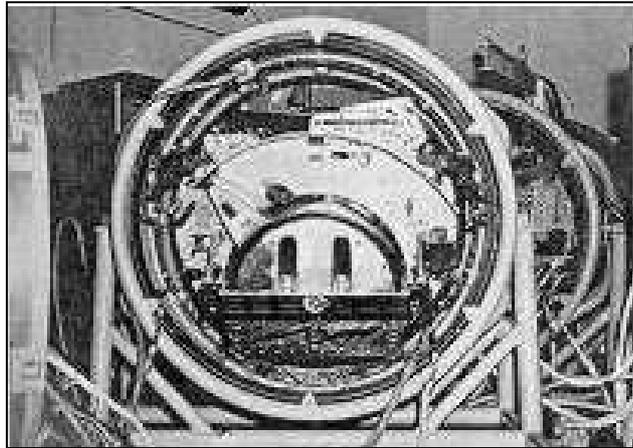


Figura 2.13 : La *J-1 camera*

Tale meccanismo incrementò la durata di ciascuna missione fino a 15 giorni, in modo che la copertura di ciascuna missione risultò almeno raddoppiata. Inoltre non erano presenti ulteriori parti oscillanti e vennero aggiunti dei razzi ausiliari che permisero di controllare il decadimento dell'orbita; in tal modo fu possibile "lavorare" ad altitudini inferiori.

La risoluzione a terra raggiunse i 9 piedi (2.54 m).

La missione successiva (**KH- 4 B**) montava una camera di tipo *J-3*; questa presentava numerosi cambiamenti rispetto alla *J-1*. Infatti le camere *C'''* e *Mural* presentavano ancora delle vibrazioni durante il movimento del braccio di scansione arrivando persino a bloccarsi al termine di ogni scansione. Le vibrazioni erano raddoppiate rispetto alle missioni con una unica camera *C'''*, dato che tali sistemi montavano una coppia di *C'''*. Le vibrazioni "sporcarono" le immagini e peggioravano la risoluzione.

Nel sistema *J-3* la "cella" con le lenti e il braccio di scansione erano connessi e alloggiati all'interno di un "tamburo" che ruotava di 360°; questo era conosciuto come *Constant Rotator* (rotatore costante, figura 2.14) e la sua realizzazione fu possibile solo a fronte di un incremento del diametro del carico utile.

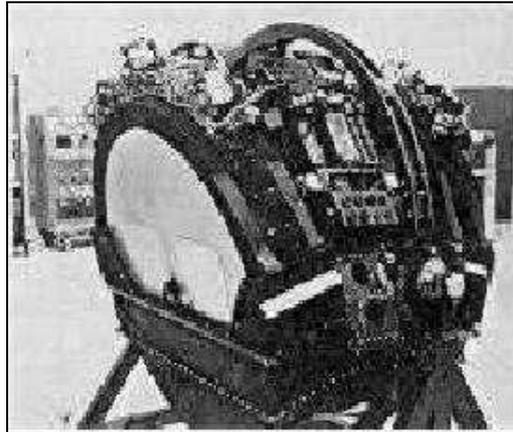


Figura 2.14 : Il dispositivo *Constant Rotator* montato sulle missioni KH-4B

L'angolo di scansione restò comunque di 70° e così le vibrazioni vennero eliminate.

In questa nuova configurazione, inoltre, ogni camera poteva montare 2 filtri intercambiabili e 4 "fessure per l'esposizione", migliorando così le prestazioni in condizioni di piccoli angoli d'elevazione del sole.

Alcuni miglioramenti vennero introdotti anche nei sistemi di controllo, consentendo alle piattaforme KH-4 B di lavorare su orbite a quota di 150 km; persino il dispositivo di *IMC* venne migliorato.

Tutto questo rese possibile una risoluzione a terra di 6 piedi (1.83 m) ed una durata delle missioni di 19 giorni.

La figura seguente illustra lo schema di realizzazione della camera J-3.

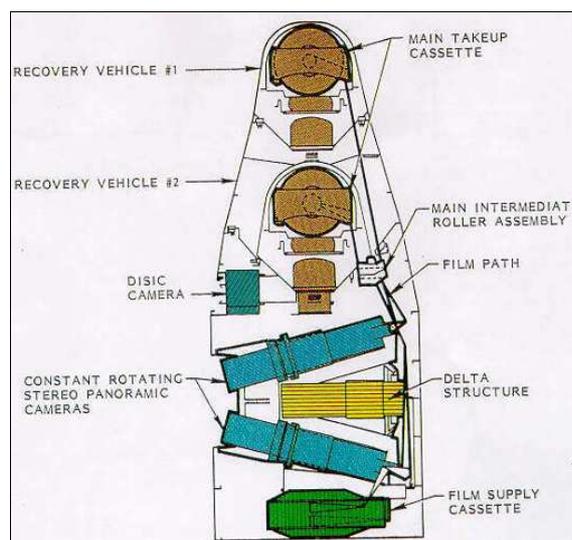


Figura 2.15 : Schema della camera J-3

### 2.5 Due sistemi paralleli al CORONA: Argon e Lanyard

Le missioni designate con le sigle KH-5 e KH-6 non fanno propriamente parte del progetto CORONA, anche se da esso hanno attinto diversi aspetti.

Il progetto **KH-5** è identificato con la sigla **Argon**; operò fra il 17 Febbraio 1961 ed il 21 Agosto 1964 per un totale di 12 missioni.

I satelliti di questo sistema, utilizzati come mezzo di ricognizione, dovevano fornire informazioni geodetiche precise sull'Unione Sovietica per individuare obiettivi strategici. Le prime missioni volarono in maniera indipendente mentre le ultime lavorarono congiuntamente alle camere CORONA.

I satelliti Argon avevano un unico RV e “acquisivano” il mondo intero; la camera aveva una focale di 3” (7.62 cm) e la pellicola una risoluzione di 30 lp/mm. La risoluzione a terra era stimata in 460 piedi (circa 140 m). Le immagini argon sono state impiegate in applicazioni di *change detection* (identificazione dei cambiamenti al suolo), orto rettifica e ne è stata valutata l'accuratezza planimetrica.

Di seguito si presenta un'immagine della camera impiegata nelle missioni Argon.

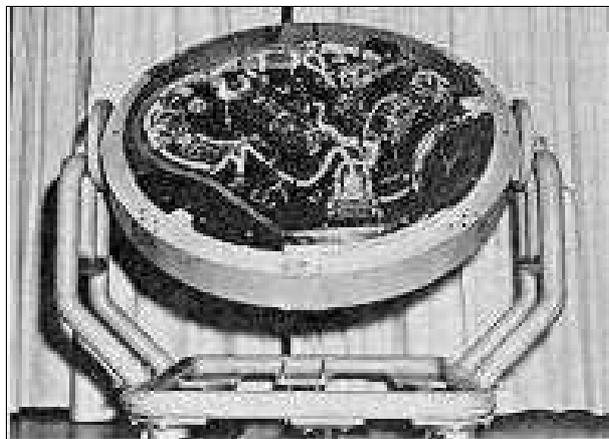


Figura 2.16 : La camera delle missioni Argon

Le missioni **KH-6** vengono identificate con il nome **Lanyard**; tale sistema produsse un'unica missione (31 Luglio 1963) che generò 2251 piedi di pellicola (quasi 670 metri).

Lo scopo del Lanyard era quello di acquisire immagini ad alta risoluzione di specifici obiettivi nell'URSS. Per questo la camera impiegata aveva una focale di 66” (circa 167.64 cm) ed “impressionava” una pellicola con risoluzione di 160 lp/mm; la risoluzione a terra

era la migliore possibile, vale a dire 6 piedi (1.83 m). L'ottica consisteva in una cella con lente singola e garantiva una copertura stereoscopica tramite uno specchio oscillante con angolo di 30°. Lo *swath* aveva le dimensioni di 7.5x40 miglia nautiche (14x75 km).

Si riportano, in figura 2.17, le diverse ottiche impiegate nelle missioni fino ad ora descritte; è sicuramente ben intuibile l'evoluzione delle camere (che sono disegnate in verde scuro).

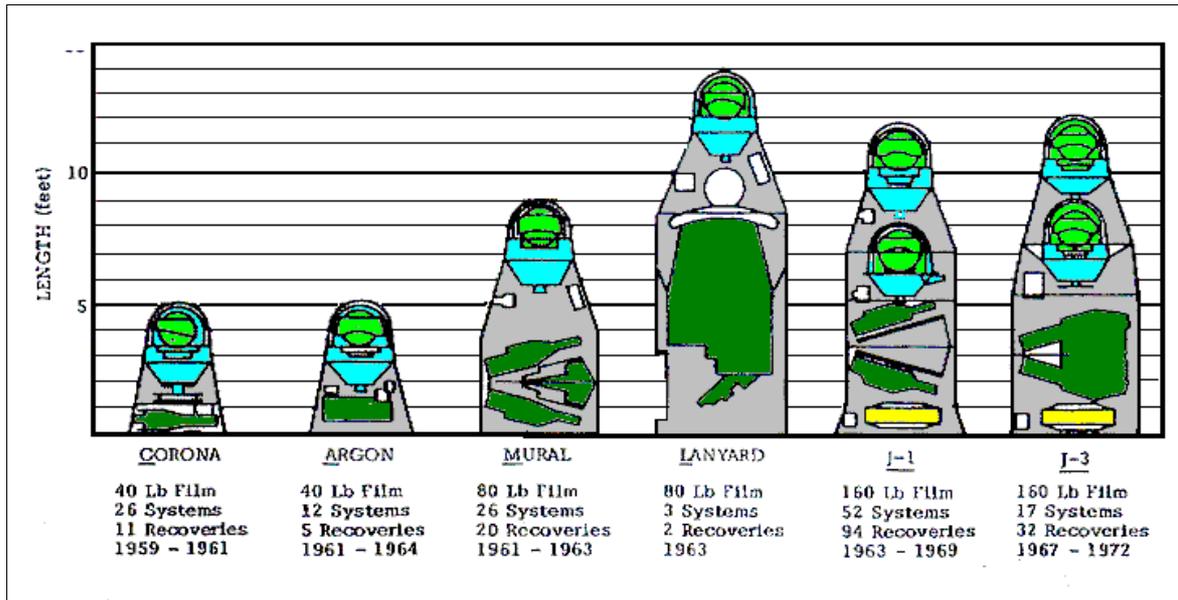


Figura 2.17 : Configurazioni di massima delle diverse camere

Nella pagina seguente viene riportata una sorta di tabella che riporta le caratteristiche salienti di tutte le missioni facenti parte del programma spaziale CORONA; la prima riga riporta gli identificativi di ciascuna missione.

	<b>KH-1</b>	<b>KH-2</b>	<b>KH-3</b>	<b>KH-4</b>	<b>KH-4A</b>	<b>KH-4B</b>
<i>Periodo di attività</i>	27/6/59 - 13/9/60	26/10/60 - 23/10/61	30/8/61 - 13/1/62	27/2/62 - 24/3/64	24/8/63 - 22/9/69	15/9/67 - 25/5/72
<i>N° di fotogrammi acquisiti</i>	1432	7246	9918	101743	517688	188526
<i>Durata di una miss. (giorni)</i>	1	2 – 3	1 – 4	6 – 7	4 – 15	19
<i>Quota dell'orbita (km)</i>						
Inferiore stimata	192	252	217	211	180	150
Superiore stimata	817	704	232	415	n/d	n/d
<i>Missioni con successo</i>	1	3	5	20	49	16
<i>Obiettivi</i>	U.R.S.S.	Enfasi su U.R.S.S.		Copertura globale/Enfasi su aree negate		
<i>IFOV</i>	5.265°	5.265°	5.265°	5.265°	5.265°	5.265°
<i>Angolo di scansione</i>	71°.16	71°.16	71°.16	71°.16	71°.16	71°.16
<i>Angolo stereo</i>	-	-	-	30°	30°	30°
<i>Lente</i>	f/5.0 Tessar	f/5.0 Tessar	f/3.5 Petzval	f/3.5 Petzval	f/3.5 Petzval	f/3.5 Petzval
<i>Focale (millimetri)</i>	609.650	609.650	609.650	609.650	609.650	609.650
<i>Risoluzione</i>						
<i>Pixel a terra (m)</i>	12.20	7.60	3.70 – 7.60	3.00 – 7.60	2.70 – 7.60	1.80 – 7.60
<i>Pellicola (lp/mm)</i>	50 – 100	50 – 100	50 – 100	50 – 100	120	160
<i>Scala nominale del film</i>	1:275000 1:760000	1:275000 1:760000	1:275000 1:760000	1:300000	1:305000	1:247.500

Tabella riassuntiva sulle caratteristiche delle missioni

## CAPITOLO 3 LE IMMAGINI PANORAMICHE CORONA

### 3.1 *Le immagini panoramiche ed il problema delle distorsioni*

Nel primo capitolo si è specificato che tutte le immagini acquisite dai satelliti CORONA sono di tipo panoramico e si è anche motivato il perché di questa scelta; ricordiamo infatti che sfruttando il “principio panoramico” si possono acquisire immagini ad alta risoluzione e con ampia copertura a terra facendo volare la piattaforma a quote di 150 km (o più) rispetto al terreno. Si evince quindi come tali caratteristiche si sposino alla perfezione con lo scopo per il quale è stato concepito il sistema CORONA (cioè la foto-ricognizione).

Tuttavia le immagini panoramiche presentano anche degli svantaggi, primo fra tutti la distorsione determinata proprio dal principio panoramico; il fatto che la pellicola non sia posizionata su un piano (come accade nelle *frame camera*) ma bensì su una sorta di cilindro determina, come facilmente intuibile, una distorsione nei fotogrammi acquisiti. Questi, inoltre, non possono essere considerati delle *prospettive centrali* e quindi il centro del fotogramma non rappresenta più la proiezione del centro di presa.

La geometria di presa panoramica determina errori per una serie di quantità, in particolare (Slama et al. 1980):

- Localizzazione della piattaforma (tempo, orbite)
- Localizzazione della scena (rifrazione atmosferica, curvatura terrestre, rotazione terrestre)
- Posizione della camera (scala della geometria, rollio, beccheggio, deriva ...)
- “Posa” degli assi nominali della camera nei confronti del supporto (rollio relativo, beccheggio relativo, deriva relativa)
- Posizionamento degli assi ottici rispetto agli assi nominali (convergenza nel beccheggio, azione del dispositivo di *FMC* nel beccheggio ...)
- Parametri di orientamento interno (focale, posizione dell’asse ottico principale e del punto principale, distorsione delle lenti ...)

- Localizzazione del punto immagine (posizione del punto lungo la “slitta” rispetto al punto principale...)

Le figura seguente mostra le distorsioni presenti nelle immagini CORONA (Sohn et alt. 2004).

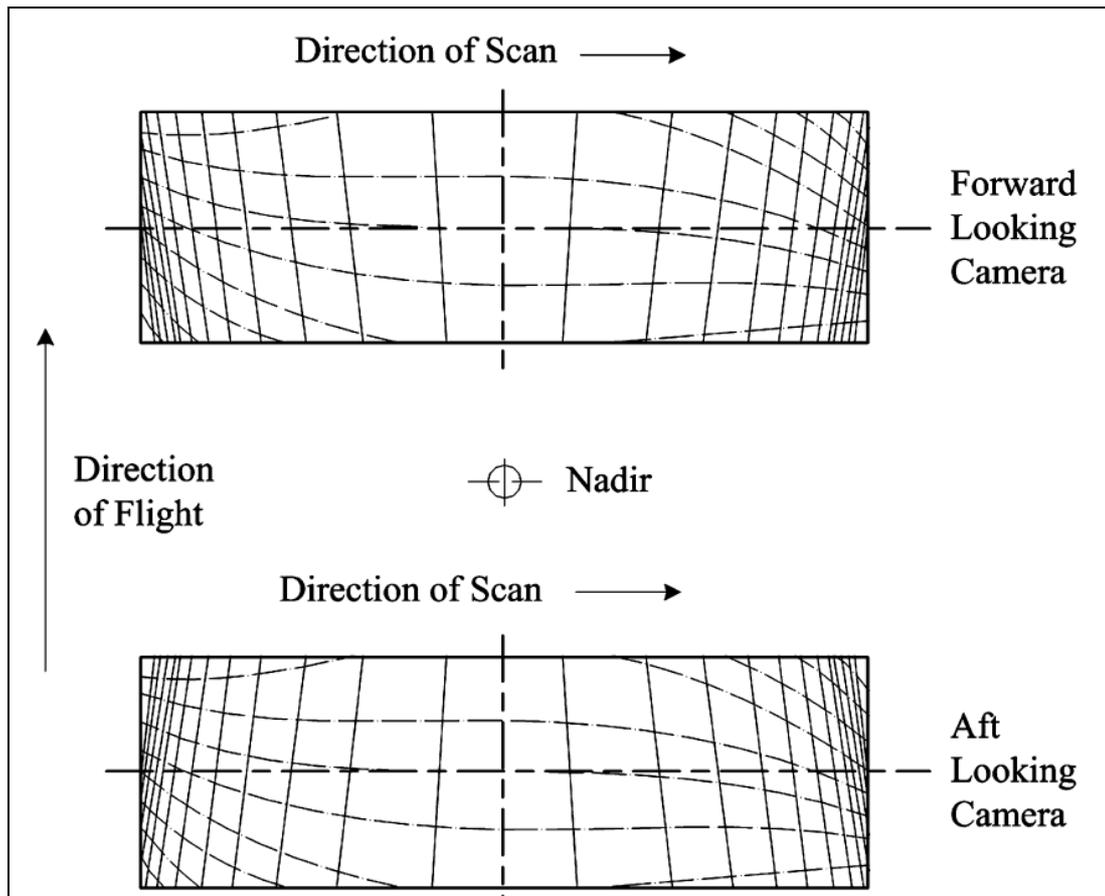


Figura 3.1 : Distorsioni per la camera “avanti” (sopra) e la camera “indietro” (sotto); la scala di rappresentazione è enfatizzata

L'utilizzo metrico delle immagini CORONA, quindi, è subordinato alla eliminazione di tali distorsioni; è cioè indispensabile un'operazione di *rettifica* dei fotogrammi.

Tale procedura agisce principalmente su tre aspetti salienti della distorsione, vale a dire:

1. *Correzione della distorsione panoramica*, cioè la correzione dello spostamento, rispetto alla posizione attesa in caso di prospettiva centrale, dei punti immagine

dovuto alla forma cilindrica della superficie su cui è posizionata la pellicola e al movimento della lente durante l'acquisizione del fotogramma.

Valgono le seguenti relazioni matematiche:

$$\left. \begin{aligned} y_p &= f \alpha \\ \alpha &= \tan^{-1} \frac{Y}{H} \end{aligned} \right\} \Rightarrow y_p = f \cdot \tan^{-1} \frac{Y}{H} \quad (1)$$

$$x_p = \frac{f}{H} x \cdot \cos \alpha$$

in cui  $x_p$  e  $y_p$  sono le componenti di distorsione panoramica,  $f$  è la focale,  $H$  è la quota di volo (relativa al *datum* utilizzato),  $Y$  è la coordinata terreno di un punto qualunque sull'immagine,  $x$  è la coordinata immagine di un punto qualunque sul fotogramma (considerando l'asse delle  $x$  orientato secondo la direzione di volo) ed  $\alpha$  è l'angolo di scansione della camera, cioè l'angolo "spazzato" durante l'acquisizione.

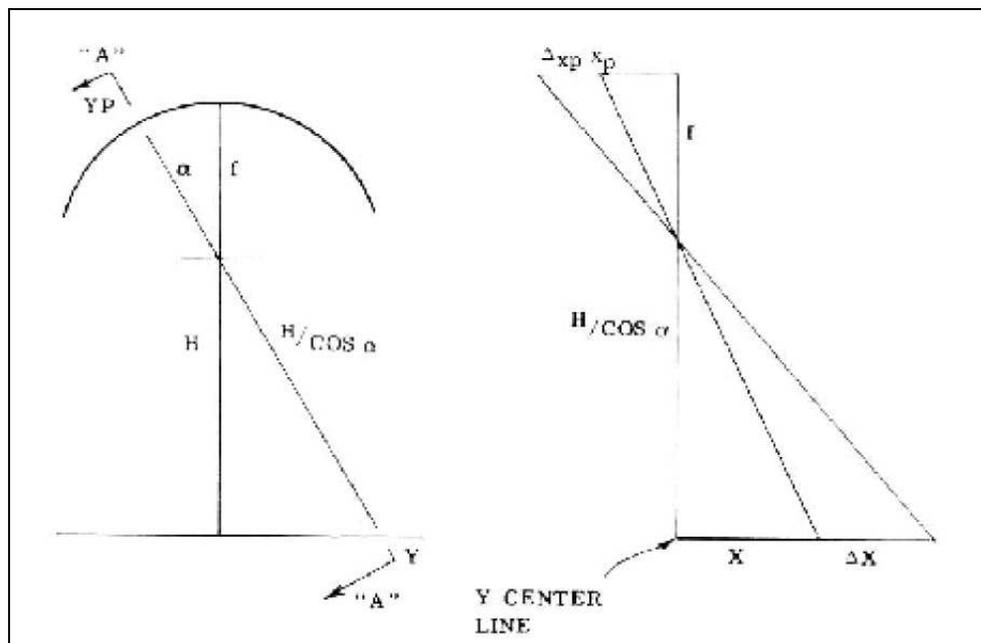


Figura 3.2 : La geometria di presa panoramica

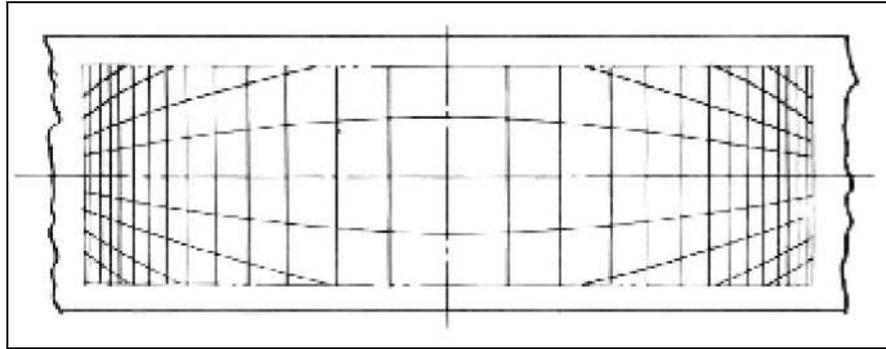


Figura 3.3 : La distorsione panoramica

2. *Correzione della distorsione di “scan positional”* cioè dello spostamento dei punti immagine (rispetto alla posizione attesa dalla geometria cilindrica) conseguente al movimento in avanti della piattaforma satellitare durante l’acquisizione del fotogramma.

In questo caso vale la relazione:

$$\left. \begin{aligned} x_s &= \frac{f}{H} \cdot V \cdot t \cdot \cos \alpha \\ t &= \frac{\alpha}{\delta} \end{aligned} \right\} \Rightarrow x_s = \frac{V \cdot \alpha \cdot f \cdot \cos \alpha}{H \cdot \delta} \quad (2)$$

dove  $x_s$  è la componente di distorsione di “scansione”,  $V$  rappresenta la velocità della piattaforma rispetto al suolo,  $t$  è il tempo di scansione della camera e  $\delta$  è la velocità angolare del braccio di scansione su cui è montata la camera (in gradi/secondo).

Tale distorsione è rappresentata in figura 3.5.

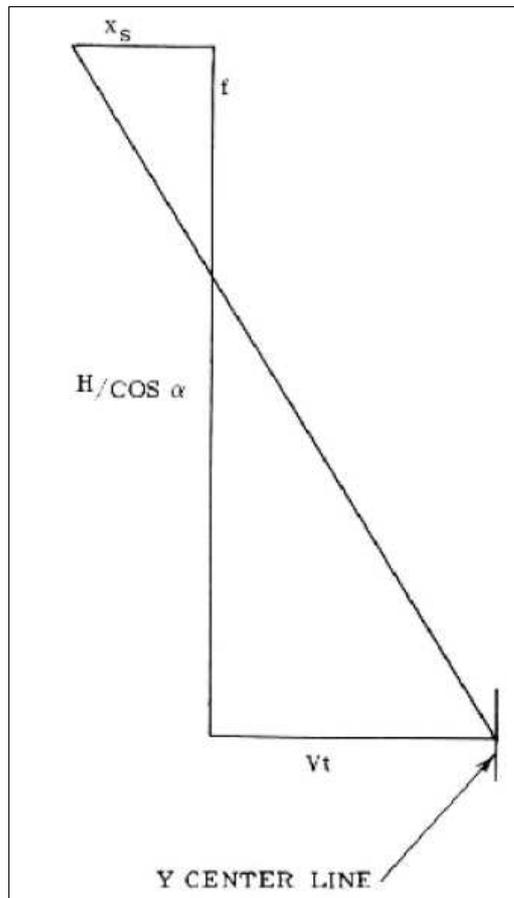


Figura 3.4 : Schema geometrico della distorsione di scansione

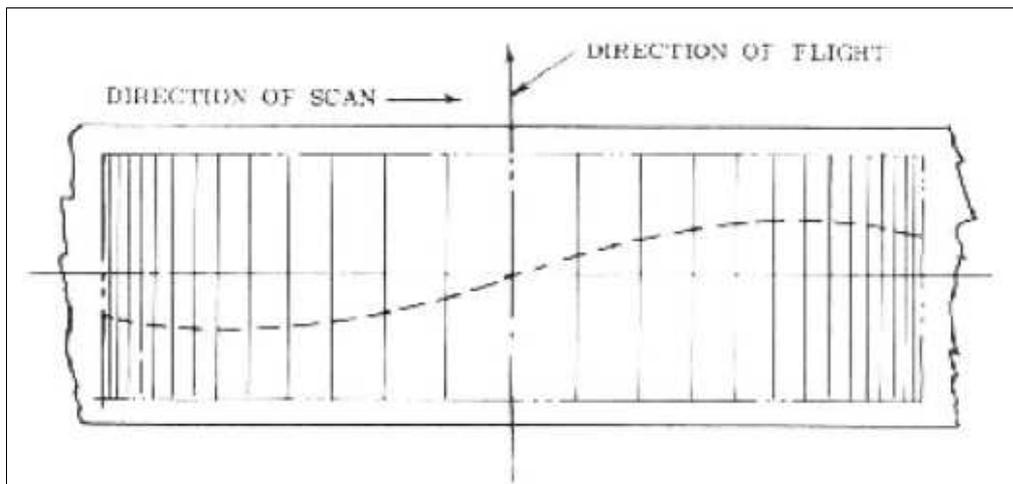


Figura 3.5 : Effetto della distorsione di scansione sul fotogramma

3. *Correzione della distorsione dovuta all'azione del dispositivo di IMC (Image Motion Compensation) cioè dello spostamento dei punti immagine, rispetto alla posizione attesa secondo la prospettiva cilindrica, conseguente all'impiego del dispositivo suddetto; con questo dispositivo veniva spostata la lente, o la pellicola, per compensare (Compensation) il movimento in avanti (Forward) della piattaforma.*

Si utilizza la relazione matematica:

$$v = \frac{dx_{im}}{dt} = \frac{f \cdot V \cdot \cos \alpha}{H} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} dx_{im} = \frac{f \cdot V \cdot \cos \alpha}{H} dt \\ dt = \frac{d\alpha}{\delta} \end{array} \right\} \Rightarrow x_{im} = -\frac{V \cdot f}{\delta \cdot H} \sin \alpha \quad (3)$$

dove  $x_{im}$  è la componente di distorsione dovuta all'azione dell'IMC,  $v$  è la velocità dell'immagine nel piano focale e i restanti simboli hanno il significato sopra ricordato.

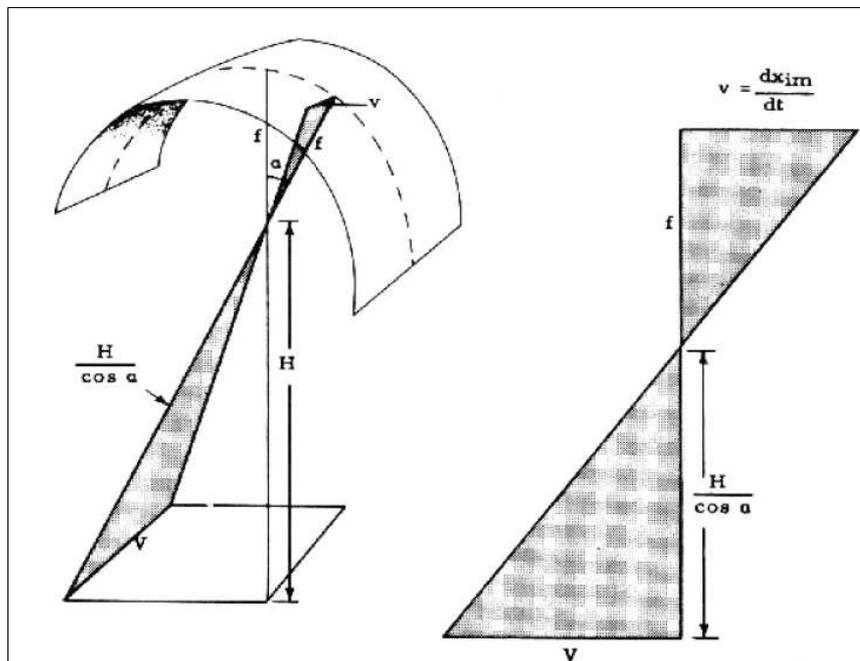


Figura 3.6 : Geometria della distorsione per IMC

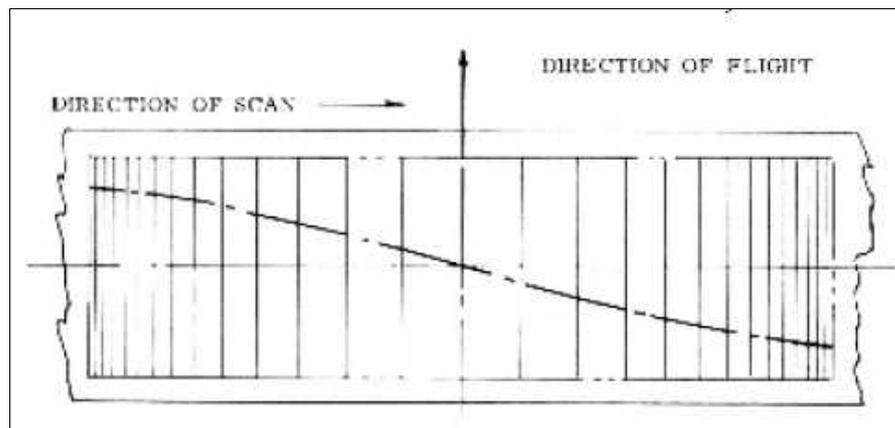


Figura 3.7 : Effetto della distorsione sul fotogramma

Quelle descritte fino ad ora sono distorsioni che affliggono il posizionamento “planimetrico” dei punti immagine; è presente anche una distorsione nella “posizione” panoramica verticale dovuta al rovesciamento dell’asse di scansione all’interno del piano verticale contenente la linea di volo. A seguito di questa distorsione le immagini delle linee parallele alla traiettoria di volo vengono a formare un angolo rispetto alla “immagine” della traiettoria stessa sul fotogramma.

La combinazione delle quattro distorsioni appena descritte genera fotogrammi aventi l’aspetto riportato in figura 3.1.

Da quanto sopra descritto e ricordato, emerge come le immagini panoramiche siano, in generale, una riproduzione geometrica piuttosto distorta della realtà; i fattori che influenzano questa situazione sono di svariata natura. Con riferimento alla geometria interna delle camere panoramiche abbiamo:

- *fattori ottici* quali la distorsione delle lenti (di norma pochi micron) e la distanza fra il punto nodale della lente e la pellicola durante la scansione.
- *fattori ottico-meccanici* come la mancata rotazione della lente attorno al proprio punto nodale, movimenti irregolari della lente o del braccio di scansione, la vibrazione dei componenti ottici e meccanici per tutta la larghezza del formato della pellicola. Tutti questi fattori hanno un effetto negativo sulla geometria interna e la qualità della immagine potrebbe risultare incompatibile con l’alta risoluzione di cui sono capaci i “sistemi panoramici”.

- *fattori meccanici* come il movimento della pellicola durante la scansione (pellicola che è supposta stazionaria) o il posizionamento fuori dal piano focale del film; anche il movimento irregolare o errato del dispositivo *IMC* può distorcere eccessivamente l'immagine.

### 3.2 *La correzione delle distorsioni nelle immagini panoramiche*

Ora che sono state presentate le distorsioni (e le cause che le determinano) presenti nelle immagini panoramiche ed avendo quindi illustrato come tali immagini siano differenti dalle classiche immagini *frame*, verranno illustrati gli approcci praticabili per la correzione delle distorsioni stesse cioè per eseguire la cosiddetta *rettifica* delle immagini. Tale procedura risulta indispensabile nel caso si vogliano ricavare informazioni metriche dai fotogrammi.

Secondo Slama et al. (1980) esistono 4 approcci possibili con i quali eseguire la rettifica; la prima distinzione da operare è fra metodi ottici e metodi elettronici. A loro volta queste due “famiglie” possono essere combinate per migliorare o facilitare l'esecuzione di talune operazioni.

I metodi ottici (puramente ottici oppure con l'ausilio di un computer) offrono molti vantaggi, come per esempio il mantenimento dell'alta risoluzione, la rigida conservazione della geometria dell'immagine e l'affidabilità degli strumenti utilizzati. D'altro canto questi approcci richiedono elevate quantità di tempo e rendono difficile l'integrazione dei “prodotti” con altre tipologie di dato.

I metodi elettronici (puramente elettronici o integrati con quelli ottici) sono sicuramente più versatili ed offrono la possibilità di mantenere pressoché inalterata la risoluzione del dato grezzo; è tuttavia possibile la perdita di interpretabilità dei prodotti.

Come per tutte le immagini satellitari, anche nel caso delle CORONA la conoscenza delle effemeridi della piattaforma consentirebbe la correzione delle distorsioni presenti nell'immagine. Tuttavia, data la segretezza entro cui fu concepito l'intero progetto, le

effemeridi non vennero declassificate (come invece accadde per le immagini) e quindi la rettifica delle immagini utilizzando parametri orbitali non è praticabile.

Per questo motivo sono stati sviluppati in letteratura altri metodi per la correzione delle distorsioni.

Il primo approccio venne proposto da Case (1967). Egli presentò il cosiddetto metodo *IEFP* (acronimo di *Instantaneous Equivalent Frame Photograph*), basato sul concetto di “ridurre” l’immagine panoramica ad una immagine *frame* equivalente avente la stessa lunghezza focale e inclinazione. Non ritenendo utile la descrizione di questo metodo, si rimanda alla bibliografia per l’approfondimento.

Le idee di Case vennero approfondite da Devereaux (1973), il quale studiò la possibilità di impiegare, assieme alla camera panoramica, una camera *frame* con la quale generare la necessaria densità di “controllo” (visto come parametri noti) richiesta per una calibrazione “in volo” della camera panoramica.

Slama (1980) propose la compilazione di appositi programmi al calcolatore e l’applicazione di specifiche trasformazioni ed algoritmi costruiti “su misura” per il tipo di dato da trattare. Questo approccio richiedeva molti sforzi e risultava una “strada cieca” in quanto erano comunque alcuni dati sulla piattaforma che non erano reperibili e coordinate di punti a terra che non erano accurati.

Sohn et al. (2004) hanno proposto tre differenti metodologie per la correzione delle distorsioni: la prima consiste nell’impiego di equazioni di collinearità modificate, la seconda prevede l’utilizzo di equazioni di collinearità con parametri di orientamento esterno dinamici modellati in funzione del tempo, la terza è fondata su funzioni polinomiali razionali (*RFM*) “appoggiate” al terreno. In questa ultima “variante” non viene utilizzato alcun modello fisico del sensore di acquisizione. Tutti e tre i metodi proposti prevedono l’utilizzo di tre sistemi di coordinate immagine piane, come illustrato in figura 3.8 .

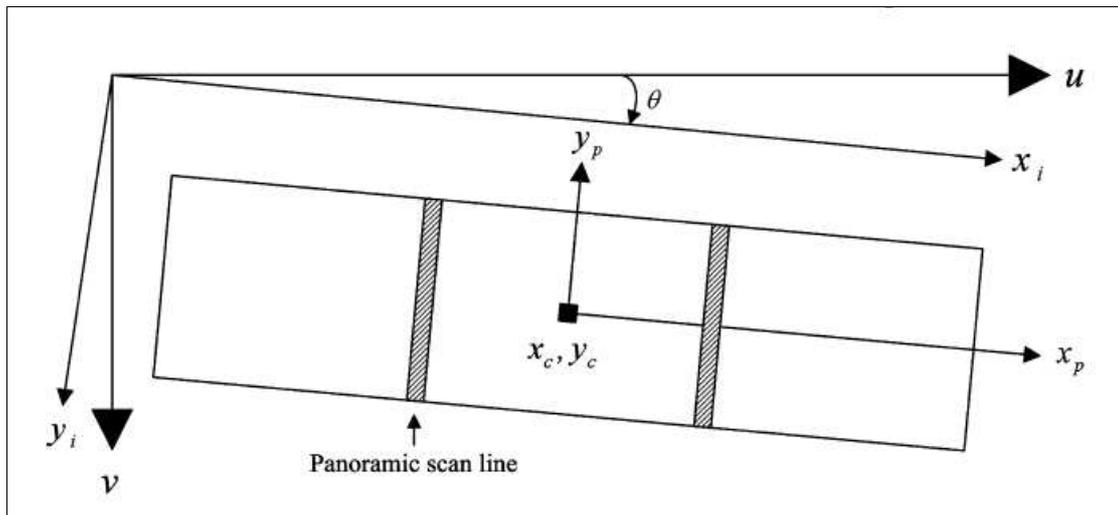


Figura 3.8 : Sistemi di coordinate immagine alla base dei metodi proposti da Sohn et al.

Il sistema  $(u, v)$  è determinato dalla scansione dei fotogrammi CORONA; esso ha origine nell'angolo in alto a sinistra, l'asse delle  $u$  orientato in direzione del numero crescente di colonna e l'asse delle  $v$  orientato secondo il numero crescente di riga.

Un altro sistema è quello  $(x_i, y_i)$  ottenuto ruotando il sistema appena menzionato di un angolo  $\theta$  (definito dalle linee di bordo del fotogramma); questo sistema è legato al precedente dalla relazione:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (4)$$

Il terzo è il sistema di coordinate panoramiche  $(x_p, y_p)$ , avente origine al centro del "film" panoramico; la posizione di questo "centro" non è nota con precisione a causa della mancanza del file di calibrazione della camera. Essa viene assunta incognita ed è, quindi, definita come "pseudo centro". L'asse  $y_p$  è parallelo all'asse  $y_i$  e alla linea panoramica di scansione della pellicola allo stesso istante di esposizione.

Le coordinate immagine ruotate  $(x_i, y_i)$  vengono convertite nelle coordinate panoramiche fotografiche  $(x_p, y_p, z_p)$  tramite le relazioni seguenti:

$$\begin{aligned} x_p &= (x_i - x_c) \cdot d \\ y_p &= (y_i - y_c) \cdot d \\ z_p &= -f = -609.602 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5)$$

dove  $x_c, y_c$  sono il numero di riga e di colonna del “pseudo centro”,  $d$  è la grandezza del pixel dell’immagine (cioè la risoluzione con cui è stata scansionata la pellicola) ed  $f$  è la lunghezza della focale.

L’approccio delle *Equazioni di collinearità modificate* consiste nel trovare la relazione esistente fra le coordinate immagine panoramiche e le “equivalenti” coordinate *frame* ( $x_f, y_f$ ) in un piano tangente. Tali relazioni derivano dalla correzione delle distorsioni esplicitate in precedenza.

Una volta trovate le equazioni della immagine frame equivalente è possibile ottenere le coordinate immagine corrette dalle distorsioni ( $x'_f, y'_f$ ); queste possono essere direttamente inserite nelle equazioni di collinearità tradizionali, come di seguito riportato:

$$\begin{aligned}
 x'_f &= x_f = f \cdot \tan \alpha \\
 y'_f &= y_f + (y_s + y_{im}) \sec \alpha = \frac{y_p}{\cos \alpha} + \frac{V \cdot f}{H \cdot \delta} (\alpha - \tan \alpha) \\
 \begin{bmatrix} x'_f \\ y'_f \\ -f \end{bmatrix} &= s \mathbf{M} \begin{bmatrix} X - X_c \\ Y - Y_c \\ Z - Z_c \end{bmatrix} \\
 \mathbf{M} &= \mathbf{M}_\omega \mathbf{M}_\varphi \mathbf{M}_\kappa
 \end{aligned} \tag{6}$$

dove  $s$  è il fattore di scala,  $\mathbf{M}$  è la matrice di rotazione in funzione degli angoli di rotazione ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) fra il sistema di coordinate a terra e il sistema di coordinate immagini corrette, ( $X, Y, Z$ ) sono le coordinate a terra e ( $X_c, Y_c, Z_c$ ) le coordinate del centro di prospettiva.

Nelle relazioni appena scritte ci sono 9 incognite ( $x_c, y_c, X_c, Y_c, Z_c, \omega, \varphi, \kappa, V, H, \delta$ ) determinabili con un minimo di 5 *GCP* (punti a terra di coordinate note).

Il metodo appena illustrato è valido se si suppone che la piattaforma satellitare sia ferma durante l’acquisizione di ciascun fotogramma.

Nel caso, invece, si voglia considerare il movimento del satellite durante la “cattura” del fotogramma si ricorre al metodo delle equazioni di collinearità modificate con parametri di orientamento esterno dipendenti dal tempo. Tale impostazione sarebbe molto complessa e richiederebbe una notevole quantità di parametri. Date l’elevata velocità della piattaforma, la bassa quota di volo e il breve tempo di scansione (circa 0.5 gradi/secondo) è possibile considerare i parametri di orientamento esterno come funzioni lineari del tempo, semplificando il problema; si ottengono le seguenti equazioni di collinearità modificate:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} 0 \\ y_p + IMC_t \\ -f \end{bmatrix} &= s\mathbf{M}_\alpha \mathbf{M} \begin{bmatrix} X - X_c \\ Y - Y_c \\ Z - Z_c \end{bmatrix} \\
 \mathbf{M}_\alpha^t \begin{bmatrix} 0 \\ y_p + IMC_t \\ -f \end{bmatrix} &= s\mathbf{M} \begin{bmatrix} X - X_c \\ Y - Y_c \\ Z - Z_c \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} f \sin \alpha \\ y_p + IMC_t \\ -f \cos \alpha \end{bmatrix} &= s\mathbf{M} \begin{bmatrix} X - X_c \\ Y - Y_c \\ Z - Z_c \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{7}$$

dove  $\mathbf{M}_\alpha$  è la matrice di rotazione dell'angolo di scansione al tempo  $t$ .

I corrispondenti parametri di orientamento esterno vengono espressi come funzioni lineari del tempo:

$$\begin{aligned}
 X_c &= X_0 + X_1 t \\
 Y_c &= Y_0 + Y_1 t \\
 Z_c &= Z_0 + Z_1 t \\
 \omega &= \omega_0 + \omega_1 t \\
 \phi &= \phi_0 + \phi_1 t \\
 \kappa &= \kappa_0 + \kappa_1 t \\
 IMC_t &= -\frac{f \cdot V}{H \delta} \sin \alpha
 \end{aligned} \tag{8}$$

dove  $\omega \phi \kappa$  sono gli elementi della matrice di rotazione al tempo  $t$ , e  $X_c, Y_c, Z_c$  le coordinate terreno del centro di prospettiva al tempo  $t$ . Per ciascun punto a terra di una linea registrata al tempo  $t$  il corrispondente punto immagine deve soddisfare le equazioni di collinearità una volta applicati i parametri di orientamento. Risultano, quindi, 14 parametri incogniti per ciascuna immagine (elenco); essi possono essere determinati conoscendo un minimo di 7 GCP ed applicando una tecnica di compensazione ai minimi quadrati.

Come prima accennato, Sohn et al. (2004) propongono, per la correzione delle distorsioni nelle immagini CORONA, una tecnica basata sulle funzioni polinomiali fratte “appoggiate”

al terreno (da loro definita *Terrain-dependent Ractional Function Model*). Questo approccio è del tutto generale in quanto i polinomi razionali fratti sono indipendenti dalle caratteristiche del sensore.

Le coordinate immagine di ciascun pixel sono espresse dal rapporto di polinomi che rappresentano le coordinate terreno del corrispondente punto. Il passaggio dallo spazio terreno a quello immagine è definito dal seguente rapporto fra polinomi:

$$r = \frac{p_1(X, Y, Z)}{p_2(X, Y, Z)} \quad c = \frac{p_3(X, Y, Z)}{p_4(X, Y, Z)} \quad (9)$$

dove  $r$  e  $c$  sono gli indici riga colonna normalizzati del pixel e  $(X, Y, Z)$  sono le coordinate terreno normalizzate dell'oggetto. Ciascun polinomio ha la forma generale del tipo:

$$p = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k \quad (10)$$

dove  $a_{ijk}$  sono gli *RFCs* (*Rational Function Coefficients*), cioè i coefficienti dei polinomi fratti.

Senza un modello fisico del sensore non è possibile costruire la “griglia” tridimensionale degli oggetti; riveste quindi un ruolo fondamentale la scelta del numero e della distribuzione dei *GCP*. Se questi non sono scelti in modo accurato il risultato non sarà soddisfacente. Per giunta la soluzione delle *RFM* non è numericamente stabile.

Impiegando, ad esempio, polinomi di secondo grado sono incogniti 38 *RFC* e quindi sono necessari almeno 19 *GCP*.

L'evoluzione della tecnologia e lo sviluppo di software sempre più avanzati non hanno comunque risolto definitivamente il problema della correzione delle distorsioni citate all'inizio del capitolo; non esiste infatti un programma specifico per il trattamento delle immagini CORONA. Questo principalmente per due motivi: il primo è la complessità (talvolta incapacità) di potere reperire dati specifici per ciascuna delle missioni di questo programma satellitare, dati con i quali sarebbe possibile “costruire” modelli accurati delle camere e sviluppare algoritmi specifici per la rettifica delle immagini. Altro motivo risiede nel fatto che, dal momento della loro declassificazione ad oggi, le immagini CORONA sono state impiegate in pochissime occasioni al fine di ricavarne informazioni metriche; infatti l'uso predominante di tali fotogrammi è stato (ed è in parte tutt'ora) la foto interpretazione vale a dire un uso dal punto di vista “qualitativo” e non “quantitativo”

(inteso come metrico) dell'immenso patrimonio storico e geografico rappresentato da queste immagini.

Galiatsatos (2004) è stato uno dei primi a voler ricavare informazioni metriche dai fotogrammi CORONA; per riuscirci ha utilizzato due approcci differenti sfruttando le potenzialità di due software, cioè *SocetSet* (della BAE System) ed *Erdas Ortho Image* (della Leica).

Il primo di questi due programmi mette a disposizione dell'utente il modulo di camera panoramica, consentendo quindi un trattamento "specifico" delle immagini; grazie a questo modello di sensore, infatti, è possibile la correzione delle distorsioni connesse alla particolare geometria di acquisizione. Tuttavia, come verrà illustrato nei capitoli seguenti, tale modulo richiede una serie di parametri di partenza non sempre semplici da rintracciare o che comunque richiedono una pre-elaborazione dell'immagine.

Il software della *Leica* non possiede al suo interno un modulo specifico per le immagini panoramiche; la "miglior" cosa che si può fare è sfruttare il modello di camera non metrica (in sostanza una camera della quale non si conosce il certificato di calibrazione e quindi neppure l'entità delle distorsioni). Tale modulo richiede, quali parametri in ingresso, solamente il valore della distanza focale e le dimensioni del pixel; la prima è, come ricordato, una grandezza standard in tutte le missioni, la dimensione del pixel è nota una volta conosciuta la risoluzione con cui è stata scansionata la pellicola.

E' chiaro che l'utilizzo del software prodotto dalla BAE consente di sfruttare a pieno le potenzialità dei fotogrammi CORONA, ma non sempre le informazioni richieste dal modulo specifico sono a disposizione dell'utente e valori "improvvisati" o "ipotizzati" spesso non consentono una corretta elaborazione. L'impiego di modello di camera non metrica è sì più semplice ma porta, inevitabilmente, alla perdita di alcune delle caratteristiche dei fotogrammi.

Indipendentemente da quale dei metodi illustrati si scelga di utilizzare, sarebbe evidentemente indispensabile avere un buon "controllo a terra", nel senso che occorrerebbe conoscere le coordinate, quanto più precise possibili, dei *GCP*.

### 2.3 Il sistema di coordinate immagine nei fotogrammi CORONA

Come prima ricordato la correzione delle distorsioni panoramiche sarebbe perfetta avendo a disposizione il *certificato di calibrazione* della camera con la quale è stata acquisita l'immagine relativa. Tuttavia, dato l'alone di segretezza in cui è nato ed è stato sviluppato l'intero progetto, non è affatto facile reperire il suddetto certificato; anzi a volte è proprio impossibile farlo, nonostante tutti i dati e parametri riguardanti il programma CORONA siano stati formalmente declassificati.

Ad esempio se si volessero informazioni dettagliate in merito ad una precisa missione bisognerebbe seguire una rigida procedura di richiesta; occorrerebbe infatti inoltrare richiesta scritta allo *NRO (National Reconnaissance Office)* nella quale specificare con estrema esattezza le proprie credenziali e lo scopo per il quale tali informazioni vengono richieste. Una volta ottenuta l'autorizzazione all'ottenimento dei dati occorrerebbe recarsi personalmente presso gli uffici del NRO (in Virginia, USA) e ritirare le informazioni per le quali è stata inoltrata la suddetta richiesta

Per ciascuna missione, comunque, venne redatto un report di calibrazione contenente: un abbozzo del formato (che includeva il sistema di identificazione dei punti ed il sistema di coordinate), statistiche di calibrazione (compresa la varianza media dei *rail holes* e per ciascuna delle tracce), lunghezza della focale e costanti della camera (in micron) ed una lista di coordinate per tutti i 73 fori (*holes*) su ciascuno dei "binari" (*rails*) e per tutti i 73 punti su ciascuna "traccia". I punti sulle tracce sono determinati dall'intersezione delle linee congiungenti ciascuna coppia di buchi opposti e le tracce stesse.

Il sistema di numerazione di tali punti aveva la forma di una matrice con 5 righe e 73 colonne, con un sistema irregolare di numerazione delle righe.

Le figure 2.9 e 2.10 illustrano il sistema di coordinate immagine per i fotogrammi acquisiti, rispettivamente, dalla camera avanti e da quella indietro. In entrambe sono visibili, ai margini dell'immagine, delle sigle numeriche (0301 0401 0501 ecc); i primi due valori indicano l'indice di riga, gli altri due l'indice di colonna. L'asse positivo delle X è orientato secondo la direzione di volo.

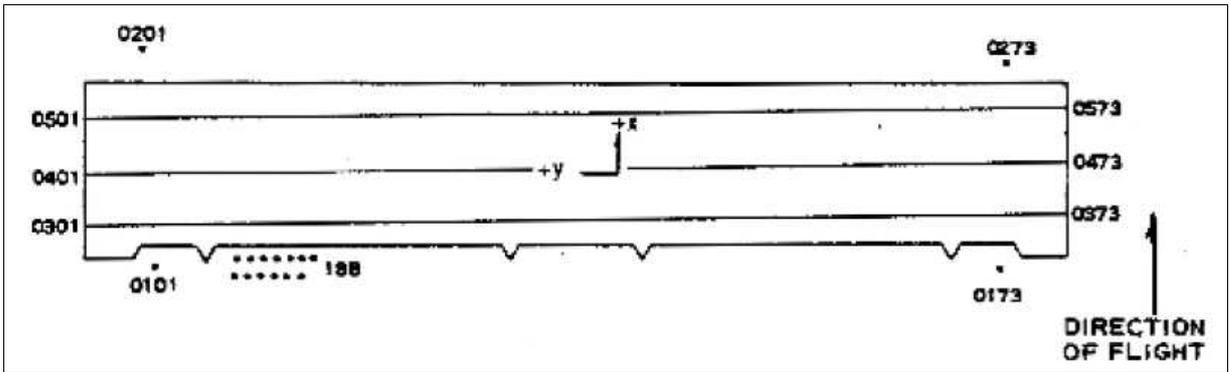


Figura 3.9 : Geometria del fotogramma della camera "avanti"

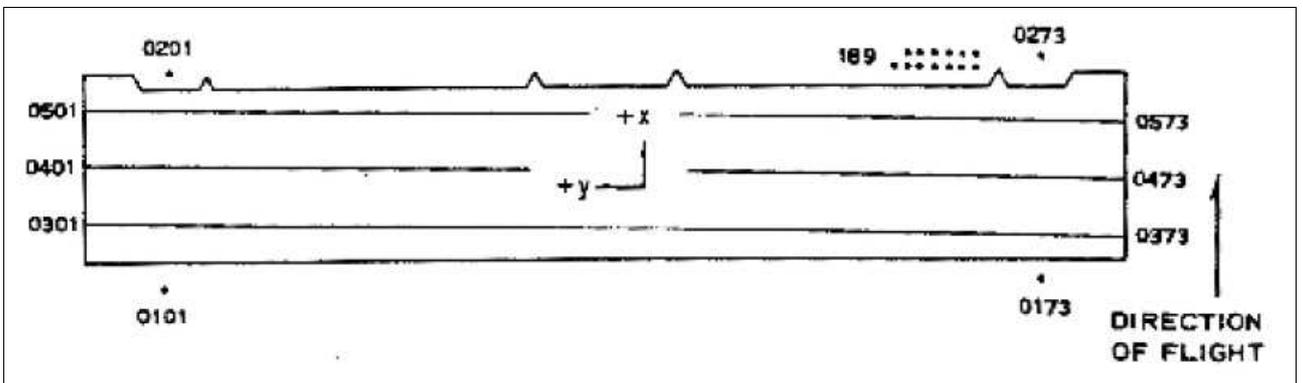


Figura 3.10 : Geometria del fotogramma della camera "indietro"

## CAPITOLO 4 IL SITO ARCHEOLOGICO DI TILMEN HÖYÜK

### 4.1 Informazioni generali

Come già anticipato nell'introduzione, il recupero metrico di fotogrammi storici si rivela utile a svariati tipi di studio, con particolare riguardo a quelli di natura storica ed archeologica.

Alla radice di questo lavoro di tesi vi è, tra le altre, un'esigenza di tipo archeologico; la zona interessata al recupero, infatti, è collocata in Turchia e comprende quello che oggi è il sito archeologico di *Tilmen Höyük*. Tale sito si trova nella fertile valle di *Islahiye*, una pianura orientata nord-sud delimitata ad ovest dalle alte catene dell'Amano, a nord da quelle del Tauro e a est dal *Kurt Dağ*; la valle si collega, a sud, alla depressione dello *Amuq*.

Tilmen è collocata a 10 chilometri ad Est della città di *Islahiye*, all'interno della provincia di *Gaziantep* nella parte sud occidentale della Turchia (figura 4.1).



Figura 4.1 : Collocazione geografica del sito di Tilmen

Il ritrovamento di questo sito archeologico risale al 1958 a seguito di una spedizione turca guidata da Alkhim B. (circa lo stesso periodo in cui è stato concepito, sviluppato ed attuato

il progetto CORONA); a questa prima spedizione seguirono decine di campagne di scavo che portarono alla luce vasti tratti delle fortificazioni nella città bassa, una porta ubica maggiore, due porte minori e parte dei monumenti costituenti l'acropoli.

Alla prima campagna di scavi sono seguiti una prima campagna di restauro tra il 2002-2003 (condotta da Duru R.) e una missione archeologica italo-turca del 2003 condotta dal Dipartimento di Archeologia dell'Università di Bologna in collaborazione con i professori Duru R. e Umurtak G. dell'università di Istanbul ed il museo Archeologico di Gaziantep.

Il responsabile scientifico della missione per l'Università di Bologna è il Prof. Nicolò Marchetti; il DISTART collabora attivamente al progetto dal 2005.

Secondo quanto riportato da un articolo dello stesso Marchetti (*Architettura viva*, 2007) Tilmen fu sicuramente una fiorente capitale durante l'età del Bronzo Medio (vale a dire tra il 2000 ed il 1600 a.C.). Questo sito archeologico rappresenta uno dei principali punti di partenza sia per ricostruire i contatti tra Anatolia e Siria, sia per indagare l'organizzazione delle capitali del II millennio a.C. (contemporanee agli splendori di *Elba* e *Ugarit*).

### ***3.2 Descrizione del sito archeologico***

Come la maggior parte delle città dell'età del Bronzo Medio, anche Tilmen era fortificata da mura (realizzate con una serie continua di casematte) e "sede di cancellerie imperiali, impegnata in intense attività commerciali, diplomatiche e militari all'interno di una fitta rete di rapporti che si estendeva dall'Egitto a Creta e all'Anatolia e dal Levante sino alla Mesopotamia e all'Iran sudoccidentale" (Marchetti N.).

Da una ricostruzione condotta al calcolatore, partendo dai dati raccolti in fonti iconografiche, analisi strutturali e planimetriche degli edifici, Tilmen aveva probabilmente la seguente configurazione presentata in figura 4.2.

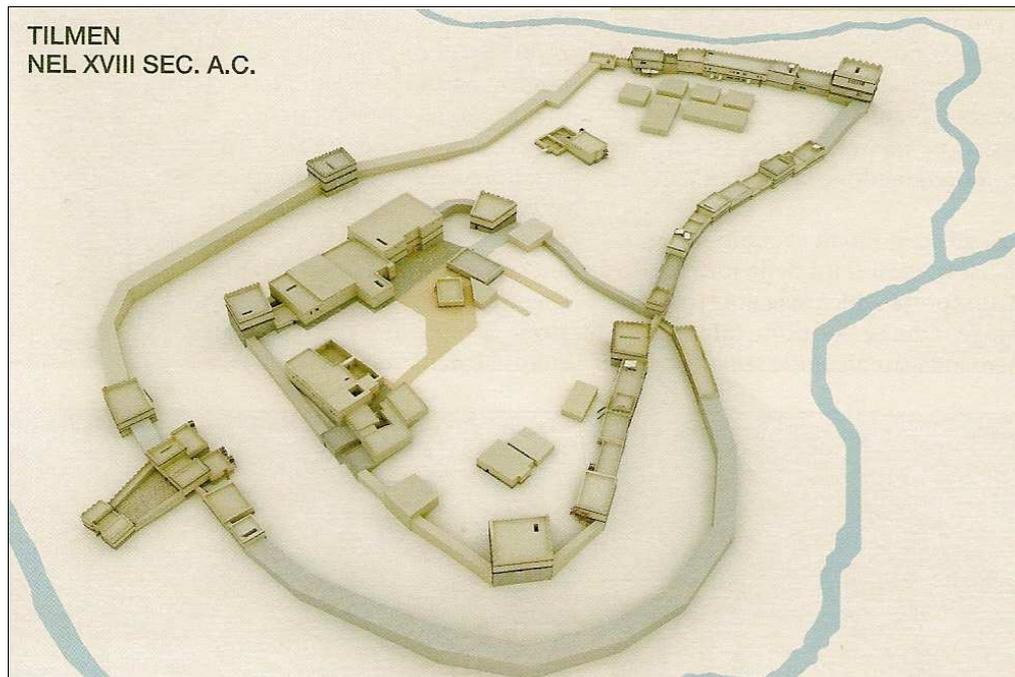


Figura 4.2 : Ricostruzione al calcolatore di Tilmen.

I monumenti portati alla luce durante gli scavi sono tutti realizzati con blocchi di basalto (molto abbondante nella regione); gli alzati sono in mattoni crudi.

Il sito occupa una superficie di 5.5 ettari; comprende una città bassa fortificata con un sistema continuo di casematte e un'acropoli eccentrica fortificata, presentandosi come uno dei siti più monumentali di tutta la regione.

Nel sistema di casematte che fortifica la città bassa si aprono due accessi minori (denominati K-2 e K-3) e una porta monumentale (figura 4.3) costituita da un corpo avanzato fiancheggiato da due torri con due leoni scolpiti ai lati dell'entrata; tale porta, che dà accesso all'acropoli, è collegata a una porta urbana maggiore (K-1) costituita da due torri che delimitano un vano centrale.

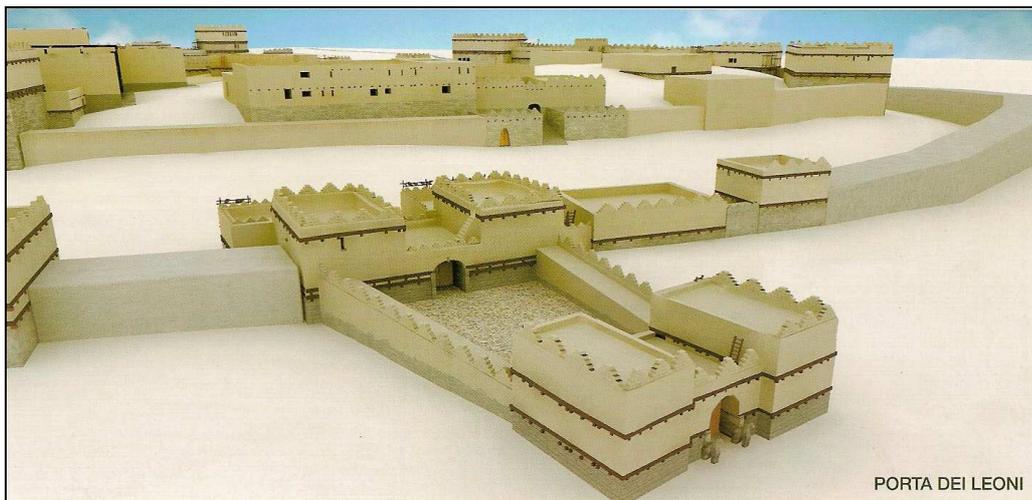


Figura 4.3 : Ricostruzione al computer della *Porta dei Leoni*

Da K-1, tramite una scalinata monumentale (K-5; figura 4.4), si sale sull'acropoli fortificata, in cima alla quale una strada basolata si dirige a sud verso l'area pubblica monumentale.

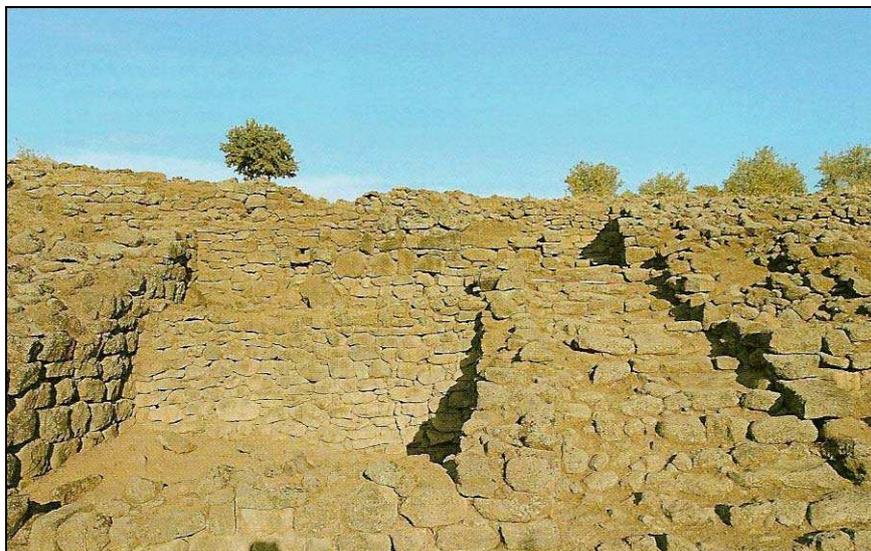


Figura 4.4 : La scalinata che porta all'acropoli

Nei pressi di tale scalinata è stata portata alla luce un'ampia residenza (figura 4.5) articolata intorno a due grandi corti; il settore settentrionale dell'edificio comprendeva una *suite* di rappresentanza con ingressi ad ortostati, un cortiletto pavimentato in basoli e due vani con pavimenti in tritume calcareo. Nell'edificio venivano svolte anche attività

connesse con la lavorazione dei cibi; ciò è testimoniato dalla presenza di un forno da pane nella corte principale e numerose macine in basalto per graniglie rinvenute nello strato di crollo del vano d'ingresso.

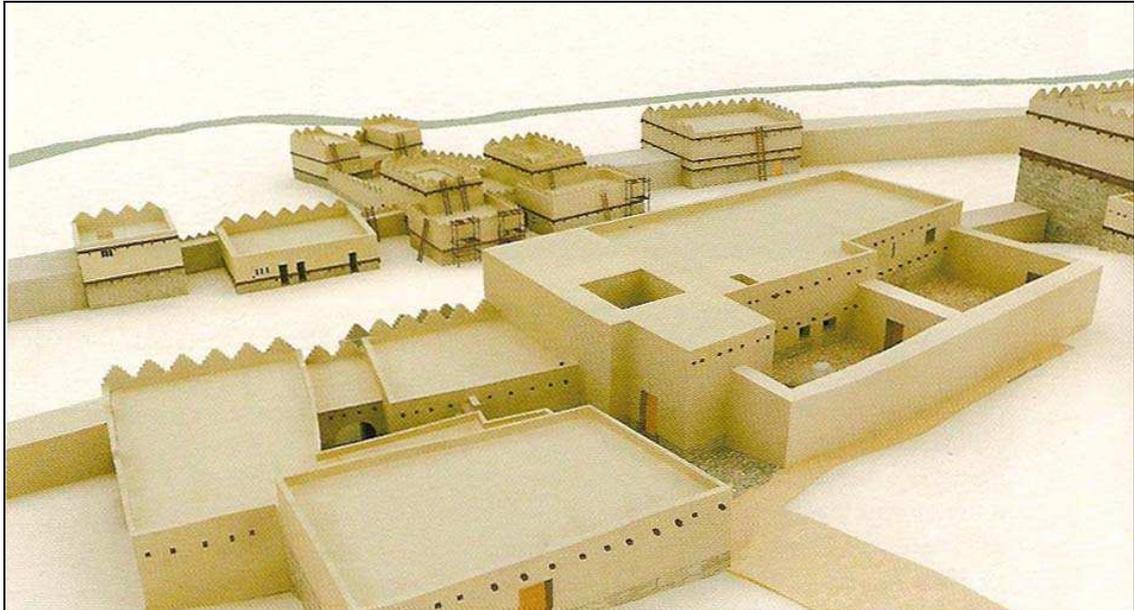


Figura 4.5 : Ricostruzione virtuale della grande residenza

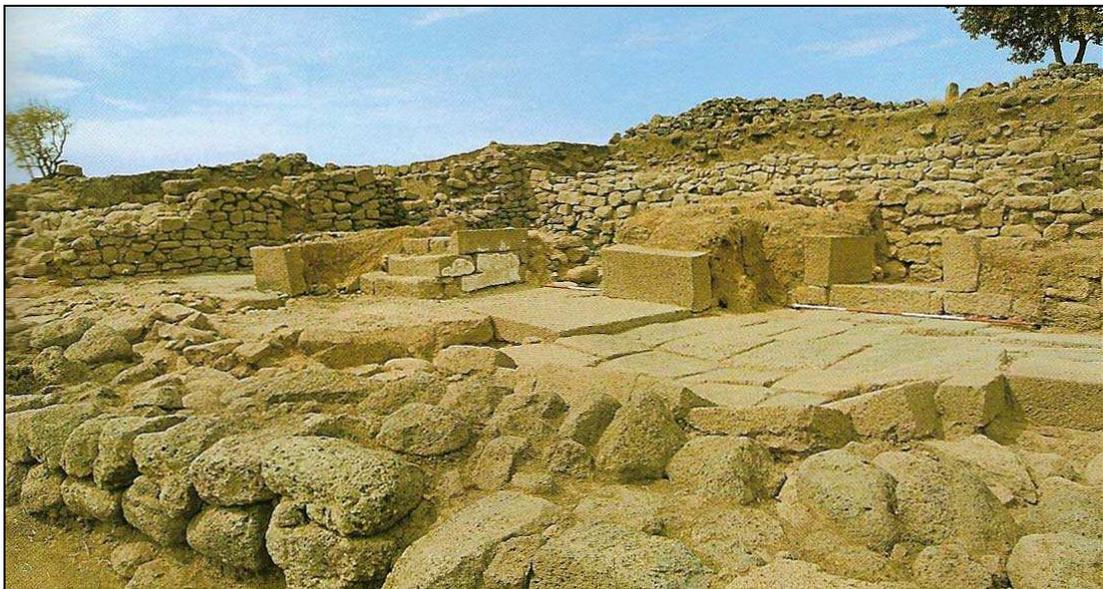


Figura 4.6 : La grande residenza come appare in realtà

L'area pubblica monumentale sull'acropoli si compone di quattro grandi edifici, esplorati nel 2003 e 2004: l'edificio (E) (forse un tempio) e un palazzo reale (A), una residenza (C) e una fortezza (H). L'Edificio E e il Palazzo Reale A (figura 4.6) vennero costruiti intorno al 1750 a.C.: il primo sembra appartenere a una tipologia di edifici sacri a forma di torre (con anche una scalinata interna) diffusa dall'Anatolia centrale alla costa levantina, mentre la residenza reale è assai simile – in pianta e nella tecnica costruttiva con ortostati alla base delle pareti – agli edifici palatini paleosiriani di *Alalakh*, *Ebla* e *Qatna*.

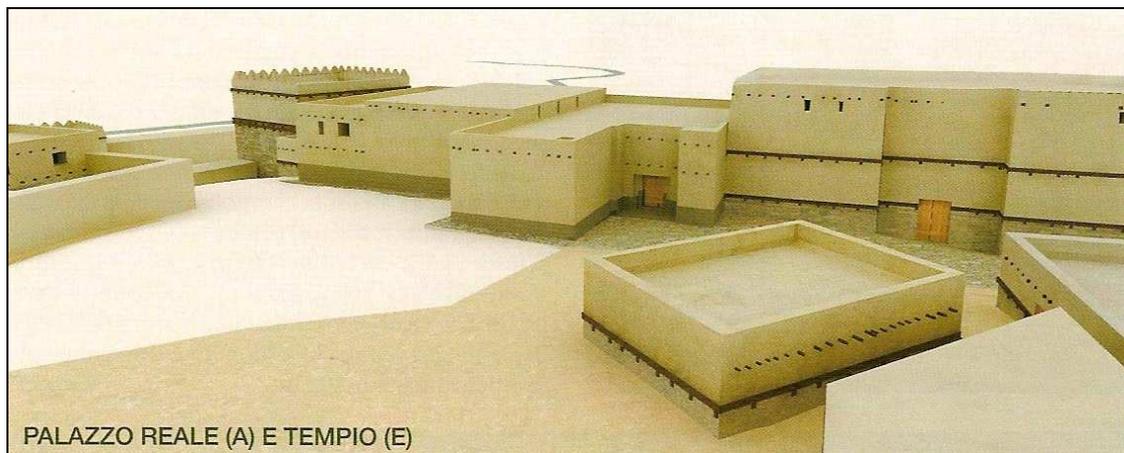


Figura 4.6 : La ricostruzione virtuale del palazzo reale (a sinistra) e del vicino tempio



Figura 4.7 : L'ingresso al palazzo reale così come appare attualmente

La sala del trono (figura 4.8) è contraddistinta da un contrafforte e da due basi in pietra per arredi mobili.

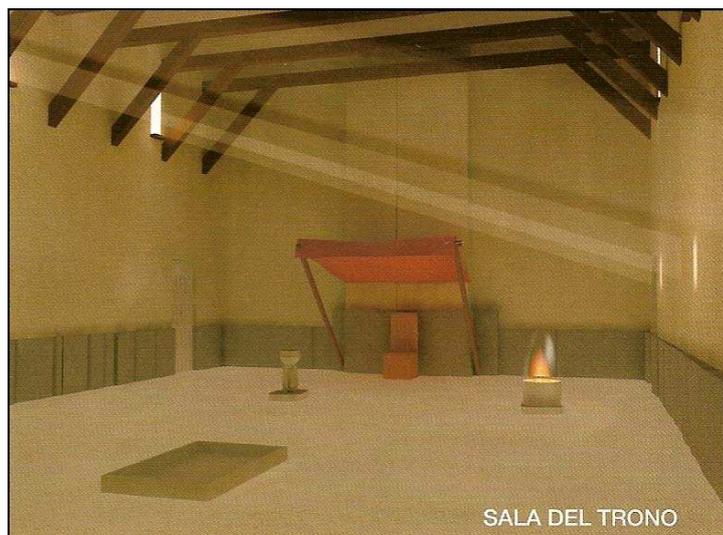


Figura 4.8 : Ricostruzione della sala del trono

La Fortezza H proteggeva l'angolo sud-orientale dell'acropoli e in origine doveva essere alta almeno 11 m (è conservata oggi per 4,5 m). Come di consueto nell'architettura militare siro-palestinese, non ci sono ingressi all'altezza del piano terra.

I risultati degli scavi più recenti (2004-2006) hanno portato alla luce ulteriori costruzioni. Sull'acropoli, a nord-ovest della piazza centrale, è stato indagato un complesso di edifici (G) con magazzini distrutti verso il 1550 a.C., fiancheggiati da tre strade che si dirigono verso punti diversi dell'acropoli.

Nell'area K-5, a sud della grande scalinata che collegava la cittadella alla porta urbana, è stato scavato un palazzo con ingressi a ortostati articolato intorno a un grande cortile basolato: anche questo edificio reca evidenti tracce della distruzione del 1550 a.C.

Più a nord, nell'area L è stata ottenuta una dettagliata sequenza all'interno del Bronzo Medio e si è messa in luce la strada lungo le casematte dell'acropoli.

Nella città bassa, nell'area M, è stato scoperto un tempio torre con portico in facciata (figura 4.9), nella cui cella è stata trovata una stele paleosiriana tarda che raffigura un alto dignitario davanti, probabilmente, al dio della tempesta. Essa rappresenta la più antica scultura rinvenuta nell'area di *Gaziantep*; è alta 67 cm e scolpita in basalto. La ricostruzione tridimensionale (figura 4.10) è stata ottenuta nei laboratori del DISTART partendo da due tecnologie digitali; la fotogrammetria (partendo da coppie stereografiche) e la scansione laser (condotta in collaborazione con l'*ETH* di Zurigo). I dati sono stati

raccolti sia in sito (foto digitali dello scavo) sia dal calco diretto della stele ottenuto con resine epossidiche plasmabili.

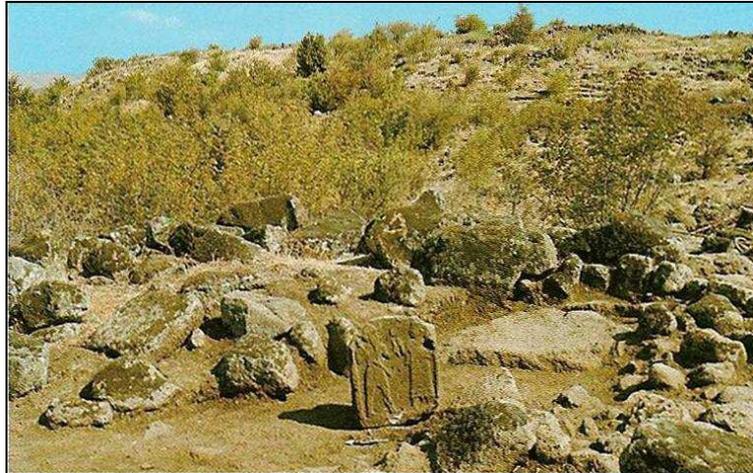


Figura 4.9 : La collocazione della stele all'interno del tempio torre

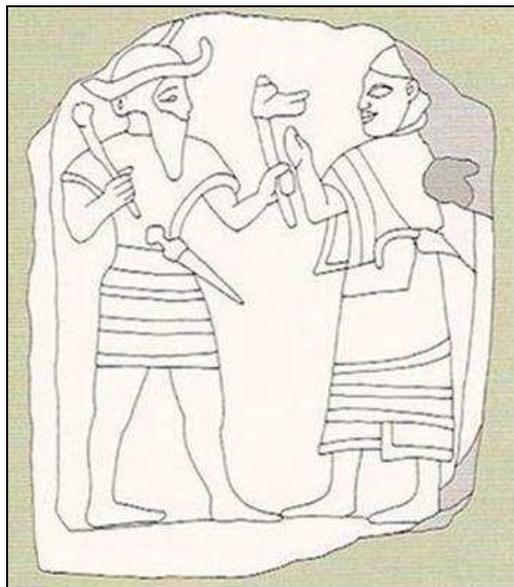


Figura 4.10 : Ricostruzione tridimensionale della stele

Di fronte al tempio, nel *temenos*, sono state trovate vasche in pietra e tracce di attività metallurgiche. L'esplorazione delle casematte occidentali è stata concentrata nell'area della postierla meridionale (K-3) e nei pressi dell'angolo nord-est delle mura, dove nell'area P (figura 4.11) si sono messe in luce due monumentali fortezze; quella più a sud (denominata

P2) è costituita da due vani di cui il primo presenta anche una scala a due brevi rampe. La fortezza maggiore (P) difendeva l'angolo delle mura a casematte; ha un ingresso verso la città bassa dal quale si entra in un corridoio che distribuisce a una scala a due rampe allungate e a due vani quadrati sul fondo. Questo schema è del tutto simile a quello della fortezza sull'acropoli; quest'ultima, però, non presenta il corridoio di distribuzione.

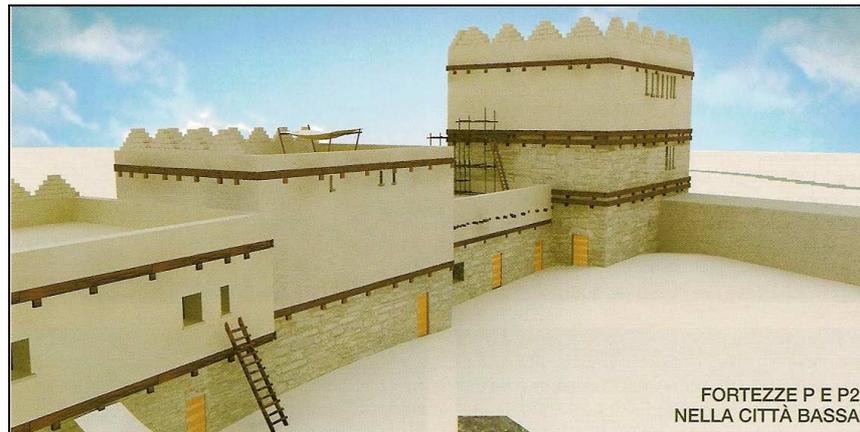


Figura 4.11 : Immagine virtuale delle fortezze presenti a Tilmen

Parallelamente all'avanzamento degli scavi è stata avviata anche la realizzazione del *Parco Archeologico* di Tilmen; per vari dei monumenti succitati è già iniziata la fase di restauro e sono già stati realizzati i primi sentieri attrezzati ed alcune strutture ricettive e di accoglienza per ospitare i visitatori.

Una configurazione di massima di questo parco è presentata nella figura di pagina seguente.

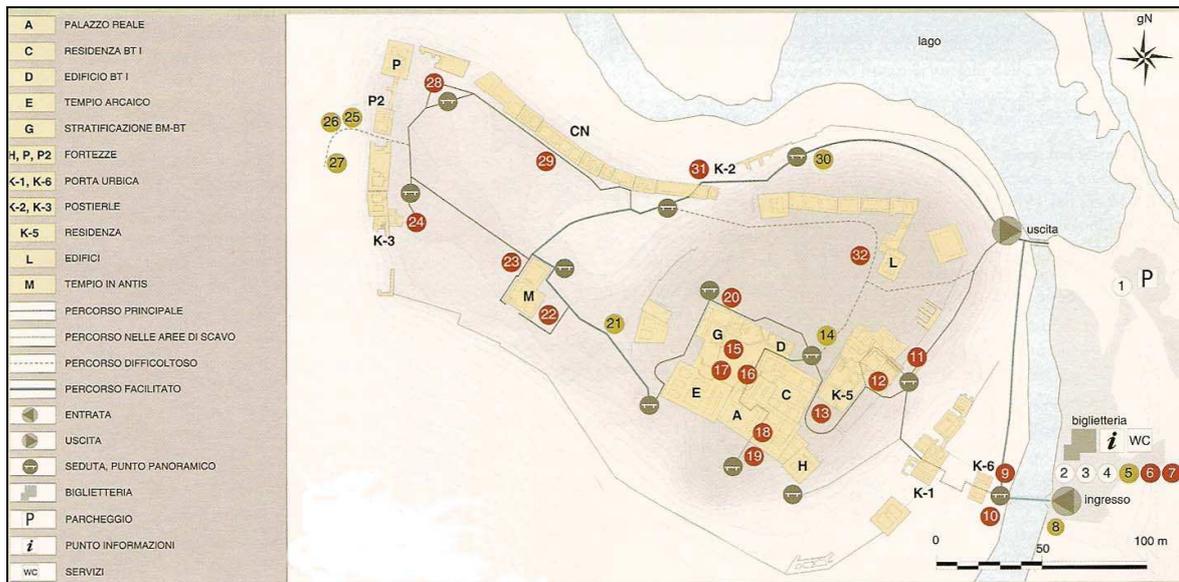


Figura 4.12 : Schema del parco archeologico (i cerchi rossi indicano i pannelli archeologici, quelli verdi i pannelli naturalistici)

## CAPTIOLO 5 ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI

### 5.1 *Informazioni preliminari*

Questo capitolo rappresenta la parte più significativa della sperimentazione realizzata; nelle pagine che seguono, infatti, verranno illustrati i passaggi fondamentali dell'elaborazione metrica delle immagini CORONA, fino alla generazione dei diversi prodotti utili allo studio.

Le elaborazioni sono state condotte, come accennato nelle precedenti pagine, con il software *Socet Set versione 5.4* sviluppato dalla società americana *BAE System* e che si pone certamente come stazione fotogrammetrica digitale di alto livello. La scelta è ricaduta su questo programma anche perché esso contiene un modulo per il trattamento delle immagini panoramiche e rappresenta, quindi, uno dei migliori approcci possibili per il trattamento a fini metrici delle informazioni CORONA.

Nel paragrafo 4.1 e seguenti verrà illustrato in dettaglio il funzionamento del software e tutte le fasi che sono state seguite in fase di elaborazione, rivolte soprattutto al procedimento di *import* e orientamento esterno dell'immagine.

Il lavoro ha avuto per oggetto, come ricordato nell'introduzione, un'immagine comprendente ciò che oggi è il sito archeologico di *Tilmen Höyük*; la strisciata risale al 21 Marzo 1968, e quindi essa non mostra evidentemente l'aspetto attuale del sito stesso con gli scavi in corso da parte dell'Università di Bologna.

L'immagine è un "prodotto" della missione KH-4A, operativa fra il 24 Agosto 1963 ed il 22 Settembre 1969; il formato originale misura, su pellicola, 70 mm x 75.692 cm ed è stato scansionato dallo *USGS* con uno scanner fotogrammetrico di ottima qualità, avente risoluzione geometrica di 7  $\mu$ m (ovvero 7 millesimi di millimetro). Per esigenze "pratiche" (determinate dall'area di 23 \* 23 cm per questo tipo di scanner) il formato originale è stato suddiviso in 4 fotogrammi (identificati con le sigle *a, b, c, d*) aventi dimensioni variabili fra 22,7 cm e 23,6 cm.; queste 4 parti risultano parzialmente sovrapposte in direzione longitudinale (con percentuali variabili fra il 20% ed il 30%). In pratica c'è sovrapposizione fra il fotogramma *a* e quello *b*, fra il *b* ed il *c*, fra il *c* e il *d*, ma non si tratta di una sovrapposizione longitudinale tra prese successive come in un classico blocco

fotogrammetrico ma funzionale, solo a garantire continuità a seguito della scansione effettuata per parti su un'unica immagine originale.

In figura 5.1 si riporta la configurazione del formato originale mentre nella figura successiva viene presentato il fotogramma *a*.

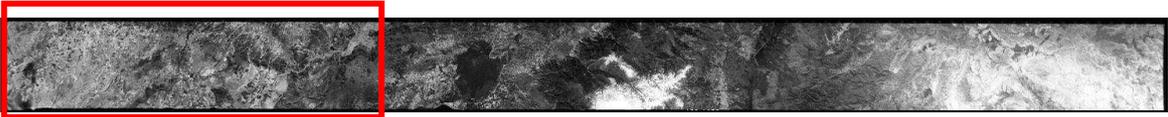


Figura 5.1 : Immagine originale

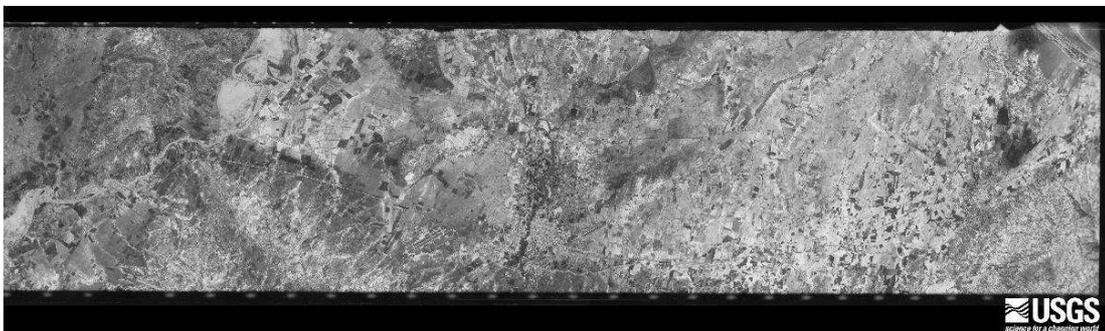


Figura 5.2 : Fotogramma *a*

Con riferimento alla figura 5.1, il rettangolo rosso indica la posizione del fotogramma *a* rispetto al formato originale; risulta quindi evidente come quest'ultimo costituisca la parte occidentale della strisciata e che, quindi, le restanti parti determinino lo sviluppo della strisciata verso Est. Tali affermazioni sono verificabili osservando la figura che rappresenta la collocazione geografica della stessa; questa immagine è visualizzabile nel sito <http://edcns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>; i vertici della stessa hanno le coordinate, rintracciabili al medesimo indirizzo, riportate in figura 5.4.



Figura 5.3 : Posizione geografica della strisciata 37

Full Display of Record 1

Dataset Attribute	Attribute Value
<a href="#">Entity ID</a>	DS1046-2104DA037
<a href="#">Acquisition Date</a>	1968/03/21
<a href="#">Mission Number</a>	1046-2
<a href="#">Frame Number</a>	37
<a href="#">NW Corner</a>	36°55'58.80"N, 34°43'58.80"E
<a href="#">NE Corner</a>	37°15'00.00"N, 37°48'57.60"E
<a href="#">SW Corner</a>	36°46'58.80"N, 34°48'00.00"E
<a href="#">SE Corner</a>	37°04'58.80"N, 37°48'00.00"E
<a href="#">Revolution</a>	104D
<a href="#">Data Source</a>	Other
<a href="#">Camera Resolution</a>	Stereo Medium
<a href="#">Camera Type</a>	AFT
<a href="#">Image Type</a>	Black and White
<a href="#">Film Type</a>	70mm Panoramic
<a href="#">Generation</a>	2
<a href="#">Polarity</a>	Negative
Key	.0934085

FGDC Format X Dismiss Window

Figura 5.4 : Informazioni in merito alla strisciata 37

I quattro fotogrammi componenti la strisciata sono caratterizzati da una dimensione del pixel a terra di circa 2.50 m; si tratta di valori approssimativi in quanto, a seguito delle distorsioni imputate dalla particolare acquisizione delle immagini panoramiche, i pixel non hanno le medesime dimensioni sia all'interno di una stessa immagine sia nel raffronto fra due immagini contigue. In base a quanto affermato nelle righe precedenti, infatti, i fotogrammi collocati agli estremi est ed ovest della strisciata risultano maggiormente "distorti" rispetto a quelli collocati in posizione più centralizzata.

Nelle pagine seguenti verranno descritte le diverse fasi dell'elaborazione fino alla creazione del prodotto metrico più noto nell'ambito del telerilevamento, vale a dire l'*ortofoto*; come noto esso rappresenta un fotogramma avente caratteristiche metriche (in sostanza una sorta di carta topografica con qualità fotografica ottenuta partendo da una o più immagini). Per la generazione di questo prodotto è necessario anche un modello digitale del terreno, cioè il cosiddetto *DEM* (acronimo di *Digital Elevation Model*). Non

avendo a disposizione questo prodotto specificatamente per la zona oggetto di studio, si è utilizzato il *DEM* a scala globale *SRTM*; alcune delle prossime righe saranno dedicate anche alla missione *SRTM* e alla procedura di elaborazione dei dati da questa acquisiti.

Nei paragrafi seguenti verranno descritte le procedure seguite per l'elaborazione delle immagini, dalla fase preliminare dell'*import* fino alla generazione dell'ortofotomosaico.

## 5.2 *La fase di import*

Con il termine *import* si designa la fase con cui, importando nel progetto le immagini di interesse, ha inizio il processo di elaborazione; tale passaggio è fondamentale, in quanto definendo la tipologia (*frame*, *panoramic* ecc) e le caratteristiche delle immagini, permette al software l'applicazione dei modelli di correzione delle distorsioni specifici nel caso di interesse..

Il procedimento ha inizio con la creazione del progetto, vale utile per definire il *datum* ed il sistema di coordinate di riferimento utilizzate (nel nostro caso *WGS84* e coordinate *Geografiche*), oltre all'unità di misura dei valori di quota (metri) ed al valore massimo e minimo della stessa (valore noto a priori oppure stimato e comunque del tutto indicativo). La schermata che si presenta all'utilizzatore è quella in figura 5.5.

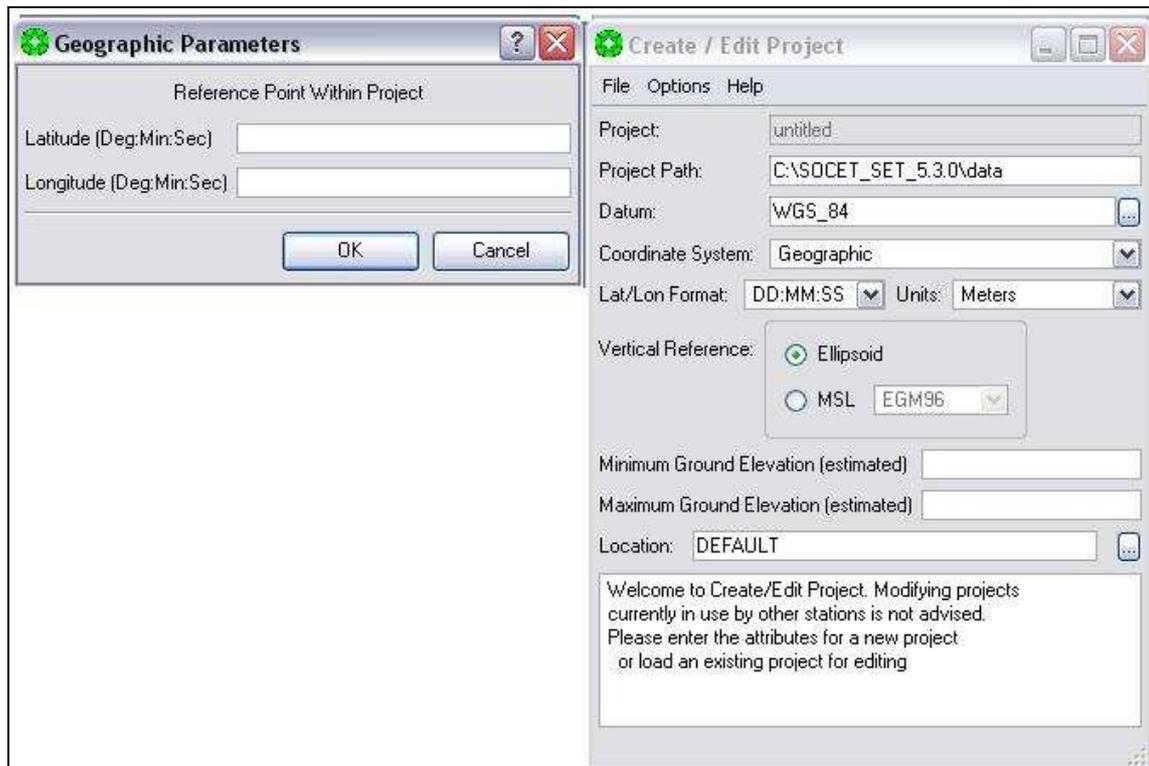


Figura 5.5 : Schermata di creazione del progetto

Creato il file di progetto è possibile iniziare l'import vero e proprio; ricordiamo che il software utilizzato contiene un modulo specifico per il trattamento delle immagini panoramiche, che richiede la conoscenza di una serie di parametri relativi all'immagine ed alla piattaforma di acquisizione.

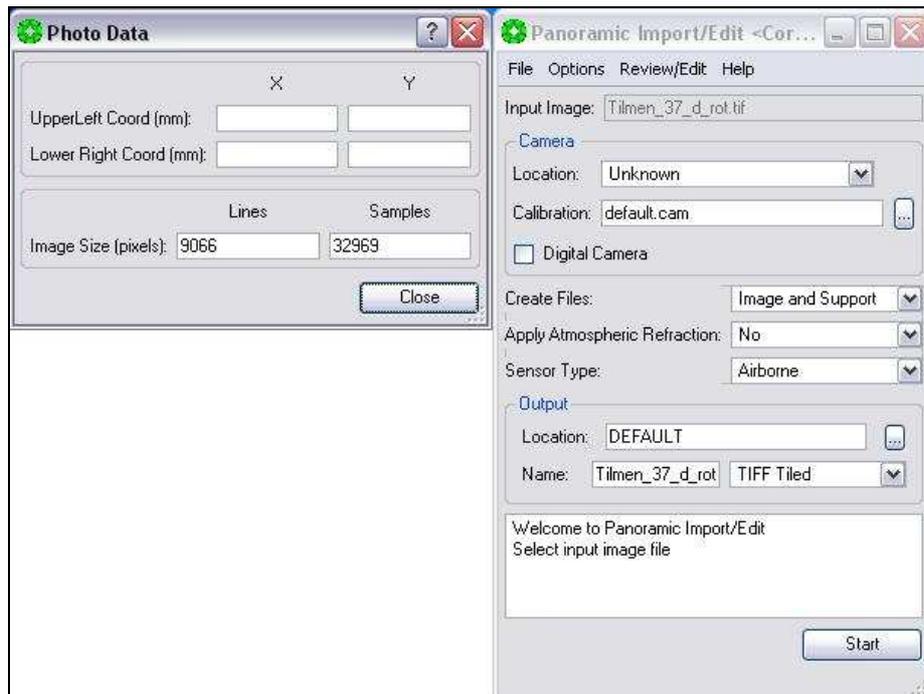


Figura 5.6 : Finestra per l'assegnazione dell'immagine di input e delle sue caratteristiche

Come si vede dalla figura le prime informazioni che il software richiede sono le dimensioni dell'immagine in mm, in particolare tramite le coordinate del vertice in alto a sinistra ed in basso a destra dell'immagine; tali dimensioni sono state ottenute moltiplicando i valori corrispondenti al numero totale di righe e colonne (*line* e *samples*) per la larghezza del pixel dichiarata dallo USGS in fase di scansione delle immagini, vale a dire 0.007 mm (7 micron).

Dopo avere digitato tali valori, è necessario assegnare il file di calibrazione della camera; nel caso in esame l'unico parametro noto è la focale (609.602 mm).

Successivamente è necessario definire la *location* della camera; selezionando dal menù a tendina la voce *enter data* si apre la schermata di figura 5.7.

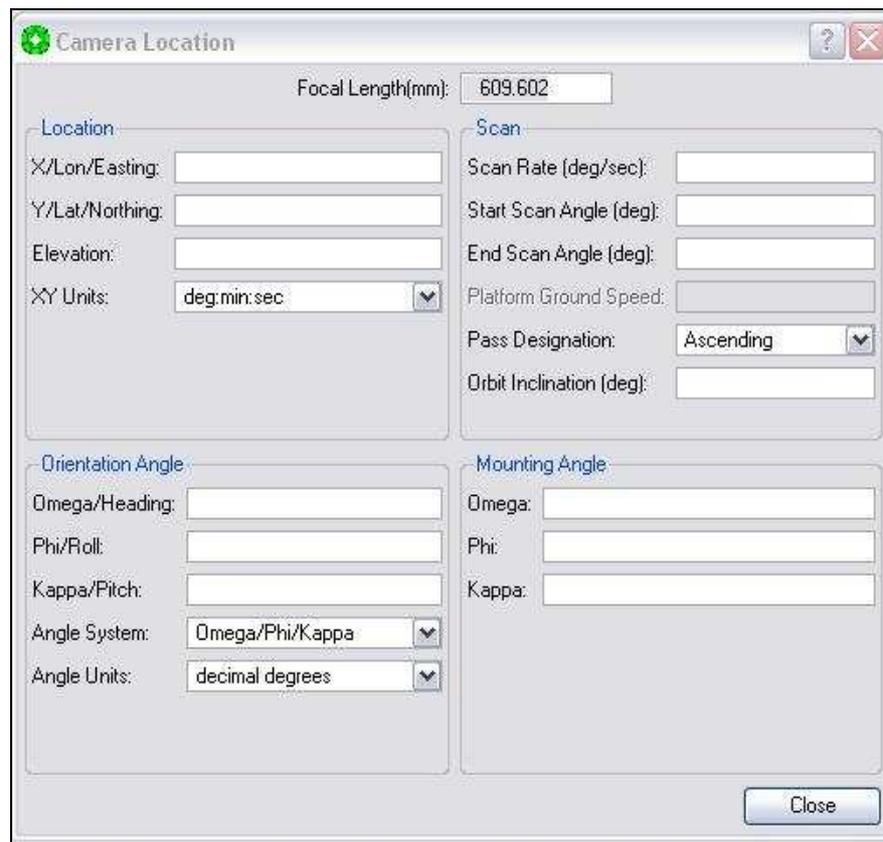


Figura 5.7 : Finestra per l'assegnazione della *camera location*

Assegnare i parametri di *camera location* è indispensabile per fare interpretare correttamente al software l'immagine che si andrà ad elaborare.

Con riferimento alla figura 5.7 ed alle indicazioni riportate nel manuale del software vengono descritte le differenti voci presenti:

- *Focal length* : è il valore della lunghezza focale della camera letto dal certificato di calibrazione.
- *Location* : definisce la posizione del centro di presa rispetto al sistema di coordinate a terra prescelto durante la creazione del progetto (paragrafo 5.1).
- *Orientation angle* : possono essere inseriti come *omega*, *phi*, *kappa* (che definiscono la trasformazione dallo "spazio terreno" allo "spazio fiduciale", figura 5.8) oppure come *heading*, *pitch*, *roll* (che definiscono la trasformazione tra lo spazio "terreno" e quello "immagine").

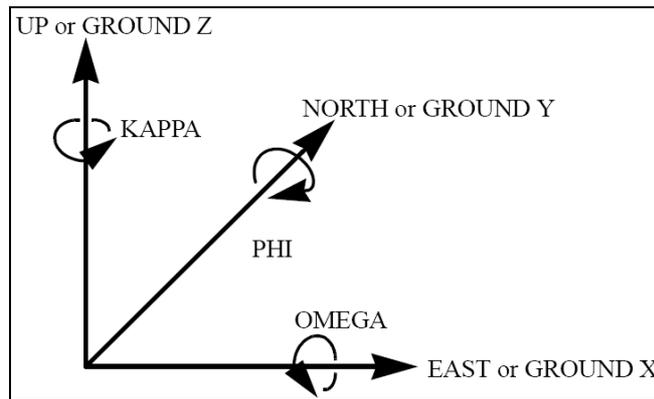


Figura 5.8 : Rappresentazione schematica degli angoli *omega*, *phi*, *kappa*

Questi sono parametri non necessari alle elaborazioni successive.

- *Scan rate* : rappresenta la velocità angolare (gradi/secondo) con la quale la camera acquisisce l'immagine. In tutte le missioni CORONA tale parametro vale 35.5 deg/sec.
- *Start ed End scan angle* : letteralmente angoli di inizio e fine scansione, sono necessari al software per inizializzare il *timing* interno del sensore. Di default la direzione di scansione è perpendicolare alla direzione di volo, con valori positivi degli angoli a sinistra della piattaforma rispetto al centro di presa guardando verso Nord (quindi ad esempio nel caso in esame per l'immagine *a* tale parametro è positivo, per l'immagine *d* è negativo).

I valori per questi due parametri sono strettamente correlati alle coordinate di orientamento interno del sensore; devono, infatti, “matchare” l'orientamento interno stesso.

Non avendo a disposizione i valori esatti per questi due parametri ed essendo questi indispensabili si è stati costretti a calcolarli in maniera empirica; un calcolo preciso sarebbe possibile avendo a disposizione il formato originale su pellicola (non in nostro possesso); questo è visionabile unicamente presso gli uffici dello *NRO* (*National Reconnaissance Office*), sito negli *USA*.

- *Pass designation* : sta ad indicare la direzione dell'orbita della piattaforma su cui è montato il sensore. E' possibile scegliere *ascending* o *descending*, indicando con il

primo termine la acquisizione durante il moto Nord-Sud e con l'altro termine l'acquisizione durante il moto Sud-Nord. Per il sistema CORONA la scelta corretta è *descending*, sennonché tale opzione “costringe” l'operatore ad impiegare immagini che presentano il Sud geografico in alto, rendendo quindi più complicati il riconoscimento e la collimazione di punti sull'immagine (come la figura 5.2 che presenta l'immagine *a*).

- *Orbit inclination* : definisce l'inclinazione dell'orbita della piattaforma rispetto all'equatore. Questo angolo varia da missione a missione (nel nostro caso è pari a  $79^\circ$ ); dalla bibliografia consultata si evince, in ogni caso, che per le immagini CORONA esso è compreso fra i  $60^\circ$  e gli  $80^\circ$ .
- *Mounting angle* : terna che definisce la posizione degli assi del sensore rispetto alla direzione di volo della piattaforma. *Omega* è la deflessione verso destra o verso sinistra (positivo se il sensore punta verso sinistra). *Phi* rappresenta la deflessione in avanti o all'indietro (valore positivo se il sensore punta in avanti). *Kappa* definisce la rotazione rispetto ad un piano orizzontale contenete il veicolo (rotazione positiva se in senso orario). I tre angoli sono nulli nel caso di sensore che vede il terreno perpendicolarmente sotto di se e con la direzione di acquisizione dell'immagine orientata nel senso del volo.

In seguito a numerose ripetizioni della fase di import dell'immagine si è scoperto come, fra i parametri appena citati, ve ne siano di particolarmente influenti sul risultato del processo che stiamo descrivendo; questi sono *start scan angle*, *end scan angle* e *pass designation*. In base ai valori assegnati a questi parametri, infatti, il software interpreta correttamente (o meno) le dimensioni e la collocazione dell'immagine nel sistema assoluto. Appare quindi importante descrivere più in dettaglio la procedura seguita per il calcolo dei parametri di *start* ed *end scan angle*, di seguito riportata

Una prima verifica sul buon esito della fase di import è possibile osservando il *footprint* (impronta a terra) e la finestra di *image information*, delle quali un esempio è riportato in figura 5.9.

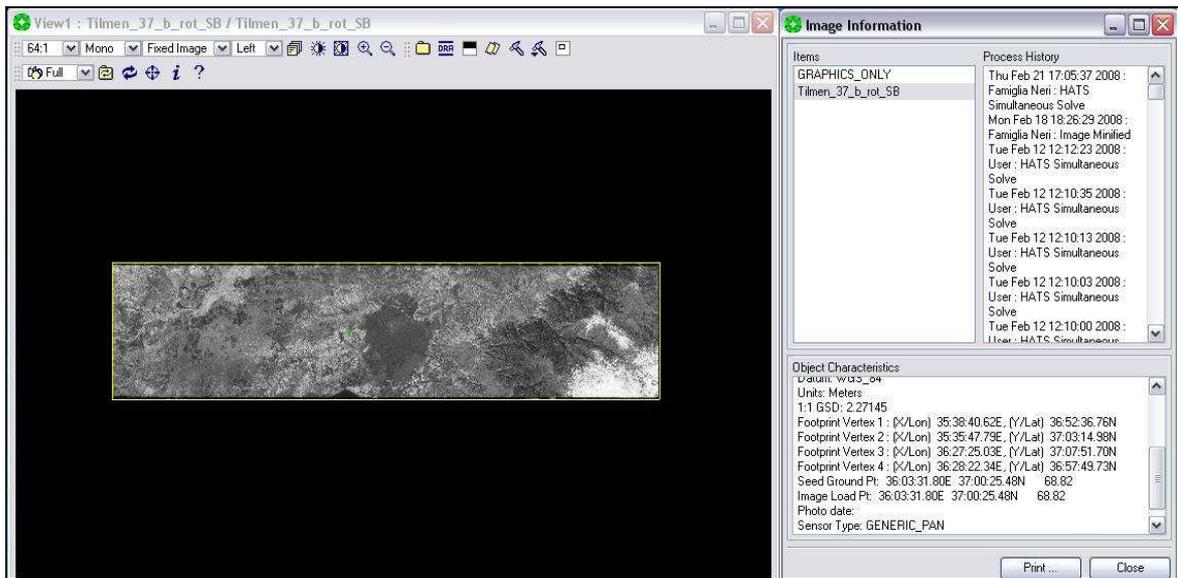


Figura 5.9 : Esempio di *footprint* (a sinistra) e relativa finestra di *image information* (a destra)

Dato il tipo di immagine elaborato il *footprint* si può definire corretto se ha forma rettangolare (così come in figura 5.9); la fase di import si può considerare corretta se i valori di coordinate dei vertici dell'immagine e il valore *GSD* (dimensione del pixel a terra) sono compatibili, rispettivamente, con la dimensione a terra e la risoluzione di partenza dell'immagine.

Nel caso la verifica sommaria appena presentata dia esito positivo si può considerare conclusa (con successo) la fase di *import*; in caso contrario (ad esempio se la forma del *footprint* non fosse compatibile con il formato dell'immagine o se i valori delle coordinate dei vertici non fossero fisicamente plausibili) si deve rivedere la fase di import, prestando particolare attenzione ai valori assegnati allo *start* ed *end scan angle*. Questi ultimi, infatti, sono determinanti per una corretta interpretazione delle dimensioni e della collocazione dell'immagine da parte del software.

### 5.2.1 La valutazione dei parametri di *start* ed *end scan angle*

Come anticipato nelle righe precedenti, in questo sotto paragrafo si cercheranno di evidenziare gli aspetti considerati e la procedura seguita per la stima di questi due parametri angolari. E' corretto parlare di stima in quanto, come già prima riportato, una

valutazione esatta degli stessi sarebbe possibile unicamente avendo a disposizione il formato originale su pellicola.

In bibliografia (Galiatsatos 2004) questi due parametri vengono dedotti partendo da misure effettuate sul formato originale su pellicola; avendo a disposizione, come già ricordato, unicamente i file digitali dei quattro fotogrammi in cui è stata suddivisa la strisciata originale, il metodo presentato in bibliografia è stato scelto come “riferimento”.

Per potere realizzare le misure necessarie per la stima dei due parametri angolari è stato necessario effettuare una georeferenziazione preliminare dei quattro fotogrammi in modo tale da poter stimare in modo approssimativo il ricoprimento fra le immagini, oltre alla posizione della camera all’atto dell’acquisizione. Il risultato di questa operazione, svolta con il software *Global Mapper*, è illustrato in figura 5.10; come base di riferimento per la georeferenziazione è stata utilizzata una immagine Landsat risalente al 2002.



Figura 5.10 : Posizione reciproca dei 4 fotogrammi costituenti la strisciata 37

Con riferimento alla figura 5.11 ed alle notazioni in essa riportate si illustra ora la procedura seguita; il rettangolo rosso identifica la posizione occupata dal fotogramma *a*, la linea rossa rappresenta la mezzeria della strisciata.

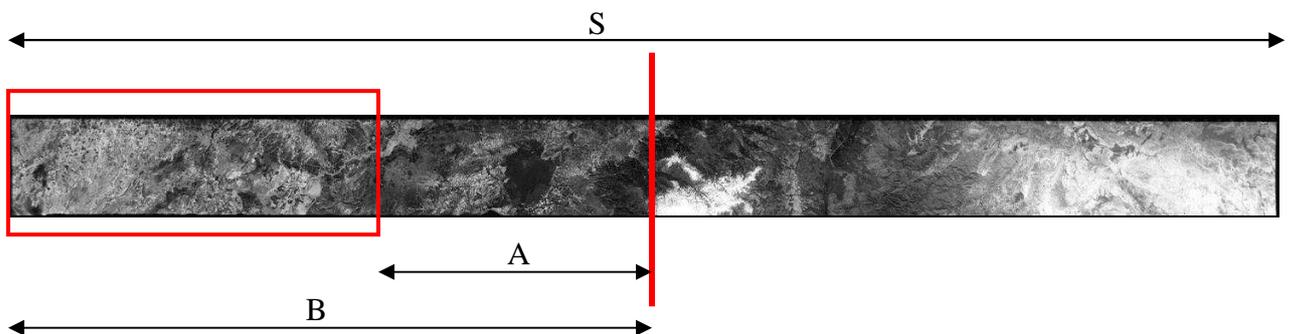


Figura 5.11 : Immagine esemplificativa per la valutazione di *start / end scan angle*

Come evidente dalla figura sopra riportata, si sono genericamente indicate con A e B le distanze dei bordi di ciascun fotogramma rispetto al “centro” della strisciata. Nel caso specifico una delle due distanze (B) è pari a metà della dimensione totale della strisciata, ovvero  $B = S/2 = 37.846$  cm. L'altra distanza è ottenibile sottraendo ad  $S/2$  la dimensione (in centimetri) del fotogramma preso in esame (dimensione variabile di volta in volta); come ricordato tale quantità è stata ottenuta, caso per caso, moltiplicando il numero di colonne costituenti il fotogramma per 0.007 mm.

Ricordando che l'intero “cono” su cui operava la camera era pari a  $71^{\text{d}}.16$ , è evidente come la distanza  $S/2$  sia “sottesa” da un angolo pari alla metà di quello totale, vale a dire pari a  $35^{\text{d}}.58$ .

In funzione di questa relazione si sono ricavati i valori degli angoli sottintendenti i segmenti A e B (definiti per comodità  $\alpha$  e  $\beta$ ) risolvendo le proporzioni:

$$S/2 : 35^{\text{d}}.58 = A : \alpha$$

$$S/2 : 35^{\text{d}}.58 = B : \beta$$

Il calcolo dei segmenti A e B è stato eseguito, come già anticipato, per ciascuno dei 4 fotogrammi elaborati; va precisato come, per i fotogrammi *b* e *c*, la valutazione di queste due grandezze non sia stata del tutto agevole dato che essi presentano zone di sovrapposizione con quelli collocati alle estremità della strisciata. Infatti, se per i fotogrammi *a* e *d* il segmento B è pari a  $S/2$ , così non è per i restanti due fotogrammi. In questi casi è stato necessario valutare la lunghezza, in centimetri, della zona di sovrapposizione con il fotogramma adiacente; tale grandezza è stata ricavata attraverso una proporzione fra la dimensione in centimetri e quella in chilometri sia del fotogramma che della zona di sovrapposizione. La misura in chilometri è stata ottenuta in maniera empirica facendo riferimento alla situazione di figura 5.10. Nota la stima della lunghezza della zona di sovrapposizione, sono stati calcolati i valori di A e B da cui è stato possibile ricavare  $\alpha$  e  $\beta$ . Ricordiamo che A e B rappresentano le distanze dei bordi del fotogramma dalla mezzeria della strisciata e che  $\alpha$  sottende sempre A,  $\beta$  sottende sempre B.

Dopo aver effettuato la stima di questi due angoli, è stato necessario comprendere in quale ordine e con quale segno inserire gli stessi all'interno della procedura di elaborazione; in particolare è stato necessario capire quale fosse la direzione di scansione (oraria oppure

antioraria) per poi stabilire, di volta in volta, quale fra  $\alpha$  e  $\beta$  rappresentasse lo *start* oppure l'*end scan angle*. Effettuando diversi tentativi di *import* ed analizzando ogni volta il *footprint* e l'*image information*, si è compreso che il sensore, durante il moto della piattaforma da Nord a Sud, acquisiva la scena da Est verso Ovest; secondo tale schema, quindi, gli angoli succitati dovevano essere entrambi positivi per la porzione *d*, uno positivo ed uno negativo per i fotogrammi *c* e *b*, entrambi negativi per la scena *a*. Operando, come scritto nelle righe precedenti, con immagini “ruotate” rispetto alle originali (vale a dire in modo che il lato Nord fosse sopra a quello Sud), è stato necessario invertire i segni rispetto a quanto appena descritto.

La seguente tabella riassume i valori dei segmenti A e B e dei conseguenti angoli  $\alpha$  e  $\beta$  calcolati per ciascuno dei quattro fotogrammi; fra parentesi quadre è indicato con *S* lo *start scan* e con *E* l'*end scan angle*.

<b>Fotogramma</b>	<b>Segmento A</b>	<b>Segmento B</b>	<b>Angolo <math>\alpha</math></b>	<b>Angolo <math>\beta</math></b>
<i>37 a</i>	14.506 cm	37.846 cm	13 <sup>d</sup> .6375 [ <i>S</i> ]	35 <sup>d</sup> .58 [ <i>E</i> ]
<i>37 b</i>	19.4542 cm	4.1827 cm	18 <sup>d</sup> .2894 [ <i>E</i> ]	-3 <sup>d</sup> .9322 [ <i>S</i> ]
<i>37 c</i>	1.4341 cm	25.9710 cm	-1 <sup>d</sup> .3482 [ <i>E</i> ]	-23 <sup>d</sup> .5699 [ <i>S</i> ]
<i>37 d</i>	15.1429 cm	37.846 cm	-14 <sup>d</sup> .2362 [ <i>E</i> ]	-35 <sup>d</sup> .58 [ <i>S</i> ]

Tabella riassuntiva dei valori di start / end scan angle per i diversi fotogrammi

I seguenti paragrafi sono dedicati alla descrizione delle fasi successive a quella di *import*, ovvero quelle di triangolazione aerea e di generazione dell'ortofotomosaico.

### 5.3 La fase di triangolazione aerea

Questa procedura è identificabile, all'interno del software, sotto la sigla *Multi Sensor Triangulation (MST)*. Grazie ad essa è possibile conferire ai fotogrammi una valenza metrica, ovvero è possibile registrare gli stessi rispetto al terreno o rispetto agli altri fotogrammi (nel caso si lavori su un blocco fotogrammetrico).

Le immagini su cui eseguire la triangolazione possono essere di vario tipo: grandi blocchi di immagini *frame* (cioè tradizionali), immagini satellitari (singole o sovrapposte), stereo-

coppie, combinazioni di immagini tradizionali e non, così come immagini da fonte sconosciuta.

Come riportato dal manuale per l'utente e come visibile in figura 5.12, il processo di triangolazione si svolge secondo i seguenti "passi" principali:

- *Setup* : si possono scegliere quali immagini faranno parte del processo di triangolazione, quale modello matematico applicare, l'eventuale file contenete i punti di controllo a terra (*GCP*) e il *layout* del blocco di immagini.
- *Automatic Point Measurement* : per la misurazione automatica o semi-automatica dei punti (a differenti scale e tipi di sensore)
- *Interactive Point Measurement* : per la collimazione , guidata dall'utente, di punti di controllo a terra e di *tie points* (punti visibili sulle zone di sovrapposizione ma dei quali non si conoscono informazioni a terra, ovvero coordinate terreno) utilizzati nel processo di triangolazione.
- *Initialize / Solve* : questa è la fase di *adjustment*, ovvero di calcolo vero e proprio dell'orientamento esterno del blocco fotogrammetrico. Questa funzionalità può essere utilizzata anche nel caso si siano importate immagini senza assegnare il modello di camera; dopo la "soluzione" è possibile visualizzare nuovamente le stesse nel *display* appositamente dedicato.

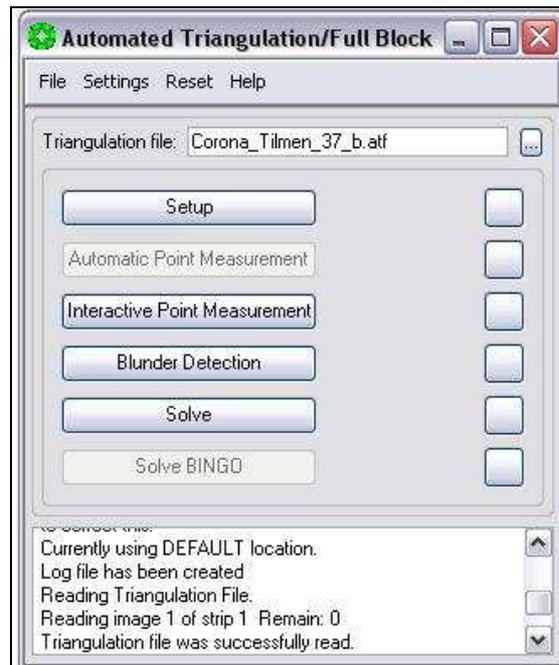


Figura 5.12 : Finestra iniziale della fase di triangolazione

I principali “prodotti” del processo di triangolazione sono il *Triangulation file* (.atf), contenete l’elenco delle immagini partecipanti nel processo e le informazioni necessarie per la stima dei parametri iniziali di triangolazione, il *Ground Point file* (.gpf), che contiene le coordinate terreno dei *GCP* utilizzati ed i residui (in metri) su ciascuno di essi, l’*Image Support file* (.sup) che contiene le informazioni che mettono in relazione i punti terreno e quelli immagine tramite il modello matematico del sensore. Quest’ultimo file in particolare viene creato durante il processo di *import* e viene aggiornato dopo ogni fase di elaborazione.

Nel nostro caso si è scelto di triangolare ciascun fotogramma per ovviare ad alcune problematiche; in particolare la scarsa conoscenza nel trattamento di questo tipo di immagini e la possibile risposta del software nel considerare una immagine di dimensioni pari a quella della strisciata originale. Inoltre i quattro fotogrammi non presentano una sovrapposizione paragonabile a quella riscontrabile nei classici blocchi fotogrammetrici; per questi ultimi, infatti, le zone di sovrapposizione sono pari al 60% della dimensione dei fotogrammi, mentre nel nostro caso di studio è riscontrabile una sovrapposizione di circa il 20% fra il fotogramma *a* ed il *b* e di circa il 45% fra il *c* e il *d*.

Dei tre passaggi appena citati, quello maggiormente delicato e “complesso” è stato in particolare il secondo, vale a dire l’*Interactive Point Measurement*. La scelta dei *GCP*, infatti, rappresenta un aspetto fondamentale in relazione alla buona riuscita dell’intera fase di triangolazione; un soddisfacente orientamento esterno delle immagini consente di poter confidare in una buona precisione dei prodotti metrici realizzati dai fotogrammi.

Ricordiamo che, come principio generale, occorre utilizzare il numero più alto possibile di punti di controllo a terra, ben identificabili e distribuiti in maniera il più possibile uniforme su tutta la foto.

Per il nostro caso di studio non è sempre stato possibile seguire tali raccomandazioni; ad esempio non sempre è stato possibile identificare con certezza alcuni punti “plausibili”, così come non in tutte le foto si è riusciti a distribuire uniformemente i punti di controllo. Con le prossime righe si tenterà di illustrare i diversi problemi incontrati in fase di identificazione dei *GCP*.

Per prima cosa è necessario considerare che, risalendo le immagini al 1968, sono intercorsi innumerevoli cambiamenti nell’assetto e nell’organizzazione del territorio; è possibile, ad esempio, osservare sulle immagini attuali (prese da *Google Earth*) la comparsa di nuovi nuclei abitati (figura 5.13) in zone prima disabitate, così come è evidente la crescita nell’estensione dei centri abitati di maggior dimensione o la realizzazione di nuove opere (autostrade, canali di irrigazione ecc..).

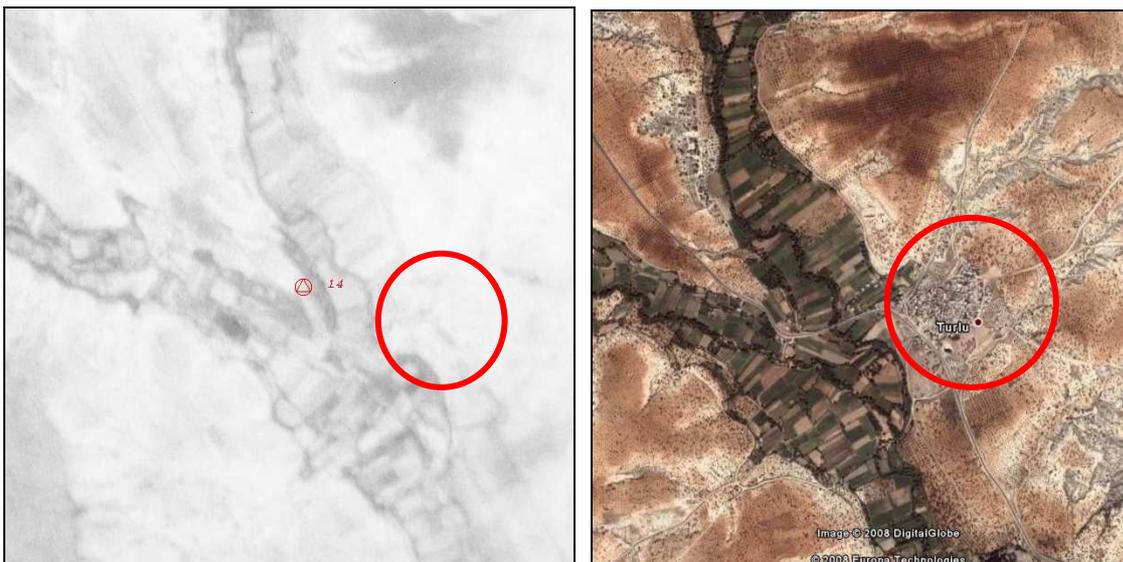


Figura 5.13 : Situazione nel 1968 (a sinistra particolare dell’immagine CORONA) e situazione attuale (a destra particolare do Google Earth)

Una ulteriore fonte di difficoltà nella fase di scelta dei punti di controllo a terra è identificabile nella non uniformità di risoluzione delle immagini di *Google Earth*, soprattutto in relazione alla notevole estensione a terra della CORONA in direzione Ovest-Est (superiore ai 250 chilometri). Non sempre, infatti, l'area di interesse rientra in *Google Earth* in zone ad alta risoluzione e questo ha ridotto la possibilità di identificare con precisione punti a terra. Se per le zone ad alta risoluzione l'identificazione è stata generalmente non troppo complicata, nelle zone in cui la risoluzione era media o addirittura bassa (il fotogramma *c* è collocato in una di queste) il riconoscimento di possibili punti doppi è risultato alquanto complesso.

Inoltre, poiché gran parte della strisciata comprende territorio montuoso (in parte innevato al tempo di acquisizione), a volte si è stati costretti a “perlustrare” zone poco popolate e per giunta ricche di vegetazione, la quale conferisce alle stesse un tono di colore uniforme che complica ulteriormente la capacità dell'operatore di discernere fra i vari particolari.

In linea di massima si è cercato di individuare *GCP* nelle zone ad alta risoluzione, nei pressi di centri abitati e collocati all'incrocio di strade o canali d'irrigazione, in modo tali da poterli identificare con la maggiore accuratezza possibile. Per ciascun fotogramma si sono cercati almeno 20-25 punti così da avere la possibilità di selezionare, fra questi, quelli che determinassero la distribuzione migliore possibile; la valutazione della bontà di quest'ultima è stata valutata, oltre che in modo qualitativo per via puramente visiva, soprattutto osservando i residui sulle coordinate calcolati nella fase di soluzione.

Quest'ultima rappresenta, come già anticipato, l'ultimo stadio della procedura di triangolazione dei fotogrammi; è stato scelto, per il sensore, un modello matematico rigoroso basato su 17 parametri incogniti (così come di *default*) ed operante in maniera iterativa.

In figura 5.14 viene presentata una schermata catturata al termine della fase di *solve* e relativa al fotogramma *a*. Sulla destra appare la finestra riepilogativa del processo (numero dei *GCP* utilizzati, iterazioni eseguite, scarto quadratico medio in pixel e su ciascuna coordinata) mentre a sinistra quelle dedicata ai residui (in metri) calcolati sui punti utilizzati.

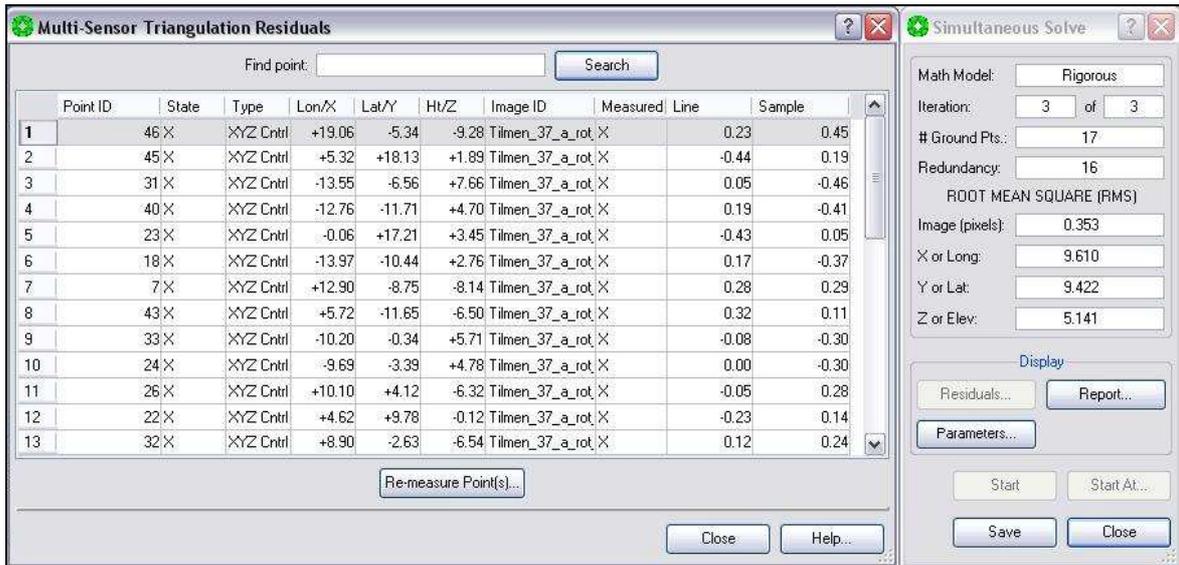


Figura 5.14 : Esempio di schermata al termine della fase di *Solve*

La seguente tabella riassume i risultati del processo di triangolazione per ciascuno dei quattro fotogrammi; i residui espressi in pixel sono numeri puri, mentre quelli su ciascuna coordinata (X = Longitudine, Y = Latitudine, Z = Quota Geoidica) sono espressi in metri.

Fotogramma	N° GCP	Ridondanza	RMS pixel	RMS X [m]	RMS Y [m]	RMS Z [m]
37 a	17	16	0.353	9.610	9.422	5.141
37 b	11	4	0.110	10.936	11.584	5.957
37 c	11	2	0.108	11.015	13.684	2.883
37 d	11	4	0.116	13.500	10.970	6.518

Tabella riassuntiva dei residui per ciascun fotogramma

Osservando tale tabella si può benissimo vedere come i residui siano contenuti entro i 15 metri e generalmente non inferiori ai 10 metri. Queste precisioni sono ampiamente compatibili con quelle dei GCP utilizzati, avendo rintracciato gli stessi, come già ampiamente ricordato, su *Google Earth*.

Aggiungendo, a questa premessa, le considerazioni sulla distribuzione dei punti di controllo a terra (come già detto non sempre uniforme), sulla collocazione degli stessi in riferimento alla risoluzione delle immagini di *Google Earth* (molti punti collocati in zone a

bassa risoluzione e su terreno montuoso) e ricordando la limitata conoscenza della procedure di trattamento di questo tipo di immagini, si possono ritenere soddisfacenti i risultati ottenuti.

Il paragrafo seguente è dedicato al processo di generazione del prodotto metrico più noto ed utilizzato in fotogrammetria e telerilevamento, ovvero l'ortofotomosaico.

## **5.4 La generazione dell'ortofotomosaico**

### *5.4.1 Terminologia e aspetti generali*

Il termine ortofoto indica una rappresentazione fotografica metricamente corretta di un oggetto a terra; tale rappresentazione è generalmente ottenuta partendo da un unico fotogramma. Una ortofoto, quindi, può essere utilizzata come fosse una classica mappa topografica, con il vantaggio di essere molto più ricca dal punto descrittivo in quanto il contenuto fotografico si aggiunge, appunto, a quello metrico.

Si parla di ortofotomosaico nel caso vengano unite insieme più ortofoto della stessa zona; nel nostro caso è necessario effettuare questo ulteriore passaggio perché, seppure l'immagine originale CORONA sia unica, le quattro immagini digitali derivate sono state triangolate singolarmente ed unite solo nel momento della generazione del prodotto finale.

In un'ortofoto ogni oggetto è rappresentato così come appare nella realtà, senza l'introduzione di una codificazione o simbologia; essa è meno costosa rispetto ad una tradizionale restituzione fotogrammetrica numerica, ed è di più facile esecuzione e aggiornabilità.

Analiticamente un'ortofoto è un raddrizzamento differenziale, ovvero un raddrizzamento che interessa porzioni elementari del fotogramma (ciascuna ipotizzata piana) variando, per ciascuna di queste, le condizioni geometriche della proiezione (conseguenti a loro volta alla variazione in quota degli oggetti). In un'ortofoto, quindi, non si riscontra variazione di scala da un punto ad un altro perché essa è mantenuta costante variando la distanza del centro di proiezione. Tale variazione è attuabile solo conoscendo il modello digitale del terreno rappresentato sul fotogramma; per la generazione di un'ortofoto planimetricamente corretta, quindi, è necessario disporre del *DEM (Digital Elevation Model)* della zona

rappresentata sul fotogramma che s'intende raddrizzare. Nelle pagine successive verrà dedicato un breve paragrafo al *DEM* utilizzato nel nostro caso di studio.

La generazione di un'ortofoto (così come di un'ortofotomosaico) è diretta conseguenza del processo di ricampionamento presente nella fase di produzione del prodotto stesso; un'ortofoto, infatti, costituisce un'immagine *ex novo* rispetto a quella di partenza.

Il ricampionamento è una nuova disposizione dei pixel all'interno della nuova immagine; ciascuno di questi presenta un *Digital Number* (ad esempio un valore di livello di grigio) diverso da quello che gli compete nell'immagine di partenza.

Alla base del ricampionamento c'è una trasformazione inversa (figura 5.15), cioè una trasformazione che parte dall'immagine trasformata (l'ortofoto) e finisce sull'immagine originale (il fotogramma).

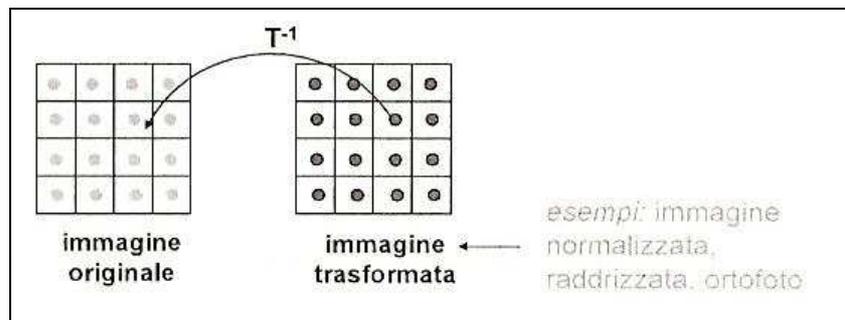


Figura 5.15 : Trasformazione inversa

Non si utilizza una trasformazione diretta in quanto essa potrebbe generare dei numeri reali, mentre le coordinate dei pixel sono numeri naturali; inoltre si correrebbe il rischio di avere pixel di valore non assegnato nell'immagine generata.

La procedura di generazione di un'ortofoto digitale passa attraverso le fasi seguenti:

- I. Definizione della matrice dell' orto-immagine, in cui ad ogni pixel corrisponde un elemento del piano sul terreno.
- II. Per ogni pixel dell'orto-immagine, avente univoche coordinate assolute, si procede così:
  - a. Si estrae un valore della quota dal DTM;
  - b. Si proietta il punto terreno 3D tramite le equazioni di collinearità (devono quindi essere noti per l'immagine i parametri di orientamento interno ed esterno) ottenendo le coordinate fotogramma (x y);

- c. Si trasformano le coordinate fotogramma ( $x y$ ) nelle coordinate immagine  $ij$  (indice di riga e colonna nella matrice immagine) tramite una trasformazione affine (bi-dimensionale);
- d. Si trova sull'immagine, per interpolazione, il valore di densità corrispondente alle coordinate  $ij$  calcolate;
- e. Si assegna tale valore di densità al pixel sull'orto-immagine.

Per l'assegnazione dei nuovi *Digital Number* possono seguirsi diverse strategie di interpolazione.

In figura 5.16 il *pixel* annerito rappresenta quello a cui deve essere assegnato il *DN*. L'immagine originale è disegnata con un tratteggio, quella ricampionata con tratto continuo.

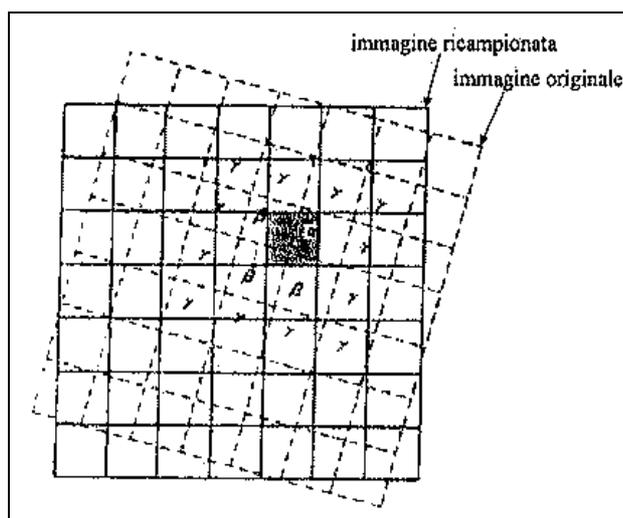


Figura 5.16 : Esempio di ricampionamento

Le strategie di ricampionamento possibili sono diverse; le tre utilizzate in fase di generazione dell'ortofoto dal *Socet Set* sono essenzialmente tre:

- *nearest-neighbour* : il valore è trasferito dal *pixel* più vicino (preserva la qualità radiometrica ma introduce discontinuità geometriche)
- *interpolazione bilineare* : alla cella viene trasferita la media pesata dei *pixel* compresi in una maschera 2x2 contenente quello considerato (corregge le

distorsioni geometriche ma agisce come filtro passa-basso sulla componente radiometrica)

- *convoluzione cubica* : alla celle viene trasferita la media pesata dei *pixel* compresi in una maschera di dimensione 4x4 contenete quello considerato (è la scelta migliore possibile perché bilancia correzione radiometrica e geometrica, ma richiede lunghi tempi di elaborazione)

Il seguente paragrafo è dedicato al *DEM* utilizzato per la generazione dell'ortofotomosaico, vale a dire quello prodotto dalla missione *SRTM*.

#### 5.4.2 La missione *SRTM* ed il relativo *DEM*

L'acronimo *SRTM* (*Shuttle Radar Topography Mission*) indica la prima e tutt'ora unica missione, conclusasi nel Febbraio 2000, dedicata all'interferometria radar a singolo passaggio per l'acquisizione e generazione del più completo *data base* topografico digitale a scala globale e ad alta risoluzione (1-3 arc/sec, cioè fra 30 e 90 metri). La missione è frutto di una collaborazione fra *NASA*, dipartimento della difesa americano (*DoD*), *NIMA* (*National Imagin and Mapping Agency*), *JPL* (*Jet Propultion Laboratory*), *DLR* (Centro Aerospaziale Tedesco), *ASI* (Agenzia Spaziale Italiana).

La missione, cominciata nell'Agosto 1996, è durata 60 mesi, dei quali gli ultimi 18 dedicati al *post-processing* dei dati acquisiti. Per la sua realizzazione sono state sfruttate, quali punti di riferimento, le esperienze raccolte durante le precedenti missioni denominate *SRL-1* e *SRL-2* nate e sviluppate in collaborazione tra *DLR* e *ASI*.

Come già anticipato, la tecnica alla base di questa missione è l'interferometria radar a singolo passaggio, la quale consiste sostanzialmente nello sfruttare la differenza di fase tra due immagini *SAR*. Tale sigla indica un radar ad apertura sintetica, vale a dire un sensore di tipo attivo a microonde in grado di compiere misurazioni sulla superficie terrestre indipendentemente dalle condizioni atmosferiche e dalla presenza di luce solare sfruttando il cosiddetto effetto *Doppler*, vale a dire quell'effetto che si verifica ogni volta in cui un qualunque ricevitore di onde e la sorgente emittente si trovano in condizioni di moto l'uno rispetto all'altra. Il sistema *SAR* presenta una migliore risoluzione azimutale (vale a dire nella direzione di volo del sensore stesso) rispetto ad un tradizionale sensore radar; infatti

esso è costruito in modo da poter registrare tutte le  $n$  eco provenienti dal *target* durante l'intervallo in cui il *target* stesso è illuminato dalle onde emesse dall'antenna. Questo corrisponde a sintetizzare  $n$  antenne in posizioni diverse e combinare i segnali ricevuti in modo da formare un *array* di antenne reali, ovvero a realizzare la cosiddetta antenna sintetica.

Un interferogramma è una immagine raster ottenuta dall'elaborazione di due immagini *SAR*; più precisamente esso si ottiene moltiplicando (pixel per pixel) una prima immagine (detta *master*) per il numero complesso coniugato della seconda (identificata con il termine *slave*). Il risultato di questa moltiplicazione è, appunto, l'interferogramma, il quale ha come fase la differenza tra le fasi delle singole immagini di partenza. Ciascuna immagine, presa singolarmente, sarebbe inutilizzabile in quanto affetta dal fenomeno di retrodiffusione eliminabile, appunto, con l'interferometria di due immagini.

Noto l'interferogramma e la posizione relativa tra le due antenne *SAR* è possibile calcolare l'elevazione relativa tra i pixel dell'immagine e ottenere, quindi, un modello digitale del terreno.

La piattaforma utilizzata per la missione *SRTM* (figura 5.17) era attrezzata con due antenne *SAR*; una trasmittente-ricevente posizionata nel corpo dello *shuttle* (operante in banda C), l'altra solo ricevente collocata al termine del cosiddetto *mast* (un braccio estensibile lungo 60 metri) ed operante in banda X.

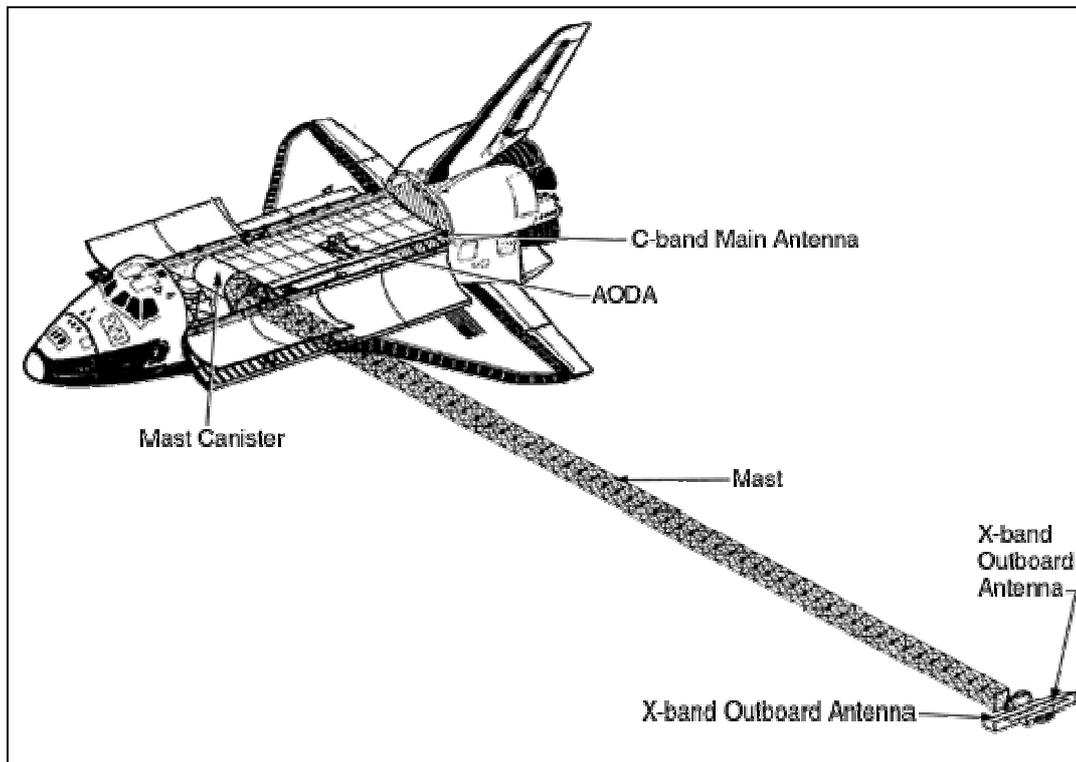


Figura 5.17 : Configurazione della piattaforma impiegata nella missione *SRTM*

La configurazione presentata in figura precedente è definita a *base line* fissa cioè con distanza fissa fra i centri di fase delle due antenne; questa disposizione facilitò notevolmente il processamento dei dati.

La piattaforma utilizzata in questa missione venne lanciata in orbita con un'inclinazione di  $57^\circ$ , che permise ai sensori *SAR* d'illuminare la terra con un angolo di *look* costante (pari a  $52^\circ$  per l'antenna in banda X) e di coprire le zone del globo comprese fra i  $60^\circ$  di latitudine Nord ed i  $56^\circ$  di latitudine Sud, vale a dire una fascia comprendente circa l'80% delle terre emerse (si veda figura 5.18).

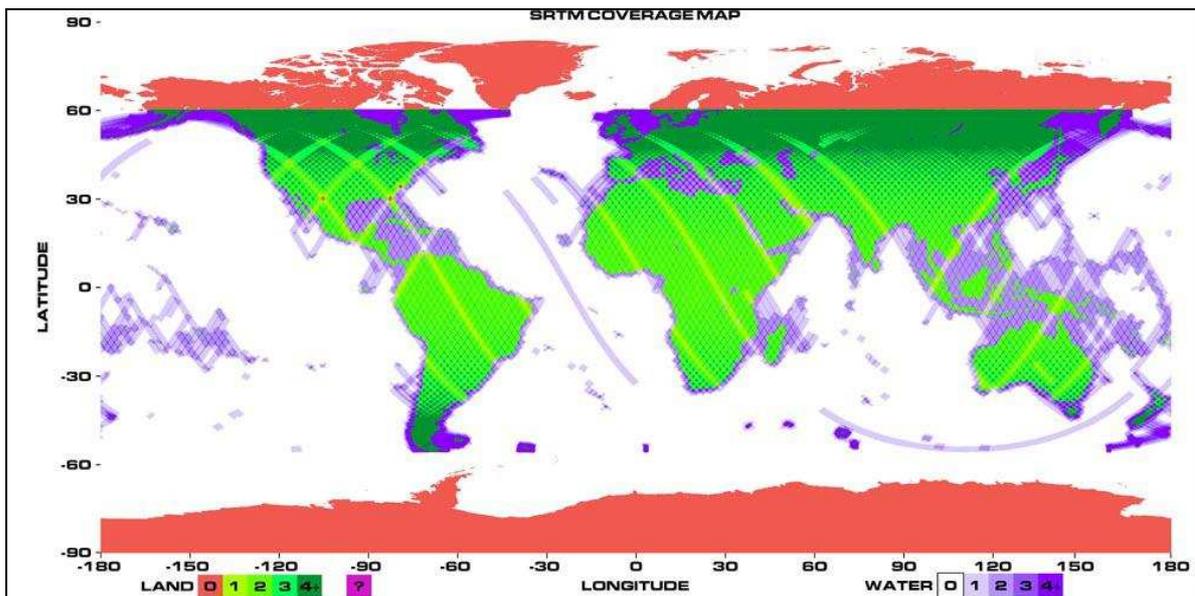


Figura 5.18 : Mappa di copertura a terra della missione *SRTM*

Le orbite totali furono 176, delle quali solo 159 vennero utilizzate in fase di elaborazione dei dati; per esigenze di risparmio energetico le acquisizioni vennero limitate unicamente alla superficie terrestre, comprendendo anche una fascia di 100 km sull’oceano e i cui dati vennero utilizzati per generare una superficie di calibrazione.

La missione *SRTM* permise la generazione del più completo *data base* topografico in formato digitale a scala globale ed alta risoluzione (costituito dalle singole immagini acquisite dalle antenne) e anche di un modello digitale del terreno (*DEM*) di tutte le terre emerse.

Quest’ultimo è un modello di tipo *grid* a celle rettangolari di dimensione variabile fra i 30 e i 90 metri; la dimensione del pixel, infatti, è proporzionale alla potenza del segnale riflesso (e quindi registrato). E’ scaricabile gratuitamente all’indirizzo <http://srtm.csi.cgiar.org/> ed è disponibile in due formati (*GEO Tiff* oppure *ArcInfo ASCII*). Una volta entrati nell’area di download l’utente può scegliere (dalla schermata in figura ??) se prelevare una determinata porzione di territorio (avendo a disposizione latitudine e longitudine esatte) oppure il rettangolo comprendente la zona che lo interessa.

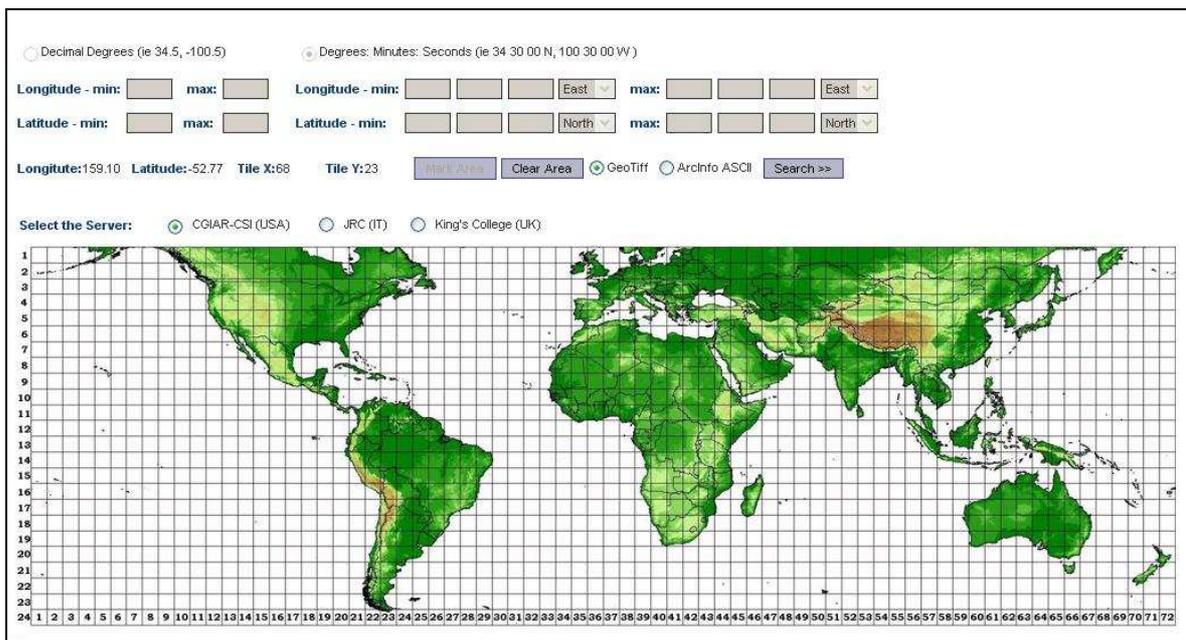


Figura 5.19 : Schermata del sito da cui scaricare gratuitamente il *DEM SRTM*

Il modello digitale succitato è stato prodotto in coordinate geografiche, con spaziatura orizzontale di circa 1 arc/sec e quota valutata in metri. Il *datum* di riferimento è il *WGS84*; le quote fornite sono ortometriche.

Per ciò che riguarda la precisione, è necessario distinguere tra errore assoluto e relativo. Il primo è pari a  $\pm 16$  metri, mentre il secondo (valido solo a scala locale ridotta, cioè circa 200 km) è di  $\pm 6$  metri. Entrambe le precisioni sono valide per il 90% dei dati, cioè rappresentative di un'ellisse d'errore pari a 1.6 volte la deviazione standard.

#### 5.4.3 L'ortofotomosaico prodotto dalle immagini CORONA

Ora che tutti gli aspetti tecnici e di carattere generale sono stati illustrati verranno descritte le procedure seguite per la generazione dell'ortofotomosaico.

Il software utilizzato è sempre la stazione fotogrammetrica digitale *Socet Set v. 5.4.0*. Il *DEM* utilizzato è quello prodotto dalla missione *SRTM*, l'unico disponibile nell'ampia zona presa in esame. In particolare sono stati impiegati i due rettangoli identificati dalle sigle 43\_05 e 44\_05, entrambi riportati in figura 5.20, scaricati in formato *GeoTiff*.

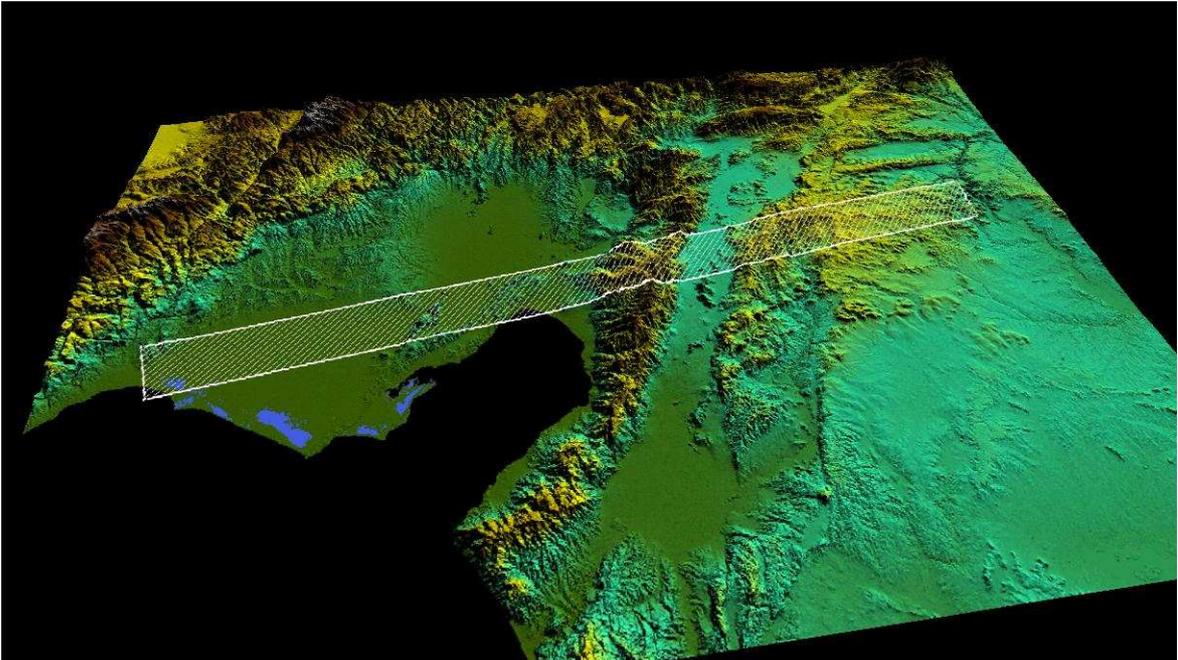


Figura 5.20 : Rappresentazione tridimensionale del *DEM* utilizzato (in tratteggio l'impronta dell'immagine CORONA)

L'impronta a terra dell'immagine elaborata è stata creata facilmente utilizzando gli strumenti a disposizione nel software *Global Mapper*, utilizzato anche per la visualizzazione del modello digitale stesso.

All'interno del software *Global Mapper* si è anche proceduto alla selezione e successivo export della porzione di *DEM* relativa esclusivamente all'area coperta a terra dall'immagine CORONA, in modo da ridurre al necessario il grosso quantitativo di dati da gestire.

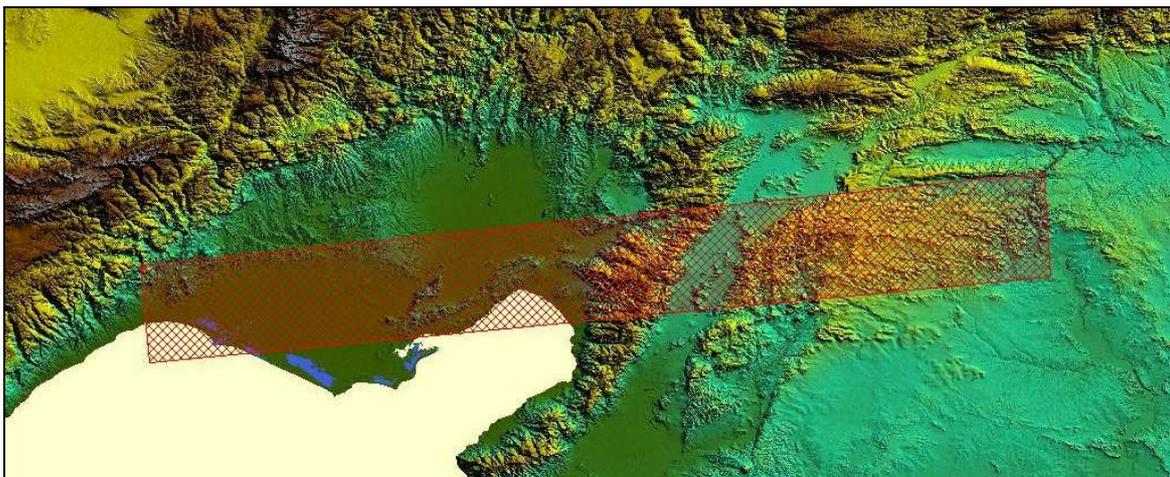


Figura 5.21 : Porzione del *DEM* impiegata per la generazione dell'ortofotomosaico (in rosso)

La porzione di cui sopra contiene 3.275.000 punti ed è stata esportata in formato *ArcGrid ASCII* , formato compatibile con il software *Socet Set* (lo stesso utilizzato per le fasi in precedenza descritte).

La schermata che quest'ultimo presenta all'utente è la seguente (figura 5.22).

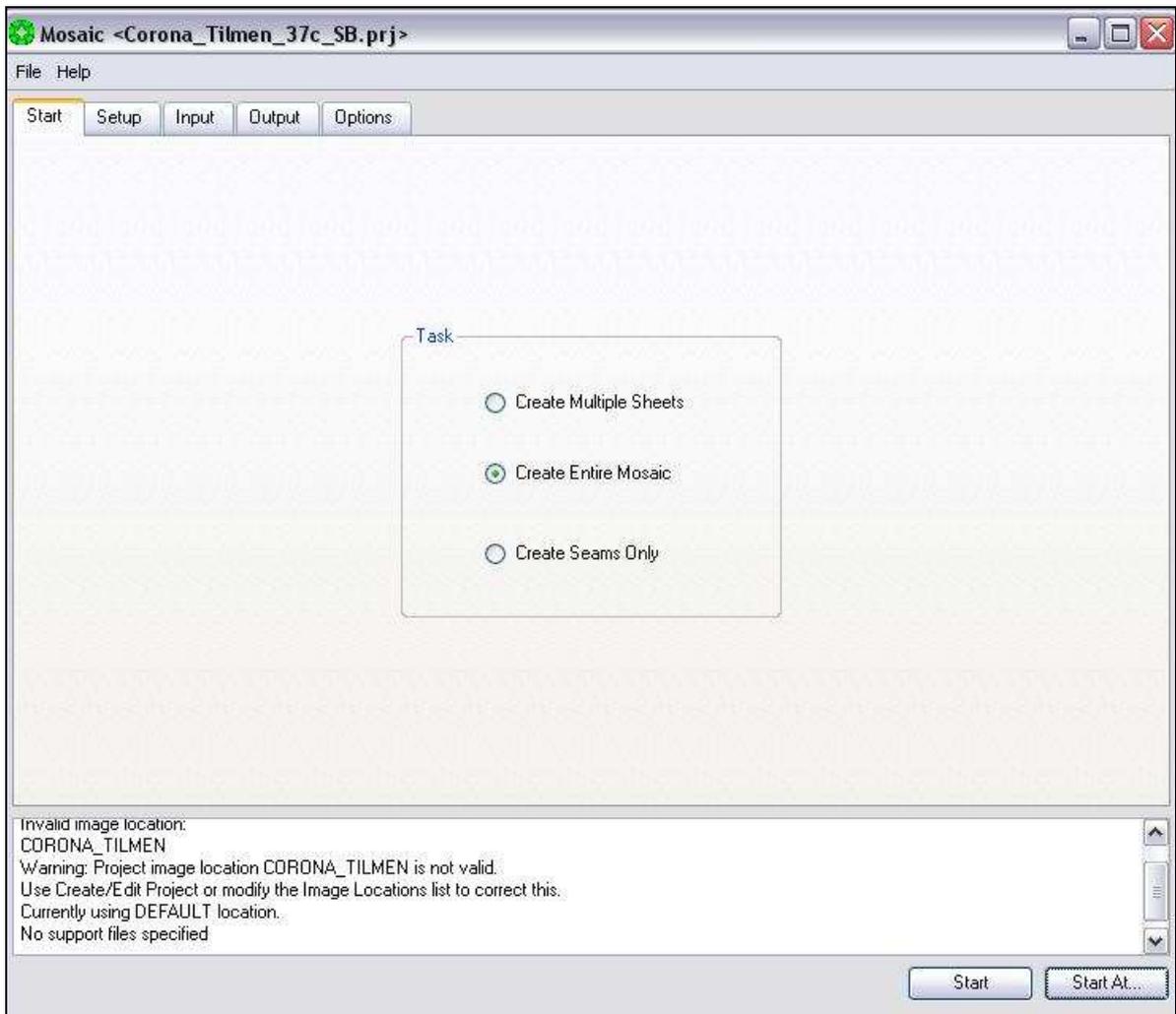


Figura 5.22 : Schermata in *Socet Set* da cui iniziare la generazione dell'ortofotomosaico

In particolare per il caso in esame si è scelto di effettuare in un'unica fase l'ortorettifica e la mosaicature delle 4 immagini. I passi fondamentali dell'elaborazione sono:

- *Setup* : sezione che contiene informazioni in merito alle coordinate assolute del prodotto finale, calcolate in funzione delle immagini scelte come *input* o del *DEM*.
- *Input* : menù che consente di scegliere quali immagini e quale *DEM* utilizzare per la generazione dell'ortofotomosaico.
- *Output* : in cui si impostano il formato del file generato e la dimensione del *GSD* dell'ortofotomosaico.

- *Options* : sezione nella quale è possibile scegliere diversi parametri, fra cui il metodo di mosaicatura, il colore di *background* per l'ortofotomosaico (bianco o nero) e il metodo di interpolazione per l'assegnazione dei livelli di grigio ai pixel così come descritti al sottoparagrafo 5.4.1 (*bilinear*, *nearest-neighbour*, *bicubic*).

Per la generazione del nostro ortofotomosaico sono stati scelti i seguenti parametri:

- file generato in uscita del tipo *tiff* + *world file* associato
- dimensione del pixel a terra (*GSD*) pari a 10 metri
- metodo di mosaicatura di tipo *radiometric*, con l'opportunità di bilanciare in automatico le differenze radiometriche fra le immagini nelle zone di sovrapposizione
- interpolazione bilineare, per l'assegnazione dei livelli di grigio ai vari pixel

La figura seguente rappresenta il risultato dell'operazione di "spalmatura" dell'ortofotomosaico sul modello digitale del terreno utilizzato per la produzione dello stesso.

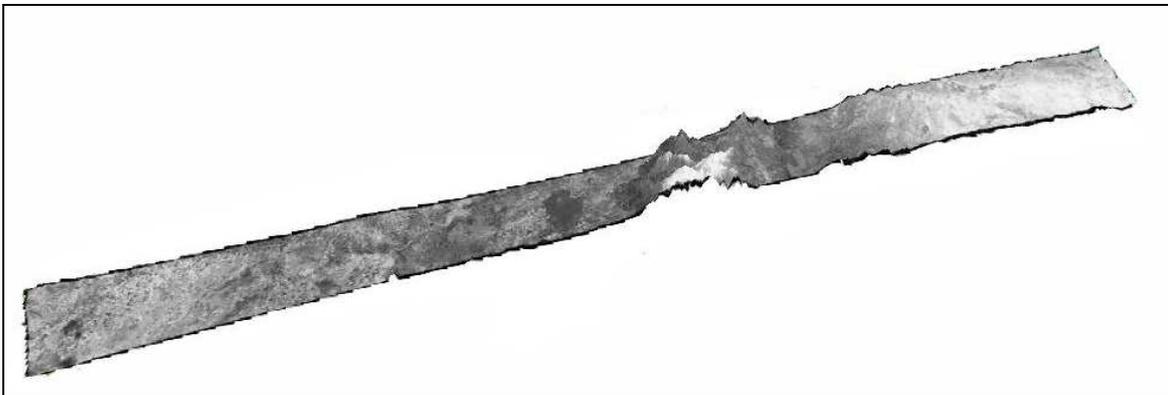


Figura 5.23 : Quadro d'insieme dell'ortofotomosaico in 3D

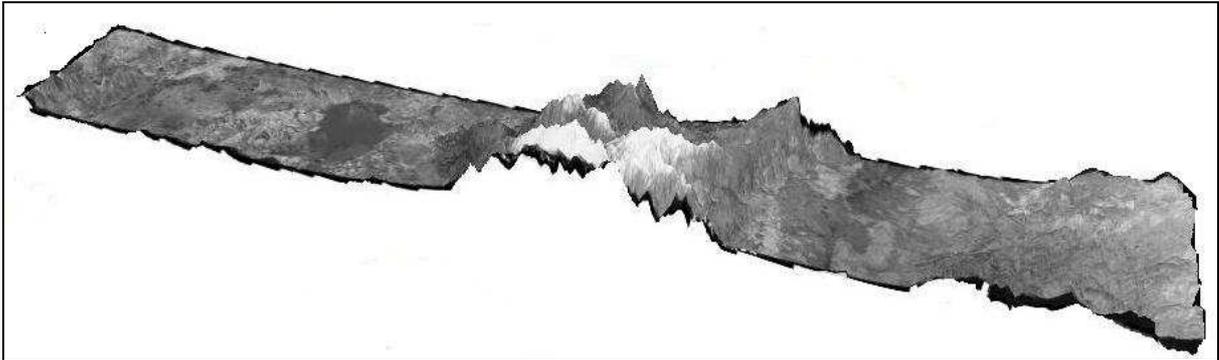


Figura 5.24 : Particolare dell'ortofotomosaico in figura sopra

La dimensione del GSD dell'immagine di partenza rendeva possibile spingersi anche a risoluzioni più elevate per l'ortofotomosaico generato, ma i residui ottenuti in fase di triangolazione aerea e la spaziatura del DEM SRTM utilizzato hanno determinato la scelta effettuata, anche considerata la difficoltà di gestire file di dimensione più elevate.

Una volta generato questo ortofotomosaico, si sono verificate le precisione planimetriche raggiunte, utilizzando quali *check points* punti noti non impiegati nella fase di triangolazione, per un totale di 44 punti.

La stima dei residui sui punti è stata valutata sulle coordinate *UTM* degli stessi.

La tabella nella pagina seguente riporta i residui in metri su ciascuna coordinata per ognuno dei 44 punti. Le colonne con la sigla **Orto** contengono le coordinate dedotte dall'ortofotomosaico, quelle recanti la sigla **G.E.** riportano le coordinate dei medesimi punti lette da *Google Earth*.

I residui riportati nelle colonne **Delta Nord** e **Delta Est** sono stati ottenuti come differenza, rispettivamente, fra il valore dedotto da *Google Earth* e quello ricavato dall'ortofotomosaico.

<b>Punto</b>	<b>UTM Nord Orto [m]</b>	<b>UTM Nord G.E. [m]</b>	<b>Delta Nord (UTM) [m]</b>	<b>UTM Est Orto [m]</b>	<b>UTM Est G.E. [m]</b>	<b>Delta Est (UTM) [m]</b>
<b>1</b>	4095000.340	4094947.700	-52.640	240632.900	240634.730	1.830
<b>2</b>	4091252.780	4091299.010	46.230	233254.650	233259.110	4.460
<b>4</b>	4107760.660	4107809.800	49.140	257668.700	257870.970	202.270
<b>5</b>	4098429.640	4098416.180	-13.460	716638.440	716589.560	-48.880
<b>6</b>	4097418.750	4097462.830	44.080	740594.170	740692.860	98.690
<b>11</b>	4106875.410	4106832.760	-42.650	326972.380	327035.850	63.470
<b>12</b>	4115763.830	4115769.890	6.060	356228.710	356259.970	31.260
<b>13</b>	4109302.060	4109308.070	6.010	344376.190	344463.110	86.920
<b>16</b>	4081672.440	4081650.320	-22.120	672098.320	671989.000	-109.320
<b>17</b>	4102283.090	4102280.230	-2.860	744183.640	744369.560	185.920
<b>18</b>	4093345.420	4093361.990	16.570	733744.850	733755.010	10.160
<b>20</b>	4094356.840	4094363.980	7.140	728646.830	728611.940	-34.890
<b>21</b>	4091387.490	4091382.930	-4.560	715080.900	715053.310	-27.590
<b>27</b>	4087315.820	4087290.600	-25.220	666159.900	665940.390	-219.510
<b>28</b>	4088100.600	4088099.430	-1.170	701357.270	701389.840	32.570
<b>30</b>	4085995.600	4086003.680	8.080	692498.140	692543.130	44.990
<b>34</b>	4099257.300	4099230.800	-26.500	707109.260	707081.270	-27.990
<b>35</b>	4086549.990	4086528.080	-21.910	674649.990	674597.800	-52.190
<b>36</b>	4092099.270	4092149.070	49.800	661506.400	661217.150	-289.250
<b>39</b>	4095863.130	4095859.520	-3.610	710710.530	710678.210	-32.320
<b>41</b>	4078166.710	4078116.210	-50.500	663779.140	663460.100	-319.040
<b>42</b>	4093527.400	4093514.770	-12.630	679943.360	679965.670	22.310
<b>44</b>	4098622.140	4098597.970	-24.170	697486.550	697507.940	21.390
<b>100</b>	4106014.470	4105909.030	-105.440	763929.480	763826.830	-102.650
<b>101</b>	4103476.070	4103474.660	-1.410	245326.420	245238.150	-88.270
<b>102</b>	4102339.490	4102315.560	-23.930	754170.250	754210.540	40.290
<b>108</b>	4110537.980	4110603.340	65.360	261079.800	261201.140	121.340
<b>111</b>	4101426.420	4101364.530	-61.890	752356.260	752341.700	-14.560
<b>205</b>	4114797.800	4114901.710	103.910	310523.160	310595.250	72.090
<b>207</b>	4103784.310	4103780.940	-3.370	295901.270	295849.120	-52.150
<b>208</b>	4111093.140	4111060.860	-32.280	317284.430	317262.790	-21.640
<b>213</b>	4115633.090	4115571.810	-61.280	324093.140	324328.390	235.250
<b>214</b>	4103684.900	4103609.500	-75.400	277886.050	277850.080	-35.970
<b>215</b>	4107475.760	4107500.480	24.720	262197.090	262415.800	218.710
<b>217</b>	4105902.610	4106042.130	139.520	328878.920	329022.010	143.090
<b>300</b>	4102015.810	4102105.480	89.670	362925.110	362885.880	-39.230
<b>302</b>	4100733.130	4100845.100	111.970	360008.760	359982.200	-26.560
<b>304</b>	4114023.450	4114059.870	36.420	382762.790	382795.340	32.550
<b>305</b>	4114835.700	4114835.780	0.080	313293.190	313381.640	88.450
<b>312</b>	4102220.280	4102316.300	96.020	355818.500	355847.390	28.890
<b>313</b>	4104496.750	4104550.090	53.340	357353.600	357371.000	17.400

<b>317</b>	4106420.310	4106473.230	52.920	382691.440	382617.960	-73.480
<b>318</b>	4107277.880	4107294.080	16.200	380312.210	380247.930	-64.280
<b>319</b>	4114653.250	4114654.220	0.970	361631.450	361613.450	-18.000

Tabella riassuntiva dei residui sui *check points*.

L'errore medio sulla coordinata Nord è pari a circa 8 metri, quello sulla Est circa 2.5 metri; gli scarti quadratici medi sono di circa 46 metri per la Nord e di circa 111 metri per la Est. Osservando le colonne dei residui si nota come il 45% dei punti presenta un errore, su entrambe le coordinate, attorno ai 50 metri; la percentuale scende all'11% considerando un errore massimo, sempre su entrambe le coordinate, inferiore ai 30 metri.

In generale, comunque, si nota come la coordinata Est presenti errori tendenzialmente maggiori rispetto a quella Nord. Questo potrebbe essere conseguenza di una non accuratissima fase di import, riferendoci particolarmente ai valori di *start* ed *end scan angle*. Ricordiamo, infatti, che questi due parametri sono stati valutati empiricamente partendo da misure effettuate a monitor sulle immagini digitali, stante l'impossibilità di effettuare le stesse in maniera diretta sulla pellicola originale.

Si può notare anche che circa il 25% dei punti presenta un errore, per una delle due coordinate, uguale o anche superiore a 100 metri; ciò si verifica su quei punti collocati posizionati lungo i bori dei fotogrammi dove, come precisato nel secondo capitolo, sono maggiori le distorsioni indotte dal sistema panoramico di acquisizione.

Vi sono anche altri fattori che influiscono sulla precisione di un ortofotomosaico e che possono quindi giustificare i residui riportati nella tabella di pagina precedente.

In primo luogo va precisato come la precisione assoluta di un ortofoto sia strettamente correlata alla qualità del *DEM* utilizzato. Come illustrato nel sottoparagrafo espressamente dedicatogli, il modello digitale del terreno prodotto con la missione *SRTM* presenta dei pixel di dimensioni variabili fra i 30 e i 90 metri ed una precisione assoluta di  $\pm 16$  metri. Tali caratteristiche non consentono di sfruttare appieno le potenzialità dei fotogrammi di partenza (risoluzione a terra di circa 2.5 metri) ed inficiano, quindi, la precisione del prodotto finale.

La precisione finale di un'ortofoto è influenzata anche dalla qualità dei punti d'appoggio; tale aspetto costituisce senza dubbio uno degli punti più delicati della sperimentazione condotta. Come già anticipato nei paragrafi precedenti, infatti, il loro reperimento ha

costituito una delle parti più gravose del lavoro, e la non disponibilità di cartografia a grande scala o di dati GIS aggiornati e di qualità controllata hanno costretto ad utilizzare in modo sistematico il dato Google Earth, del quale peraltro non sono note le caratteristiche metriche né gli stadi di elaborazione a cui le immagini sono state sottoposte, ed esso non garantisce il livello di omogeneità che sarebbe stato necessario per una copertura così ampia. I 40 anni di differenza fra le immagini attuali e quelle di *Google Earth* non hanno sicuramente agevolato la ricerca dei *GCP*; si unisca a questo la non sempre ottima risoluzione delle immagini assunte come “verità a terra” attuale e la morfologia della zona indagata (parecchie zone montuose e con vegetazione rigogliosa).

Questo lavoro di tesi può considerarsi come punto di partenza per il futuro, in quanto mostra quali prodotti siano ricavabili dalle immagini CORONA, quali sono i problemi da affrontare e i punti “deboli” della fase di elaborazione dei fotogrammi.

Per il futuro è previsto il reperimento di dati maggiormente precisi relativamente alla zona comprendente il sito archeologico di Tilmen Höyük, dato il notevole interesse storico-archeologico che gravita attorno ad esso. La possibilità di utilizzare, quali fonte di informazione, immagini acquisite dalle moderne piattaforme satellitari (ad esempio *Ikonos* o *Quick Bird*) aventi migliore risoluzione geometrica e per le quali sono note le procedure di pre-elaborazione a cui siano state sottoposte (stante comunque la possibilità di acquistare il dato “grezzo”), migliorerebbe certamente la precisione dei prodotti finali ricavati dalle immagini CORONA.

Disponendo, addirittura, di rilievi topografici eseguiti in situ ad hoc si potrebbero raggiungere precisioni ancora più elevate, con in più la possibilità di verificare direttamente la qualità degli stessi. Considerato che per l’area di studio è stato attivato un progetto per l’istituzione di un “parco archeologico del Mediterraneo”, tale eventualità è certamente da prendere in considerazione per approfondimenti futuri sul territorio tramite l’utilizzo di immagini satellitari e panoramiche.

Di seguito (figura 5.25) si riporta uno “zoom” sulla zona di Tilmen ricavato da un ortofotomosaico con *GSD* pari a 5 metri. Si è scelto di generare un prodotto con questa caratteristica (nonostante quanto riportato in precedenza relativamente all’entità dei residui e alla possibilità di gestione del dato finale in funzione delle dimensioni dello stesso) a

scopo puramente illustrativo; un dimensione del pixel a terra di questa entità, infatti, consente di non perdere in definizione avvicinandosi maggiormente alla zona d'interesse. La freccia indica la posizione del sito archeologico.

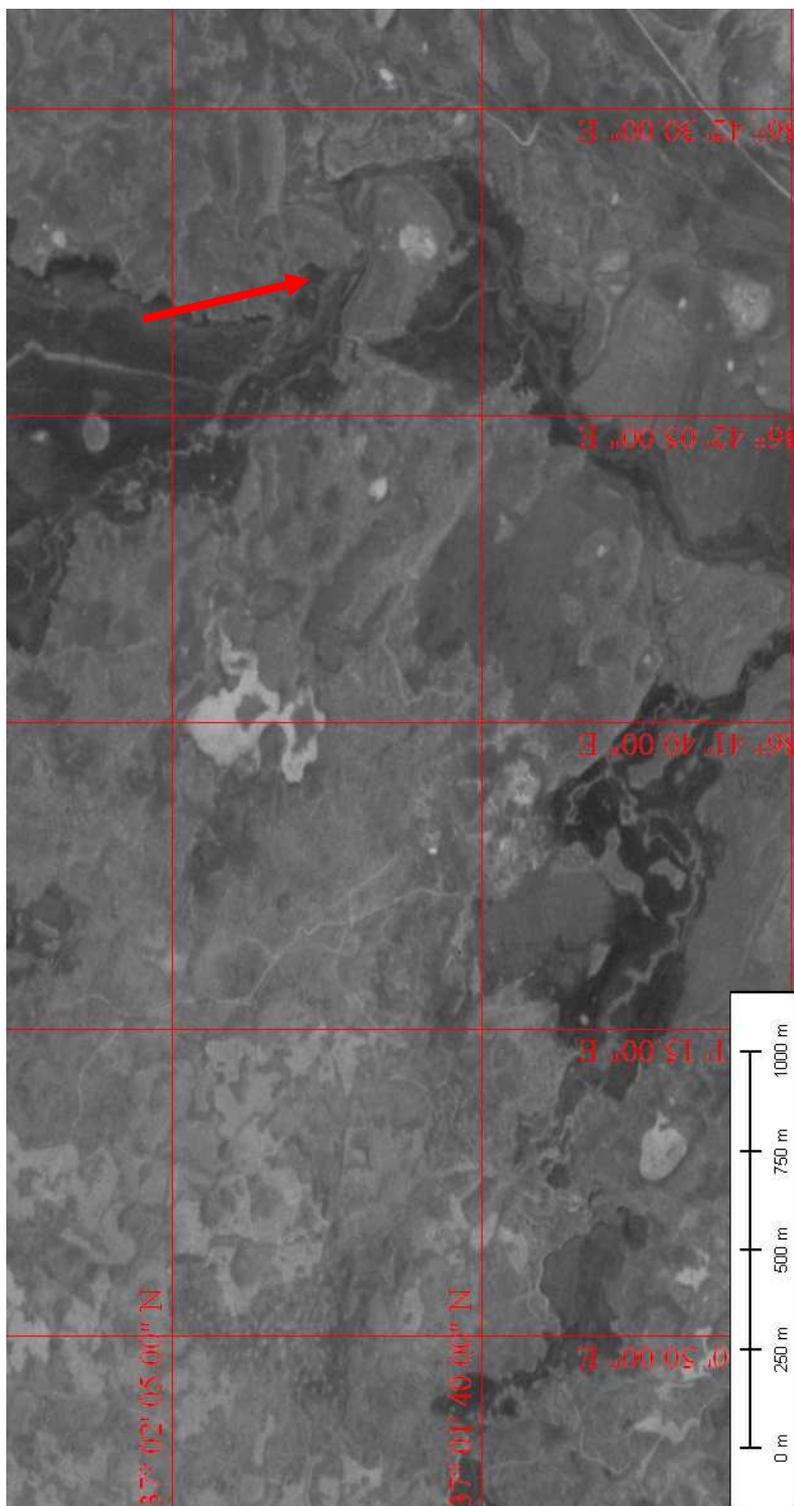


Figura 5.25 : Particolare della zona di Tilmen tratto dall'ortofotomosaico

## CAPITOLO 6 CONCLUSIONI

Il lavoro presentato costituisce un esempio su come sia possibile sfruttare immagini e fotogrammi di valenza storica, e su quanto questa operazione di recupero possa essere efficace per la comprensione degli assetti territoriali pregressi, soprattutto per quelle zone per le quali le informazioni cartografiche risultano scarse o addirittura assenti. Le informazioni ricavabili dalle immagini storiche, inoltre, posseggono un carattere di oggettività e di “totalità” non sempre rintracciabili e desumibili dalla cartografia storica. Un fotogramma, infatti, è una fonte di informazione imparziale derivante da un’acquisizione oggettiva: a differenza della cartografia, infatti, esso contiene tutti gli elementi presenti all’epoca di acquisizione senza omissioni, errori di rappresentazione o interpretazione, o applicazione di criteri selettivi soggettivi.

Il processo di foto-interpretazione, ovvero una valutazione puramente qualitativa dei fotogrammi, sarebbe di per sé sufficiente per identificare (seppur sommariamente) le modificazioni avvenute nei diversi territori con il trascorrere degli anni; il recupero a fini metrici potrebbe quindi apparire come un impegno di risorse non giustificato. Tuttavia un approccio qualitativo di questo tipo non consentirebbe alcun tipo di analisi territoriale oggettiva e limiterebbe notevolmente le enormi potenzialità associate ai fotogrammi storici. Conferire caratteristiche oggettive (come una precisa collocazione in un sistema geodetico-cartografico) alle immagini del passato permette la co-registrazione delle stesse con immagini recenti, rendendo quindi tangibili le modificazioni intercorse sul territorio ed oggettivando, quindi, l’analisi di *change detection*.

Ricordando, inoltre, la notevole quantità di fotogrammi storici disponibili, anche grazie alla declassificazione di immagini acquisite ed utilizzate in passato per scopi militari, emerge come le tematiche affrontate in questo lavoro di tesi siano più attuali di quanto si pensi; infatti lo sfruttamento di queste risorse “storiche” rappresenta una nuova ed interessante possibilità per l’analisi e la comprensione delle dinamiche evolutive intervenute in quelle zone scarsamente monitorate in passato con le classiche metodologie. Conoscere la situazione pregressa di un territorio costituisce un importante punto di partenza nel lavoro di “ricostruzione” degli archeologi, così come uno spunto per le analisi di storici, demografi ed urbanisti volte all’interpretazione delle dinamiche di sviluppo

intervenute in una precisa realtà territoriale. Potersi avvalere, per questi studiosi, di immagini fotografiche storiche opportunamente elaborate agevola tutti questi tipi di analisi e conferisce un carattere globale agli studi da esse derivanti. Un confronto diretto (per esempio tramite sovrapposizione delle immagini) tra passato e presente costituisce la miglior possibilità di indagine scientifica oggettiva del processo evolutivo intervenuto in una determinata zona (sia essa una città, una regione o una nazione).

La presente tesi si è posta l'obiettivo di fornire, come anticipato nelle prime righe, un piccolo esempio su come i mezzi tecnologici attualmente a disposizione (sistemi di calcolo, scanner fotogrammetrici, stazioni fotogrammetriche digitali, ecc) possano essere impiegati in queste operazioni di recupero della innumerevole mole di dati del passato che abbiamo a disposizione; basti ricordare che solamente le missioni CORONA, di cui tratta la tesi, lasciano in "eredità" più di 850.000 fotogrammi per una superficie coperta di 2 milioni di chilometri quadrati.

Questo lavoro di tesi, seppur finalizzato su un unico e particolare tipo di immagini (a geometria panoramica), potrebbe essere esemplificativo per tutti coloro che volessero utilizzare per i propri studi le immagini fotografiche del passato, opportunamente elaborate, esaminando alcuni dei punti delicati delle fasi di elaborazione e i problemi che possono presentarsi (reperimento di punti d'appoggio, procedure software da seguire, ecc). Il caso specifico affrontato con questa tesi potrebbe inserirsi in un contesto più ampio, esteso alle immagini a geometria panoramica in generale; i fotogrammi CORONA, infatti, derivano dal telerilevamento satellitare mentre il principio panoramico è stato utilizzato anche in aerofotogrammetria e per la fotogrammetria terrestre (la cosiddetta fotogrammetria dei vicini).

In letteratura sono pressoché inesistenti i lavori sul trattamento metrico di immagini CORONA e ciò ha reso più complessa la sperimentazione.

I risultati ottenuti sono da considerarsi molto interessanti, anche se l'accuratezza raggiunta potrebbe essere stata superiore se fossero state presenti altre condizioni: aldilà dell'assenza di esperienza pregressa reperibile in letteratura, e dell'assenza stessa di moduli software espressamente dedicati al trattamento di queste immagini, va ricordata la difficoltà nel reperimento di punti d'appoggio da rilievo diretto o da cartografia a scala adeguata. Si è dovuto ricorrere alla consultazione delle immagini disponibili in *Google Earth*, alle quali è

stato assegnato un valore di “verità a terra” che in realtà non possono possedere, anche perché non sono reperibili informazioni sull’effettiva loro qualità metrica. Inoltre vanno considerati il periodo di tempo intercorso dall’acquisizione ad oggi (40 anni) e la non sempre adeguata risoluzione delle immagini. Da ultimo, l’assenza di un modello digitale del terreno di precisione paragonabile a quella dei fotogrammi originali potrebbe avere “forzato” la procedura di generazione dell’ortofotomosaico contribuendo al peggioramento dell’accuratezza planimetrica.

Ciò non toglie nulla alle potenzialità di queste immagini, ed al fatto che, seguendo la procedura individuata, risultati migliori potrebbero essere ottenuti disponendo di dati ulteriori e di migliore qualità a terra. Ricordando, inoltre, il bassissimo costo per l’acquisto dei fotogrammi CORONA e la grande quantità di immagini di questo satellite o di altri analoghi oggi disponibili anche all’utenza civile, è da prevedere ed auspicare un interesse crescente su questi temi in modo tale da poter approfondire la conoscenza di certe zone del globo tutt’ora poco conosciute ma che potrebbero nascondere informazioni preziosissime del nostro passato.

Il caso di Tilmen Höyük, importante scavo archeologico condotto dall’Università di Bologna sotto la guida del prof. N. Marchetti, può in questo senso diventare un esempio significativo di come si possa contestualizzare la ricerca archeologica, allargandola ad un ambito regionale ed affrontandola con un gruppo di ricerca multidisciplinare che studi il sito nel senso più ampio, dal singolo reperto al territorio, facendo ricorso alla molteplicità di informazioni e dati che le tecniche digitali moderne possono offrire.

## Bibliografia

1. Altmaier A., Kany C., (2002): “Digital Surface Model Generation from CORONA Satellite Images”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **56**(4), pp 221-235.
2. Bayram B., Bayraktar H., Helvaci H., Acar U., (2004): “Coast Line Change Detection Using CORONA, SPOT and IRS 1D Image”, *XXth ISPRS Congress*, Istanbul, Commission 7.
3. Falcini P., (2008): “Shuttle Radar Topography Mission: studio ed analisi di qualità di un DEM globale”, Università di Bologna, Tesi di Laurea in Cartografia Numerica e Sistemi Informativi Territoriali L (rel. G.Bitelli).
4. Flower M. J. F., (2006): “Modelling the Acquisition Times of CORONA KH-8 Satellite Photographs”, *AARG News*, **33**.
5. Galiatsatos N., (2004): “Assessment of the CORONA Series of Satellite Imagery for Landscape Archaeology: a Case Study for the Orontes Valley, Syria”, Università di Durham, Tesi presentata per il Dottorato di Ricerca.
6. Goossens R., De Wulf A., Bourgeois J., Gheyle W., Willems T., (2006): “Satellite Imagery and Archaeology: the Example of CORONA in the Altain Mountains”, *Journal of Archaeological Science*, **33**, pp. 745-755.
7. Jacobsen K., (2002): “Geometric Aspects of the Handling of Space Images”, *ISPRS Commission I / Pecora 15 Conference Proceedings*, IntArchPhRS (34), Part 1 Com 1, Denver, pp 89-93.
8. Marchetti N., (2007): “Scavi e ricerche 2003-2006 a Tilmen-Höyük in Turchia sud-orientale”, articolo consegnato direttamente dall’autore al relatore della presente Tesi.

9. Marchetti N., Bitelli G., Casiddu N., Davite C., Fortunati V., Franco G., Marchesi G., Musso S.F., Rosa E., Rossi P., Soldà M., Spadolini M.B., Speranza M., Vescovi G., Vittuari L., (2007): “Tilmen Höyük, una capitale di 4000 anni fa”, *Archeologia Viva*, **125**, pp. 46 – 59.
10. Ruffner K. C., (1987): “*CORONA: America’s First Satellite Program*”, CIA Cold War Record, Washington D.C., Government Printing Office.
11. Schmidt M., Goossens R., Menz G., Altmaier A., Devriendt D., (2001): “The Use of CORONA Satellite Images for Generating a High Resolution Digital Elevation Model”, *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, **7**, pp 3123-3125.
12. Socet Set User’s Manual, BAE Systems.
13. Sohn H., Kim G., Yom J., (2004): “Mathematical Modelling of Historical Reconnaissance CORONA KH-4B Imagery”, *The Photogrammetric Record*, **19**(105), pp 51-66.
14. Sohn H., Kim G., Yun K., (2002): “Rigorous Sensor Modeling of Early Reconnaissance CORONA Imagery for Monitoring Urban Growth”, *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, **3**, pp 1929-1931.
15. Sohn H., Park C., Chang H., (2005): “Rational Function Model-Based Image Matching for Digital Elevation Models”, *The Photogrammetric Record*, **20**(112), pp. 366-383.
16. Wheelon A. D., (1997): “CORONA: The First Reconnaissance Satellites”, *Physic Today*, pp 24-26.

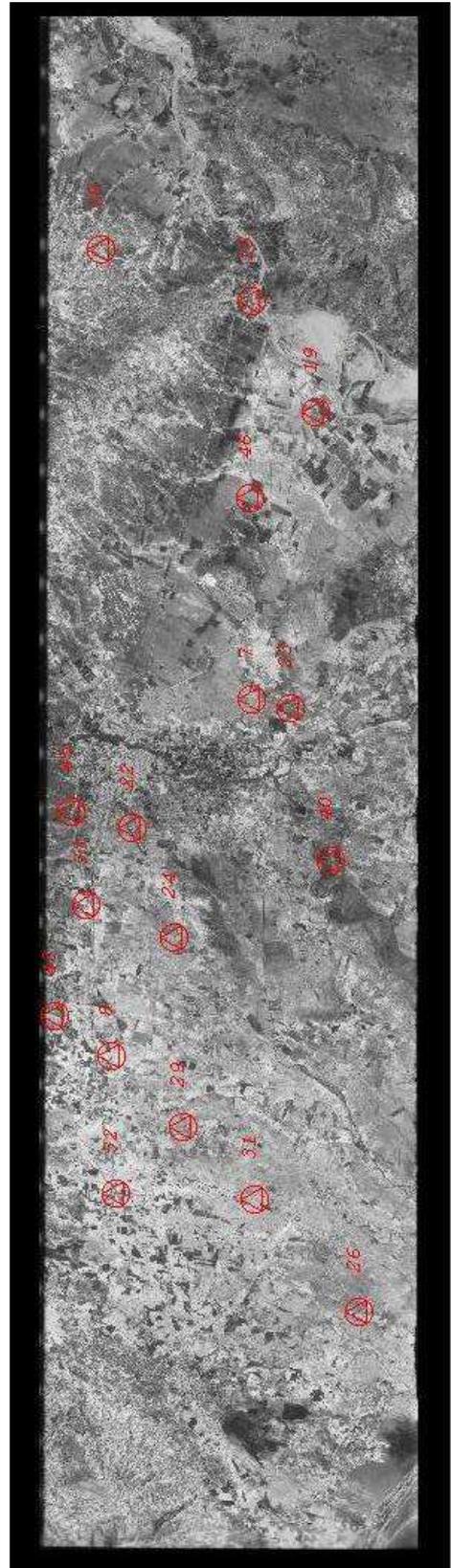
17. Wilkinson K. N., Beck A. R., Philip G., (2006): "Satellite Imagery as a Resource in the Propection for Archaeological Sites in Central Syria", *Geoarchaeology: An International Journal*, **21**(7), pp. 735-750.
18. Zhon G., Jezek K. C., (2002): "Satellite Photograph Mosaic of Greenland from the 1960s Era", *International Journal of Remote Sensing*, **23**(6), pp. 1143-1159.
19. Pagine internet consultate:
  - <http://edcwww.cr.usgs.gov/webglis>
  - [http://en.wikipedia.org/wiki/Corona\\_\(satellite\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Corona_(satellite))
  - [http://en.wikipedia.org/wiki/Petzval\\_lens](http://en.wikipedia.org/wiki/Petzval_lens)
  - [http://en.wikipedia.org/wiki/PGM-17\\_Thor](http://en.wikipedia.org/wiki/PGM-17_Thor)
  - [http://en.wikipedia.org/wiki/Thor\\_\(launch\\_vehicle\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Thor_(launch_vehicle))
  - <http://msl.jpl.nasa.gov/Programs/corona.html>
  - <http://www.centennialofflight.gov/essay/SPACEFLIGHT/delta/SP9.htm>
  - <http://www.fas.org/irp/index.html>
  - <http://www.friends-partners.org/~mwade/spaceflt.htm>
  - <http://www.geog.ucsb.edu/~kclarke/Corona/Corona.html>
  - <http://www.gwu.edu/~nsarchiv>
  - <http://www.nara.gov/nara/searchnail.html>
  - <http://www.nationalmuseum.af.mil/factsheets/factsheet.asp?id=3944>
  - <http://www.nro.odci.gov/index5.html>
  - <http://www.odci.gov/csi/index.html>

**GROUND CONTROL POINTS FOTO 37\_A**

<i>Punto</i>	<i>Latitudine Nord (ggmmss.ss)</i>	<i>Longitudine Est (ggmmss.ss)</i>	<i>Quota geoidica (m)</i>
7	36° 55' 56.57"	35° 23' 01.01"	18.000
8	36° 58' 35.34"	35° 07' 19.65"	21.000
18	36° 57' 26.45"	35° 37' 31.60"	16.000
19	36° 55' 17.00"	35° 34' 05.77"	13.000
22	36° 58' 50.19"	35° 16' 54.62"	17.000
23	36° 54' 47.29"	35° 23' 00.34"	17.000
24	36° 57' 12.14"	35° 12' 54.61"	11.000
26	36° 49' 57.19"	34° 59' 04.65"	3.000
29	36° 56' 08.91"	35° 05' 05.02"	15.000
31	36° 53' 40.14"	35° 02' 49.67"	6.000
32	36° 57' 52.63"	35° 01' 29.57"	26.000
33	36° 59' 55.11"	35° 13' 22.78"	26.000
38	37° 01' 44.59"	35° 38' 16.49"	142.000
40	36° 52' 59.66"	35° 17' 29.59"	15.000
43	37° 00' 25.73"	35° 08' 24.51"	36.000
45	37° 00' 41.22"	35° 16' 57.61"	30.000
46	36° 56' 45.91"	35° 30' 29.70"	20.000



Posizione dei GCP su Google Earth



Posizione dei GCP sull'immagine CORONA

PUNTO (7)

Latitudine 36°55'56.57" N

Longitudine 35°23'1.01" E

Quota geoidica: 18 m

Descrizione: incrocio tra canali per l'irrigazione



Immagine da Google Earth



Immagine CORONA 37\_a

PUNTO (8)

Latitudine 36°58'35.34" N

Longitudine 35° 7'19.65" E

Quota geoidica: 21 m

Descrizione: biforcazione di strada (in terra battuta) che incontra canale per l'irrigazione



Immagine da Google Earth



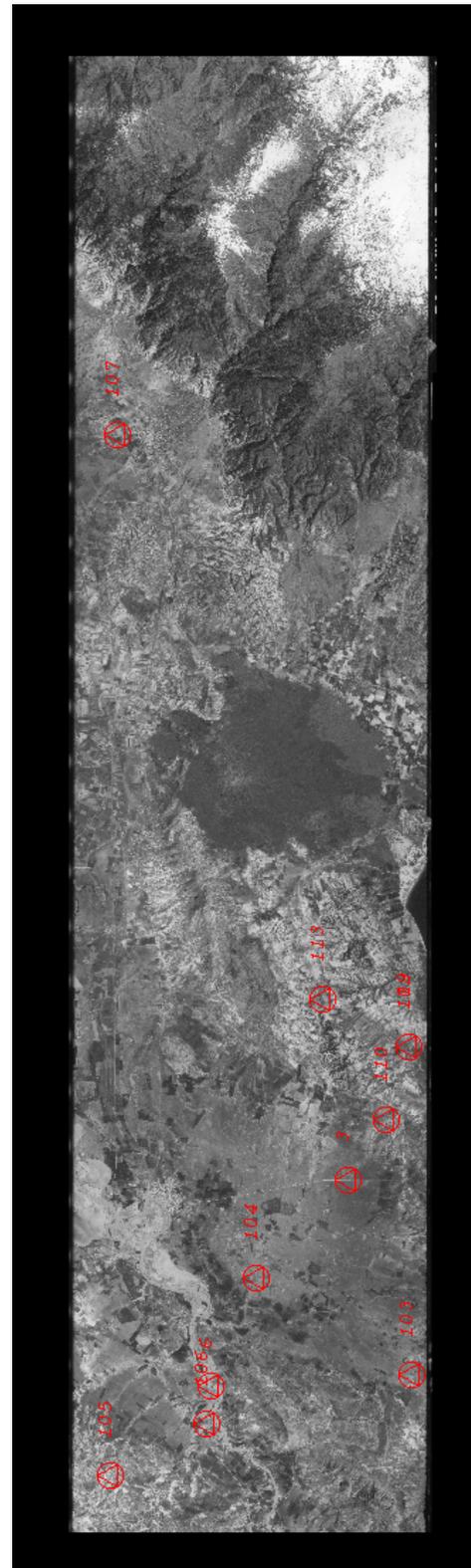
Immagine CORONA 37\_a

**GROUND CONTROL POINTS FOTO 37\_B**

<i>Punto</i>	<i>Latitudine Nord (gmmss.ss)</i>	<i>Longitudine Est (gmmss.ss)</i>	<i>Quota geoidica (m)</i>
3	36° 56' 22.85"	35° 50' 38.78"	26.000
6	36° 57' 53.70"	36° 05' 12.07"	19.000
103	36° 53' 52.59"	35° 44' 08.92"	39.000
104	36° 58' 36.58"	35° 46' 32.04"	21.000
105	37° 02' 07.42"	35° 38' 15.69"	113.000
106	36° 59' 30.86"	35° 40' 54.48"	24.000
107	37° 05' 20.69"	36° 15' 01.74"	112.000
109	36° 55' 11.51"	35° 55' 38.56"	86.000
110	36° 55' 32.82"	35° 52' 59.24"	108.000
112	36° 55' 11.28"	35° 55' 38.65"	86.000
113	36° 57' 44.79"	35° 56' 46.24"	123.000



Posizione dei GCPs sulla 37b come da Google Earth



Posizione dei medesimi GCPs sulla CORONA

PUNTO (3)

Latitudine 36°56'22.85" N

Longitudine 35°50'38.78" E

Quota geoidica: 26 m

Descrizione: incrocio stradale



Immagine da Google Earth



Immagine CORONA 37\_b

PUNTO (6)

Latitudine 36°59'33.09" N

Longitudine 35°42'16.55" E

Quota geoidica: 19 m

Descrizione: spalla NO (NordOvest) di un ponte



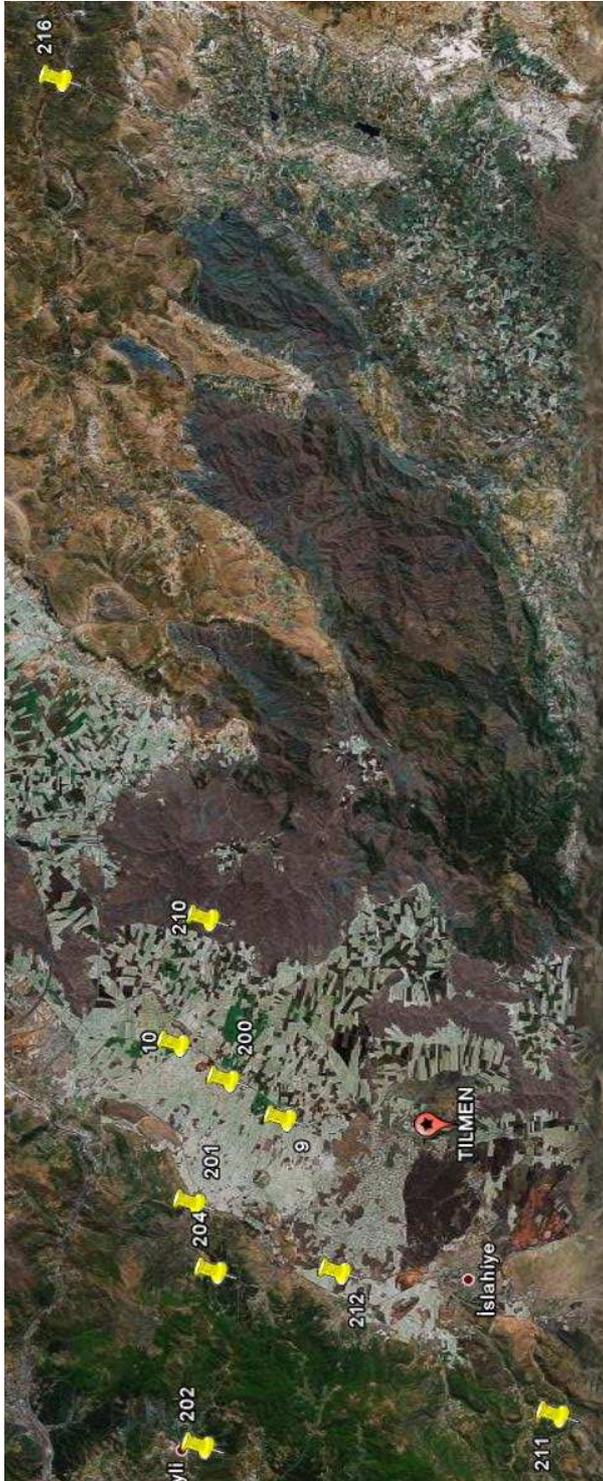
Immagine da Google Earth



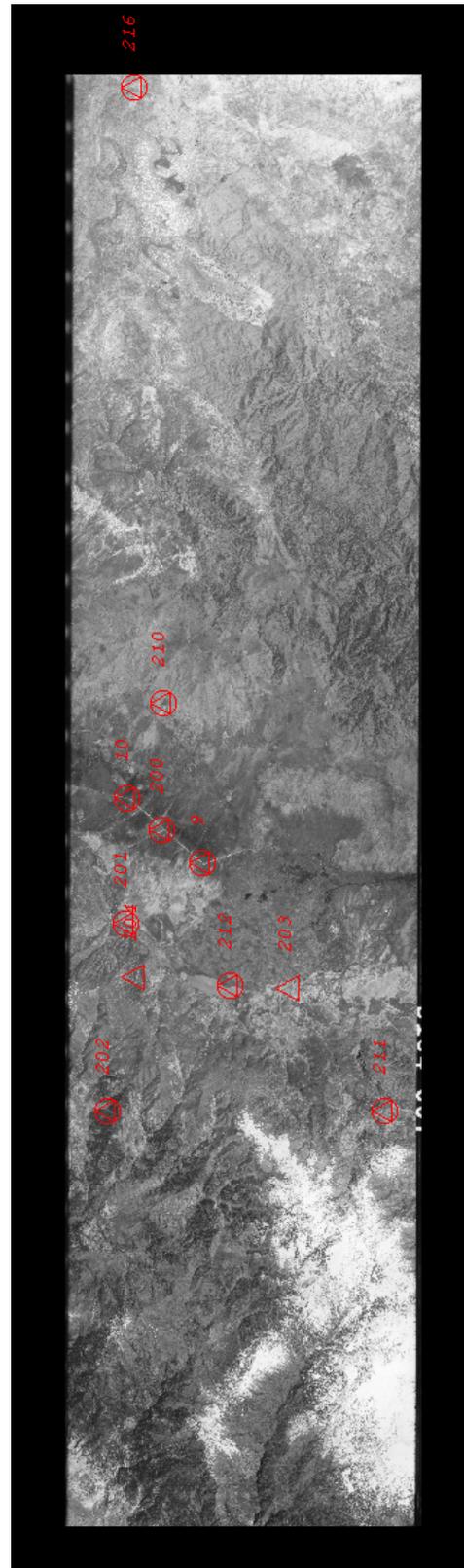
Immagine CORONA 37\_b

**GROUND CONTROL POINTS FOTO 37\_C**

<i>Punto</i>	<i>Latitudine Nord (ggmss.ss)</i>	<i>Longitudine Est (ggmss.ss)</i>	<i>Quota geoidica (m)</i>
9	37° 05' 10.76"	36° 42' 13.77"	480.000
10	37° 07' 33.92"	36° 44' 19.91"	478.000
200	37° 06' 27.12"	36° 43' 19.87"	479.000
201	37° 07' 12.07"	36° 39' 51.99"	527.000
202	37° 06' 59.23"	36° 33' 09.57"	901.000
203	37° 02' 14.35"	36° 38' 04.74"	Non assegnata
204	37° 06' 42.67"	36° 38' 01.23"	Non assegnata
210	37° 06' 53.36"	36° 47' 52.73"	539.000
211	36° 59' 08.00"	36° 34' 00.78"	793.000
212	37° 03' 57.86"	36° 37' 56.19"	511.000
216	37° 10' 02.97"	37° 11' 20.70"	1036.000



Posizione dei GCPs sulla 37c come da Google Earth



Posizione dei medesimi GCPs sulla CORONA

PUNTO (9)

Latitudine 37° 5'10.76" N

Longitudine 36°42'13.77" E

Quota geoidica: 480 m

Descrizione: piega di un canale per irrigazione a NO (Nord Ovest) della città di Islahiye

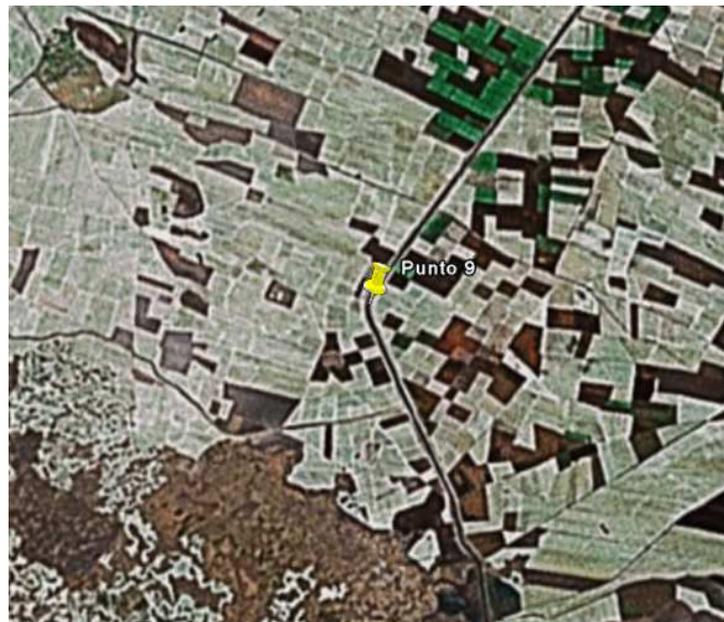


Immagine da Google Earth



Immagine CORONA 37\_c

PUNTO (10)

Latitudine 37° 7'33.92" N

Longitudine 36°44'19.91" E

Quota geoidica: 478 m

Descrizione: piega di un canale per irrigazione a NO (Nord Ovest) della città di Islahiye



Immagine da Google Earth



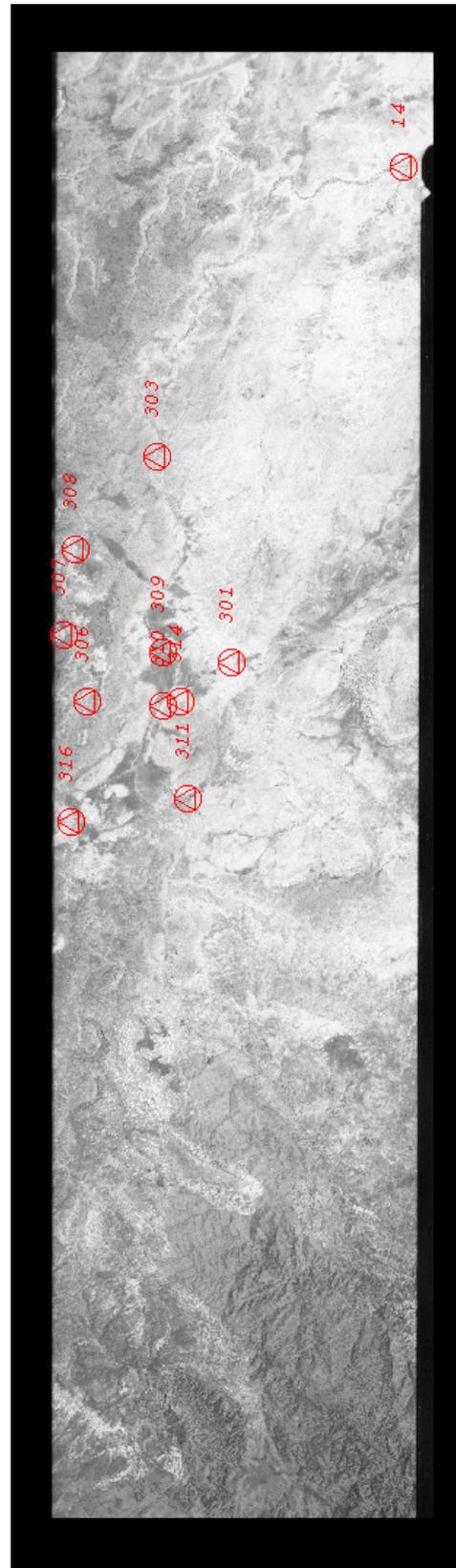
Immagine CORONA 37\_c

**GROUND CONTROL POINTS FOTO 37\_D**

<i>Punto</i>	<i>Latitudine Nord (ggmss.ss)</i>	<i>Longitudine Est (ggmss.ss)</i>	<i>Quota geoidica (m)</i>
14	37° 04' 08.63"	37° 45' 11.49"	535.000
301	37° 07' 45.73"	37° 23' 23.98"	885.000
303	37° 10' 57.00"	37° 32' 18.15"	780.000
306	37° 12' 03.10"	37° 21' 52.93"	975.000
307	37° 13' 05.95"	37° 24' 47.36"	823.000
308	37° 13' 07.75"	37° 28' 23.75"	890.000
309	37° 09' 55.09"	37° 23' 55.72"	853.000
310	37° 09' 41.53"	37° 21' 41.88"	908.000
311	37° 08' 35.23"	37° 17' 51.31"	970.000
314	37° 09' 09.57"	37° 21' 51.77"	879.000
316	37° 12' 03.66"	37° 17' 01.88"	944.000



Posizione dei GCPs sulla 37c come da Google Earth



Posizione dei medesimi GCPs sulla CORONA

PUNTO (301)

Latitudine 37° 07' 45.73"

Longitudine 37° 23' 23.98"

Quota geoidica: 885 m

Descrizione: incrocio stradale



Immagine da Google Earth



Immagine CORONA 37\_d

PUNTO (314)

Latitudine 37° 09' 09.57"

Longitudine 37° 21' 51.77"

Quota geoidica: 879 m

Descrizione: incrocio stradale



Immagine da Google Earth

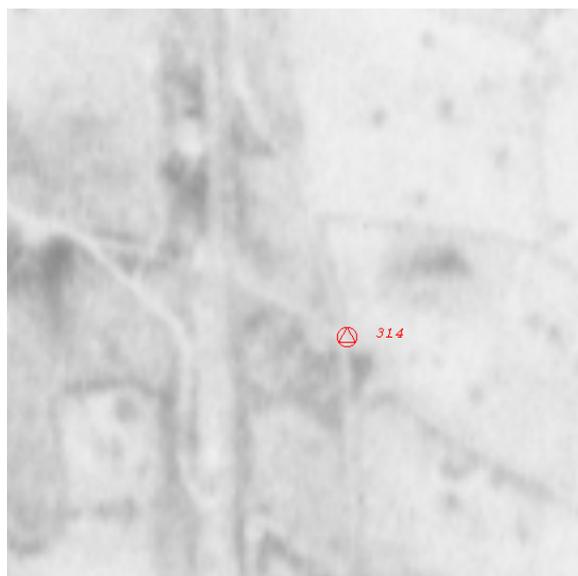


Immagine CORONA 37\_d

## ***Ringraziamenti***

*Anche questa volta sono riuscito a portare a termine il compito assegnatomi, ma lo sforzo compiuto va condiviso con tantissime persone; tenterò di elencarle, cercando di essere il più esaustivo possibile.*

*In prima posizione, non me ne voglia nessuno, c'è sicuramente la mia famiglia: Silvano, Elisa, Ilenia ed Alessia. Grazie per essermi stati vicino, sempre, comunque ed incondizionatamente. Avete sempre creduto in me ,spronandomi quando serviva, dicendomi di rilassarmi quando mi vedevano in subbuglio. Non mi hanno mai risparmiato un sorriso, mi hanno sempre compreso e mai criticato. Grazie, immensamente grazie.*

*Anche se non viviamo sotto lo stesso tetto, è sicuramente parte della mia vita e sarà parte della mia famiglia in futuro: grazie Laura, la mia fidanzata. Abbiamo passato tanti momenti difficili sia insieme che separati, ma siamo sempre stati legati da qualcosa di speciale, un'affinità indescrivibile. Mi hai sopportato sempre, non chiedendomi mai più di quello che ti potevo dare. Sei preziosissima, spero di averti sempre nella mia vita. Grazie, di tutto cuore.*

*Ecco ora la parte difficile, cioè gli amici del "gruppo" di Rimini; chi metto per primo? Facciamo così, seguo l'alfabeto così sarà colpa sua (dell'alfabeto).*

*Grazie Amedeo, anzi Ame, anzi Ponch.. Vabbè, mi hai capito. Mi sei sempre stato vicino, mi hai ascoltato e hai scelto di condividere sempre le cose belle che mi capitavano (oppure che capitavano a te). Abbiamo parlato di tantissime cose, dalla politica alle donne. Abbiamo opinioni diverse su parecchi argomenti, ma siamo legati da un sentimento comune: entrambi vogliamo sempre il bene delle persone a noi care. Con i tuoi consigli sono cresciuto e a volte ci ho pure pianto; ma non ho alcun rimorso. Grazie mittico, grazie.*

*E già che sono in "zona", grazie anche a Rita perché ti prendi cura di Amedeo; sei una persona speciale, dato che stai con una persona speciale.*

*Grazie Daniela (anzi Taniela) e anche al tuo uomo (Uipi). Osservandovi ho compreso molte cose nei rapporti fra donne e uomini. E poi grazie perché avete sempre tante idee per fare qualcosa tutti insieme; spero d'ora in poi di poter aderire più spesso alla vostre gite.*

*Grazie Enry (all'anagrafe Enrico), perché da te ho capito quanto sia importante mettere se stessi nelle cose che si fanno; dal lavoro alla serata con gli amici. Da te ho capito "anticipo" come sarà il mondo del lavoro; grazie per avermi reso partecipe delle tue esperienze di cantiere e non. Tieniti stretta la Manu perché è una ragazza d'oro.*

*Grazie Giova (non riesco a chiamarti Giovanni). Che tu ci creda o no, il tuo appoggio è stato sempre preziosissimo in tutto ciò che ho fatto. Dalla salsa all'Università. Ho condiviso con te miriadi di appunti e sono sempre stato contento nel farlo. Ci siamo divertiti spesso, durante le nostre serate al club del biliardo. Non riesco ad esprimere tutta la mia gratitudine. E poi, credici un po' di più; abbiamo le stesse capacità, anzi tu ne hai di più.*

*Grazie Ivan (oppure Giò?!); per me sei Ivan. Negli ultimi tempi ci siamo molto persi di vista, per esigenze diverse, ma d'ora in poi riallacceremo i rapporti perché so che sei una persona speciale, basta solo osservarti bene.*

*Grazie Maurizio (Sba, Serpe, Bega, Mauri...hai mille soprannomi) per non esserti mai risparmiato in tutto ciò che hai fatto oppure abbiamo fatto insieme. Hai una miriade di qualità, tra cui la lealtà. Grazie al tuo punto di vista ho spesso viste le cose in modo diverso, riuscendo a comprenderle (cioè farle mie) e non solo a capirle. Mi hai insegnato le doti della calma e della mediazione; grazie a te ho capito che, su alcune cose, è inutile farsi il sangue amaro, risparmiandomi, così, arrabbiature inutili. Ricorda, durante l'estate mi dovrai trasformare un salsero. Grazie di tutto e per tutto, soprattutto perché hai espresso il desiderio di "non perderci mai di vista".*

*Grazie Nini (Elisa) per tutte le volte che mi hai strappato un sorriso, anche quando non ne avevo voglia. Sarà merito anche di quel pezzo d'uomo che hai a fianco (il Diego), quindi grazie pure a lui. Siete fantastici insieme e a volte vi invidio per la sintonia che avete.*

*E con il gruppo di Rimini ho finito, tocca ai "colleghi" dell'università.*

*Per ovvi motivi (4 anni vissuti insieme in quel di Bologna) il primo è Ciaccio. Ne abbiamo passate tante insieme, belle e brutte. Quando ho chiesto il tuo aiuto non me l'hai mai rifiutato, anzi ti sei prodigato al massimo. Mi hai insegnato a prendere le cose con più calma, ad analizzare le situazioni da diversi punti di vista. Ti sei sempre dimostrato leale, anche in situazioni delicate dove magari altri avrebbero titubato; da lì mi sono reso conto di quanto conti sulla nostra sincera amicizia. Grazie anche per avermi fatto scoprire una leccornia unica: la piadina con i wurstel (spettacolare). Spero proprio che questa amicizia duri per tutta la vita e sta certo che farò di tutto perché ciò avvenga. Grazie, grazie, grazie.*

*Grazie al mio omonimo Stefano Passini per tutto ciò che ha voluto condividere, dagli studi alle serate insieme in giro per Bologna (magari a mangiare delle tigelle). Ho scoperto in te un grande amico, non perdiamoci di vista ok ?*

*Grazie a Matte e Smone (la strana coppia) per la loro spensieratezza e la loro voglia di godersi la vita, senza però trascurare lo studio. Quante risate ci siamo fatti a Bologna, quante birre, "pieghe", "croom" o "morteee". Mi avete fatto sorridere spesso, mi avete aiutato spesso. Grazie.*

*Grazie ad Ale, che mi ha dimostrato come si possa essere appassionati al proprio lavoro; ti invidierò sempre il senso pratico e la forza di volontà che hai. Mi hai insegnato tanto, spero di averti lasciato qualcosa anche io.*

*Grazie all'Ely, preziosa compagna di studio e, ultimamente, di viaggi in treno. Saremo comunque dei buoni strutturisti, anche se all'esame di stato ci derideranno.*

*Grazie all'Ila. Ricordo ancora quando abbiamo fatto le due di notte per studiare Tecnica LS; la fatica è stata ripagata con un bel voto. Grazie anche per le innumerevoli cene, seguite sempre da interessanti discussioni. Mi hai sempre dimostrato disponibilità, grazie di cuore.*

*Grazie a Botta, per tutte le volte che hai risposto ai miei quesiti, sempre con il sorriso sulle labbra. Ma come fai ad essere sempre così sereno?*

*Grazie a tutti quelli che ho dimenticato, spero di riuscire a farmi perdonare.*

*Grazie al Prof. Ing. Gabriele Bitelli per avermi seguito durante la tesi ed avere sempre creduto nella sua realizzazione; ed anche per aver risposto alle mie e-mail anche a notte fonda.*

*Grazie all'Ing. Giorgia Gatta e all'Ing. Valentina Alena Girelli, che hanno sopportato la mia fastidiosa presenza in laboratorio durante gli ultimi tre mesi. Grazie anche per essere sempre state disponibili a chiarimenti e spiegazioni, anche di cose banali. Ho lavorato con serenità grazie al vostro aiuto.*

*Grazie al Prof. Nicolò Marchetti del Dipartimento di Archeologia dell'Università di Bologna per tutte le preziosissime informazioni forniteci sul sito archeologico di Tilmen Höyük.*

*E, scusate l'egoismo, grazie a me stesso perché in fondo ho messo tutte le mie forze per portare a compimento la mia carriera Universitaria.*