

RILEVAMENTI AEROFOTOGRAMMETRICI AD ELEVATA PRECISIONE ALTIMETRICA

DOTT. ING. GIAN PIERO LE DIVELEC

Fin a che punto i metodi di rilevamento aerofotogrammetrico possono essere di aiuto per la cartografia tecnica che occorre alle opere agrarie di irrigazione? Questo quesito ha particolarmente interesse nel momento attuale quando in varie parti del mondo si progettano grandi lavori di irrigazione.

1. - In Sardegna l'Ente Autonomo del Flumendosa ha affidato a ditte specializzate il compito di eseguire le carte topografiche della zona pianeggiante denominata «Campidano di Cagliari» (fig. 1). Questa zona si estende per circa 50.000 ettari dalla costa verso Nord-Ovest. Le carte topografiche da eseguire devono servire alla progettazione delle opere per la irrigazione della zona. La irrigazione da compiere utilizza le acque dei fiumi Flumendosa, Flumineddu e Mulargia oggi defluenti verso la costa orientale dell'Isola. La deviazione delle acque è ottenuta a mezzo di gallerie che collegano i tre serbatoi artificiali creati con sbarramenti sui tre fiumi e a mezzo di una galleria che collegherà il serbatoio del Mulargia ad un grande canale adduttore. Questo canale alimenterà una rete di canali principali, e precisamente due verso N. W. e due verso S. E. che dipartono da un canale trasversale al centro del «Campidano». I canali principali si manterranno ai margini della zona irrigata ed a una quota la più alta possibile.

L'Ente del Flumendosa ha stabilito le caratteristiche delle carte topografiche tenendo presente lo scopo delle carte stesse. In riassunto l'Ente ha richiesto:

a) cartografia generale alla scala 1 : 2.000 con rappresentazione molto accurata di tutte le particolarità topografiche ed agricole del terreno;

b) rappresentazione altimetrica per punti quotati (10 per Ha) e per curve di livello (equidistanza 0,5 m). Rappresentazione ed aggiornamento almeno parziale delle linee catastali individuanti la proprietà.

La precisione richiesta per la planimetria della carta è quella consueta del Catasto Italiano.

La precisione richiesta per la rappresentazione altimetrica fu fissata invece molto più ristretta di quella consueta per le analoghe carte catastali. Nelle carte del Campidano fra la quota altimetrica di un punto del terreno e la quota dedotta graficamente dalla carta è consentito uno scarto di:

m. 0,05 se il punto quotato è un punto materialmente esistente sul terreno e costituito da una opera stabile (spalletta di ponte, termine lapideo, pilastrino, ecc.).

m. 0,20 se il punto quotato non è un punto materialmente esistente,

sia esso ottenuto per intersezione di curve di livello, sia esso uno dei punti quotati isolati.

Dalla cartografia generale, avente le caratteristiche accennate, l'Ente ha richiesto di dedurre con operazioni fotomeccaniche e di disegno le carte alle scale 1 : 10.000 ed 1 : 25.000.

2. - L'inquadramento generale trigonometrico del lavoro è stato realizzato a mezzo di una rete di triangolazione di IV ordine che si appoggia ad un estremo (Cagliari) alla base costituita da un 1° ordine (Torre S. Pancrazio) e da un III ordine (Decimomannu) della rete geodetica fondamentale e si chiude per controllo ad IV ordine (Uras) della rete dell'I.G.M.

Lo sviluppo di questa rete, che è notevole nel senso dei meridiani e modesto nel senso dei paralleli, faceva temere una progressiva deformazione.

La deformazione poteva essere rilevata al controllo nel punto del IV ordine reperito all'estremo N. W. della catena (Uras). Fu adottato il criterio di tollerare uno scarto di chiusura, che raggiungesse anche l'1/10.000 della lunghezza (circa 60 Km.) della catena stessa e di adattare la catena alle posizioni prestabilite dei tre punti noti (nella proiezione Gauss-Boaga scelta per la rappresentazione cartografica) alterando le coordinate dei punti determinate con la nuova rete del IV ordine secondo una certa proporzionalità rispetto alla distanza dei punti stessi della base di origine.

Per l'inquadramento generale altimetrico è stata istituita una rete di linee di livellazione principali appoggiate alla livellazione fondamentale dell'I.G.M., della quale una linea traversa nel senso dei paralleli la zona da rilevare a circa un terzo del limite Sud e si dirama poi verso Sud raggiungendo il mare in prossimità di Cagliari.

La linea fondamentale è stata in gran parte rifatta perché non tutti i caposaldi furono reperiti. Nell'esecuzione della rete di livellazione principale sono stati adottati tutti gli accorgimenti necessari allo scopo di assicurare una precisione che, misurata dallo scarto fra le misure in andata e ritorno dei dislivelli di due caposaldi successivi, non fosse superiore alla tolleranza $t_3 = \text{mm. } 3 \sqrt{D}$ con D distanza in Km. fra i capisaldi stessi. La lunghezza complessiva delle linee di livellazione principale si aggira sui 150 Km.

3. - Due ditte specializzate in lavori aerofotogrammetrici la soc. E.I.R.A. di Firenze e la soc. I.S.A. di Roma hanno collaborato nella esecuzione delle carte. Le due imprese hanno adottato criteri di lavoro diversi.

L'E.I.R.A. ha adottato sulla zona di circa 30.000 Ha che essa ha rilevato, l'applicazione su estensione vasta di metodi precedentemente sperimentati su piccole estensioni per realizzare con la restituzione fotogrammetrica un piano quotato di notevole precisione. La E.I.R.A. pertanto ha dedotto al restitutore le quote dei dieci punti quotati per ettaro, richiesti dall'Ente ed ha tracciato per restituzione diretta e non per interpolazione fra i punti quotati le curve di livello. Sono stati invece quotati per determinazione diretta in cam-

pagna (livellazione geometrica) i punti caratteristici, per i quali era richiesta una precisione di 5 cm.

A nostra conoscenza il metodo seguito dell'E.I.R.A. rappresenta una prima interessante applicazione di restituzione fotogrammetrica per conseguire la massima precisione alimetrica.

4. - Le carte eseguite dall'E.I.R.A. (fig. 2) dimostrano, a prima vista, la grande ricchezza dei particolari topografici rappresentati. È evidente che per ottenere col rilievo ordinario uguale ricchezza e fedeltà sarebbe stata necessaria una enorme quantità di misure di campagna e l'impiego di topografi particolarmente abili ad interpretare topograficamente il terreno e a effettuare schizzi a vista. Si sarebbe avuto un ingentissimo lavoro di tavolo per la messa in carta dei dati numerici raccolti.

Limitando l'esame anche alla sola parte planimetrica appare evidente la maggiore leggerezza con la quale i problemi cartografici delle grandi scale sono risolti dai metodi aerofotogrammetrici. Se poi l'esame delle carte si sofferma sulla rappresentazione altimetrica risulta evidente la possibilità della aerofotogrammetria di rappresentare impensatamente frequenti variazioni ed accidentalità del terreno, che risultano dai ricami e dalle sinuosità delle curve di livello. Sinuosità che si sarebbero sicuramente trascurate se le curve fossero risultate come interpolazione di punti quotati. Questi punti quotati poi, che su una estensione di 30.000 ettari raggiungono il notevole numero di 300.000 almeno, costituiscono, quando la loro determinazione sia avvenuta per misure dirette sul terreno un lavoro penoso e disagiavo in campagna, un complesso maneggio di registri, calcoli e disegni in ufficio. Per il controllo della precisione altimetrica che è stata raggiunta col metodo di preparazione dei fotogrammi e di restituzione messo a punto dall'E.I.R.A., si sono effettuate alcune sezioni sul terreno (a mezzo di livelli) e si sono confrontate le sezioni sul terreno con le sezioni grafiche. Su n. 1086 quote altimetriche di punti così controllate si sono constatati errori da cui si deduce che l'errore medio quadratico altimetrico di carte aerofotogrammetriche realizzate con gli accorgimenti adottati dall'E.I.R.A. è stata di $\pm 0,125$ essendo: $e.m.q. = \pm \sqrt{\frac{[ee]}{n}}$ se i controlli sono riferiti alle curve di livello e di $\pm 0,04$ m. se i controlli sono riferiti a punti quotati (numerici).

5. - Gli strumenti aerofotogrammetrici impiegati dall'E.I.R.A. per il lavoro suddetto sono:

a) macchina da presa aerofotogrammetrica RB 30 Zeiss con obiettivo Topogon di focale 200 mm. (circa) formato 30 x 30 - film Ferrania Aviopancro.

È stato preveduto a regolare ed aumentare la pressione di spianamento del film. È stata misurata con l'apparecchiatura creata dalle Officine Galileo di Firenze la distorsione propria dell'obiettivo, come variazione della distanza principale in funzione dell'angolo della visuale (angolo di campo).

b) Stereocartografo Santoni Mod. IV (Officine Galileo). Sono stati costruiti i correttori atti a correggere la distorsione dei fotogrammi usati. La restituzione è stata fatta con diapositive stampate su vetro.

6. - Il volo di ripresa aerofotografica è stato eseguito da una quota relativa di circa 1.200 m., la scala del negativo è stata quindi di circa 1 : 6.000. La sovrapposizione assiale dei negativi è stata dell'80%, quella laterale del 30 %. Le immagini fotografiche sono risultate molto buone.

Ciò dipende oltre che dalle ottime qualità dell'obbiettivo anche dalla scelta della stagione del volo (dicembre-gennaio) dopo un periodo di pioggia e quando la temperatura dell'aria era tale da non avere foschia, ma una grande trasparenza, vegetazione minima. Le strisciate fotografiche sono state raggruppate in due categorie, principali e secondarie fra loro alternate. Delle strisciate principali si sono scelti i fotogrammi alterni fra i quali a causa del ricoprimento assiale originale (80 %) sussiste un ricoprimento residuo del 60 %. Questi fotogrammi costituiscono ancora una serie continua di stereogrammi, che chiameremo principali. Essi sono stati ridotti a mezzo di un riduttore Zeiss al formato 20 × 20. Le diapositive così ottenute sono analoghe a diapositive stampate per contatto da negativi raccolti con una camera avente l'obbiettivo di 133,33 mm. e con una distorsione pari alla risultante di quella del Topogon originale (ridotta di un terzo) e di quella dell'obbiettivo del riduttore (controllata misurando le deformazioni della riduzione di un reticolo). È stato costruito il correttore della distorsione degli stereogrammi principali. Per gli stereogrammi principali fu realizzata una preparazione planimetrica regolare, saltando al massimo tre stereogrammi, sono stati individuati sul terreno e sui fotogrammi stessi quattro o cinque punti, la cui posizione planimetrica è stata determinata per triangolazione diretta o inversa con appoggio sulla rete che ricopre l'intero territorio da rilevare (2°). Il controllo altimetrico dell'orientamento è stato effettuato utilizzando i punti quotati di cui diremo appresso. L'orientamento e la restituzione degli stereogrammi principali allo stereocartografato sono serviti:

a) a determinare i punti di controllo planimetrico di tutti gli altri stereogrammi (secondari);

b) a tracciare la planimetria delle zone fotografate nelle strisciate principali.

Tali lavori sono perciò realizzati con fotogrammi alla scala 1/9000 (rapporto di amplificazione fra fotografia e tracciamento × 4,5) e con una base media di 720 m. pari cioè a 0,6 volte la quota relativa di volo.

7. - Per il tracciamento della altimetria e, nelle strisciate secondarie, per il tracciamento della planimetria sono stati impiegati stereogrammi secondari, cioè copie diapositive per contatto del formato 23 × 23 contenenti ognuna la sola parte centrale dei negativi originali. I fotogrammi secondari hanno un ricoprimento assiale di 73,9 % circa. Considerando i fotogrammi alterni (tutti i pari

o tutti i dispari ad esempio) resta fra loro un ricoprimento assiale di 47,8 % con una base di restituzione di 720 m.

Il terreno restituibile con uno stereogramma secondario alterno nel senso del volo (per es. lo 1-3) è pari a 110 mm. alla scala del fotogramma (660 m.), quello restituibile con lo stereogramma secondario alterno (2-4) è pure 110 mm. (660 m.) e si accavalla col precedente per 45 mm. (270 m.). Gli stereogrammi secondari sono stati utilizzati orientandoli ciascuno isolatamente e sfruttando la massima base possibile (stereogrammi ottenuti con fotogrammi alterni). Il ricoprimento laterale (30 % che equivale a 90 mm. di fotogramma per ogni bordo) lascia nelle diapositive della parte centrale 230×230 mmq. un ricoprimento assiale di 20 mm. che assicura la copertura completa del terreno.

Il controllo dell'orientamento degli stereogrammi secondari è dato:

a) per la planimetria: dalle coordinate dei punti di controllo già utilizzati nell'orientamento degli stereogrammi principali, o dalle coordinate dei punti dedotti dalla restituzione (come è detto in 6° a);

b) per la altimetria: dalla quota ottenuta a mezzo di livellazioni secondarie (appoggiate alla rete principale 2°) di alcuni punti (9 o più) che sono stati riconosciuti sul terreno e sui fotogrammi in modo da stabilirne almeno 6 lungo i due bordi ed almeno 3 al centro dello stereogramma. Le livellazioni secondarie sono state fatte con tutti gli accorgimenti necessari per non superare, alla chiusura delle linee secondarie sulle principali, errori di mm. $6 \sqrt{D}$.

Nell'orientamento degli stereogrammi secondari, prima di procedere alla restituzione dell'altimetria, restituzione che ha sempre seguito quella della planimetria, abbiamo effettuato un rigoroso controllo delle quote dei punti di quota nota. Abbiamo ritoccato l'orientamento relativo secondo i metodi conosciuti allo scopo di migliorare l'assetto generale del modello rispetto ai punti noti del terreno. Alcuni piccoli errori residui nei punti, errori che non si sono potuti annullare, furono considerati come deformazioni locali del modello. Ne tenemmo conto per correggere le quote dei punti restituiti seguendo le ipotesi di un fittizio spostamento del piano di riferimento (limitatamente al triangolo che ha per vertici i punti di controllo più prossimi al punto restituito) spostamento misurato dagli errori constatati nei controlli.

Nella restituzione altimetrica si è avuto quindi un rapporto di amplificazione fra fotogramma e carta di 3 volte, la base di restituzione è stata ancora pari a 0,6 volte la quota di volo. Dai controlli di cui è fatto cenno precedentemente (4°) risulta che l'e.m.q. altimetrico della carta è pari a circa 0,100/00 della quota di volo.

8. - Gli strumenti adoperati ed il metodo di lavoro adottato sono stati le cause determinanti della bontà dei risultati conseguiti. I quali risultati sono ancor più soddisfacenti se si considera la possibilità di realizzare un buon lavoro con minor fatica e con minor spesa di quelle che sarebbero occorse ricorrendo ad altri sistemi. In effetti il lavoro fu affidato alle ditte che lo hanno eseguito dopo una regolare gara di appalto.



FIG. 1. - Fotogramma della Zona pianeggiante « Campidano di Cagliari ».

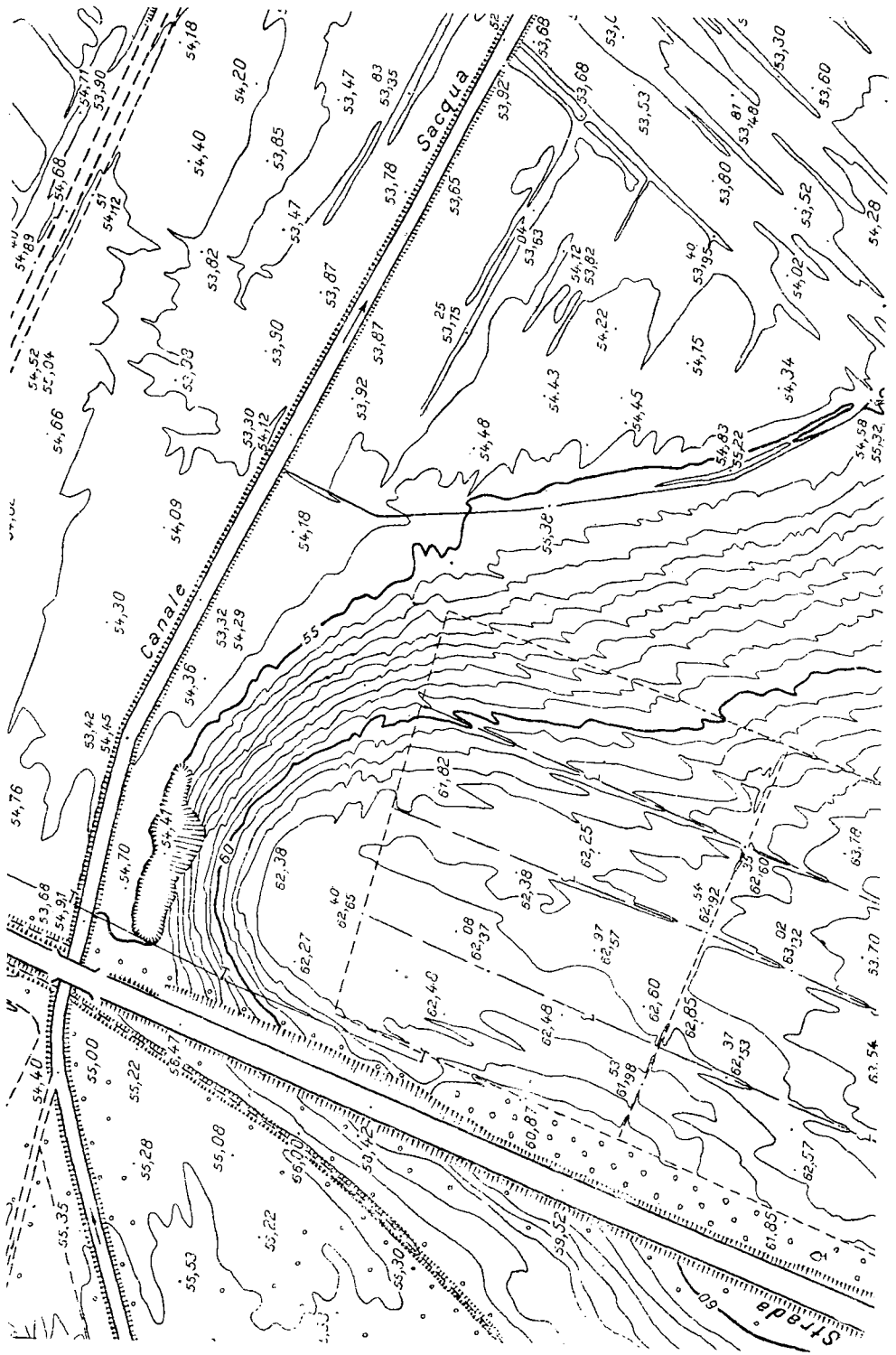


FIG. 2. - Carta, ricavata da fotogrammi, con ricchezza di particolari topografici.