

ANALISI METRICA DI CARTOGRAFIA ANTICA IN AMBIENTE DIGITALE

METRIC ANALYSIS OF ANCIENT CARTOGRAPHY IN A DIGITAL ENVIRONMENT

Giorgia Gatta*

Riassunto

I documenti cartografici storici entrano spesso in applicazioni a carattere multidisciplinare quale strumenti essenziali per lo studio delle dinamiche territoriali o degli assetti urbani nel tempo. Risulta quindi indispensabile comprendere la qualità metrica di tali documenti, per conoscere quanto affidabile sia l'informazione in essi contenuta. A tale scopo possono dare una risposta i moderni strumenti della Geomatica, in quanto consentono il "recupero digitale" della cartografia storica, mediante acquisizione, analisi metrica e varie ulteriori elaborazioni in ambiente digitale.

Nell'articolo¹ viene preso in esame il processo di analisi metrica, evidenziando mediante diagramma di flusso lo svolgimento delle sue tre fasi principali. Una volta appurato il livello di qualità metrica da attribuire alla carta, è possibile, mediante un processo di georeferenziazione, assegnare nuovamente un contenuto metrico alla carta storica digitalizzata, e aprire in tal modo un ampio spettro di analisi ulteriori, anche in altri campi d'indagine.

Abstract

Historical cartographic documents are often part of interdisciplinary applications, being essential instruments to study territorial dynamics or urban development. Therefore, there is the need to assess the metric quality of these documents and to understand the level of reliability of the information they record. The modern geomatic instruments can help, allowing a "digital recovery" of ancient cartography, by means of acquisition, metric analysis, and other digital elaborations.

In the paper the metric analysis process is taken into account; three basic steps are highlighted by means of flow chart. Once assessed the metric quality level of the map, a georeferencing step can give a metric content to the digitalized historical map. On this basis, many other kinds of analysis are allowed.

Parola chiave: cartografia storica, recupero metrico, georeferenziazione, analisi delle deformazioni.

1. Introduzione

La cartografia, nata oltre 4000 anni fa come espressione artistica ancor prima che scienza, nel tempo ha subito un'evoluzione che ha riflesso quella culturale e sociale dell'uomo: «più ancora che immagine

* DICAM (Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali) - Università di Bologna - Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna - giorgia.gatta@unibo.it

¹ Articolo estratto dalla tesi di Dottorato di Gatta, 2010.

del mondo, la "carta" è un'immagine dell'immagine che del mondo ha un individuo, un'epoca storica o una particolare società» (Sgambati et al., 2006). Il patrimonio cartografico antico (costituito non solo da carte, ma anche da atlanti geografici, planisferi, mappamondi) giunto fino a noi e oggi conservato presso numerose istituzioni e singoli privati in tutto il mondo, è dunque davvero immenso.

Il patrimonio cartografico storico possiede dunque uno straordinario valore storico, artistico e documentario, che lo fa rientrare a pieno diritto nella classe dei Beni Culturali storici. Tuttavia tale patrimonio spesso non viene ritenuto alla stregua di classiche opere d'arte, pittoriche, scultoree e architettoniche, forse per il fatto di essere generalmente poco conosciuto, spesso conservato in stanze dimenticate o non accessibili al pubblico (anche per ragioni di protezione dall'effetto deleterio del tempo), e valorizzato in modo episodico e frammentario. D'altronde, nel corso della storia, il documento cartografico quale strumento decisionale vero e proprio prende il sopravvento sul prodotto iconografico puramente estetico, ragion per cui negli anni si è andata perdendo la connotazione di oggetto "estetico".

Stanno oggi prendendo via varie iniziative tese alla sensibilizzazione di enti pubblici, associazioni, privati verso il problema di veder perso per sempre questo immenso patrimonio se non lo si recupera adeguatamente e per tempo (Adcock et al., 2004; Archivio di Stato di Genova, 2008). Per la sua duplice natura, quella di bene culturale da una parte e di strumento decisionale dall'altra, la cartografia storica necessita oggi di un duplice "recupero": da una parte un "recupero materiale", salvaguardando il delicato supporto su cui la cartografia è nata (restaurando i documenti laddove necessario e proteggendoli dall'effetto del tempo), dall'altra un "recupero digitale", estraendo il fondamentale contenuto di cui la cartografia storica si fa portatrice e conservandolo su un supporto differente da quello originale, in quanto di tipo digitale. Nel presente articolo viene analizzato quest'ultimo aspetto, mostrando come, attraverso moderne applicazioni delle tecniche geomatiche, sia oggi possibile innanzitutto salvaguardare l'esistenza del documento cartografico mediante trasposizione in forma digitale, quindi tentare di estrapolare l'informazione metrica ivi contenuta comprendendone il livello di affidabilità, ed infine utilizzare il prodotto derivato per studi ed analisi di grande interesse, in prevalenza a carattere multidisciplinare.

2. Il recupero digitale di cartografia storica

Indubbiamente i documenti cartografici storici rappresentano una preziosa fonte di informazioni, geograficamente localizzate, relative ad un preciso momento della storia, fissate come un «fermo-immagine» sul foglio (Dall'Aglio et al., 2002). E l'analisi in ottica multitemporale dei documenti cartografici storici permette di sfruttarne appieno le potenzialità: ordinando più istantanee in successione cronologica e ricomponendo il «lunghissimo film» (Dall'Aglio et al., 2002) della storia, è possibile desumere, dalla «stratificazione geografica» (Cantile, 2003) delle informazioni così ordinate, le trasformazioni del paesaggio, della morfologia e dell'assetto del territorio, e comprenderne leggi e tempi di evoluzione. Leggi e tempi che, applicati alla realtà odierna, possono aiutare nel comprendere l'assetto territoriale presente e nel tentare di progettare quello futuro.

In questo ambito di ricerca, gli strumenti della Geomatica non solo consentono il recupero digitale della carta storica, mediante l'acquisizione, che ne garantisce la conservazione nel futuro sottoforma di copia fedele, salvaguardando le proprietà metriche ad essa associate, ma ne agevolano anche lo studio mediante tutta una serie di elaborazioni specifiche dell'ambiente digitale, permettendo così un ampio spettro di ricerche ed applicazioni, non attuabili col solo supporto analogico. L'intero processo di recupero di cartografia in ambiente digitale può essere suddiviso in tre fasi fondamentali (Gatta, 2010):

- acquisizione: conversione della carta in ambiente digitale, da condursi con strumenti e tecnologie idonee, che garantiscano il non danneggiamento dell'originale e che soddisfino criteri di elevata accuratezza e precisione;

2.1. Analisi metrica di cartografia storica

Nel presente articolo si analizza nel dettaglio l'analisi metrica di cartografia storica (fase cerchiata in figura 1). Essa è un processo fondamentale per iniziare lo studio di una carta antica, soprattutto quando ci si deve avvalere di tale carta per analisi successive. Occorre infatti stimare la qualità, vale a dire l'affidabilità, della carta, per conoscere quanta informazione, di che tipo e di che qualità è deducibile da tale carta.

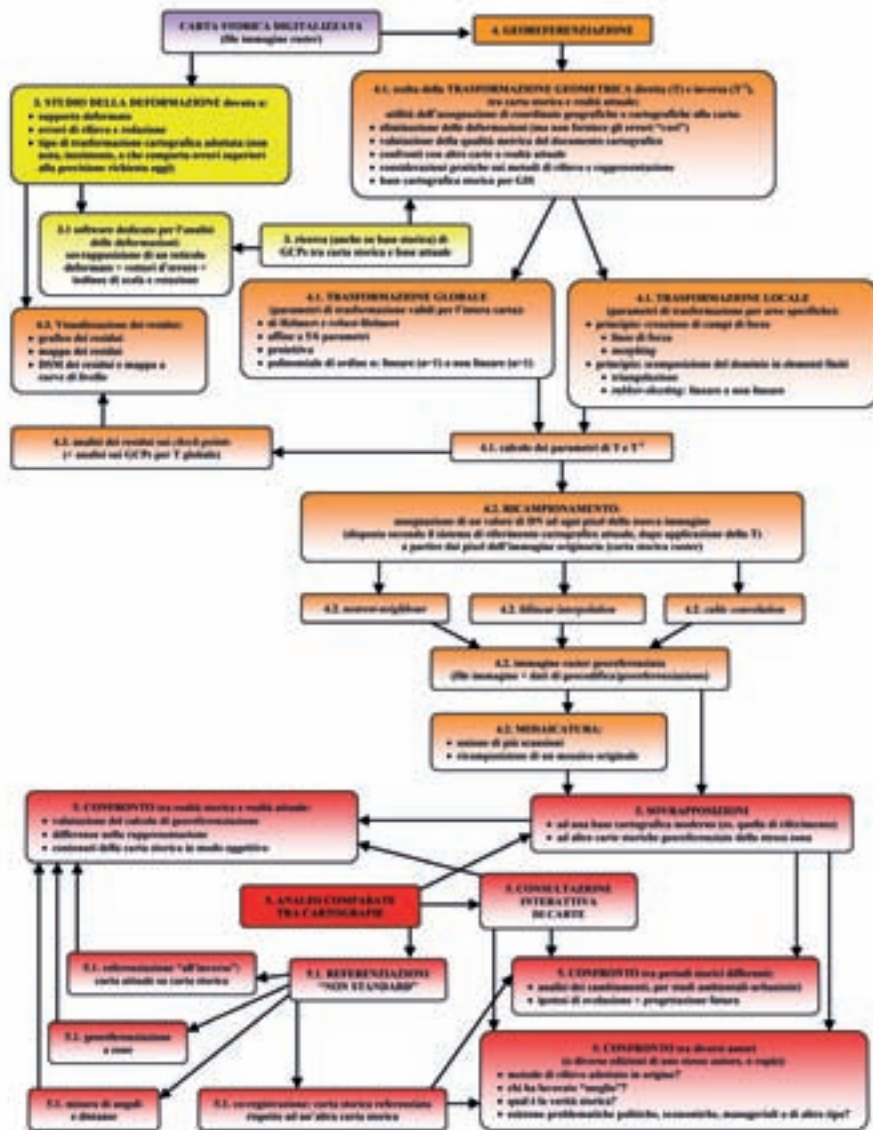


Fig. 2 - Diagramma esplicativo del processo di analisi metrica di cartografia storica (cerchiato nel diagramma di figura 1): ogni passaggio è identificato da un colore (che si riferisce alla fase di appartenenza) e da un numero (che indica il paragrafo in cui quel passaggio viene discusso). (La versione a colori dell'articolo è consultabile online sul sito dell'AIC)

La seconda fase di figura 1 può essere ulteriormente esplicitata nel diagramma di flusso di figura 2, in cui si evidenziano tre fasi ulteriori:

- studio della deformazione (in giallo);
- georeferenziazione (in arancione);
- analisi comparate tra cartografie (in rosso);

che verranno analizzate nel dettaglio nei paragrafi seguenti.

3. Analisi delle deformazioni

Lo studio di una carta storica solitamente prende avvio con l'analisi delle deformazioni insite in essa. Tali deformazioni possono essere dovute a:

- supporto analogico non piano o deformato;
- antiche modalità nell'esecuzione del rilievo topografico (e del disegno in carta);
- tipo di trasformazione cartografica adottata per la redazione della carta.

La deformazione registrata su una carta antica è dunque l'insieme di tutti questi contributi, che non sono immediatamente scindibili; il primo può essere in parte ridotto durante la fase di acquisizione, ponendo attenzione a mantenere piano il documento (carta, in questo caso) originale. Relativamente alla presenza e all'entità degli altri due contributi, si possono fare solo ipotesi, sulla base di documenti e studi storici; essi risultano quindi i meno controllabili. I metodi di rilievo adottati anticamente sono spesso sconosciuti (in quanto spesso manca una documentazione che attesti quali siano stati gli strumenti adottati e le modalità operative seguite), e analisi di propagazione dell'errore possono essere fatte solo in maniera semplificativa. In secondo luogo, la legge di rappresentazione cartografica adottata per le carte antiche risulta spesso sconosciuta, e soprattutto non è detto che sia tale da comportare errori accettabili secondo le moderne convenzioni (Baiocchi & Lelo, 2005). Questo è particolarmente vero per le carte pre-geodetiche (Bitelli et al., 2009).

L'analisi delle deformazioni si basa sul confronto diretto con la realtà attuale, costituita normalmente da cartografia moderna, supposta priva di deformazioni (ovviamente cosa non vera, in quanto ogni carta ha in sé un errore intrinseco, che ne caratterizza la precisione, ed è espresso mediante l'errore di graficismo); quindi è la fase di georeferenziazione della carta (par. 4) che permette di fatto tale analisi. L'analisi dei residui, in uscita dal calcolo di compensazione relativo ai parametri della trasformazione geometrica che caratterizza la georeferenziazione, permette infatti di avere una stima degli errori e delle deformazioni registrati in mappa (par. 4.3).

Per condurre un'analisi delle deformazioni occorre quindi individuare sulla carta storica un certo numero di "punti di controllo a terra" (GCP, **Ground Control Point**, nel gergo fotogrammetrico) di coordinate note con sufficiente grado di affidabilità. Le coordinate possono essere ricavate per mezzo di un rilievo a terra o dedotte da altra cartografia, di qualità e caratteristiche note, della stessa zona (Boutoura & Livieratos, 2006). È bene sottolineare che, lavorando con cartografia storica, questo fondamentale passaggio risulta piuttosto delicato, in quanto:

- gli elaborati storici mancano spesso di un sistema di riferimento geografico, o ne possiedono uno diverso da quelli utilizzati attualmente;
- può risultare molto difficile l'identificazione su di essi di GCP corrispondenti a punti rimasti invariati nel tempo, ancora esistenti e riconoscibili.

Quest'ultimo fattore può essere anche molto rilevante, sia nel caso di carte di paesaggi naturali, per le quali l'ambiente è andato evolvendosi, sia nel caso di carte storiche di città, per le quali il tessuto urbano può essersi enormemente modificato, e per le quali può quindi risultare utile affiancare una analisi storica degli edifici rimasti invariati nel tempo (Bitelli & Gatta, 2011).

3.1. L'analisi delle deformazioni con un software dedicato

Esistono software specificatamente ideati per lo studio delle deformazioni insite in carta. Diffuso nel campo di studio della cartografia storica è per esempio il software MapAnalyst, ideato per permettere anche agli storici senza un particolare background tecnico di analizzare in modo semplice la geometria delle carte antiche (Jenny & Hurni, 2011). Sulla base del riconoscimento di punti omologhi tra carta storica e carta attuale, avviene il calcolo dei parametri di trasformazione, alla pari di un processo di georeferenziazione, ma senza la fase finale di ricampionamento d'immagine. Sulla base dei parametri calcolati, viene effettuata una visualizzazione delle deformazioni presenti in carta, mediante sovrapposizione alla carta storica di:

- vettori o cerchi d'errore (risultato della fase di calcolo dei parametri di trasformazione) sui singoli GCP;
- reticolo cartografico moderno (che di norma risulta deformato);
- isolinee di scala oppure di rotazione (linee ad ugual fattore di scala o ad ugual angolo di rotazione, rispettivamente), per mostrare le relative variazioni sulla mappa.

Mediante il calcolo dei parametri della trasformazione inversa, una analoga visualizzazione può essere effettuata sulla carta moderna.

4. Georeferenziazione

Generalmente l'analisi metrica di una carta storica viene eseguita georeferenziando la carta. Il processo di assegnazione di coordinate oggetto in un certo sistema di riferimento (solitamente geodetico-cartografico) al sistema immagine restituisce alla geometria dell'immagine quel contenuto metrico e geometrico posseduto inizialmente dalla carta analogica, e in qualche modo andato perduto durante il processo di acquisizione. In questo contesto si utilizzerà il termine di georeferenziazione in senso lato, comprendendo con esso anche il processo di geocodifica, legato all'assegnazione delle coordinate ad uno specifico sistema geodetico-topografico in uso.

Con l'assegnazione di coordinate geografiche o cartografiche, il processo di georeferenziazione apre un ampio spettro di possibili analisi e applicazioni:

- correzione, almeno in parte, delle deformazioni presenti in carta, mediante il ricampionamento dell'immagine (par. 4.2);
- valutazione della qualità metrica del documento cartografico, mediante l'analisi dei residui di georeferenziazione (par. 4.3);
- confronto dell'assetto territoriale antico con quello moderno e confronti reciproci tra carte storiche (par. 5);
- considerazioni pratiche sui metodi di rilievo adottati e sulla qualità della rappresentazione; inserimento della carta trasformata in ambiente GIS, come base cartografica storica.

La georeferenziazione di una carta è un processo che si realizza mediante due passaggi fondamentali, al termine dei quali si dispone di una immagine nuova (in termini quantitativi e di solito anche qualitativi) della carta:

- un processo di trasformazione geometrica tra sistema immagine e sistema oggetto di riferimento (par. 4.1);
- il successivo ricampionamento, una volta applicati a tutti i pixel dell'immagine i parametri di trasformazione calcolati nella fase precedente (par. 4.2).

Il procedimento di calcolo dei parametri della trasformazione diretta (T) e di quella inversa (T^{-1}), al fine di individuare una corrispondenza biunivoca tra due set di punti giacenti su due piani differenti (quello immagine, nel sistema oxy , e quello oggetto, nel sistema OXY), si realizza tramite un processo di "**best**

fitting”, conoscendo le coordinate, nei due sistemi, di un certo numero di GCP (par. 3). Il numero minimo di punti di controllo è legato al tipo di trasformazione piana adottata, in quanto dipende dal numero di parametri della trasformazione stessa. È sempre opportuno, quando possibile, lavorare con un numero di punti superiore allo stretto necessario (e omogeneamente distribuiti sul piano immagine), per consentire una valutazione più affidabile della qualità della trasformazione, mediante l’analisi dei residui di una compensazione ai minimi quadrati. A questo valore si può associare anche l’analisi dei residui su *check-point* (CP), le cui coordinate, note ma non utilizzate per il calcolo dei parametri della trasformazione geometrica, vengono confrontate con quelle in uscita dalla fase di compensazione (avvenuta sulla base dei soli GCP).

4.1. Scelta della trasformazione geometrica

Come visualizzato in figura 2, per la georeferenziazione di una carta è possibile utilizzare trasformazioni geometriche di due classi distinte: trasformazioni globali, per le quali i parametri di T valgono per l’intero piano immagine, e trasformazioni locali, per le quali i parametri di T valgono solo per aree specifiche, solitamente piccole, definite da un piccolo numero di punti di controllo o come intorno di ogni punto di controllo (Livieratos, 2006). La scelta della trasformazione da utilizzare dipende da diversi fattori, in primo luogo il tipo presunto di deformazione da correggere e il fine di utilizzo della carta georeferenzziata.

La differenza risultante dall’applicazione di un tipo o dell’altro di trasformazione, infatti, consiste per lo più nel tipo di deformazione che subisce la carta nel processo di ricampionamento in seguito all’applicazione dei parametri stimati. Il risultato finale di un processo di trasformazione globale è quello di:

- compensare alla deformazione complessiva, per l’appunto globale, della carta;
- spostare i GCP dalla loro posizione sulla carta (per via della stima dei parametri mediante compensazione ai minimi quadrati).

Le varie trasformazioni di tipo globale si differenziano tra loro per il numero di parametri coinvolti, e dunque per il tipo di deformazione (lineare o non lineare) che sono in grado di correggere. Il risultato di una trasformazione lineare (di Helmert, affine, proiettiva, polinomiale di ordine $n=1$) è una traslazione, una rotazione globale ed una variazione di scala; per una trasformazione proiettiva il risultato è un’immagine prospettica, vale a dire ruotata e scalata non uniformemente. Una trasformazione lineare corregge dunque effetti di scala, offset, rotazione e riflessione; una trasformazione non lineare corregge invece distorsioni non lineari. La più semplice trasformazione non lineare è la polinomiale di 2° ordine, e a seguire quelle di ordine superiore. In questi casi il risultato dipende molto dal numero di punti di controllo e dalla loro distribuzione spaziale sul piano immagine (Balletti, 2006; Boutoura & Livieratos, 2006).

Dall’altro lato, in una trasformazione locale i parametri calcolati sono validi solo per ogni singola sub-area. Di conseguenza l’applicazione di tale trasformazione comporta:

- la visualizzazione delle deformazioni locali, in base alle aree selezionate dall’utente per mezzo dei GCP;
- il mantenimento della posizione dei GCP in termini di coordinate oggetto (quindi, non in termini di posizione reciproca sulla carta storica), forzando gli altri punti dell’immagine ad adattarsi.

Le trasformazioni locali possono essere distinte in due grandi classi, in base al principio su cui operano: scomposizione del dominio in elementi finiti (triangolazione e *rubber-sheeting*), e creazione di campi di forze (mediante vettori o *morphing*).

Il modello matematico applicato usualmente è lo stesso delle trasformazioni globali, ma viene circoscritto ad aree limitate. A differenza delle trasformazioni globali, per quelle locali non è possibile la

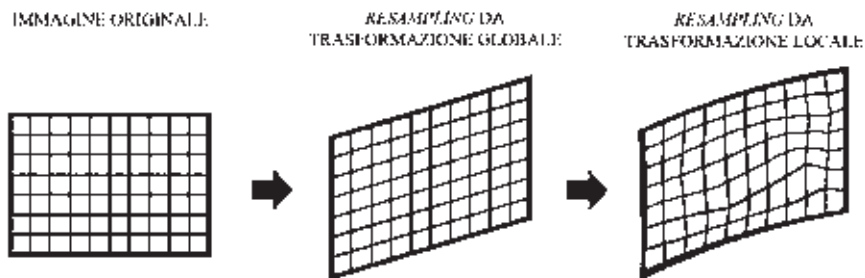


Fig. 3 - Schema dell'applicazione di una trasformazione globale e di una locale in successione.

stima della precisione mediante analisi dei residui sui GCP, in quanto tutti i punti di controllo vengono mantenuti fissi (quindi a residuo nullo); il controllo della precisione è possibile unicamente mediante inserimento di CP, nello stesso modo in cui può essere fatto per una trasformazione globale.

Differenze nel modo in cui avviene il calcolo dei parametri di trasformazione comportano ovviamente differenze negli effetti indotti dall'applicazione di tali trasformazioni. Uno dei problemi delle trasformazioni globali consiste negli effetti degli algoritmi di interpolazione in quelle parti dell'immagine in cui non esistono informazioni, in quanto non sono presenti GCP; a rigore si tratta di processi di estrapolazione. Trattandosi di trasformazioni di tipo globale, i parametri vengono calcolati sulla base delle sole informazioni (coordinate dei GCP) inserite dall'utente, e vengono applicati allo stesso modo sull'intera immagine, senza considerare quindi che una logica diversa potrebbe aver presieduto al rilievo e alla rappresentazione delle diverse porzioni di territorio mappate; le deformazioni nelle aree su cui non sono disponibili GCP possono risultare quindi inaccettabili. D'altro canto le trasformazioni locali soffrono spesso di problemi di non conformità tra aree di trasformazione adiacenti (ad esempio effetti di taglio).

Un altro possibile modo di effettuare la georeferenziazione è quello di applicare in successione vari algoritmi di calcolo; in particolare può risultare utile l'applicazione di una prima trasformazione globale (in modo da eliminare le grosse deformazioni), e di una successiva trasformazione locale (in modo da affinare la georeferenziazione); in questo passaggio, ovviamente, occorre eliminare l'informazione di georeferenziazione associata alla carta in seguito all'applicazione della prima trasformazione (fig. 3).

4.2. Ricampionamento

Il calcolo dei parametri della trasformazione T e quelli della sua inversa T^{-1} , avvenuto sulla base di punti di controllo, permette di instaurare una relazione biunivoca tra spazio immagine (sistema oxy , solitamente riga x colonna) e spazio oggetto (sistema OXY , solitamente coincidente con un sistema cartografico), e quindi di estendere la validità dei parametri calcolati a tutti i punti (pixel) dell'immagine. Dall'applicazione di tali parametri a tutti i pixel dell'immagine originale, si genera dunque la carta georeferenziata.

Il processo, noto col nome di **resampling** (ricampionamento) (fig. 4), consiste nel riempimento di una matrice vuota di pixel disposta nel sistema OXY , assegnando un valore radiometrico ad ogni suo pixel, sulla base dell'applicazione dei parametri della trasformazione inversa calcolati e di algoritmi di interpolazione. In figura 2 si evidenzia la possibilità di scelta del tipo di algoritmo di interpolazione (**nearest neighbour**, **bilinear interpolation**, **cubic convolution**) e il risultato finale del processo, consistente nel file immagine (raster) accompagnato dai dati di geocodifica/georeferenziazione secondo il sistema di riferimento adottato.

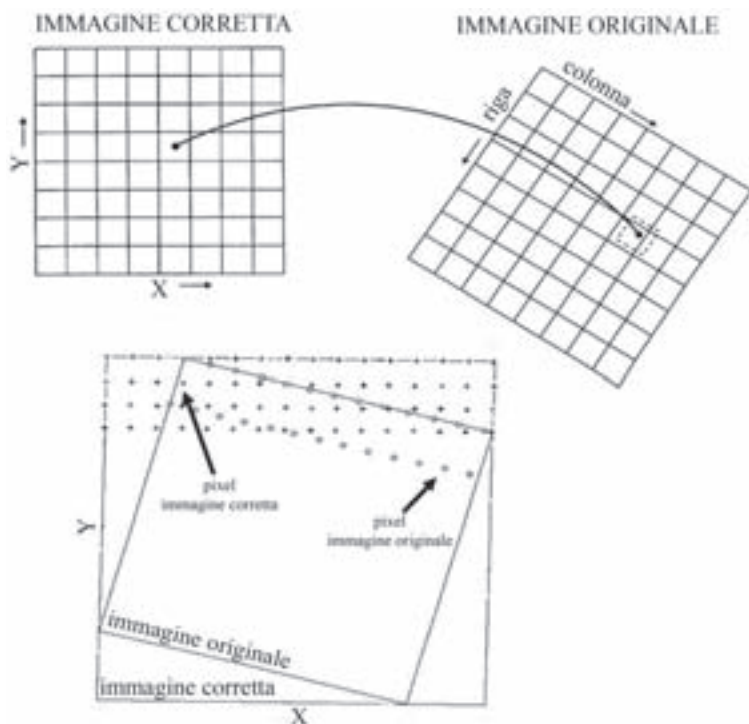


Fig. 4 - Schema di come avviene il **resampling** di immagine.

In figura si evidenzia anche la possibilità di sfruttare tale informazione per effettuare la mosaicatura di più immagini; questo trova applicazione sia nel caso in cui l'acquisizione della carta sia avvenuta in più parti (ad esempio per ragioni di dimensioni dell'originale) sia nel caso in cui si debba ricomporre un mosaico composto in originale da più carte (senza sovrapposizione tra carte adiacenti). Mentre nel primo caso la mosaicatura può avvenire anche prima della fase di georeferenziazione (ad esempio tramite algoritmi di **image matching**, in base al contenuto radiometrico delle immagini), nel secondo caso l'informazione di geocodifica/georeferenziazione può risultare l'unico strumento in grado di ricomporre il mosaico di carte originale (Bitelli & Gatta, 2011b). Nell'unione delle scansioni può risultare conveniente effettuare una omogeneizzazione del colore, per evitare che il mosaico presenti differenze radiometriche; l'operazione può essere fatta sia correggendo preventivamente le differenze di colore sulle singole immagini, mediante appositi sistemi di controllo del colore, sia in fase di mosaicatura, sfruttando algoritmi specifici, come ad esempio quello di **blending**.

4.3. Analisi dei residui

Come sopra accennato, la valutazione della qualità di una trasformazione avviene normalmente attraverso l'analisi dei residui, in uscita dal calcolo di compensazione ai minimi quadrati. Le trasformazioni globali lavorano sul principio di minimizzazione dei residui sui GCP, in modo da ripartire l'errore globale tra i punti di controllo in modo il più possibile uniforme. Come detto, una valutazione più veritiera della qualità di una trasformazione può avvenire mediante CP; siccome essi non influiscono sul risultato di compensazione, in genere stimano un valore di residuo più alto rispetto a quello calcolato mediante i GCP. Attraverso i CP è possibile avere una stima della qualità della trasformazione anche se di tipo locale (per la quale un'analisi sulla base dei GCP non è possibile).

I parametri statistici di valutazione della qualità di una trasformazione di norma consistono in: singoli residui (sui GCP e sui CP) nelle due coordinate planimetriche, errore di posizionamento per ciascun GCP o CP, scarto quadratico medio, errore normalizzato. Per facilitare la lettura dei residui di georeferenziazione è possibile sfruttare visualizzazioni quali: istogramma dei residui, mappatura dei residui in carta (a colori, vettori, o cerchi di errore), visualizzazione tridimensionale dei residui o a curve di livello (l'informazione planimetrica è data dalle coordinate oggetto associate alla carta, l'informazione altimetrica è fornita dai residui trasformati da valore pixel ad un valore metrico), e così via.

Per una stima più affidabile dei residui (e dei parametri) di trasformazione, è bene disporre di un numero il più possibile elevato di punti, ovviamente compatibilmente con le difficoltà pratiche di individuazione di punti omologhi tra carta storica e base attuale. Inoltre, se da una parte risulta utile avere a disposizione dei CP, dall'altra è vero che il disporre di un numero elevato di CP significa privare il calcolo di compensazione di quegli stessi punti, col risultato di indebolire la stima dei parametri di trasformazione. La soluzione va dunque cercata in un compromesso tra le queste due esigenze opposte. In seguito all'analisi dei residui, si può eventualmente affinare il calcolo di compensazione effettuando una selezione dei GCP, per eliminare quelli in corrispondenza dei quali si hanno residui elevati non immediatamente giustificabili. Anche in questo caso, è probabilmente in un compromesso, tra l'eliminazione di molti GCP (migliorando la stima dei residui, ma vincolando meno la rete) e la conservazione anche di quelli apparentemente "peggiori" (accettando quindi residui più elevati, ma vincolando meglio la rete), che sta la soluzione migliore.

5. Analisi comparate tra cartografie

La principale utilità della georeferenziazione di carte antiche è la possibilità di confrontare queste con altre carte storiche, dello stesso periodo, precedenti o successive, e soprattutto con basi cartografiche moderne (*in primis* la base di riferimento adottata per il calcolo di georeferenziazione, se le coordinate dei GCP utilizzati sono stati dedotti da cartografia). L'obiettivo può essere lo studio delle proprietà geometriche e di proiezione del documento cartografico antico, da una parte, o lo studio delle variazioni avvenute nel paesaggio (naturale o urbano), dall'altro. Da quest'ultimo punto di vista, l'inserimento della carta storica in sistemi GIS (eventualmente anche WebGIS), quale layer cartografico storico (evidentemente all'interno degli errori stimati in uscita dal processo di georeferenziazione), risulta un valido strumento di supporto allo studio.

Nello schema di figura 2 si sono volute distinguere diverse modalità di comparazione con la carta antica in esame, in base al termine di paragone utilizzato:

- la realtà attuale, per valutare:
 - la qualità del calcolo di georeferenziazione (par. 4.3);
 - le differenze nella rappresentazione, indice di peculiarità nel disegno o di reale cambiamento del territorio;
 - i contenuti della carta storica in modo metrico (quindi oggettivo), ricavandone informazioni localizzate spazialmente (Bitelli & Gatta, 2011);
- periodi storici differenti, per effettuare:
 - analisi dei cambiamenti, ai fini di studi ambientali e/o urbanistici;
 - ipotesi di evoluzione dell'ambiente o di sviluppo della città, per la progettazione di interventi futuri;
- carte di diversi autori (o edizioni differenti o copie di una stessa carta) in uno stesso periodo storico, per cercare risposta alle seguenti domande:
 - qual è il metodo di rilievo adottato in origine, e quali sono gli strumenti che vennero utilizzati?
 - chi tra più autori (nell'ipotesi di autori differenti e coevi che hanno operato sullo stesso territorio) ha lavorato "meglio"?

qual è la “verità storica” tra quelle rappresentate in carta (nel caso in cui elementi del territorio oggi non siano più conservati)?

esistono problematiche politiche, economiche, di tipo manageriale o di altro tipo che possono avere inciso nella redazione dei documenti?

Tali confronti normalmente si realizzano mediante sovrapposizioni, condotte all'interno di software di trattamento di dati GIS, con l'ausilio di diversi strumenti ivi implementati; in tale ambiente, inoltre, l'informazione della carta antica può essere collegata a dati (alfanumerici o d'immagine) di varia natura (ad esempio, per mappe catastali, è possibile creare link tra particelle raffigurate e relativi registri). La sovrapposizione consente innanzitutto di valutare la qualità del calcolo, e scoprire se vi sono zone, in carta, più problematiche di altre in quanto a precisione geometrica o ad insufficienza di GCP. In secondo luogo, consente di notare differenze nella rappresentazione antica rispetto a quella moderna, indice di peculiarità nel disegno o di evoluzione del paesaggio; consente quindi di valutare i contenuti della carta in modo oggettivo (Proto, 2008). Infine, la sovrapposizione permette di comparare il contenuto non solo geometrico ma anche tematico di due carte simili, e quindi valutarne il reale grado di similarità.

Un altro modo di comparare carte tra loro è una consultazione interattiva, che si avvale di procedure software specifiche per il confronto diretto, fianco a fianco, tra carta storica e carta moderna. Queste nascono dal desiderio di evitare le deformazioni tipiche del processo di georeferenziazione, a volte tali da non ritrovare più l'aspetto originale della carta (il problema è sentito soprattutto per le carte storiche in proiezione scenografica), ma al contempo dalla volontà di assegnare comunque un contenuto metrico alla carta antica, cosa fondamentale per il suo studio e per la possibilità di estrarne informazioni di tipo quantitativo. Una soluzione può derivare dall'applicare i parametri di trasformazione di volta in volta, “*on the flight*”, senza però ricampionare l'immagine (Guerra, 2000).

5.1. Georeferenziazioni non standard

Infine, sfruttando gli algoritmi della georeferenziazione, è possibile inventare nuove modalità di comparazione tra carte antiche e moderne, qui generalmente denominate “non standard” in quanto differenti dalla classica “geo”-referenziazione, e molto utili nel caso in cui si vogliano confrontare tra loro carte coeve ma con dettagli morfologici differenti. In questo caso la cartografia moderna viene sfruttata in modo alternativo a quello usuale del processo di georeferenziazione, o addirittura può non essere utilizzata. Disponendo di più carte storiche e di una base moderna, alcune modalità (evidenziate nello schema di figura 2) con cui realizzare confronti reciproci possono essere:

- geo-referenziazioni delle carte antiche rispetto a cartografia moderna: il classico processo di georeferenziazione, che fornisce un nuovo aspetto alla carta antica, quantificando le deformazioni mediante l'errore residuo associato ad ogni punto;
- co-registrazioni tra le sole carte storiche: referenziazione di una carta rispetto all'altra, utile per comparare i disegni e riconoscere gli stessi dettagli del paesaggio (Daniil, 2006);
- referenziazioni “all'inverso”: referenziazione della cartografia moderna sulle carte antiche (quindi all'opposto rispetto alla georeferenziazione tradizionale), per evidenziare in modo semplice ed intuitivo in quale modo i caratteri topografici odierni si dovrebbero deformare per adattarsi ai corrispondenti mappati sulla carta antica; questo risulta uno strumento potente per una visualizzazione del pattern della deformazione originale dovuta al lavoro del rilevatore antico (Balletti, 2006);
- georeferenziazione a zone: georeferenziazione di sub-aree della carta (scelte dall'operatore) e ricomposizione del mosaico delle sub-aree ricampionate;
- misure D: misura di angoli e distanze D sulla carta antica (riproducendo il lavoro del cartografo antico, e misurando in carta le grandezze che potrebbero essere state misurate in campagna), e trasposizione dei valori su una base cartografica moderna.

Si rimanda a Gatta (2010) per i risultati dell'applicazione di tali tecniche ad alcune carte pre-geodetiche, coeve ma differenti per i dettagli morfologici rappresentati.

Queste modalità non standard di referenziazione, che tentano di analizzare la carta esulando da una base di riferimento attuale, nascono dalla necessità di distinguere sulla carta gli errori di campo e di laboratorio (commessi in fase di rilievo e poi in fase di redazione della carta, strumentali, accidentali o intenzionali che siano), mappati (quindi "errori veri", registrati sulla carta antica), da quelli che si aggiungono in fase di calcolo della georeferenziazione (supponendo nulla la deformazione del supporto). I residui in uscita dalla fase di georeferenziazione, infatti, sono il risultato di tutti questi errori, e non è facile distinguerne i contributi. Il fatto che l'algoritmo di calcolo di una trasformazione globale tenda a minimizzare i residui su tutti i GCP, ricalcolandone la posizione planimetrica, significa che introduce una forzatura, una deformazione geometrica, e quindi una sorta di errore (che è possibile chiamare "errore di stima"). Una prova dell'esistenza di tali distorsioni sta nel fatto che applicando algoritmi diversi si ottengono risultati diversi. Una trasformazione locale al posto di una globale permette di fissare la posizione dei GCP, ma il problema rimane all'interno delle singole sotto-regioni, dove il calcolo avviene mediante una trasformazione affine. Dunque, l'errore globale di georeferenziazione in uscita dal processo non rispetta direttamente l'errore dovuto alla tecnica di rilievo originaria e la sua propagazione (soprattutto in zone in cui oggi non vi sono informazioni topografiche in quanto i dettagli del territorio sono cambiati o scomparsi), ma può darne solo un'indicazione.

Tale necessità è sentita soprattutto nello studio di carte molto antiche, come le pre-geodetiche, redatte con strumenti e metodologie assai meno precisi degli attuali. Ovviamente l'analisi della carta deve essere accompagnata sempre da uno studio approfondito degli strumenti di rilievo utilizzati assieme alla loro precisione, e della metodologia di rilievo (individuazione delle basi di riferimento topografiche originarie e dei relativi traguardi, nel rispetto della direzione secondo cui anticamente è stato eseguito il rilevamento) e di trasposizione in carta. Alcune informazioni possono derivare dalla consultazione di documentazione originaria o da manuali dell'epoca, ma non sempre tali documenti sono ancor oggi conservati o facilmente ritrovabili, o addirittura potrebbero non essere mai stati redatti.

Conclusioni

Lo studio discute l'analisi metrica di cartografia storica, e di come essa si pone all'interno di un più ampio processo di recupero digitale di tale patrimonio storico-culturale. La procedura è stata schematizzata attraverso diagrammi di flusso, evidenziando e descrivendo i passaggi chiave. L'analisi metrica di una carta antica, comunque supportata da una analisi filologica del documento cartografico, permette di: studiare le deformazioni insite in carta, ridare alla carta digitale quel contenuto metrico inizialmente posseduto dal documento originale, effettuare confronti di vario tipo (riguardanti l'assetto territoriale antico con quello moderno, o confronti reciproci tra carte storiche), tentare di derivare considerazioni pratiche sulla metodologia di rilievo e rappresentazione anticamente adottata.

Una volta analizzata metricamente una carta e georeferenzata, si apre un ampio ventaglio di studi e applicazioni. Questo dimostra come le moderne tecniche della Geomatica possano ampliare le possibilità di indagine nel campo della cartografia storica, mostrando la forza e l'attualità del prodotto cartografico antico, sia per l'informazione del passato che può tramandare, sia per la natura multidisciplinare degli studi che può consentire.

Ringraziamenti

Un grande ringraziamento al mio tutor, prof. Gabriele Bitelli.

Bibliografia

- ADCOCK E.P., VARLAMOFF M.T., KREMP V. (2004). *Principi dell'IFLA per la cura e il trattamento dei materiali di biblioteca*, Bari, IFLA.
- ARCHIVIO DI STATO DI GENOVA. (2008). *Adotta un documento*. Tratto il giorno 1/3/2010 da Archivio di Stato di Genova: <http://www.archivi.beniculturali.it/ASGE/adotta.htm>
- BAIOCCHI V., LELO K. (2005). *Georeferencing the historical maps of Rome between the Seventeenth and Eighteenth centuries*. "Atti del CIPA XX International Symposium, Torino".
- BALLETTI C. (2006). *Georeference in the analysis of the geometric content of early maps*, e-Perimtron, vol. 1, n° 1, pp. 32-42.
- BITELLI G., CREMONINI S., GATTA G. (2009). *Ancient maps comparisons and georeferencing techniques: a case study from the Po river delta (Italy)*, e-Perimtron, vol. 4, n° 4, pp. 221-233.
- BITELLI G., GATTA G. (2011a). *Digital processing and 3D modelling of an 18th century schenographic map of Bologna*, In: A. Ruas (ed.): "Advances in Cartography and GIScience", Springer, pp. 129-146.
- BITELLI G., GATTA G. (2011b). *Experiences on georeferencing of maps from the XIX century Gregorian Cadastre of Bologna (Italy)*. "Atti del VI Workshop on Digital Approaches to Cartographic Heritage, L'Aia", CD-Rom.
- BOUTOURA C., LIMERATOS E. (2006). *Some fundamentals for the study of the geometry of early maps by comparative methods*, e-Perimtron, vol. 1, n° 1, pp. 60-70.
- CANTILE A. (2003). *Il tempo nelle carte, il tempo delle carte*, "Atti della 7^a Conferenza Nazionale ASITA, Verona", pp. 28-31.
- DALL'AGLIO P.L., DI COCCO I., MARCHETTI G. (2002). *La cartografia storica per la ricostruzione del paesaggio antico: alcuni casi dell'Italia Padana*, "Atti della 6^a Conferenza Nazionale ASITA, Varese", pp. 55-60.
- DANIIL M. (2006). *Comparing by digital transparency the differences between two almost identical 17th century maps of North Aegean Sea*, e-Perimtron, vol. 1, n° 3, pp. 194-208.
- GATTA G. (2010). *Valorizzazione di cartografia storica attraverso moderne tecniche geomatiche: recupero metrico, elaborazione e consultazione in ambiente digitale*, Tesi di Dottorato in "Scienze Geodetiche e topografiche", Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna.
- GUERRA F. (2000). *2W: new technologies for the georeferenced visualization of historic cartography*, "International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing", vol. XXXIII, B5, pp. 339-346.
- JENNY B., HURNY L. (2011). *Studying cartographic heritage: Analysis and visualization of geometric distortions*, "Computers & Graphics", 35-2, pp. 402-411.
- LIMERATOS E. (2006). *On the Study of the Geometric Properties of Historical Cartographic Representations*, "Cartographica", 41-2, pp. 165-175.
- PROTO M. (2008). *Il paesaggio dei tecnici. Attualità della cartografia storica per il governo delle acque*. Bologna-Cremona, 3-4 aprile 2008, "Storia e Futuro. Rivista di storia e storiografia", 17, pp. 1-4.
- SGAMBATI G., BENASSATI G., BIANCINI L., BUONORA P., SINISI D., CANTILE A., DELFINO L., DI ANGELO ANTONIO M., FALCHETTA P., MANCINELLI M.L., SANGUINETI M.T., SERRATRICE G., TRUCI I., VALERIO V. (2006). *Linee guida per la digitalizzazione del materiale cartografico*, ICCU.