

Recenti sviluppi nell'attività del Catasto della Repubblica di San Marino: verso l'adozione delle metodologie GNSS

V. Casella^a, M. Franzini^a, B. Padova^a, L. Mazza^b

^a DIET, Università degli Studi di Pavia, via Ferrata, 1 - 27100 Pavia
(vittorio.casella, marica.franzini, barbara.padova)^a@unipv.it

^b Ufficio Tecnico del Catasto, Via Piana, 42 - 47890 Repubblica di San Marino, lucia.mazza.catasto@pa.sm

KEYWORDS: GNSS, Catasto, Cartografia

RIASSUNTO

Il presente articolo illustra alcune attività della collaborazione tra l'Ufficio Tecnico del Catasto della Repubblica di San Marino e il Laboratorio di Geomatica dell'Università di Pavia, avente come scopo ultimo l'adozione delle tecniche GNSS per le attività del Catasto.

Si descrive la stazione GNSS permanente creata e gestita dal Catasto di San Marino. Si illustrano in particolare le modalità con cui la stazione è stata inquadrata nel datum IGM95-ETRF89 e nel nuovo RDN-ETRF2000.

Si illustra la nuova rete GPS che è stata creata e che rappresenterà il datum WGS84 per San Marino.

Infine si descrive la metodologia adottata per l'esecuzione della trasformazione di datum planimetrico fra il sistema di riferimento RSM50, adottato negli primi anni '50 e tuttora usato, e il WGS84.

ABSTRACT

The present paper illustrates some activities carried out within a collaboration between the Cadastral Technical Department of the Republic of San Marino and the Geomatics Laboratory of the University of Pavia, whose final goal is the adoption of the GNSS measuring techniques for daily cadastral surveying.

The GNSS CORS is illustrated, which is operated by the San Marino Cadastre. The paper focuses on its dual referencing, to the old Italian GPS network named IGM95, and to the new RDN one.

The newly created GNSS San Marino network is described, which represents the WGS84 reference system for the San Marino country.

The old San Marino reference system, named RSM50, was adopted in the early '50s and is still used. The adopted methodology for datum transformation between RSM50 and WGS84 is depicted.

1. Introduzione

Il Catasto della Repubblica di San Marino opera da tempo con il supporto delle migliori tecnologie informatiche per quanto riguarda la memorizzazione e la gestione dei dati: tutte le informazioni del Catasto Terreni sono contenute in un sistema informativo e loro la gestione viene effettuata dal personale interno in maniera digitale; allo stesso modo, la consultazione da parte dei cittadini e l'emissione di certificati si avvale di un buon supporto informatico. Va notato tra l'altro che la cartografia catastale è l'unica esistente a San Marino, dunque viene usata anche come carta tecnica.

Il sistema di riferimento usato a San Marino è materializzato da una rete creata e rilevata alla fine degli '40. La cartografia d'impianto è stata realizzata nello stesso periodo con metodologia fotogrammetrica, con la supervisione di tecnici del Catasto Italiano; essa adotta la tradizionale proiezione di Cassini-Soldner. Il rilievo di nuove entità è effettuato da personale dell'Amministrazione con metodologie topografiche classiche.

Il desiderio di aprire il Catasto alle nuove tecnologie e metodologie di rilievo ha spinto la Dirigente, arch. Lucia Mazza, ad intraprendere un Progetto in collaborazione con il Laboratorio di Geomatica dell'Università di Pavia. Lo scopo ultimo del Progetto è l'adozione del GPS per il rilievo catastale; esso è costituito da numerose parti, alcune delle quali sono già concluse, mentre altre sono tuttora in corso.

L'articolo descrive alcune tra le attività più importanti già terminate: la creazione di una stazione GNSS permanente, la creazione di una rete statica GNSS sul territorio della Repubblica e la stima della trasformazione di datum tra il sistema di riferimento del GPS ed il sistema di riferimento di San Marino, denominato d'ora in poi RSM50.

2. La rete trigonometrica e la mappa catastale d'impianto

Con un decreto datato 21 febbraio 1949, il Governo sammarinese stabilì la formazione del Nuovo Catasto Terreni e del Nuovo Catasto Fabbricati. Il primo doveva essere costituito da mappe alle scale scala 1:2000 e 1:1000, complete di rappresentazione altimetrica basata su curve di livello e punti quotati. Il lavoro fu svolto dall'Ente Italiano Rilevamenti Aerofotogrammetrici (EIRA), con sede a Firenze, che iniziò le campagne di misura fin dal marzo 1949. La dirigenza tecnica dei lavori fu affidata all'Ingegnere Capo dell'Amministrazione del Catasto di San Marino, che ebbe il supporto dei tecnici dell'Ufficio Tecnico del Catasto di Firenze.

Inizialmente fu creata una rete trigonometrica di inquadramento: vennero ripristinati 3 punti trigonometrici già esistenti e istituiti 54 nuovi vertici. La rete, il cui schema è mostrato in Figura 1, ha una densità media di 1,1 punti al km² ed è collegato con la rete geodetica italiana.

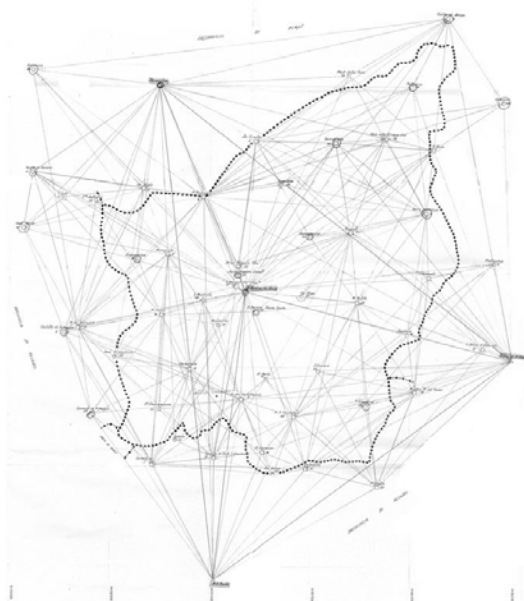


Figura 1. Schema della rete trigonometrica realizzata per la creazione della mappa catastale d'impianto.

La mappa catastale venne creata con metodo aerofotogrammetrico. Si utilizzò una camera analogica Santoni Tipo III, con focale di 198.2 mm, operante a un'altezza relativa di volo di 1600 metri. Vennero acquisite complessivamente 6 strisciate per un totale di 120 coppie. Nell'autunno-inverno 1949-1950 fu eseguita a Firenze la restituzione a mezzo di uno stereocartografo Santoni mod. III. La mappa catastale di San Marino adotta la proiezione Cassini-Soldner, con origine a Portonovo, ed è costituita da 67 fogli a perimetro chiuso, dei quali 58 in scala 1:2000 e 9 in scala 1:1000. La cartografia catastale di San Marino è simile a quella italiana, per molti aspetti: ellissoide di riferimento, datum planimetrico, proiezione cartografica.

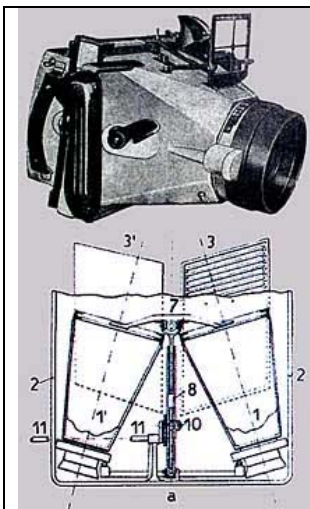


Figura 2. La camera Santoni Tipo III, dotata di due teste.

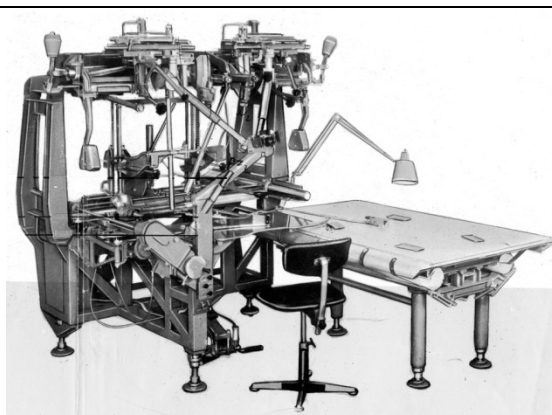


Figura 3. Il restitutore analogico Santoni mod. III.

Le operazioni di collaudo geometrico furono effettuate nel 1950 dall'Ufficio del Catasto di Firenze. Per la parte planimetrica, furono eseguite 6826 misure: le misure comprese nella tolleranza furono 5879 mentre fuori tolleranza risultarono 407 misure pari al 6.47 %. Il controllo altimetrico fu eseguito mediante 30 sezioni e poligoni altimetriche, aventi uno sviluppo complessivo di oltre 19 km. Le linee di controllo intersecavano 1132 curve e solo 4 (0.35 %) furono trovate fuori tolleranza.

3. La stazione GNSS permanente

Dal mese di marzo 2009 è attiva, presso l'Ufficio Tecnico del Catasto della Repubblica di San Marino, una stazione GNSS permanente denominata d'ora in poi RSMC. L'antenna, una Leica LEIAR25 dotata di dome, è monumentata sul tetto dell'edificio ospitante gli uffici del Catasto; il ricevitore è un Leica GRX1200 e traccia sia i satelliti GPS sia i Glonass. Vengono memorizzati i dati statici a 1 e 30 secondi, in formato RINEX, in file aventi lunghezza di 1 ora e 24 ore, rispettivamente; vengono inoltre generate le correzioni differenziali di fase distribuite in rete secondo i protocolli internazionali.

4. L'inquadramento della stazione permanente

Nel mese di luglio 2009, i tecnici del Catasto di San Marino hanno rilevato una rete costituita da RSMC e dai 6 vertici IGM95 prossimi: Rimini, Ponte Verrucchio, Casa Severini, Monte Carpegna, Peglio e Monteluro. Lo schema adottato per il rilievo è riportato in Figura 4.

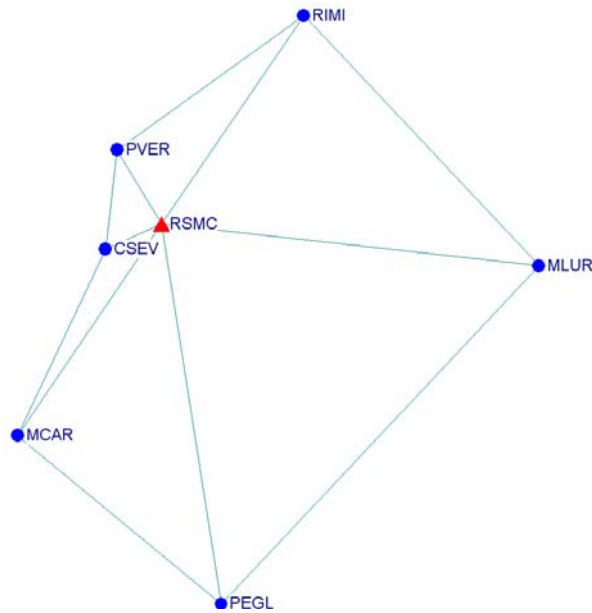


Figura 4. Schema del rilievo dei vertici IGM95.

L'elaborazione dei dati è stata svolta presso il Laboratorio di Geomatica dell'Università di Pavia. Per il calcolo della basi è stato usato il software Leica GeoOffice (LGO) di Leica Geosystems; la ricerca di errori grossolani mediante analisi della chiusura dei poligoni, è stata condotta con programmi in ambiente Matlab sviluppati da alcuni degli autori; la compensazione della rete e le successive trasformazioni di Helmert sono state effettuate con software Columbus di Best-Fit.

E' stata effettuata anzitutto la compensazione a minimi vincoli, in cui le coordinate del solo RSMC erano tenute fisse. Le accuratezze ottenute sono buone, tenendo conto che alcune basi sono lunghe alcune decine di km: nelle due componenti planimetriche il massimo valore di σ è 8 mm; in altimetria il valore massimo è 15 mm. Indicheremo con la sigla CMV le coordinate prodotte in tale fase.

Successivamente è stata stimata la trasformazione di Helmert $T_1 (T_1 : CMV \rightarrow ETRF89)$, dove CMV rappresenta le coordinate ma anche il sistema di riferimento implicitamente creato con la compensazione a minimi vincoli) che porta le CMV dei 6 vertici IGM95 a sovrapporsi ai loro valori nominali. Sono stati analizzati i residui, cioè le differenze fra le CMV roto-traslate ($T_1(CMV)$) e i valori nominali: i loro valori sono sintetizzati dalla Tabella 1 e sono particolarmente contenuti; essi evidenziano che la rete è stata rilevata bene da tecnici del Catasto e che la rete IGM95 ha in quella zona una elevata qualità, superiore a quella media.

Residui	ΔE [m]	ΔN [m]	Δh[m]
min	-0.019	-0.016	-0.024
max	0.033	0.016	0.019
media	-0.002	-0.001	0.001
sqm	0.020	0.012	0.017

Tabella 1. Parametri statistici sui residui della trasformazione di Helmert.

Le elaborazioni descritte sono state eseguite usando, per i 6 vertici di rete usati, le coordinate IGM95 o, più precisamente, le coordinate ETRF89. La stazione RSMC è stata dunque anzitutto inquadrata nel sistema di riferimento IGM95-ETRF89. Tuttavia essa è stata anche inquadrata nel nuovo sistema di riferimento italiano ETRF2000, rappresentato in Italia dalla Rete

Dinamica Nazionale (RDN). La seconda determinazione di RSMC è stata ottenuta stimando e applicando una ulteriore trasformazione di Helmert. Per spiegare questo fatto è necessario illustrare alcuni elementi riguardanti la RDN.

Lo Istituto Geografico Militare (IGM) mette a disposizione sul web, per ogni vertice IGM95, le differenze di coordinate ($\Delta\varphi, \Delta\lambda$) oppure ($\Delta E, \Delta N$) da sommare alla determinazione ETRF89 per avere la determinazione ETRF2000. Sarebbe stato possibile stimare una nuova trasformazione di Helmert T_2 ($T_2: \text{CMV} \rightarrow \text{ETRF2000}$) e procedere in analogia con quanto fatto. Si è invece preferito stimare una diversa trasformazione di Helmert T_3 ($T_3: \text{ETRF89} \rightarrow \text{ETRF2000}$) che converte le coordinate da ETRF89 a ETRF2000, per la zona di San Marino. Per conseguire tale scopo sono stati usati come punti doppi i 6 vertici IGM95, aventi la doppia determinazione. Un tale scelta è tuttavia basata sull'assunzione che la trasformazione $\text{ETRF89} \rightarrow \text{ETRF2000}$ sia ben modellizzabile, per la zona di San Marino (avente estensione di circa 10x10 kmq), con una Helmert. La verifica è stata condotta applicando la T_3 alle coordinate ETRF89 dei 6 punti doppi e confrontando le coordinate così ottenute con le ETRF2000 nominali: tutti gli scarti sono inferiori in modulo ai 5 mm, dunque l'assunzione fatta è valida. La definizione della T_3 ha dei vantaggi rispetto all'altra procedura, in quanto la T_3 potrà essere usata non solo per convertire le coordinate di RSMC, ma per convertire le coordinate di qualunque punto di cui si conoscano le ETRF89, *per la zona di San Marino*. La Tabella 2 sintetizza le coordinate della stazione RSMC nei due sistemi di riferimento.

	Coord. Geografiche WGS84		Coord. Cartografiche UTM33N-WGS84	
	IGM95- ETRF89	Latitudine [deg]	43°56'08.3109" N	Est [m]
Longitudine [deg]		12°26'43.0311" E	Nord [m]	4867897.649
Alt. ellis. [m]		669.342		
RDN- ETRF2000	Latitudine [deg]	43°56'08.3133" N	Est [m]	294954.193
	Longitudine [deg]	12°26'43.0302" E	Nord [m]	4867897.724
	Alt. ellis. [m]	669.266		

Tabella 2. Coordinate stazione RSMC nei sistemi ETRF89 ed ETRF2000

5. La rete GNSS della Repubblica di San Marino

In parallelo con la creazione della stazione permanente RSMC, sono iniziati i lavori per la creazione della rete GNSS di San Marino. Essa materializza il sistema di riferimento WGS84 per lo Stato e costituisce un primo e importante contributo per la creazione di un insieme denso di punti noti e affidabili, che potranno essere usati da tecnici del Catasto, da tecnici di altre Uffici e anche da professionisti. Tra le attività che l'Ufficio del Catasto intende svolgere nei prossimi anni vi è proprio anche la densificazione della rete.

La rete è stata progettata in modo da abbracciare tutto il territorio dello Stato e ha la configurazione mostrata in Figura 5; sono presenti 20 vertici, 10 principali e 10 associati, oltre alla stazione permanente RSMC. I vertici sono materializzati da borchie in ottone (Figura 7) fissati a pilastri protetti da pozzetti (Figura 6), per garantire loro maggiore durata.

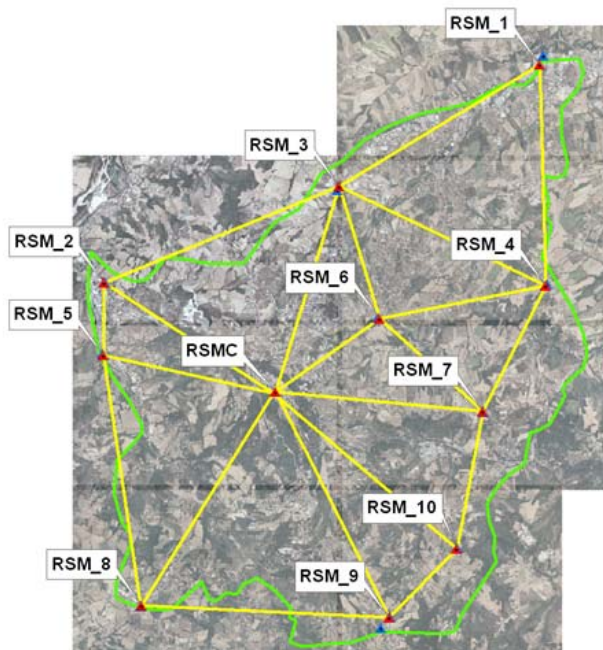


Figura 5. La struttura della rete GNSS.

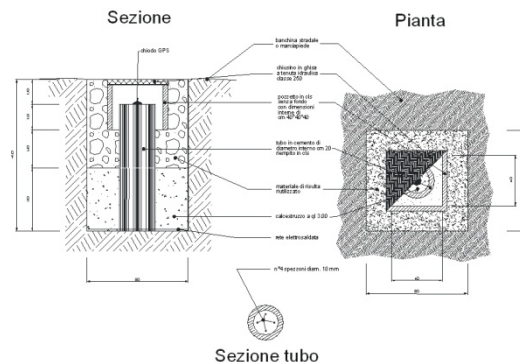


Figura 6. Schema costruttivo del pozzetto.

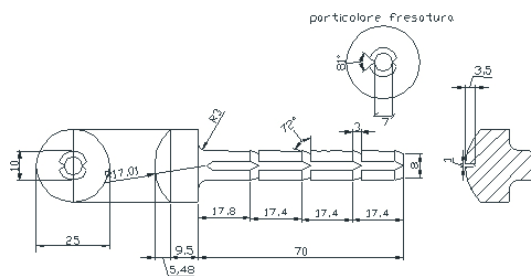


Figura 7. Schema costruttivo della borchia metallica.

Le operazioni di rilievo della rete sono state condotte dal personale del Catasto e si sono concluse nel novembre 2009. Sono state rilevate in totale 66 basi, dunque la ridondanza relativa è elevata. La pianificazione delle misure è stata condotta in modo che ogni vertice, principale o associato, venisse ri-stazionato da squadre diverse, in giornate differenti.

L'elaborazione dei dati è stata svolta dal Laboratorio di Geomatica dell'Università di Pavia, con gli strumenti software già indicati al paragrafo 3. La rete è stata compensata a minimi vincoli fissando le coordinate ETRF89 del vertice RSMC. Successivamente sono state ricavate le coordinate RDN-ETRF2000 dei vertici mediante applicazione della trasformazione di Helmert denominata T_3 nel paragrafo precedente.

6. Stima della trasformazione di datum: da WGS84 a RSM50

Le attività descritte fino a questo punto della nota consentiranno ai tecnici del Catasto di fare misure GNSS. Vi è naturalmente la necessità di stabilire un ponte fra il sistema di riferimento WGS84 e quello tuttora usato a San Marino, dunque bisogna stimare una trasformazione di datum. Essa potrà essere indifferentemente usata per inserire nelle mappe esistenti le misure GPS oppure per convertire la carta attuale a UTM-WGS84. Per portare a termine tale compito è stato necessario realizzare due fasi: la misura di un numero adeguato di punti doppi; la scelta della forma matematica con cui modellizzare la trasformazione di datum per la zona di San Marino e la stima dei corrispondenti parametri.

Per quanto riguarda i punti doppi, è stato individuato un insieme di 7 vertici appartenenti alla rete trigonometrica di Figura 1; è stato deciso di prendere in considerazione solo i vertici usati regolarmente dai tecnici del Catasto per le loro attività e ritenuti affidabili: essi sono mostrati in Figura 8. Di questi punti si conoscono le coordinate Cassini-Soldner dalle monografie e sono state misurate le WGS84 con rilievi specifici, eseguiti da personale del Laboratorio di Geomatica dell'Università di Pavia. E' stato creato anzitutto un secondo vertice di coordinate note denominato POLI, da usarsi insieme a RSMC, in quanto, all'epoca in cui sono state effettuate le misure descritte nella presente sezione, la rete GNSS non era ancora operativa.

In prossimità di ognuno dei punti doppi (punto C, con riferimento alla Figura 10) sono stati rilevati due punti GPS, A e B; essi sono stati legati ai due vertici RSMC e POLI; i dati acquisiti hanno consentito di calcolare le basi corrispondenti ai lati e alle diagonali del quadrilatero formato dai due vertici A, B e RSMC e POLI. Quando la topografia dei luoghi lo

consentiva, i due vertici A e B sono stati anche usati come punti di stazione per misure topografiche: su ognuno di essi è stato posto un teodolite elettronico Leica TPS1201 e sono stati osservati l'altro vertice e il punto C. Per i casi in cui si sono manifestati problemi di intervisibilità o di ricezione GPS, sono stati materializzati due vertici ausiliari A' e B' (vedi Figura 11), in accordo con i seguenti criteri: A' e B' devono essere misurabili con GPS; da A e B devono essere visibili C e almeno due vertici tra A, B, A', B'. Lo schema delle misure GPS svolte è indicato dalla Figura 9. I dati sono stati elaborati presso il Laboratorio di Geomatica con tecniche rigorose, che hanno evidenziato la buona precisione delle coordinate UTM-WGS84 dei punti rilevati. E' stato così costituito un elenco di 7 punti doppi, dei quali si conoscono le coordinate Cassini-Soldner e le UTM-WGS84.

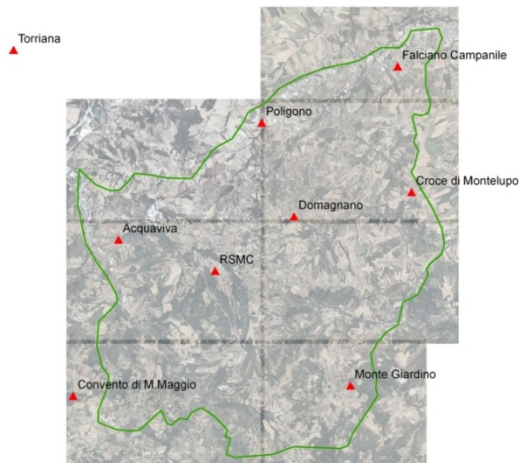


Figura 8. Collocazione dei punti doppi.

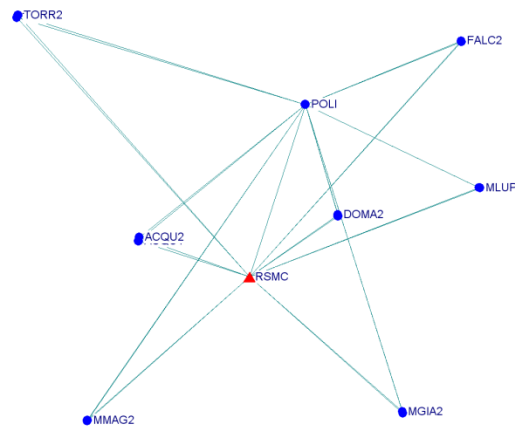


Figura 9. Schema di rilievo per l'inquadramento dei punti doppi.

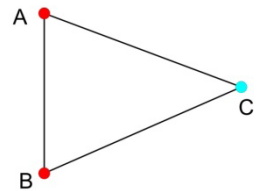


Figura 10. Schema di rilievo con 2 punti di stazione.

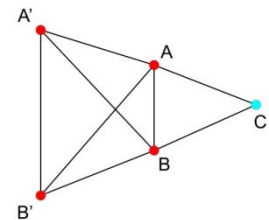


Figura 11. Schema di rilievo 2 punti di stazione e 2 vertici ausiliari.

Date le forti analogie fra l'infrastruttura geodetica e cartografica del Catasto italiano e sammarinese, per quanto riguarda ellissoide, datum planimetrico e proiezione cartografica, le esperienze maturate sul Catasto italiano sono evidentemente pertinenti anche per il Catasto di San Marino. Nella letteratura italiana si trovano diverse interessanti proposte riguardanti la trasformazione di datum (Crespi, Reina, 2004; Cina, 2008; Di Filippo, 2003), che sono state tutte prese in considerazione e valutate criticamente. Sono state anche condotte simulazioni di tipo numerico che saranno illustrate in una prossima nota. In conclusione si è ritenuto che, per la limitata estensione del territorio, circa 11x9 kmq, sia corretto formalizzare la trasformazione di datum con una trasformazione affine particolare da eseguire sul piano cartografico. La trasformazione affine particolare è una roto-traslazione con cambiamento di scala anisotropo la cui equazione è

$$\mathbf{x}_{\text{UTM-WGS84}} = \mathbf{T} + \begin{pmatrix} \lambda_x & 0 \\ 0 & \lambda_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \mathbf{u}_{\text{CS}}$$

E' stata effettuata la stima ai MQ dei parametri, sulla base dei punti doppi, che ha fornito i valori riportati in Tabella 3. La σ_0 a-posteriori vale 6.6 cm e può essere interpretata come lo scarto medio fra le coordinate UTM-WGS84 ricavate per trasformazione dalle Cassini-Soldner (coordinate UTM calcolate) e quelle determinate con rilievo topografico (coordinate UTM misurate): si tratta di un valore davvero basso, persino sorprendente. La rete trigonometrica di San Marino è stata rilevata molto bene e non presenta distorsioni, dunque la trasformazione fra i due datum può essere effettuata con qualità elevata.

E' inoltre interessante notare che la differenza fra i due valori λ_x e λ_y non è casuale. E' stato determinato il coefficiente di deformazione cartografica μ per la proiezione UTM, per la zona di San Marino. Sono stati calcolati inoltre i coefficienti

μ_x e μ_y (μ lungo l'asse Est e Nord) per la Cassini-Soldner, che notoriamente ha un coefficiente di deformazione cartografica che dipende dalla direzione. La composizione dei tre valori trovati per via analitica è in buon accordo con i valori empirici riportati nella Tabella 3. In sintesi, le coordinate usate per la stima sono così poco rumorose che è possibile evidenziare la variazione del coefficiente μ di Cassini-Soldner con la direzione.

Parametro	Valore
T_x [m]	~242030
T_y [m]	~4936120
α [grad]	-2.50136
λ_x	1.000090
λ_y	1.000062

Tabella 3. Parametri della trasformazione affine particolare stimata per San Marino.

La Tabella 4 riporta gli scarti fra le UTM calcolate e quelle misurate e conferma l'ottimo accordo fra le coordinate UTM-WGS84 e Cassini-Soldner. Il punto di Torriana è stato escluso dal calcolo finale in quanto presentava scarti anomali rispetto a quelli pubblicati. Non è stato possibile validare i risultati su punti indipendenti, cioè punti doppi non inseriti nelle stima ai MQ, perché non sono disponibili abbastanza punti doppi: suddividere i 7 esistenti in due insiemi disgiunti avrebbe eccessivamente indebolito l'affidabilità dei risultati. Ci pare si possa dire, in conclusione, che le misure recentemente effettuate dal Laboratorio di Geomatica sono state eseguite bene e che i tecnici dell'EIRA, alla fine degli anni '40, hanno davvero fatto un ottimo lavoro.

Vertice	ΔE [m]	ΔN [m]
Acquaviva	0.063	-0.031
Domagnano	-0.077	0.049
Falciano	-0.012	0.032
Monte Giardino	-0.034	0.045
Monte Maggio	-0.021	-0.023
Montelupo	0.081	-0.072
Media	0.000	0.000
SQM	0.060	0.049

Tabella 4. Scarti ottenuti sui punti doppi.



Figura 12. Rappresentazione grafica dei residui.

7. Conclusioni

La nota presenta alcune delle attività portate a termine nell'ambito di una collaborazione tra l'Ufficio Tecnico del Catasto della Repubblica di San Marino e il Laboratorio di Geomatica dell'Università di Pavia. Sono state descritte le caratteristiche della stazione GNSS permanente RSMC, operante dal marzo 2009, e il metodo con cui è stata inquadrata nel datum WGS84. E' stata presentata la rete GNSS statica di San Marino. E' stata esposta infine la strategia di trasformazione adottata per il passaggio da UTM-WGS84 a Cassini-Soldner.

La collaborazione ha riguardato anche altri argomenti che saranno oggetto di ulteriori pubblicazioni: la verifica della qualità di ricezione della stazione RSMC; l'accuratezza del servizio di posizionamento RTK erogato da RSMC; la compensazione

della rete di livellazione che è stata creata sul territorio di San Marino e la stima delle ondulazioni geoidiche per quel territorio.

Restano alcuni problemi aperti, che saranno argomento di ulteriore ricerca e collaborazione, come la verifica dell'esistenza di deformazioni locali della carta catastale; la definizione di una metodologia per l'inserimento in mappa di punti rilevati con tecniche integrate GNSS e topografiche; la predisposizione di linee guida per la regolamentazione dell'uso della strumentazione GNSS nelle attività catastali sammarinesi.

8. Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare i Tecnici del Catasto di San Marino che hanno eseguito le misure GPS descritte nelle Sezioni 4 e 5 della nota con grande attenzione: si trattava delle loro prime misure GPS e il risultato è stato ottimo.

Il contributo dato dagli autori alla redazione della nota è stato paritetico.

Bibliografia

- [1] Casella V., Franzini M., Padova B. (2009) - Il sistema GPS per il rilievo topografico. Arc.SM - Periodico di Architettura a cura dell'Ordine degli Ingegneri e Architetti della Repubblica di San Marino, n. 4, 2009, pp.34-35.
- [2] Crespi M., Reina T. (2004). Applicazioni non catastali dei punti fiduciali: proposta di una metodologia per l'inquadrimento della maglia dei punti fiduciali nel sistema cartografico UTM-WGS84-ETRF89. Bollettino SIFET, n. 3, 2004, pp. 13-22.
- [3] Cina A. (2008). La carta catastale in un sistema globale. Rivista dell'agenzia del Territorio, n. 1, 2008, pp. 3-16.
- [4] Di Filippo S. (2003). Sul passaggio delle coordinate plano-cartografiche catastali al sistema WGS84 e viceversa. Rivista dell'Agenzia del Territorio, n. 1, 2003, pp.59-89.
- [5] Galli G. (1953). Le operazioni geometriche - Il Nuovo Catasto della Repubblica di San Marino. Rivista del Catasto e dei Servizi Tecnici Erariali - Nuova serie. Anno VIII, n. 5-6, 1953.