

Carlo Monti

LA CARTOGRAFIA MODERNA

CON PARTICOLARE RIFERIMENTO ALL'ITALIA
Aspetti scientifici, statistici, approfondimenti



politecnica

MAGGIOLI
EDITORE

**LA CARTOGRAFIA MODERNA
CON PARTICOLARE RIFERIMENTO ALL'ITALIA**
Aspetti scientifici, statistici, approfondimenti

ISBN 978-88387-6021-7

© Copyright 2011 by Maggioli S.p.A.

È vietata la riproduzione, anche parziale, con qualsiasi mezzo effettuata,
anche ad uso interno e didattico, non autorizzata.

Maggioli Editore è un marchio di Maggioli S.p.A.
Azienda con sistema qualità certificato ISO 9001:2000

*47822 Santarcangelo di Romagna (RN) • Via del Carpino, 8
Tel. 0541/628111 • Fax 0541/622020*

www.maggioli.it/servizioclienti
e-mail: servizio.clienti@maggioli.it

Diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica, di riproduzione
e di adattamento, totale o parziale con qualsiasi mezzo sono riservati per tutti i Paesi.

Il catalogo completo è disponibile su www.maggioli.it area università

Finito di stampare nel mese di luglio 2011
da DigitalPrint Service s.r.l. - Segrate (Milano)

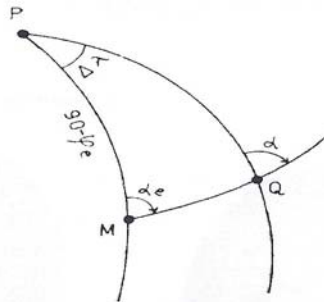
16. LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMIC E MAGNETICO. I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

La determinazione di azimuth astronomic e magnetico per la taratura delle piazzole per strumenti di bordo di aeromobili¹⁹

L'esecuzione di tali misure ricade nell'ambito della disciplina che un tempo si indicava come "geodesia di posizione", ovvero la determinazione di un punto di stazione nelle sue coordinate φ, λ con osservazioni alle stelle, note le loro efemeridi e il Tempo Universale TU. Altra misura fondamentale per correggere lo "sbandamento" delle reti trigonometriche era l'applicazione della formula di Laplace che comportava la misura della direzione del nord geografico²⁰. Il tempo ha visto assottigliarsi il ruolo e l'importanza della "geodesia di posizione" man

¹⁹ Prof. Luigi Fregonese, Ric. Conf., PhD.

²⁰ La conoscenza delle coordinate ellissoidiche e astronomiche di un punto, nonché dei rispettivi azimuth di una direzione, consente di scrivere una relazione molto importante per le operazioni di triangolazione. In un punto M di coordinate ellissoidiche φ_e, λ_e , consideriamo una geodetica di azimuth α_e ; si siano misurate, nello stesso punto, le coordinate astronomiche φ e λ e l'azimut α della geodetica.



Nella figura sono indicati i due azimuth, la deviazione in longitudine $\Delta\lambda$ e l'arco $PM = 90^\circ - \varphi_e$. Consideriamo il triangolo sferico PMQ, in cui l'angolo in Q è $180^\circ - \alpha$; applichiamo il teorema complementare del coseno scritto nella forma generica

$$\cos A = \cos B \cos C - \sin B \sin C \cos a,$$

prendendo come A l'angolo in Q; si ha

$$\cos \alpha = \cos \alpha_e \cos \Delta\lambda - \sin \alpha_e \sin \Delta\lambda \sin \varphi_e$$

A meno di termini del 2° ordine in λ , sempre trascurabili, si può porre $\cos \Delta\lambda = 1$ e $\sin \Delta\lambda = \Delta\lambda$; inoltre poniamo $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_e$, per cui $\cos \alpha = \cos \alpha_e - \sin \alpha_e \Delta\lambda$.

Si giunge subito alla relazione

$$\Delta\alpha = \sin \alpha_e \Delta\lambda$$

Questa relazione, detta di LAPLACE, permette di verificare la precisione delle misure delle triangolazioni; se essa non è soddisfatta in un punto, ciò significa che α_e e λ_e sono affette da errore.

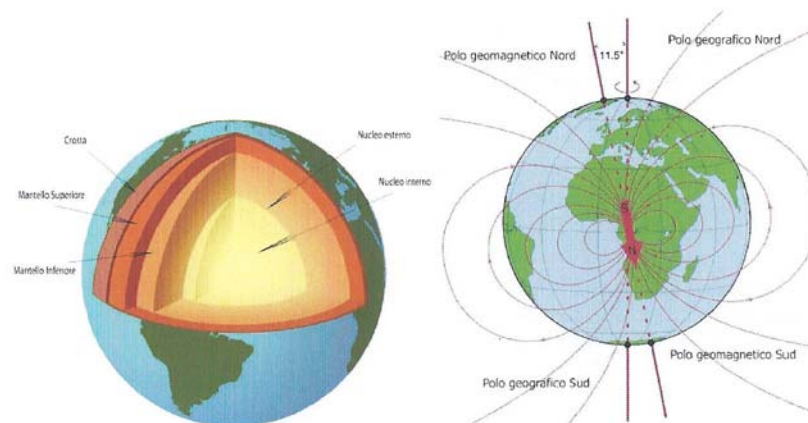
LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

mano che la scienza e la tecnologia hanno fornito sistemi più agevoli di misurazione per le coordinate dei punti (GPS), mentre le misure d'azimut non hanno perso la loro valenza.

Il significato di questo capitolo trova riscontro in applicazioni di determinazione degli orientamenti per la verifica e la taratura di strumentazioni di bordo installate su velivoli quali elicotteri o aerei, che a fronte della più moderna strumentazione hanno sempre la "vecchia", costituita in particolare dalla bussola magnetica. L'approfondimento, reso attuale dalla necessità reale, comporta la taratura di aree o piazzuole in cui si determinano, in epoche prestabilite, la direzione del Nord Magnetico, variabile nel tempo, e la direzione del Nord Geografico, stabile nel tempo, la prima volta, quale riferimento per le variazioni del Nord magnetico. Si determina sempre, la prima volta, anche la posizione del centro di riferimento per le misure di direzione magnetica e geografica.

Il campo magnetico terrestre

La Terra è sede di un campo magnetico la cui origine è dovuta alla dinamica del ferro fluido presente nel nucleo esterno del pianeta. Il campo magnetico terrestre non si espande liberamente nello spazio interplanetario, ma è confinato dal vento solare entro una precisa regione di spazio che prende il nome di magnetosfera terrestre. Conseguenza dell'interazione tra il vento solare e la magnetosfera è la formazione di un complesso sistema di correnti magnetosferiche responsabili della generazione di campi magnetici secondari.



Figura, 16.01. A sinistra il nucleo terrestre; a destra i campi magnetici e la direzione dei poli

Il campo magnetico misurato sulla superficie del nostro pianeta è pertanto la sovrapposizione di campi di origine interna alla Terra, come quelli prodotti nel

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

nucleo, nella crosta terrestre, e campi di origine esterna, come quelli dovuti alle correnti elettriche che circolano nella ionosfera e nella magnetosfera.

La registrazione continua degli elementi del campo magnetico terrestre consente quindi da un lato, di comprendere le proprietà fondamentali del campo e, dall'altro, di studiare le diverse sorgenti all'origine del campo stesso.

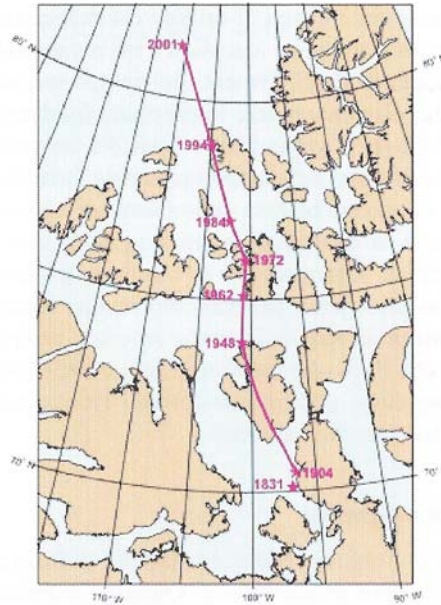
Quando si effettua la misura del campo magnetico terrestre in un determinato punto della superficie del nostro pianeta questa fornisce un valore che è il risultato della sovrapposizione di contributi aventi origine diversa. Questi contributi possono essere considerati separatamente e ciascuno di essi corrisponde ad un diverso campo: campo principale, generato nel nucleo fluido; campo crostale, generato dalle rocce magnetizzate della crosta terrestre; campo esterno, generato da correnti elettriche che fluiscono nella ionosfera e nella magnetosfera; campo d'induzione elettromagnetica, generato da correnti indotte nella crosta variabile nel tempo a seconda delle condizioni locali.

Geometria del campo magnetico

Per la sua geometria, il campo magnetico ha linee di forza entranti nella Terra nell'emisfero Nord e uscenti in quello Sud. Quindi, l'estremo libero di polarità Nord di un ago magnetico di una bussola tenderà a disporsi con l'estremità di polarità Nord verso il polo magnetico Sud della Terra (cioè, il Nord geografico). È comunque tradizione chiamare polo magnetico Nord semplicemente quello che si trova nell'emisfero Nord e, analogamente, polo magnetico Sud quello che si trova nell'emisfero Sud, in accordo con i corrispondenti poli geografici. I poli magnetici non sono statici e non sono coincidenti con quelli geografici e presentano un asse inclinato di 11,5 gradi sessadecimali rispetto all'asse di rotazione terrestre. Tuttavia non è stato sempre così, molte volte nella storia della Terra l'ago magnetico si è disposto in direzione opposta generando il fenomeno della inversione della polarità del campo magnetico principale.

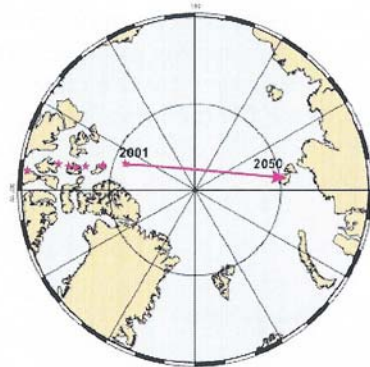
Il governo canadese ha effettuato molte misurazioni, che mostrano come il polo nord magnetico si muova in direzione nord-ovest. Durante il XX secolo si è mosso di 1100 km, e dal 1970 la sua velocità è cresciuta da 9 km all'anno a 41 km all'anno (media del 2001-2003). Se mantenesse la sua velocità e direzione presenti, raggiungerebbe la Siberia in circa 50 anni, ma ci si aspetta che devii dal suo corso presente e che rallenti.

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM



<i>Posizione Polo Magnetico Nord</i>		
Anni	Nord	Ovest Gr.
2001	81.3°	110.8°
2004	82.3°	113.4°
2005	82.7°	114.4°

Figura, 16.02. La posizione del Polo Magnetico dal 1831 al 2001(sopra) e negli ultimi anni (sotto)



Figura, 16.03. La previsione di spostamento dal 2001 al 2050

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

Questo lento movimento è sovrapposto ad un movimento giornaliero in cui il Nord magnetico descrive una ellisse, con uno spostamento massimo dalla sua posizione media di 80 km. Questo effetto è dovuto al disturbo causato dal Sole al campo geomagnetico e prende il nome di *variazione diurna* del campo magnetico.

Inversione del Campo magnetico

L'ipotesi che il campo magnetico terrestre non sia sempre stato orientato come è oggi e abbia invertito la propria polarità più volte nel corso della sua storia, ha trovato conferma solo intorno agli anni '60 a seguito di studi di paleomagnetismo condotti su campioni di roccia provenienti da fondi oceanici. Sebbene quello delle inversioni di polarità del campo geomagnetico sia uno dei più interessanti fenomeni geofisici, i meccanismi che avvengono nel nucleo terrestre e che sono responsabili di tali inversioni sono ancora poco conosciuti.

Le più recenti scale di polarità del campo geomagnetico mostrano che negli ultimi 166 milioni di anni sono avvenute più di 300 inversioni complete del campo. Infatti, è stato trovato che il verso della parte dipolare del campo geomagnetico si inverte in media ogni 300.000-1.000.000 di anni. L'intervallo di tempo tra una inversione e l'altra è molto variabile, può andare dai 40.000 ai 35.000.000 di anni e finora non sono state trovate periodicità o regolarità nel susseguirsi delle inversioni. Infatti, lunghi intervalli in cui il campo ha mantenuto la stessa polarità possono essere seguiti da brevi intervalli con polarità opposta.

L'unità di misura del campo geomagnetico nel Sistema Internazionale (SI) è il tesla (T), ma nella pratica viene usato un suo sottomultiplo, il nanotesla nT (10^{-9} T). Sulla superficie terrestre, il valore del campo varia in intensità, dall'equatore ai poli, da circa 20000 nT a 70000 nT.

Elementi del campo magnetico

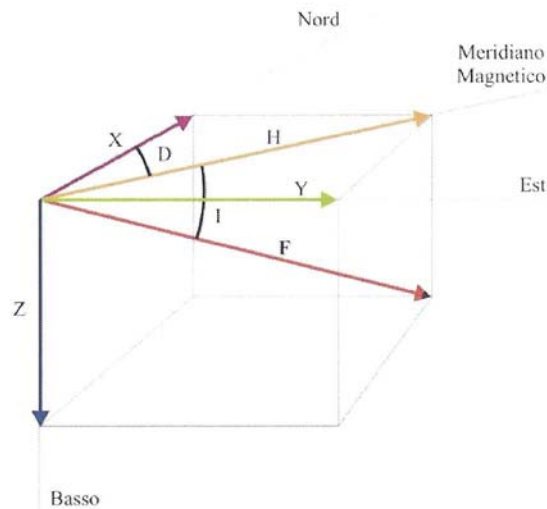
Il campo magnetico terrestre è un campo vettoriale rappresentato da un vettore, funzione del punto di osservazione e del tempo, generalmente indicato con **F**.

Introducendo una terna cartesiana riferita ad un piano locale rispetto alla zona di osservazione e con assi orientati come in *figura, 16.04* si definiscono i seguenti elementi magnetici:

- *X* componente del vettore nel piano orizzontale, diretta verso il Nord geografico
- *Y* componente del vettore nel piano orizzontale, diretta verso l'Est geografico
- *Z* componente verticale, positiva se è diretta verso l'interno della Terra
- *H* componente orizzontale totale

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

- F intensità totale del campo
- D declinazione magnetica
- I inclinazione magnetica



Figura, 16.04. Scomposizione secondo una terna cartesiana delle componenti della direzione magnetica

Un modo comune di descrivere il campo magnetico terrestre è quello di riportare su delle mappe i valori che gli elementi magnetici hanno sulla superficie terrestre. Si ottengono in questo modo le carte isomagnetiche, cioè mappe in cui punti di uguale intensità sono uniti attraverso delle linee chiuse. Il nome di queste carte varia ovviamente a seconda dell'elemento magnetico rappresentato, si parla di *carte isocline* nel caso in cui vengano riportati i valori dell'inclinazione I , di *carte isodinamiche* qualora sia tradotta in grafico una qualunque componente intensiva (X , Y , Z , H , F) del campo ed infine di carte isogone nel caso della declinazione D .

Variazioni del campo magnetico

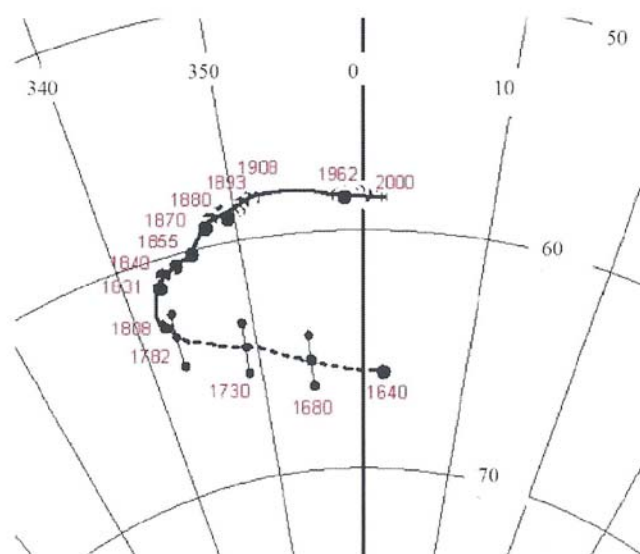
Il campo magnetico terrestre oltre ad avere una precisa struttura spaziale, definita principalmente dai contributi provenienti dal campo principale e da quello crostale, è anche sottoposto a continue variazioni temporali, sia di direzione che di intensità. Queste variazioni che possono essere di diversa natura, sono suddivise in due classi principali: variazioni a lungo e a breve termine.

Le prime, generalmente indicate con il nome di *variazione secolare*, sono dovute all'azione delle sorgenti profonde interne alla Terra, le stesse che genera-

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMIC E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

no il campo principale, e si verificano in periodi di tempo compresi tra pochi anni e qualche decina di migliaia di anni. L'ampiezza di queste variazioni, per un dato luogo di osservazione, oscilla tra pochi nT e qualche decina di nT all'anno per le componenti intensive (X , Y , Z , H e F) e da qualche primo a qualche decina di primi l'anno per l'inclinazione (I) e la declinazione (D).

Le seconde, *variazioni a breve termine*, sono di origine esterna al nostro pianeta e presentano tempi caratteristici della durata inferiore a qualche anno.



Figura, 16.05. Diagramma della variazione secolare per l'Italia centrale, riferita al valore della Declinazione magnetica dal 1640 al 2000

Carta Magnetica d'Italia

Una lunga tradizione di misurazioni magnetiche effettuate sul territorio permette all'Italia di vantare un ricco patrimonio di dati nell'ambito della definizione del campo magnetico nazionale. Le prime misure magnetiche documentate risalgono al 1640 e sono relative alla città di Roma. A partire dal 1932 la rete nazionale di misurazione del campo magnetico è stata gestita dall'Istituto Geografico Militare e successivamente anche con la collaborazione dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Ad oggi risulta essere pubblicata la Carta Magnetica d'Italia al 2005.0 con validità pari a cinque anni e quindi nel corso del 2011 dovrebbe uscire il nuovo prodotto. Per produrre la Carta del 2005.0 sono stati rilevati 110 capisaldi magnetici del primo ordine con una spaziatura media fra le stazioni intorno ai 58 km.

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM



Figura, 16.06. Rete Magnetica Italiana. Le croci indicano i capisaldi o stazioni di misura; i cerchi indicano gli osservatori e i rombi le stazioni temporanee. Le circonferenze indicano le aree di influenza, per la determinazione delle variazioni secolari del CMT

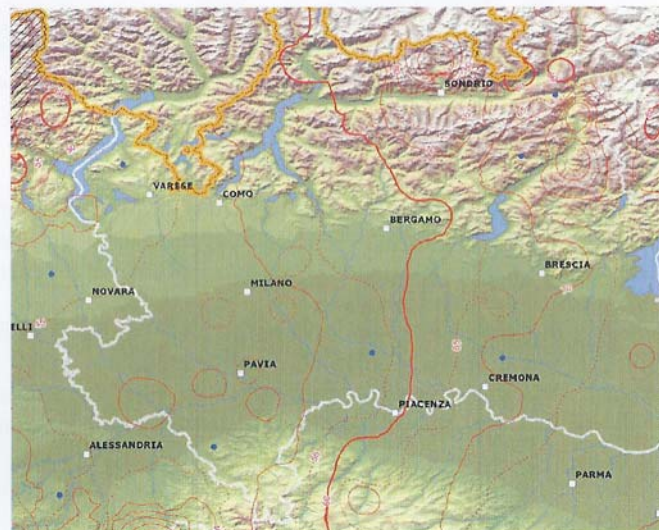
Le misurazioni sono state eseguite di norma in serie di 10, di cui 5 al mattino e 5 nel pomeriggio, lontano quindi dalla massima variazione diurna del campo magnetico, e ridotte successivamente alle ore 02_{UT} (Universal Time, ovvero tempo preso al meridiano di Greenwich), riferite al 1 Gennaio 2005. (2005.0).

Le carte prodotte forniscono i valori del Campo Totale al 2005.0 in nT, i valori della componente Verticale al 2005.0, i valori della componente Orizzontale al 2005.0 e la carta della Declinazione con la rappresentazione delle Isogone al 2005.0 e le linee di variazione annuale per il calcolo della declinazione in epoca successiva.

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMIC E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM



Figura, 16.07. Carta Magnetica d'Italia. Declinazione e isogone al 2005.0



Figura, 16.08. Carta Magnetica d'Italia. Declinazione e isogone al 2005.0 – particolare dell'Italia settentrionale

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO. I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

Alla tradizionale consultazione cartacea, IGM e INGV hanno allegato un nuovo software di consultazione dei dati magnetici che nel periodo di validità (dal 2005.0 al 2010.365) fornisce puntualmente il risultato richiesto.

In questo caso, preimpostata la data dell'osservazione è possibile in forma grafica collocarsi sul punto di osservazione ed ottenere i valori ricercati, o in alternativa, avendo a disposizione le coordinate del punto di osservazione ottenerle in modo puntuale.



Figura, 16.09. Software INGV e IGM per la consultazione della Carta Magnetica d'Italia

Misure di determinazione del nord magnetico

L'operazione di orientamento al Nord Magnetico (Nm) deve essere realizzata mediante l'impiego di un teodolite apposito e, per alcune parti, mediante una stazione totale (meglio se motorizzata) per il trasporto dell'azimut magnetico e per la determinazione di coordinate di punti.

La strumentazione utilizzata nella applicazione di cui si scrive è costituita dal teodolite Wild T0, che si presenta come un normale teodolite, quindi dotato di tutti quei dispositivi per una corretta lettura degli angoli direzioni zenitali e direzioni azimutali, ma con il cerchio orizzontale graduato libero di orientarsi verso il Nord magnetico perché con lo zero della gradazione magnetizzato. Dopo le normali operazioni di messa in stazione dello strumento il cerchio graduato orizzontale viene sbloccato mediante un dispositivo e lasciato libero di orientarsi; dopo alcuni istanti, raggiunta la posizione di quiete si possono effettuare le misure di direzione azimutale con origine delle letture posta nella direzione del Nord

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMIC E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

magnetico. Questo strumento permette la determinazione della direzione del Nm con un e.q.m. teorico dell'ordine di 5', corrispondenti a 0.09° .



Figura, 16.10. Wild T0 – Teodolite magnetico e piazzuola di calibrazione

Ovviamente, le misure e quindi l'impiego dello strumento, forniscono dei valori corretti con quella incertezza solamente se la zona interessata dal rilievo non è influenzata da campi magnetici naturali o artificiali di tipo locale.

Al fine di verificare la presenza di anomalie magnetiche e quindi fornire dati attendibili occorre adottare la procedura descritta successivamente.

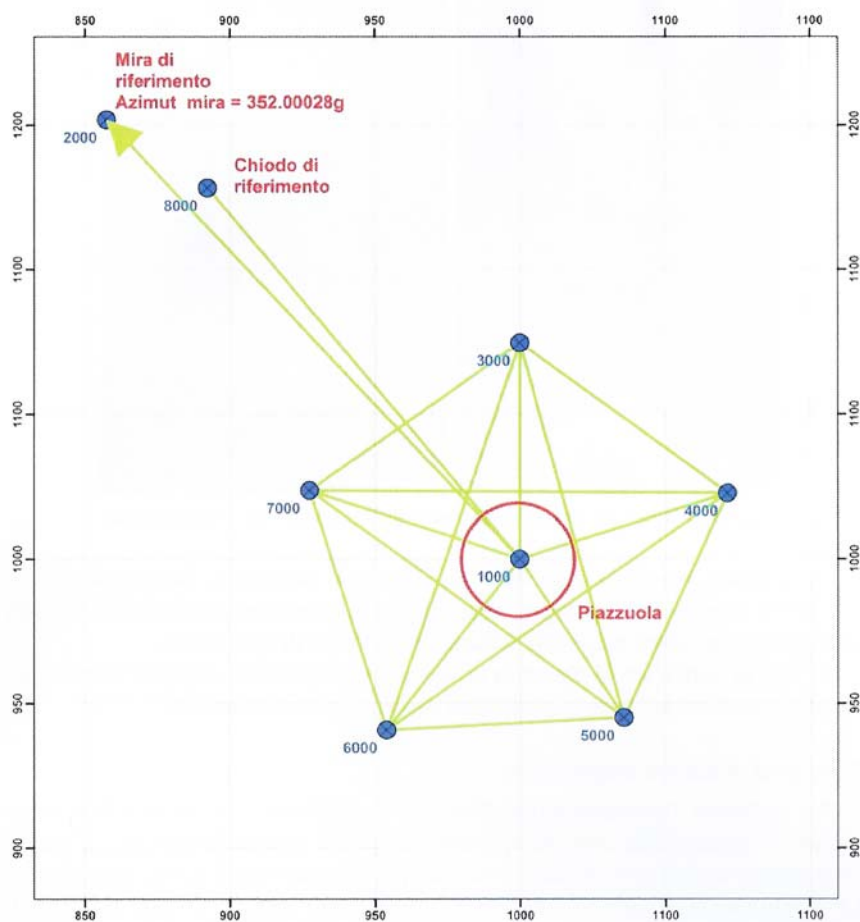
Operazioni di misura magnetiche

Per verificare l'attendibilità dei dati si deve effettuare una verifica del campo magnetico intorno alla zona di interesse per punti, valutando misure di azimut magnetico in andata e in ritorno da ciascun punto osservato. La procedura adottata è perciò quella di fare più stazioni e verificare, a coppie la costanza d'azimut. Nel caso analizzato definita come 1000 la stazione che individua il centro della piazzuola di taratura in cui è posta una piattaforma girevole si è materializzata una rete di 5 punti disposti a stella rispetto al centro e su ciascuno sono state effettuate stazioni d'azimut magnetico.

La stazione 2000 è il riferimento permanente per gli orientamenti costituito da una targa di identificazione posta su un manufatto considerato stabile nel tempo. È opportuno materializzare un riferimento permanente che fornisca l'azimut astronomico invariante rispetto a quello magnetico. I rimanenti vertici dal 3000 al 7000 sono posti a raggiera ad una distanza significativa dal centro

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

della piazzuola che varia da 50 a 100 m; l'ultimo vertice 8000 è un riferimento permanente ausiliario presente nell'area del campo di volo e costituito da un chiodo a terra.



Figura, 16.11. Carta Schema della rete di controllo del campo magnetico locale

Generalmente, in zone non anomale e prive di disturbi magnetici, gli azimut magnetici di due punti appartenenti al medesimo segmento differiscono di 200^g , a meno delle incertezze di misura proprie dello strumento e della convergenza del meridiano magnetico trascurabile nei casi in questione. In questo modo si definisce il “campo magnetico principale”, inteso come il campo generato all’interno della Terra, nel nucleo, responsabile della variazione secolare, come prece-

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMIC E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

dentemente illustrato. Se ciò non succede le cause sono dovute alla presenza di disturbi non apparenti che generano anomalie magnetiche crostali.

In definitiva le osservazioni realizzate sono 7 dalla stazione 1000 e 5 per ciascuna stazione successiva (ad esclusione delle mire di riferimento 2000 e 8000 in cui il teodolite Wild T0 non fa stazione): complessivamente si sono realizzate 15 coppie di valore d'azimut reciproco (misure in andata e in ritorno).

Misure magnetiche					Tab. 1
Strumento Wild T0		Azimut magnetico			
Stazione	Punto collimato	Sx	Dx	Media	
1000 ore 10.50	2000	350,3080	150,3030	350,3055	
	3000	398,2000	198,2000	398,2000	
	4000	78,6850	278,6050	78,6450	
	5000	161,5560	361,5030	161,5295	
	6000	240,4570	40,5520	240,5045	
	7000	318,2400	118,2850	318,2625	
	8000	353,7030	153,7200	353,7115	
3000	1000	198,2150	398,2220	198,2185	
	4000	138,2240	338,2420	138,2330	
	5000	181,0030	381,0030	181,0030	
	6000	219,3170	19,3490	219,3330	
	7000	259,1270	59,1270	259,1270	
4000	1000	278,5570	78,5610	278,5590	
	3000	337,9800	137,9990	337,9895	
	5000	225,5460	25,5830	225,5645	
	6000	259,3380	59,3660	259,3520	
	7000	298,4370	98,4570	298,4470	
5000	1000	360,2400	160,2520	360,2460	
	3000	379,7880	179,7870	379,7875	
	4000	24,5670	224,5500	24,5585	
	6000	293,8630	93,8350	293,8490	
	7000	337,0430	137,0850	337,0640	
6000 ore 12.00	1000	40,0700	240,1040	40,0870	
	3000	19,1330	219,1460	19,1395	
	4000	59,3070	259,3060	59,3065	
	5000	94,7500	294,7530	94,7515	
	7000	378,3100	178,3860	378,3480	
7000 ore 12.40	1000	118,2070	318,2020	118,2045	
	3000	58,9720	258,9840	58,9780	
	4000	98,5700	298,5700	98,5700	
	5000	138,1190	338,1180	138,1185	
	6000	178,4610	378,4630	178,4620	
Note	Misure eseguite il giorno 22 novembre tra le ore 10,50 e le 12,40				

Tab. 16.1

Misure magnetiche						Tab. 2
Strumento Wild T0		Azimut magnetico				
Stazione	Punto collimato	Andata	Ritorno	scarto	Anomalia	
1000	2000	350,3055				
	3000	398,2000	198,2185	199,9815	0,02	
	4000	78,6450	278,5590	200,0860	-0,09	
	5000	161,5295	360,2460	201,2835	*** -1,28	
	6000	240,5045	40,0870	200,4175	** -0,42	
	7000	318,2625	118,2045	200,0580	-0,06	
	8000	353,7115				
	1000	198,2185	398,2000	200,0185	-0,02	
	4000	138,2330	337,9895	200,2435	** -0,24	
	5000	181,0030	379,7875	201,2155	*** -1,22	
	6000	219,3330	19,1395	200,1935	** -0,19	
	7000	259,1270	58,9780	200,1490	* -0,15	
	1000	278,5590	78,6450	199,9140	0,09	
	3000	337,9895	138,2333	199,6662	** 0,33	
	5000	225,5645	24,5585	201,0060	*** -1,01	
6000	259,3520	59,3065	200,0455	-0,05		
7000	298,4470	98,5700	199,8770	* 0,12		
1000	360,2460	161,5295	198,7165	*** 1,28		
3000	379,7875	181,0030	198,7845	*** -1,22		
4000	24,5585	225,5645	198,9940	*** -1,01		
5000	293,8490	94,7515	199,0975	*** 0,90		
6000	337,0640	138,1185	198,9455	*** 1,05		
1000	40,0870	240,5045	199,5825	** 0,42		
3000	19,1395	219,3330	199,8065	** 0,19		
4000	59,3065	259,3520	199,9545	0,05		
5000	94,7515	293,8490	200,9025	*** -0,90		
6000	378,3480	178,4620	199,8860	* 0,11		
7000	118,2045	318,2625	199,9420	0,06		
1000	58,9780	259,1270	199,8510	* 0,15		
3000	98,5700	298,4470	200,1230	* -0,12		
4000	138,1185	337,0640	201,0545	*** -1,05		
5000	178,4620	378,3480	200,1140	* -0,11		
Note	Misure eseguite il giorno 22 novembre tra le ore 10,50 e le 12,40					

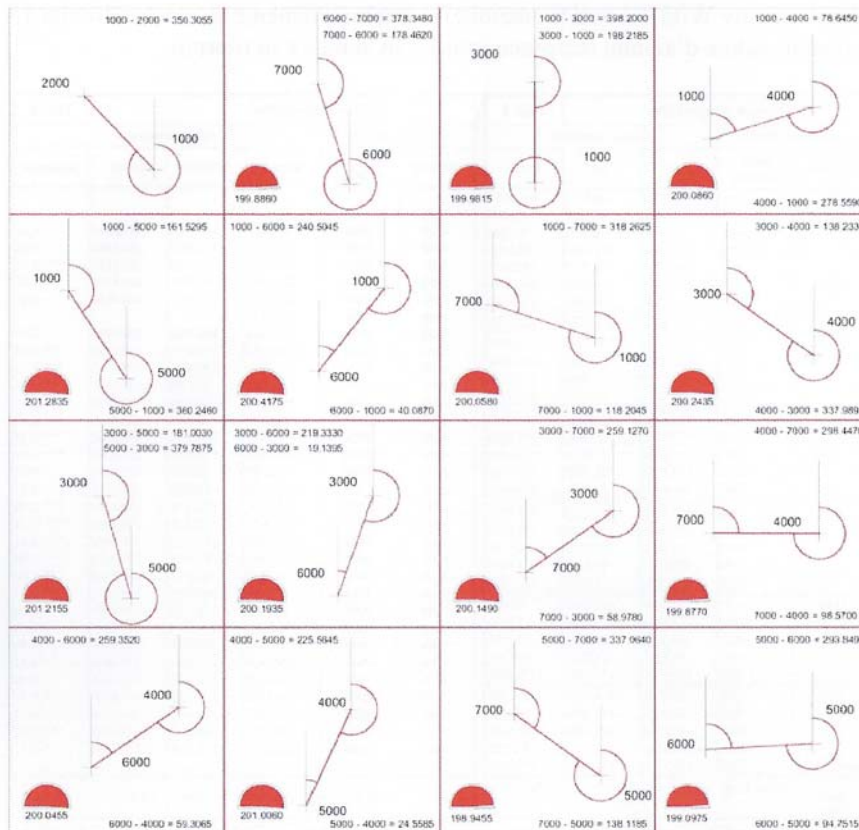
Tab. 16.2

Nella **Tab. 16.1** compaiono le medie coniugate delle misure nella posizione di lettura sinistra e destra; nella **Tab. 16.2** compaiono le misure in andata e in ritorno delle coppie reciproche. Dalla analisi della Tab. 2 si vede che tra le coppie di valori d'azimut misurate, i valori di anomalia privi di asterisco sono inferiori alle tolleranze strumentali (5' o 0.09^g), quelli contenuti nell'intervallo 5'-10' (0.09-0.185^g) presentano un asterisco, sino a 25' (0.45^g) presentano due asterischi e tre asterischi per i valori eccedenti. Le variazioni anomale si determinano sottraendo alla colonna di scarto fra andata e ritorno, il valore 200^g.

In particolare si evince la presenza di un campo anomalo di osservazione in corrispondenza del vertice 5000, in cui i valori di anomalia sono superiori a 1^g,

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

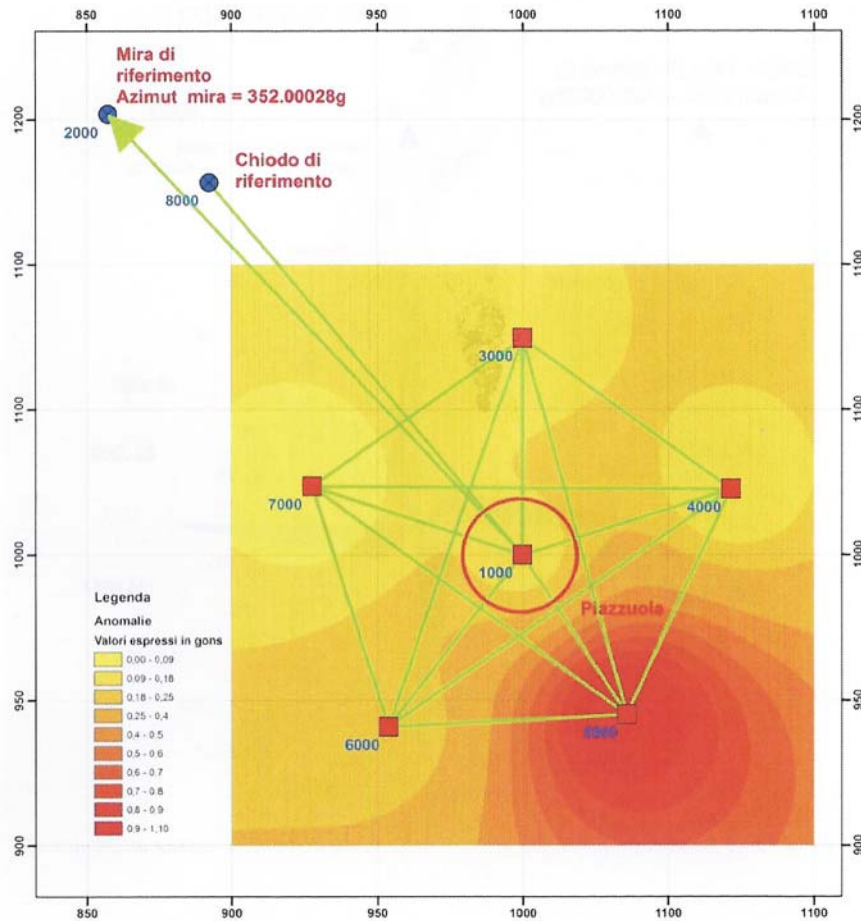
mentre nel vertice 6000 tali valori non superano il limite dei 25'. Per le altre osservazioni, effettuate sulla piazzuola, il valore del campo magnetico sembra assumere un "comportamento normale" anche se con valori limite di 10'.



Figura, 16.12. Schema dei collegamenti d'azimut reciproci necessari alla verifica del campo magnetico locale

L'immagine che segue rappresenta in forma continua (superficie delle anomalie) il campo magnetico espresso in funzione delle anomalie evidenziate sui vertici. Nell'elaborazione della superficie raster è stato utilizzato come parametro il dato dell'anomalia media per ogni vertice osservato, ad eccezione dei valori relativi del vertice anomalo 5000 che nelle osservazioni di ritorno dagli altri vertici sono stati eliminati.

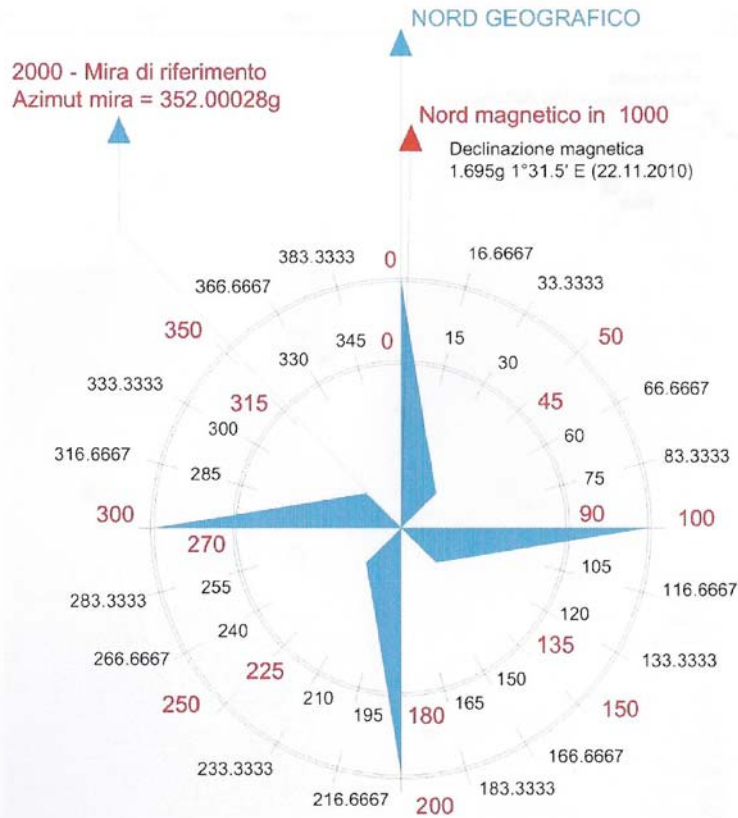
LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMIC E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM



Figura, 16.13. Anomalie magnetiche nella zona della piazzuola

Si ritiene quindi che il campo magnetico determinato nella piazzuola risulti normale, ad esclusione della zona relativa al vertice 5000 e, pertanto, si riporta la situazione conclusiva con il tracciamento della rosa dei venti di 15° in 15°, oltre alle direzioni in rosso del Nord Magnetico, in blu del nord Geografico e dell'azimut geografico della mira di riferimento, dedotti dalle misure di posizionamento astronomico descritte nei successivi paragrafi.

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM



Figura, 16.14. Rosa dei venti magnetica con indicazione della declinazione magnetica al 22.11.2010

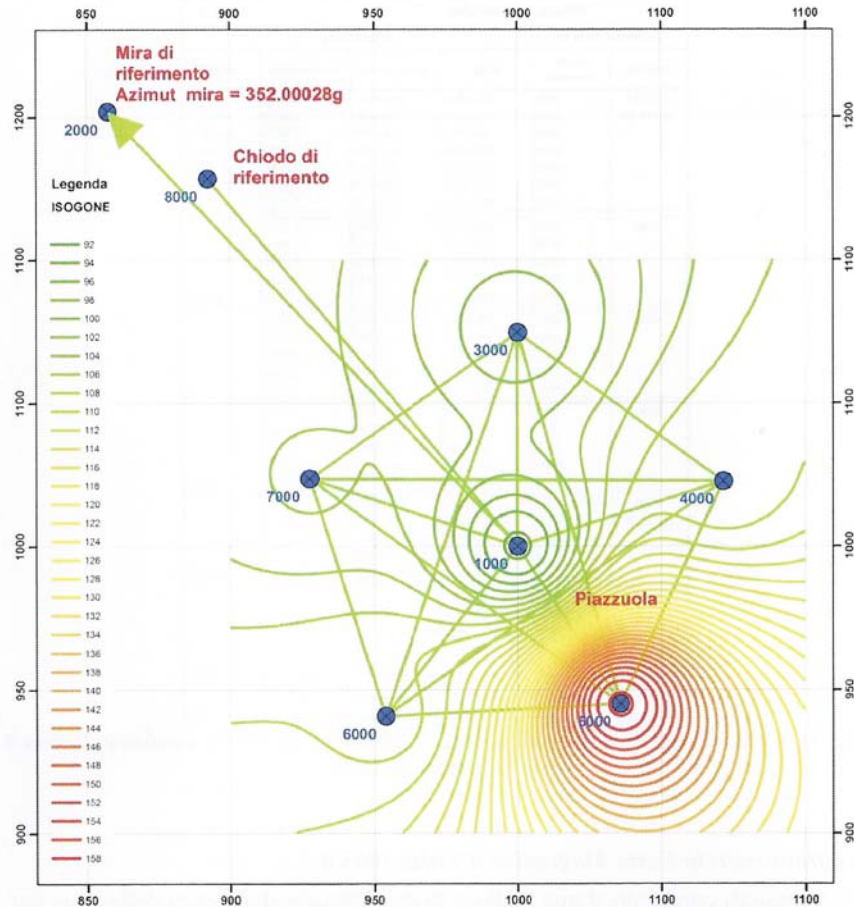
Carta magnetica locale

La declinazione magnetica nel punto 1000 centro della piazzuola, dato l'azimut magnetico alla mira 2000 di 350.3055^g e l'azimut astronomico della stessa di 352.00028^g , diventa pertanto:

$$\text{Declinazione magnetica}_{1000} = 352.00028 - 350.30550 = 1.695^g = 1^\circ 31.5' \text{ Est}$$

Per determinare la variabilità del campo magnetico in prossimità della piazzuola di taratura con continuità si interpolano le declinazioni magnetiche determinate in ciascuna stazione generando una rappresentazione del campo tramite isogone magnetiche.

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM



Figura, 16.15. Carta magnetica locale. Interpolazione lineare delle isogone riferite al centro della piazzuola: in particolare si vede come la zona presenti un andamento delle isogone molto diradato con variazione contenuta nell'intervallo di $\pm 5'$ (intervallo 92-102'), mentre nel vertice 5000 sia evidente l'anomalia con un valore che supera 1° sessagesimale (dal valore medio di $95'$ si passa al limite superiore di $158'$ con una variazione di $1^\circ 3'$)

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

Misure magnetiche					Tab. 3
Strumento Wild T0		Azimut (grad)			
Stazione	Punto collimato	Rete	Magnetico	Declinazione	Media
1000 ore 10.50	2000	352,0003	350,3055	1,6948	Valore predefinito in 1000 1,695
	3000	0,0008	398,2000	1,8008	
	4000	80,5003	78,6450	1,8553	
	5000	163,2000	161,5295	1,6705	
	6000	242,0925	240,5045	1,5880	
	7000	320,0817	318,2625	1,8192	
	8000	355,5736	353,7115	1,8621	
3000	1000	200,0008	198,2185	1,7823	1,7878
	4000	140,0238	138,2330	1,7908	
	5000	182,8295	181,0030	1,8265	
	6000	221,0867	219,3330	1,7537	
	7000	260,9128	259,1270	1,7858	
4000	1000	280,5003	278,5590	1,9412	1,9721
	3000	340,0238	337,9895	2,0343	
	5000	277,4961	225,5645	1,9316	
	6000	261,3118	259,3520	1,9598	
	7000	300,4408	298,4470	1,9938	
5000	1000	363,2000	360,2460	2,9540	2,9380
	3000	382,8295	379,7875	3,0420	
	4000	27,4961	24,5585	2,9376	
	6000	296,7059	293,8490	2,8569	
	7000	339,9636	337,0640	2,8996	
6000 ore 12.00	1000	42,0925	40,0870	2,0055	1,9835
	3000	21,0867	19,1395	1,9472	
	4000	61,3118	59,3065	2,0053	
	5000	96,7059	94,7515	1,9544	
	7000	380,3531	378,3480	2,0051	
7000 ore 12.40	1000	120,0817	118,2045	1,8772	1,8838
	3000	60,9128	58,9780	1,9348	
	4000	100,4408	98,5700	1,8708	
	5000	139,9636	138,1185	1,8451	
	6000	180,3531	178,4620	1,8911	
Note	Misure eseguite il giorno 22 novembre tra le ore 10,50 e le 12,40				

Tab. 16.3. Valore della declinazione magnetica nelle varie stazioni di acquisizione. Si nota il vertice anomalo 5000.

Confronto con la Carta Magnetica d'Italia 2005.0

A titolo di confronto si può dedurre la declinazione magnetica della zona partendo da osservazioni generali e da deduzioni effettuate tramite la carta Magnetica d'Italia pubblicata dall'INGV e l'IGM con data di riferimento al 2005. In generale si verifica se la zona studiata ricade in zona magnetica normale o in una zona in presenza di anomalia dove la declinazione varia da punto a punto e pertanto si deve rilevare con le misure sperimentali sopra descritte. Nel caso analizzato la piazzuola ricade in un campo normale in cui si deduce un valore di Declinazione Magnetica intorno a 0° 58' Est al 2005.0.

Dato che le osservazioni sono state effettuate in data 22.11.2010 occorre considerare la componente di variazione secolare. Sempre per la zona in oggetto la linea di uguale variazione secolare corrisponde a 5.8' di declinazione orientale e pertanto quella calcolata risulta di $5.8' \times 5 \text{ anni} = 29'$ Est per cinque anni (2005.0-2009.365) oltre a 5.8' Est per 0.8932 anni (dal 1.1.2010 al 22.11.10, giorni 326 su 365) corrispondenti a 5.2' che aggiunta al valore precedente forni-

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

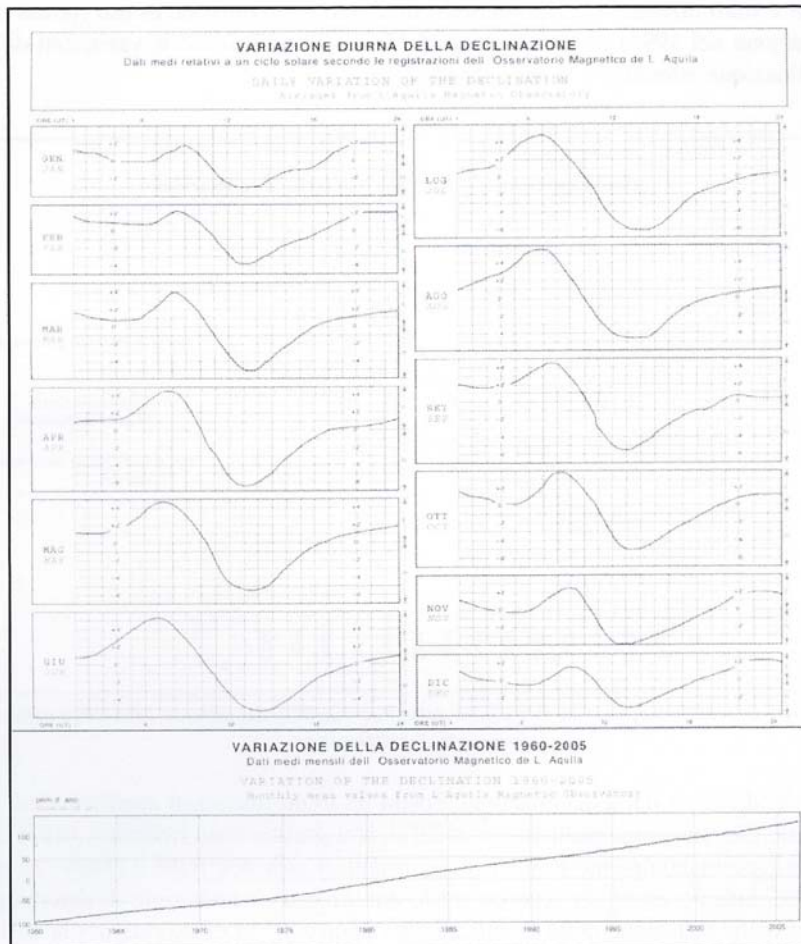
sce un valore al 22.11.2010 di 34.2' Est della componente secolare della declinazione magnetica.

Sommando a questo valore quella al 2005.0 pari a 0° 58' Est si ottiene il valore di

$$\text{Declinazione magnetica}_{1000 \text{ Carta Magnetica}} = 0^\circ 58' + 0^\circ 34.2' = 1^\circ 32.2' \text{ Est} = 1.710^\circ \text{ Est}$$

Utilizzando il software fornito direttamente dall'INGV e dall'IGM, si ottiene un valore di declinazione magnetica puntuale, a partire dalle coordinate geografiche del caposaldo 1000 della piazzuola, pari a:

$$\text{Declinazione magnetica}_{1000 \text{ Software INGV/IGM}} = 1^\circ 29.95' \text{ Est} = 1.677^\circ \text{ Est}$$



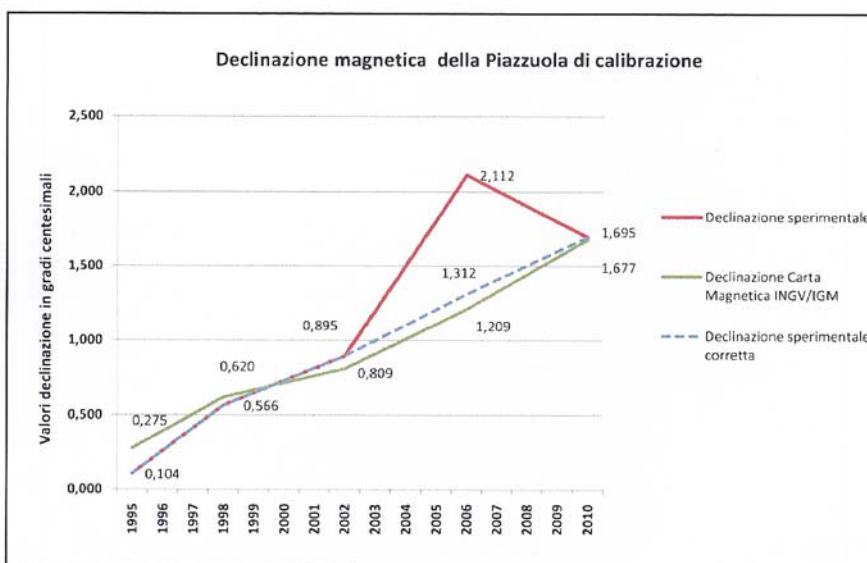
Figura, 16.16. Grafico della variazione diurna

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

Si vede dunque che estrapolando i dati dalla carta risalenti al 2005.0, esiste un buon accordo col dato sperimentale. La differenza, inferiore ai 5' fra i valori calcolati dalla carta o dal software con le relative incertezze e il valore misurato, non è significativa, tenuto altresì conto della variabilità diurna della declinazione stessa. In effetti, le misure sperimentali sono state realizzate tra le ore 10.50 e le 12.40 del giorno 22 novembre 2010 con una variazione dell'arco diurno riportata negli schemi della carta IGM pari a 1.0' Est alle ore 10.30 e -4.0' Ovest alle ore 12.30.

Confronto tra le serie storiche dal 1995 al 2010

Lo studio della variazione della declinazione magnetica nella piazzuola illustrata è stato effettuato per un periodo di tempo relativamente esteso (prima osservazione nel 1995) e nella *figura, 16.17* vengono illustrate le variazioni della Declinazione ottenute nella serie storica.



Figura, 16.17. Grafico delle variazioni della Declinazione nel periodo 1995-2010 della piazzuola di calibrazione

L'andamento della declinazione mostra un trend lineare in accrescimento orientale (Declinazione positiva verso EST). Nel grafico sono riportati i valori osservati sperimentalmente e quelli desunti dalla Carta dell'IGM e INGV. Come risulta evidente esiste un accordo tra le due diverse metodologie di determinazione della variazione della Declinazione magnetica, ad eccezione per le osservazioni relative all'anno 2006. In tale occasione le osservazioni furono ripetute

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

in due serie di misure non correlate (a circa 6 mesi di distanza) e i dati anomali furono confermati. L'anomala osservazione locale in quell'anno fu attribuita a nuove installazioni elettromagnetiche che influenzarono ed influenzano tuttora la piazzuola di calibrazione e l'area nel suo intorno. All'epoca furono fatte delle considerazioni sul campo magnetico medio presente nell'area che fissarono un valore di Declinazione magnetica interpolato il cui andamento è visibile nel grafico con la curva tratteggiata. Nel corso delle osservazioni più recenti (2010) tali valori sembrano essere rientrati in un campo magnetico normale, ad eccezione del caposaldo 5000, come sopra descritto.

Misure di determinazione del nord geografico

La determinazione dell'orientamento al Nord Geografico (NG) si esegue utilizzando un teodolite del primo ordine e un normale cronometro regolato su un segnale orario campione, facendo una serie di osservazioni alla Stella Polare (*Alfa Ursae Minoris*). È relativamente semplice poi, conoscendo le effemeridi della stessa, calcolare il suo azimut a quel dato istante e quindi riferire le osservazioni azimutali alla direzione meridiana. È solitamente conveniente, sia per la semplicità di osservazione, sia di calcoli preventivi e successivi alle osservazioni, riferirsi alla sola Polare e non anche ad altre stelle circumpolari. La motivazione è data dalla possibilità di ottenere precisioni elevate dell'ordine di qualche secondo sessagesimale tollerando l'osservazione alla Polare anche errori di qualche secondo nella misura del tempo.

Determinazione della posizione del punto di stazione²¹

Utilizzando la stella polare per la determinazione del NG non è necessaria una elevata precisione nella conoscenza del punto di stazione. Nella fattispecie si è ricorsi ad un rilievo GPS, confrontando i valori con un rilievo topografico tradizionale appoggiato a quattro vertici trigonometrici IGM.

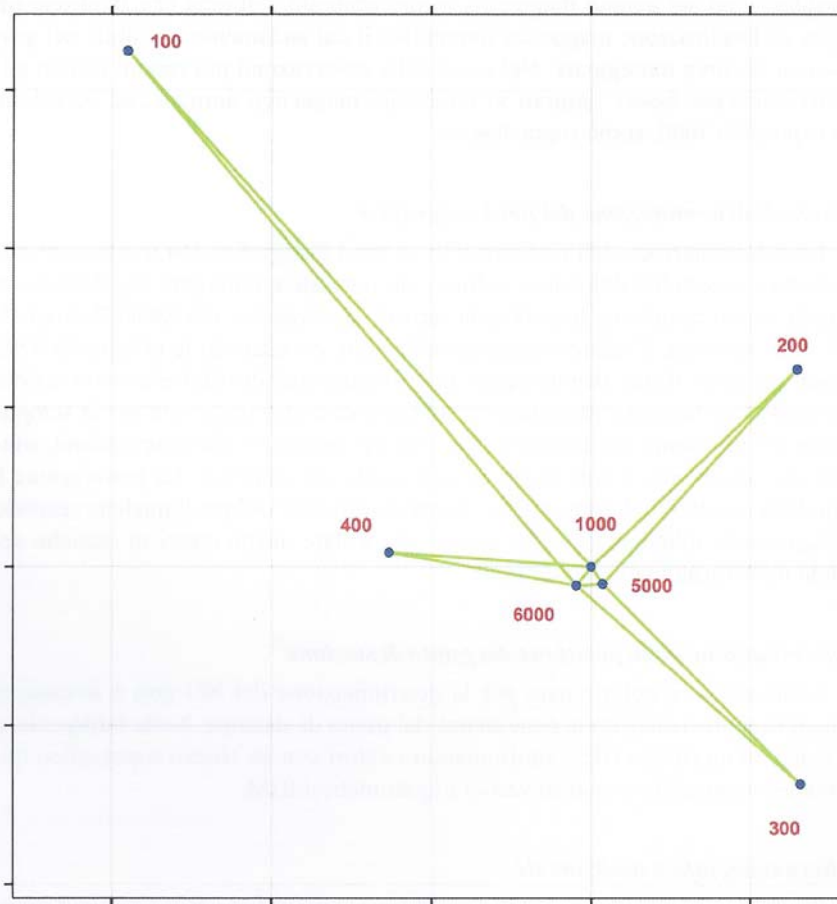
Rilievo topografico tradizionale

A titolo di confronto si è determinata la posizione della stazione 1000 effettuando un rilevamento topografico tradizionale, mediante la realizzazione di una piccola rete locale collegata ai vertici ufficiali visibili dalla stazione 1000 centro della piazzuola. Più precisamente la metodologia è stata la realizzazione di un triangolo avente i vertici coincidenti con i punti 1000, 5000 e 6000 e da questi

²¹ Le applicazioni numeriche successive consistono in una dimostrazione del metodo utilizzato, in cui i dati di posizione reali del lavoro sono stati modificati volontariamente poiché l'area di intervento ricade in una zona militare. Pertanto nella trattazione sono illustrati i dati ottenuti in sede di rilievo, previo filtraggio delle coordinate.

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

sono stati collimati quattro vertici trigonometrici denominati vertice 100, 200, 300 e 400 disposti a raggiera intorno alla piazzuola. La strumentazione usata è stata la stazione totale Leica TCA 2003 con i relativi accessori.



Figura, 16.18. Rete di inquadramento topografico

Nella *figura, 16.18* è visibile la posizione di tutti i punti con il reticolo chilometrico. La geometria dell'autodeterminazione è quindi una rete planimetrica costituita da un triangolo orientato attraverso una intersezione inversa a quattro vertici di coordinate note. La rete misurata è stata compensata con programma rigoroso ai minimi quadrati, tenendo fissi i punti 100, 200, 300 e 400 (i trigonometrici) e lasciando liberi gli altri (1000, 5000 e 6000).

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

Le coordinate del centro della piazzuola risultano pertanto, nel sistema cartografico nazionale Gauss-Boaga, rispettivamente:

Coordinate vertice 1000

$$E = 2574717.12 \text{ m} \pm 0.13 \text{ m}$$

$$N = 5058189.57 \text{ m} \pm 0.05 \text{ m}$$

Rilievo topografico GPS

La determinazione della posizione della stazione 1000 fu effettuata, mediante il rilievo topografico GPS in modalità statica della *baseline* formata dal vertice della piazzuola e un vertice appartenente alla rete GPS IGM95, nella sessione di misura di calibrazione della piazzuola nel 2002. Per il rilievo GPS è stata utilizzata una coppia di ricevitori a doppia frequenza con una sessione di misura estesa a 40' in quanto la lunghezza della base è di circa 5.5 km. Utilizzando i parametri associati alla monografia del Vertice IGM, desunti attraverso l'acquisto del grigliato di trasformazione da utilizzare mediante il software Verto dell'IGM, si è pervenuti alla posizione del vertice 1000.

Coordinate GPS del vertice 1000

$$E = 2574717.39 \text{ m} \pm 0.03 \text{ m}$$

$$N = 5058189.49 \text{ m} \pm 0.03 \text{ m}$$

La differenza di coordinate all'epoca della loro determinazione ($\Delta E = 0.27 \text{ m}$ e $\Delta N = 0.08 \text{ m}$) desunte tra le due differenti metodologie è da imputare alle incertezze proprie dei vertici trigonometrici. Tuttavia, vista la precisione richiesta per il calcolo dell'orientamento del NG relativa alla posizione della stazione di $\pm 1 \text{ m}$, si decise di operare con una media delle coordinate.

Pertanto la posizione media del vertice 1000 fu definita in:

Cartografiche $E = 2574717.25 \text{ m}$ $N = 5050189.53 \text{ m}$

Geografiche $\lambda = 3^\circ 15' 00''.609 \text{ EMM}$ $\varphi = 45^\circ 40' 27''.266$

$\lambda = 15^\circ 42' 09''.009 \text{ EGr}$

Misure alla stella polare (Alfa Ursae Polaris)

Per la determinazione dell'orientamento astronomico alla stella Polare occorre considerare il giorno di misurazione, l'ora solare in cui avviene ogni singola osservazione e i dati delle effemeridi della stessa. Nel giorno 18.09.2002 è stato fatto l'orientamento alla Polare utilizzando il teodolite Leica TCA2003 munito di oculare spezzato per la collimazione della stella. Le informazioni relative alle

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

effemeridi della stella sono state tratte dal catalogo stellare FK5²² (pubblicato annualmente) per il 2002 dal quale i deducono i valori delle effemeridi dell'Ascensione Retta (AR) e della Declinazione (Dec) per la Stella Polare, oltre al Tempo sidereo di Greenwich a 0 ore di Tempo Universale (TU).

Nel caso pratico per la stella Polare (N. 907 nel catalogo FK5) si ha:

AR (Ascensione Retta)	= 2 ^h 35 ^m 30.336 ^s
Dec (Declinazione)	= 89° 16' 17.861"
TSG - 0 TU (Tempo Sidereo di Greenwich 0 ore di Tempo Universale)	= 23 ^h 46 ^m 58.640 ^s

Occorre inoltre specificare che il territorio italiano si trova a 1h di fuso da Greenwich e che il giorno di misura aveva 1h legale.

La soluzione del triangolo fondamentale di posizione utilizzando le relazioni che legano angoli e lati fornisce l'angolo di cui è spostata la Polare rispetto al meridiano del luogo all'istante dell'osservazione. Nella *figura, 16.19* che segue è evidenziato questo triangolo nei due casi possibili di stella a Est o a Ovest dell'osservatore con indicata la traccia del polo nord terrestre sulla sfera celeste (P) la posizione apparente della stella (S), la declinazione della stella (δ), l'azimut (α), la latitudine del luogo di osservazione (φ) l'angolo orario (p) e la distanza zenitale della stella (s).

La relazione che lega le quantità in gioco è:

$$\cotg(\alpha) = \frac{\cos(\varphi) \cdot \operatorname{tg}(\delta) - \operatorname{sen}(\varphi) \cdot \cos(p)}{\operatorname{sen}(p)} \quad (1)$$

dove l'unico elemento da calcolare è l'angolo orario p dell'astro per ogni osservazione.

La prassi operativa consiste perciò nel porre in stazione il teodolite, che deve essere del primo ordine, curando in modo particolare la messa in verticale del suo asse primario. Quindi si osserva la Polare e, quando questa taglia il filo verticale del reticolo del cannocchiale in prossimità del suo centro, si prende il tempo e si esegue la lettura sul cerchio orizzontale del teodolite.

Occorre pertanto avere un normale cronometro regolato su un segnale orario campione, quale ad esempio, quello trasmesso dalla stazione DCF77²³, gestita dal Physikalisch-Technische Bundesanstalt, largamente usato in Italia.

Dopo la lettura al cerchio si ruota lo strumento nella seconda posizione e si

²² Catalogo FK5 – Apparent Places of Fundamental Stars, Heidelberg, Astronomisches Rechen - Institut, dal sito www.ari.uni-heidelberg.de – Sezione database.

²³ La sigla DCF77 significa D = Deutschland, C = segnale ad onde lunghe, F = Francoforte, 77 = Frequenza di 77,5 kHz. Il riferimento temporale è mantenuto con un orologio atomico e diffuso da Mainflingen, a circa 25 km di distanza da Francoforte. Il segnale è ricevibile da una distanza di 2000 km. Sono usati due trasmettitori da 50 kW indipendenti in modo da garantire la continuità del servizio.

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

ripete la lettura alla stella e al cerchio prendendo il tempo. La lettura coniugata è fondamentale per annullare gli effetti degli errori strumentali di collimazione e inclinazione dell'asse secondario rilevanti con visuali così inclinate (circa 45° sopra l'orizzonte).

Di seguito si illustra il procedimento usato per il calcolo dell'angolo orario p nel caso della prima osservazione angolare alla Polare con le coordinate modificate (cfr. nota 21).

Tempo rilevato: 22^h 40^m 33^s

Correzione del tempo: -2 h (una per il fuso orario e una per l'ora legale)

Tempo rilevato corretto e lettura alla Polare col cerchio in I posizione:

$$t_1 = 20^h 40^m 33^s \qquad \text{Lett. } I = 1^{\text{E}}.15333$$

Si trasforma il tempo in frazione centesimale.

$$t_1 = 20^h,67583 \text{ TU}$$

Si corregge il tempo così trovato per la frazione di giorno corrispondente al passaggio dal tempo solare medio al tempo siderale. Si può ricavare da apposite tavole di conversione, oppure dalla relazione:

$$\Theta = \frac{24^h 03^m 56.555^s}{24^h}$$

dove al numeratore c'è il valore del giorno solare medio espresso in unità di giorno siderale.

Il tempo corretto di Θ risulta pertanto 20^h.73244. Il tempo sidereo di Greenwich TSG a 0 ore di TU valeva per il 18.09.2002: 23^h 46^m 58.640^s corrispondenti a 23^h.782956.

La longitudine della stazione vale 3° 15' 00.609" EMM mentre la longitudine di MM vale 12° 27' 08.400" EGr.

La longitudine del punto 1000 vale perciò 15° 42' 09.009" EGr, corrispondenti a 1^h 02^m 48.600^s EGr, ovvero 1^h.0468335.

La somma del tempo t_1 corretto di Θ , del TSG e della longitudine fornisce un valore di 45^h.5622309 cui vanno tolte 24^h per ottenere il tempo sidereo locale (TSL) di 21^h.5622309.

Togliendo al TSL l'Ascensione Retta AR 2^h 35^m 30.336^s corrispondente a 2^h.59176 desunta dalle tavole per il 18.09.2002, si ottiene l'angolo orario p . Nel caso in esame risulta:

$$p = 18^h.9704709 = 284^{\circ}.5570629 = 284^{\circ} 33' 25''.426$$

Applicando la formula (1) si ottiene l'angolo cui è deviata la Polare rispetto al meridiano locale:

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

$$\alpha = -1.12468^{\text{g}}$$

Questo valore risulta quindi per il tempo t_1 pari a -1.12468^{g} cui va aggiunto il valore letto nella I posizione del teodolite pari a 1.15333^{g} ottenendo così per la I determinazione, il valore di 0.02865^{g} .

Determinazione della direzione media del Nord Geografico

Le osservazioni reali condotte e sviluppate partendo dalle coordinate vere della stazione astronomica (cfr. nota 21) forniscono otto osservazioni coniugate in cui la determinazione della direzione viene desunta attraverso il valore medio.

Il valore medio trovato rappresenta la direzione che occorre leggere sul teodolite per avere la direzione del Nord, ovvero occorre leggere $0^{\text{g}}.00633$, che, tenuto conto della lettura alla mira posta in 2000, di $352^{\text{g}}.00661$, fornisce un azimut orario della mira rispetto al Nord Geografico di $352^{\text{g}}.00028$.

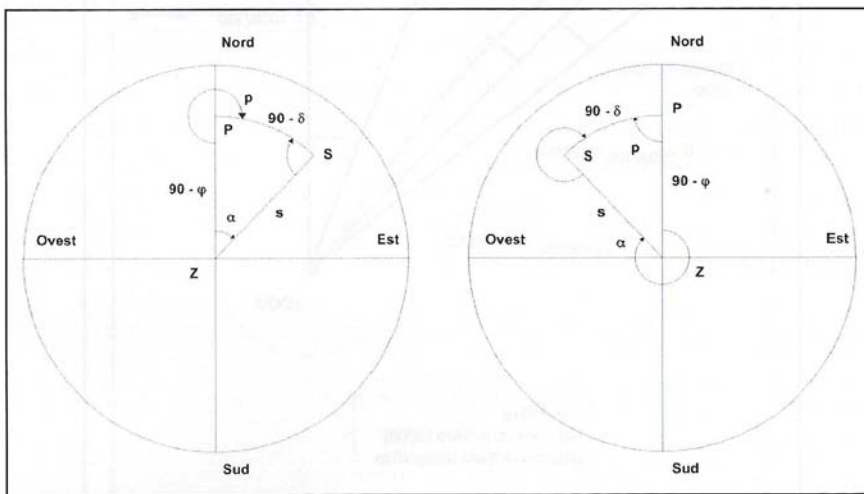
MISURE ALLA POLARE (ALFA URSAE MINORIS) DEL 18.09.2002					
Punto Mira 2000	media				352,00661
Polare	Lett. C. Dx.	Ora	Correzione	Azimut	Media
	1,15333	20.40.33	-1,14750	0,00583	
	Lett. C. Sx.				0,00579
	201,15151	20.42.59	-1,14575	200,00575	
	Lett. C. Dx.	Ora	Correzione	Azimut	Media
	1,15268	20.45.05	-1,14414	0,00853	
	Lett. C. Sx.				0,00731
	201,14810	20.47.41	-1,14201	200,00608	
	Lett. C. Dx.	Ora	Correzione	Azimut	Media
	1,14645	20.49.37	-1,14033	0,00611	
	Lett. C. Sx.				0,00605
	201,14494	20.51.08	-1,13896	200,00598	
	Lett. C. Dx.	Ora	Correzione	Azimut	Media
	1,14520	20.53.08	-1,13798	0,00813	
	Lett. C. Sx.				0,00743
	201,14190	20.55.03	-1,13517	200,00672	
Lett. C. Dx.	Ora	Correzione	Azimut	Media	
1,12657	21.07.03	-1,12148	0,00508		
Lett. C. Sx.				0,00647	
201,13116	21.05.36	-1,12330	200,00785		
Lett. C. Dx.	Ora	Correzione	Azimut	Media	
1,12207	21.09.38	-1,11813	0,00393		
Lett. C. Sx.				0,00536	
201,12655	21.08.23	-1,11198	200,00677		
Lett. C. Dx.	Ora	Correzione	Azimut	Media	
1,11930	21.12.54	-1,11368	0,00561		
Lett. C. Sx.				0,00578	
201,12300	21.10.26	-1,11706	200,00593		
Lett. C. Dx.	Ora	Correzione	Azimut	Media	
1,11321	21.16.17	-1,10833	0,00438		
Lett. C. Sx.				0,00641	
201,12010	21.14.20	-1,11165	200,00644		
VALORE MEDIO OSSERVAZIONI				0,00633 gon	±0,26mgon
AZIMUT 1000-2000				352,00028 gon	
Valori angolari espressi in gradi centesimali					

Tab. 16.4. Osservazioni reali alla Stella Polare

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

La sensibile differenza fra letture coniugate come prima detto, è dovuta all'effetto dell'errore di collimazione e di inclinazione. Le medie delle letture coniugate prive di questi errori sono in ottimo accordo.

A verifica dell'azimut così calcolato si è risolto il problema del Nord Geografico sul piano cartografico, dove sono note le coordinate Gauss-Boaga di un vertice utilizzato nella rete topografica tradizionale (100), ben visibile dal centro della piazzuola, e le coordinate della stessa (1000).



Figura, 16.19. Triangolo di posizione

Osservando lo schema della rete si vede come sia possibile calcolare la direzione della parallela al meridiano centrale del fuso ovest italiano a partire dalle coordinate dei punti 1000 e 100. Si ha infatti:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left| \frac{E_{1000} - E_{100}}{N_{1000} - N_{100}} \right| = 45.79295^{\circ}$$

Si calcola quindi la riduzione angolare alla corda tra la trasformata della geodetica 1000-100 e la corda stessa data da:

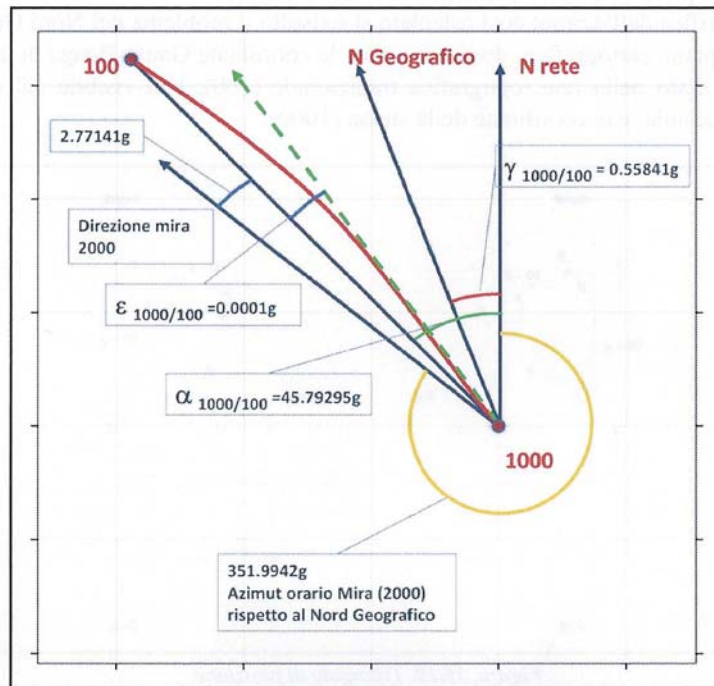
$$e_{1000/100} = \frac{1}{6 \cdot \rho \cdot N \cdot (0.9996)^2} \cdot (2E_{1000} + E_{100}) \cdot (N_{1000} - N_{100}) \cdot \frac{200}{\pi} = 0.0001^{\circ}$$

Quindi si calcola la convergenza γ del meridiano in 1000:

$$\gamma = \lambda \cdot \operatorname{sen} \varphi \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \lambda^2 \cdot \cos^2 \varphi \right) = 0.55841^{\circ}$$

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

Note le letture delle direzioni alla mira (2000) e al vertice IGM (100) tenuto conto dei due valori determinati si trova un azimut della mira pari a 351.9942^g .



Figura, 16.20. Determinazione del Nord Geografico sul piano di Gauss-Boaga

La differenza fra il nord geografico e quello determinato dalle coordinate sul piano di Gauss, tenuto conto delle necessarie correzioni, comporta una differenza di 0.0061^g .

Ciò corrisponde ad uno spostamento trasversale, stazione 1000 - punto 100 di 43 cm, che è compatibile con le incertezze proprie di un Vertice di ordine TP della "vecchia" rete IGM.

In definitiva l'azimut geografico della direzione 1000-2000 permette, in qualsiasi momento di determinare il nord geografico, invariante nel tempo, mentre l'azimut magnetico che è invece variabile nel tempo è dato per l'epoca del rilievo e mantenuto per i successivi 2 o 3 anni, con la necessaria ridefinizione alla scadenza di tale periodo.

I sistemi di riferimento e cambio di datum
(Prof. Luigi Fregonese, Ric. Conf., PhD)

Materializzazione del Sistema di Riferimento

Per materializzare un sistema di riferimento sulla superficie terrestre occorre considerare che la crosta terrestre risulta essere in costante movimento, per fenomeni di diversa natura che si presentano con un carattere di periodicità e fenomeni che si presentano come brusche variazioni temporali di tipo irreversibile (terremoti). Per georeferenziare un punto sulla superficie è necessario definire, oltre al sistema di riferimento, anche il tempo in cui si considera valido tale sistema.

Un Sistema di Riferimento (SdR) è costituito da un insieme di valutazioni e metodologie quantitative per la determinazione della posizione nello spazio e nel tempo di punti, qualsiasi sia il Sistema di Coordinate (SdC). I sistemi di riferimento possono essere fissi alle posizioni apparenti delle stelle oppure solidali alla terra e pertanto variabili nel tempo.

Per quanto riguarda i sistemi di riferimento terrestri occorre distinguere quelli realizzati mediante reti di stazioni permanenti in costante osservazione e con coordinate costantemente pubblicate ed aggiornate, da quelli realizzati con punti fissi osservati una singola volta e pertanto interessati da tutti i fenomeni di deformazione della superficie terrestre. Le due diverse tipologie non sono in contrapposizione tra loro ma, in realtà, sono due diversi modi di operare con i SdR: nel caso dei capisaldi fissi e statici ci si rifà ad un sistema di misura più legato alla pratica topografica tradizionale, dove si preferisce operare in un contesto considerato “fisso ed immutabile” nei vertici considerati del primo ordine (in questo caso le variazioni relative tra i capisaldi sono da considerarsi piccole – rispetto alle variazioni assolute nella deformazione della crosta superficiale – e poco influenti ad esempio nei lavori cartografici tradizionali).

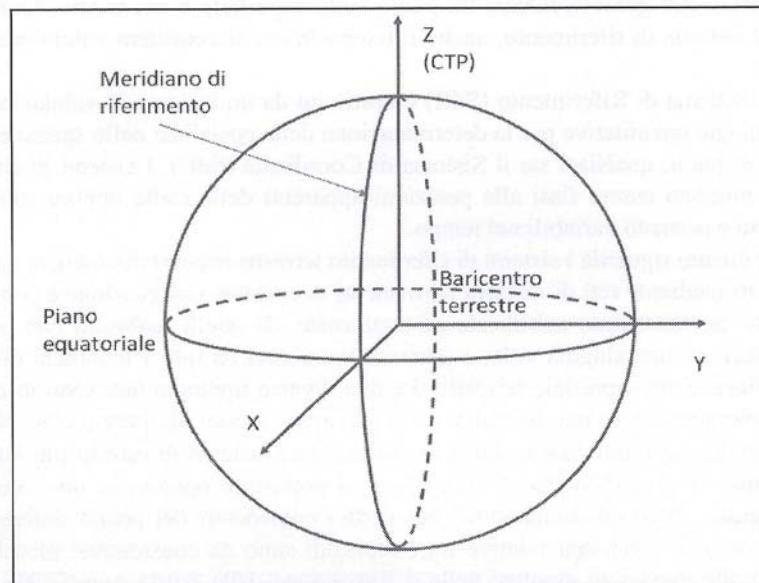
Nel secondo caso, più attinenti alla realtà e al rinnovamento tecnologico degli anni, sono da inquadrare i SdR associati alle Reti di Stazioni Permanenti dove la tecnologia e i metodi di elaborazione sono in continuo rinnovamento e con accuratezze sempre maggiori. È il caso come si vedrà del nuovo sistema di riferimento dinamico RDN definito dall’Istituto Geografico Militare Italiano IGMI.

In generale un SdR può essere definito mediante il baricentro terrestre e dall’asse di istantanea rotazione terrestre. Tuttavia, dato che il moto di rotazione del pianeta avviene attorno all’asse di rotazione che oscilla nel tempo secondo un movimento a spirale (*figura, 16.21*) attorno a un punto convenzionale medio detto Polo Convenzionale Terrestre (CTP), si può definire un SdR in maniera convenzionale, individuando un polo medio, un equatore medio ad un certo periodo e una direzione convenzionale delle origine delle longitudini (CTRS, *Conventional Terrestrial Reference System*).

Per come è definito un CTRS rappresenta un concetto matematico astratto: la sua realizzazione pratica viene chiamata *Terrestrial Reference Frame* (TRF). Un TRF è costituito da un insieme di punti geodetici (spesso chiamati stazioni) le cui

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

coordinate soddisfano la definizione di CTRS. Nel CTRS sono definite alcune grandezze fondamentali quali i parametri geometrici dell'ellissoide terrestre (semiasse ed eccentricità dell'ellissoide associato), i parametri dinamici (velocità angolare di rotazione terrestre e prodotto della massa terrestre per la costante di gravitazione).



Figura, 16.21. Definizione del SdR – Baricentro terrestre, polo convenzionale CTP, Piano equatoriale e Meridiano di riferimento

Il Sistema Internazionale di Riferimento Terrestre (ITRS) e la sua realizzazione ITRF

Storicamente sono stati definiti vari sistemi di riferimento geocentrici, associati a vari ellipsoidi, con diverse origini e diversi orientamenti: via via che le misure geodetiche sono diventate sempre più precise, è stato possibile definire nuovi parametri geometrici, ma anche origini, dei “nuovi” sistemi di riferimento ritenuti più precisi dei precedenti.

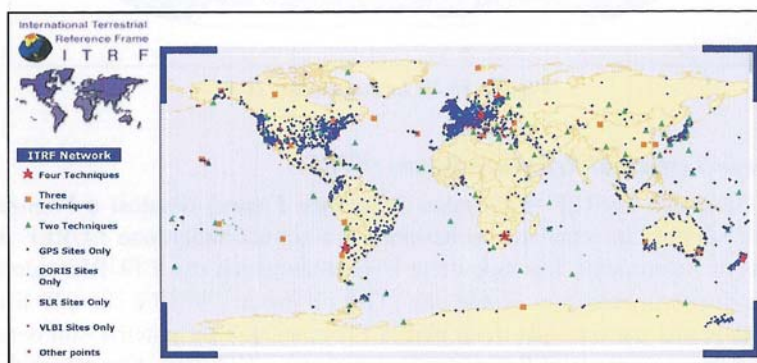
A livello globale, l'*International Earth Rotation Service* (IERS) mantiene e rende disponibile l'*International Terrestrial Reference System* (ITRS) come esempio di CTRS, e realizza il cosiddetto *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF).

L'accuratezza delle moderne tecniche di misura è tale che le coordinate dei vertici delle stazioni permanenti misurate nel sistema ITRF variano nel tempo a

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

seguito del moto di deriva della placca sulla quale i vertici insistono. Di conseguenza le coordinate misurate in ITRF devono avere un'epoca. In generale ogni realizzazione ITRF di ITRS ha un'epoca di riferimento, il primo gennaio dell'anno yy, e la realizzazione prende il nome ITRFyy (ad es. ITRF00 per il 01/01/2000).

Le reti di stazioni che materializzano il sistema ITRS utilizzano come sistemi di osservazione geodetica misure di tipo VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), SLR (*Satellite Laser Ranging*) e GNSS (*Global Navigation Satellite System*). In generale la sigla GNSS attualmente definisce i sistemi NAVSTAR GPS e GLONASS, mentre in futuro verrà inglobato il sistema Europeo Galileo.



Figura, 16.22. International Terrestrial Reference Frame

La rete IGS

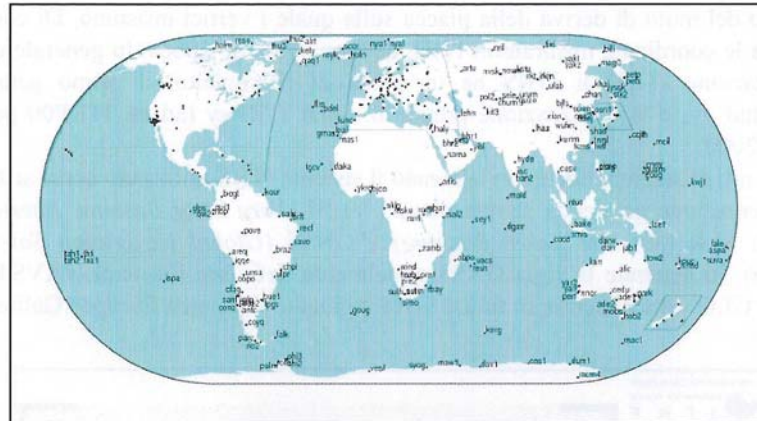
L'*International GNSS Service* (IGS) è un servizio istituito il 1° gennaio 1994 dalla *International Association of Geodesy* (IAG) il cui scopo era quello di fornire informazioni di supporto e sostenere la ricerca GNSS. A maggio 2011 la rete IGS si compone di 425 stazioni distribuite in tutto il mondo per la gestione delle informazioni GNSS, di cui solo 361 risultano effettivamente attive.

Gli scopi della rete IGS sono:

- la definizione sempre più precisa di un unico Sistema di Riferimento, e nella fattispecie dello ITRS e della sua realizzazione mediante l'ITRF;
- la valutazione dei modelli di deformazione del globo (della deriva delle placche continentali).

Successivamente alla nascita del servizio IGS, venne istituita una sottorete a livello europeo che ha preso il nome di *European Terrestrial Reference System*, più stabile localmente a livello di deformazione relativa.

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM



Figura, 16.23. La rete globale IGS

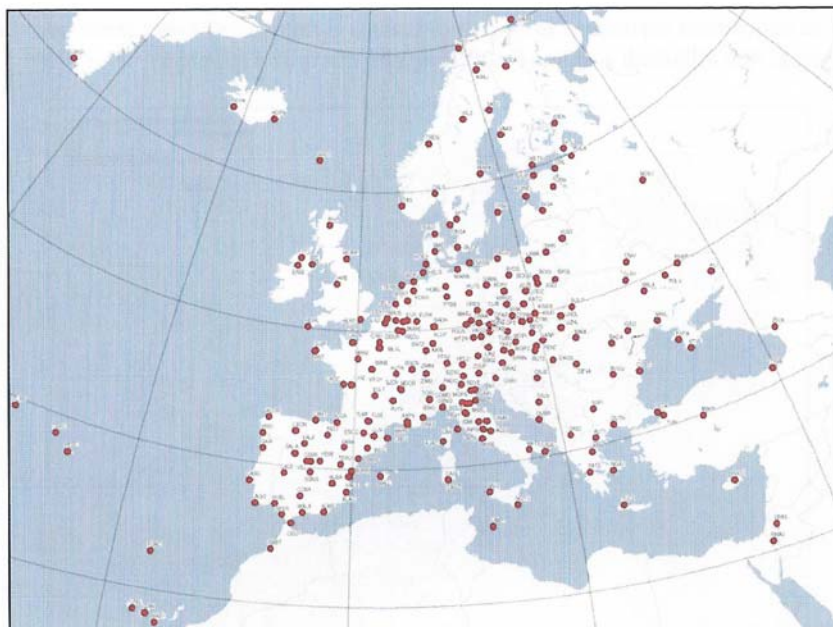
European Terrestrial Reference System (ETRS)

Al Simposio EUREF (*EUropean REference Frame*) tenutosi a Firenze nel 1990 fu adottata la seguente risoluzione: “La sottocommissione EUREF per il Sistema di Riferimento Europeo della IAG raccomanda che l’EUREF adotti un sistema di riferimento coincidente con ITRS all’epoca 1989.0 e che tale sistema sia solidale alla parte stabile della placca Eurasiatica. Tale sistema sarà denominato *European Terrestrial Reference System 1989 – ETRS89*”. Con tale dichiarazione venne istituito il riferimento ETRS89.

Il concetto di movimento locale di tipo continentale è così da intendersi: poiché ETRS89 si muove, rispetto a ITRS, solidalmente alla parte stabile dell’Eurasia, le coordinate di vertici nell’Eurasia stabile saranno indipendenti dal tempo in relativo tra di loro. Tanto è necessario nelle applicazioni cartografiche per garantire omogeneità, ripetibilità e stabilità della georeferenziazione in Europa. Il moto di deriva dell’Eurasia nel sistema ITRS è di circa 2 cm/anno in direzione Nord Est.

La maggior parte delle nazioni europee ha adottato ETRS89, in conformità con la direttiva Europea INSPIRE. In Italia, IGM95 e RDN sono le realizzazioni degli standard ETRS, ad opera dell’IGMI. IGM95 è una realizzazione di tipo statico di ETRS89, basata su vertici occupati temporaneamente da ricevitori GPS del tipo disponibile nei primi anni 90. L’allineamento con ETRS89 è stato realizzato per mezzo del limitato numero di stazioni dell’European Permanent Network allora disponibili in Italia. RDN nasce con una concezione più moderna (dinamica), impiegando stazioni permanentemente operative, e con oltre 20 punti ETRF su un totale di 100 vertici.

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM



Figura, 16.24. La rete EUREF

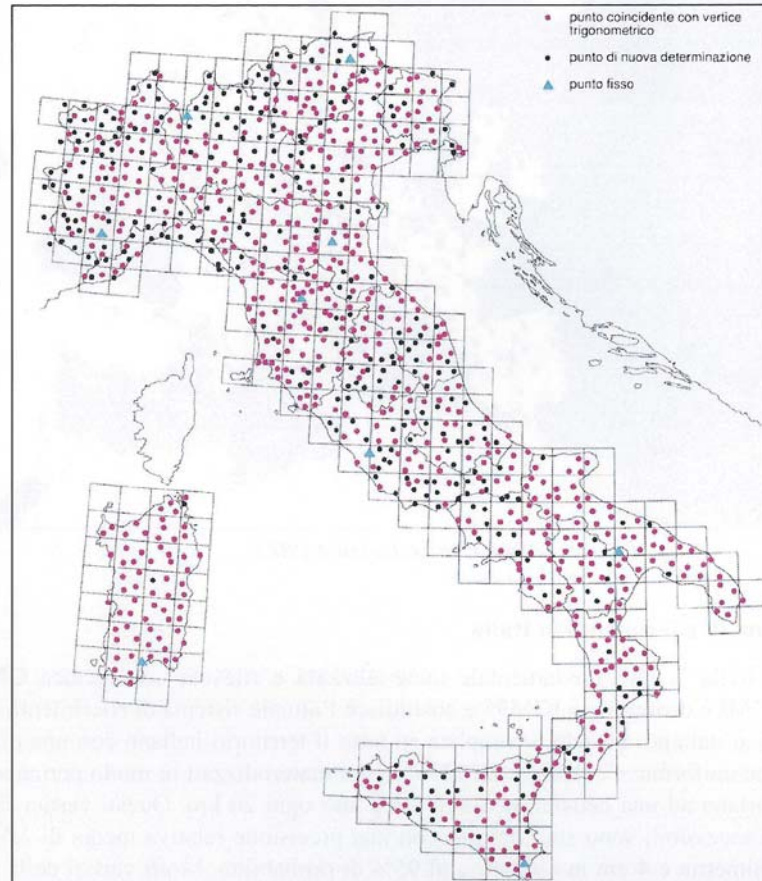
I sistemi di riferimento in Italia

In Italia la rete fondamentale materializzata e rilevata con tecnica GNSS dall'IGMI è denominata IGM95 e costituisce l'attuale sistema di riferimento cartografico italiano. La rete è completa su tutto il territorio italiano con una distribuzione uniforme: è costituita da 1236 vertici materializzati in modo permanente che portano ad una densità media di circa uno ogni 20 km. Questi vertici facilmente accessibili sono stati definiti con una precisione relativa media di 2.5 cm in planimetria e 4 cm in altimetria al 95% di probabilità. Molti vertici della rete IGM95 (circa 700) sono stati collegati direttamente alle linee di livellazione d'alta precisione e forniscono, oltre alla quota ellissoidica WGS84, anche una precisa determinazione della quota ortometrica.

La trasformazione di coordinate dalla rete IGM95 al Sistema di Riferimento Roma40 alla base della Cartografia Ufficiale Italiana, avviene con un cambio di datum. Tuttavia non è possibile fare trasformazioni di tipo globale, ma trasformazioni di tipo locale. Se da un lato è vero che le misure GPS sono di tipo globale e non risentono della zona in cui sono ottenute, la stessa cosa non vale per i punti, ad esempio, della rete IGM che definiscono il frame del sistema Roma40 alla base della Cartografia Nazionale Italiana. In tale rete i vertici misurati e calcolati sono noti in coordinate geografiche sull'ellissoide di Hayford e trasformate

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

poi in coordinate cartesiane sul piano di Gauss. È necessario avere punti comuni riferiti ai due ellissoidi e operare un *fitting* che minimizzi gli errori.



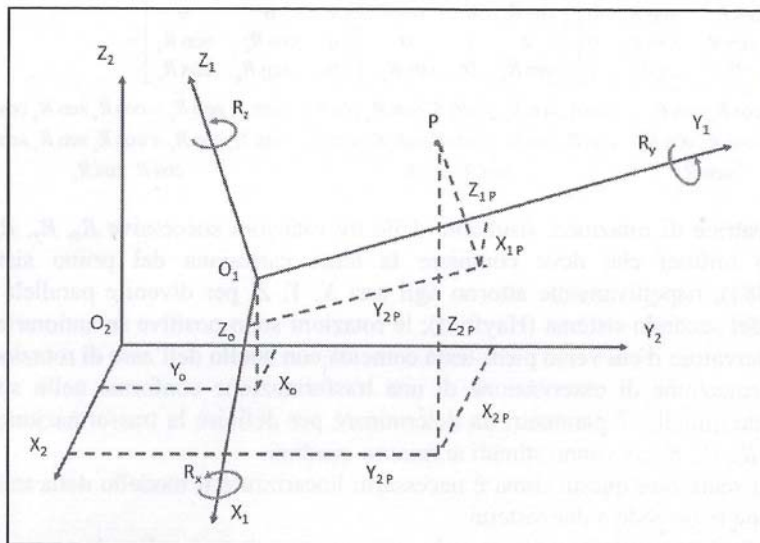
Figura, 16.25. Distribuzione dei tre tipi di punti sul territorio nazionale

Cambio di datum nel panorama italiano

La trasformazione tra datum geodetici ellissoidici, e nel caso esaminato il passaggio tra ellissoide WGS84 ed ellissoide internazionale di Hayford orientato a Roma Monte Mario, dovrebbe essere normalmente realizzato mediante una trasformazione a 6 parametri, cioè una rototraslazione nello spazio tra due SdR. Nella pratica occorre tener conto che ogni datum geodetico è in realtà definito dalla rete geodetica ad esso associata e risente quindi degli errori di misura che lo hanno generato e delle conseguenti distorsioni della rete stessa. Il modello teori-

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

co della trasformazione di cui sopra, che funzionerebbe perfettamente se le reti fossero prive di errori, deve essere quindi modificato introducendo parametri aggiuntivi, ad esempio un fattore di scala isotropo, che permettano di modellare in qualche modo le imperfezioni della rete. La trasformazione diviene quindi a 7 parametri che occorre determinare a priori conoscendo almeno 3 "punti doppi" cioè punti noti nei due sistemi di riferimento.



Figura, 16.26. Cambio di Datum. Relazione di posizione di un punto P rispetto a due diversi sistemi cartesiani

Note le coordinate di un generico punto P in un primo sistema di riferimento cartesiano WGS84 (O_1, X_1, Y_1, Z_1); in forma vettoriale:

$$X_{\text{WGS84}} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$$

Le coordinate dello stesso punto P in un secondo sistema cartesiano Hayford (O_2, X_2, Y_2, Z_2) ruotato e traslato rispetto al primo, sono date da:

$$X_{\text{HAYFORD}} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = X_0 + (1+k) \cdot R \cdot X_{\text{WGS84}}$$

dove $(1+k)$ è il fattore di scala e

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

$$X_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$$

è il vettore delle componenti di traslazione (coordinate cartesiane, nel secondo sistema di riferimento, dell'origine del primo sistema) mentre

$$R = \begin{bmatrix} \cos R_z & \sin R_z & 0 \\ -\sin R_z & \cos R_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos R_y & 0 & -\sin R_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin R_y & 0 & \cos R_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R_x & \sin R_x \\ 0 & -\sin R_x & \cos R_x \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos R_y \cos R_z & \cos R_y \sin R_z + \sin R_x \sin R_y \cos R_z & \sin R_x \sin R_z - \cos R_x \sin R_y \cos R_z \\ -\cos R_y \sin R_z & \cos R_x \cos R_z - \sin R_x \sin R_y \sin R_z & \sin R_x \cos R_z + \cos R_x \sin R_y \sin R_z \\ \sin R_y & -\sin R_x \cos R_y & \cos R_x \cos R_y \end{bmatrix}$$

è la matrice di rotazione, risultante dalle tre rotazioni successive R_x, R_y, R_z (in questo ordine) che deve compiere la terna cartesiana del primo sistema (WGS84), rispettivamente attorno agli assi X, Y, Z , per divenire parallela alla terna del secondo sistema (Hayford); le rotazioni sono positive se antiorarie per un osservatore il cui verso piedi-testa coincida con quello dell'asse di rotazione.

L'equazione di osservazione di una trasformazione conforme nello spazio presenta quindi i 7 parametri da determinare per definire la trasformazione: $x_0, y_0, z_0, R_x, R_y, R_z$ e k vanno stimati ai minimi quadrati.

Per realizzare questa stima è necessario linearizzare il modello della trasformazione ricorrendo a due sistemi.

Nel primo caso, si considerano le rotazioni piccole (ciò vale, ad esempio, per rotazioni tra due terne geocentriche o locali ma in differenti sistemi di riferimento) è sufficiente sostituire all'espressione generale della matrice R quella linearizzata valida per piccole rotazioni, che mantiene la stessa forma qualunque sia l'ordine in cui avvengono le tre rotazioni.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & R_z & -R_y \\ -R_z & 1 & R_x \\ R_y & -R_x & 1 \end{bmatrix}$$

Inoltre essendo k una quantità piccola si possono normalmente trascurare i termini in cui compaiono i prodotti kR_x, kR_y, kR_z ; perché considerabili quantità infinitesime di secondo ordine. La trasformazione conforme allora si semplifica in:

$$X_{\text{HAYFORD}} = X_0 + R_k \cdot X_{\text{WGS84}}$$

in cui:

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

$$R_k = \begin{bmatrix} 1+k & R_z & -R_y \\ -R_z & 1+k & R_x \\ R_y & -R_x & 1+k \end{bmatrix}$$

è la matrice di rotazione linearizzata che contiene il fattore di scala.

Nel secondo caso, se invece non è possibile considerare piccole le rotazioni (ad esempio se la rototraslazione avviene tra una terna geocentrica ed una locale) occorre linearizzare la funzione tenendo conto della matrice di rotazione completa. La linearizzazione si basa sullo sviluppo in serie di Taylor arrestato al 1° ordine: le incognite sono le variazioni rispetto al valore approssimato dei parametri. In questo caso la soluzione è di tipo iterativo.

Il metodo di trasformazione iniziale prevedeva sino all'inizio del 2002 l'uso di questi 7 parametri di trasformazione locali, per zone con intorno pari a circa 10 km (ambito di validità della trasformazione a 7 parametri), aventi come centri di emanazione i vertici IGM95 della rete. Tali sette parametri erano definiti come il passaggio dall'ellissoide WGS84 a quello internazionale di Hayford orientato a Roma Monte Mario e contemplavano tre traslazioni X_0 , Y_0 e Z_0 , tre rotazioni coordinate attorno agli assi R_x , R_y e R_z e un fattore di scala $1 + k$ che in qualche modo sistemava e riduceva le distorsioni della rete nazionale.

Tuttavia la tipologia della rete statica IGM95 inquadrata nel sistema ETRF89, all'epoca 1989.0, ha subito nel tempo una progressiva deformazione rispetto al corrente ITRF, con variazioni di qualche decina di cm in coordinate planimetriche.

Con l'evoluzione dei sistemi di misura e dei metodi di elaborazione e stima in oltre 20 anni dalla sua definizione, si è giunti oggi ad una più accurata stima di queste coordinate, verificando soprattutto una deformazione relativa all'interno del territorio italiano che da nord a sud non assume un comportamento omogeneo rispetto ai movimenti della placca Europea. In sostanza gli errori del Sistema di Riferimento ETRF89 (1989.0) – IGM95 rispetto al sistema ITRF risultavano troppo alti.

A partire dalla metà del 2002 l'IGM ha cambiato l'inquadramento della rete aggiornando al frame ETRF2000 ed ha sostanzialmente cambiato il sistema di passaggio di coordinate tra i vari sistemi di riferimento. Con la distribuzione del software Verto arrivato oggi alla versione 3k, il cambio di datum si realizza mediante l'utilizzo di grigliati di trasformazione locali a diverse ampiezze (intorni di circa 10 km dai vertici di emanazione della rete IGM95 o aree maggiori).

Si parte dalla conoscenza nel sistema WGS84-ETRF2000 delle coordinate

$$\varphi_{\text{WGS84}}, \lambda_{\text{WGS84}} \text{ e } h_{\text{WGS84}} \text{ altezza ellissoidica.}$$

L'IGM fornisce i valori di $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$ per passare alle coordinate φ_{XXXX} , λ_{XXXX} secondo un grigliato interpolante (XXXX rappresenta il Datum generico

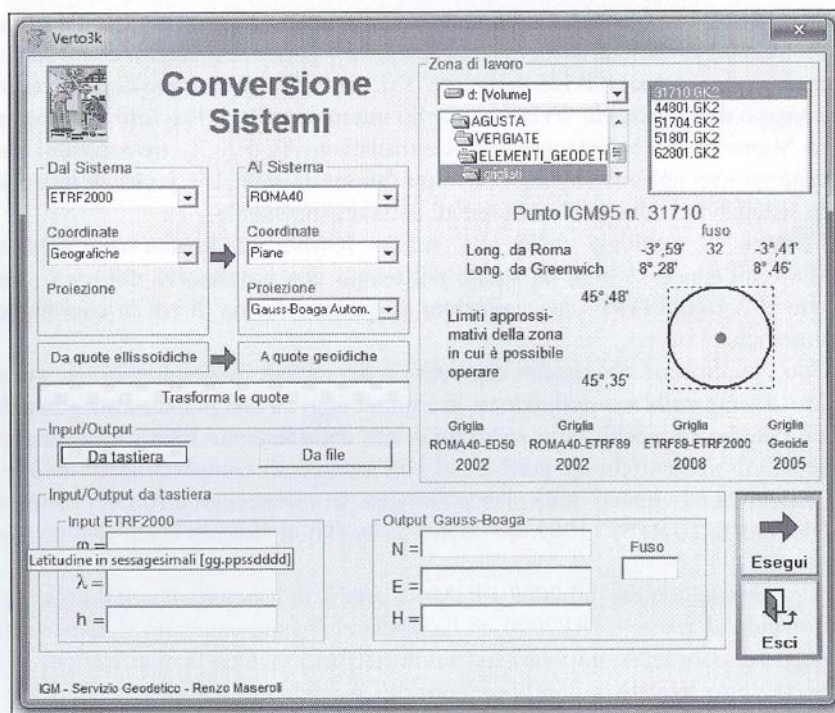
LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMIC E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

di arrivo nella trasformazione) e una ondulazione N del geode Italgeo2005 per ottenere la quota ortometrica dei punti secondo la relazione:

$$H_{\text{Ortometrica}} = h_{\text{WGS84}} - N_{\text{ondulazione}}$$

Il passaggio dalle coordinate geografiche a quelle piane avviene utilizzando le formule chiuse di Hirvonen.

La Trasformazione biunivoca attualmente prevede i seguenti cambi di datum in coordinate geografiche e in coordinate cartografiche piane UTM: Sistema ETRF89 – Rete IGM95 di impianto (ellissoide WGS84), Sistema ED50 (ellissoide Internazionale di Hayford, orientato a Potsdam) e Sistema Roma40 (ellissoide Internazionale di Hayford, orientato a Roma Monte Mario).



Figura, 16.27. Schermata di Input del Software Verto3K IGM

La Rete Dinamica Nazionale RDN

La Rete Dinamica Nazionale ha lo scopo di organizzare, sul territorio italiano, un network di stazioni permanenti GPS stabilmente materializzate, che osservano con continuità i segnali satellitari GNSS e li trasmettono per via telema-

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

tica ad un Centro di Calcolo appositamente istituito presso il Servizio Geodetico dell'IGM. La disponibilità continua delle osservazioni consente all'IGM di contribuire allo studio dei movimenti crostali ed al monitoraggio delle deformazioni sia a livello regionale che locale.

I risultati di maggior interesse per l'IGM sono quelli derivanti dall'utilizzo di tale struttura dinamica per la materializzazione ed il monitoraggio di precisione, sul territorio nazionale, del Sistema di Riferimento Globale.

L'esigenza dell'aggiornamento nasce dalla necessità di dotare la nazione di un Riferimento Geodetico in linea con i tempi, dotato di caratteristiche adatte a supportare qualunque attività geodetica e valide anche per le applicazioni che richiedono le precisioni più elevate. In particolare la gestione dei network di stazioni permanenti GPS recentemente istituiti in Italia (essenzialmente a livello regionale) allo scopo di distribuire le correzioni per il posizionamento differenziale in tempo reale (RTK), necessitano di riferimenti dotati di alte precisioni, non sempre raggiunte dalla realizzazione del Sistema Globale fino ad ora adottata: l'ETRF89. L'IGM ha quindi deciso di allinearsi al più recente frame convenzionale del Sistema ETRS89 ufficializzato in Europa: l'ETRF2000 con riferimento temporale al 2008.0.



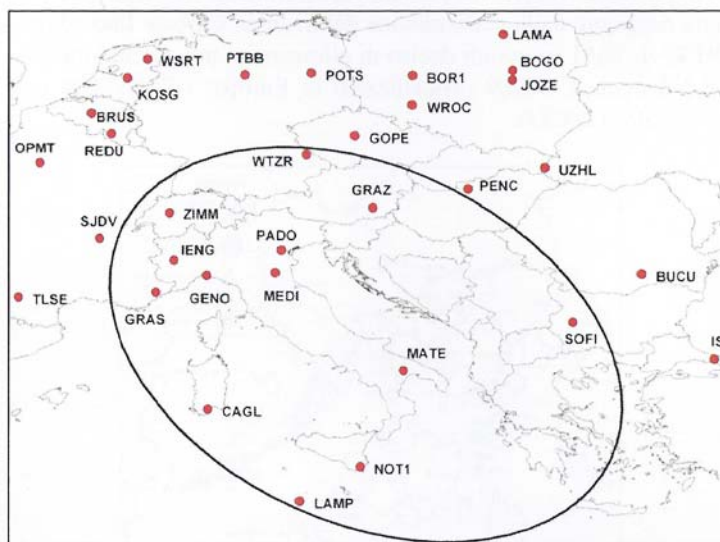
Figura, 16.28. La rete RDN Italiana

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

La RDN è stata istituita selezionando 99 stazioni permanenti GPS, fra quelle già esistenti in Italia, di proprietà di Enti Pubblici ed omogeneamente distribuite, in modo da consentire in seguito l'accesso al Riferimento Globale su tutto il territorio nazionale. Le stazioni considerate hanno una interdistanza media di 100-150 km, in modo da poter disporre, avendo avuto particolare attenzione alla copertura delle zone marginali, di una stazione ogni 3000 km² circa.

Nella rete sono state incluse tutte le stazioni presenti sul territorio nazionale e già calcolate nei network internazionali ITRS e IGS (Matera, Noto, Medicina, Padova, Torino, Genova, Cagliari e Lampedusa).

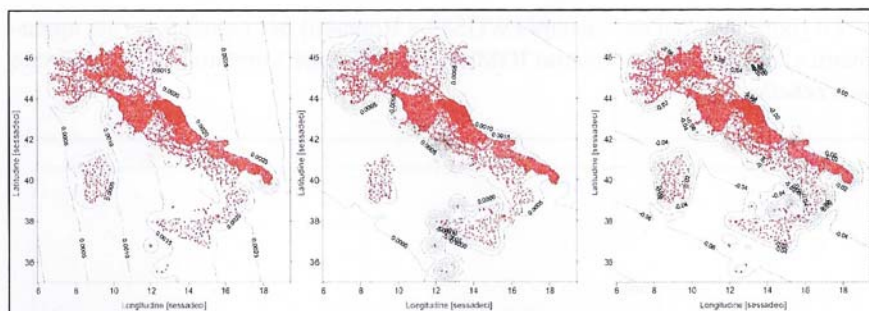
Come Datum convenzionale per l'allineamento della RDN è stato scelto il riferimento ITRS più recente (ITRF2005) e sono state considerate le 13 stazioni, presenti in tale realizzazione, che circondano efficacemente il territorio italiano e che risultavano attive all'epoca considerata: dal 23.12.2007 al 19.01.2008



Figura, 16.29. Stazioni presenti nella realizzazione della rete RDN, inquadrate in ITRF2005

La rete IGM95 risulta affetta, nel riferimento ERTF89, da deformazioni locali che hanno impedito l'aggiornamento delle coordinate con semplici rototraslazioni. È stato quindi necessario collegare una parte delle stazioni della RDN (45 stazioni) ai punti della rete IGM95 in modo da avere una omogenea distribuzione sul territorio, con particolare riguardo alle zone marginali al fine di contenere la propagazione degli errori. L'IGM ha ricalcolato ai minimi quadrati l'intera rete IGM95 e tutti i successivi raffittimenti della rete, fino alla totalità di oltre 4000 punti IGM95 fino ad oggi realizzati.

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM



Figura, 16.30. Differenze in latitudine, longitudine e altezza fra ETRF89 e ETRF2000 aggiornato al 2008.0

A partire dai nuovi valori di coordinate determinate nella rete ETRF2000 rispetto a quelli del Sistema ETRF89 sono stati desunti i nuovi grigliati di trasformazione del software Verto con il quale ad oggi sono possibili i passaggi tra coordinate geografiche e coordinate cartografiche piane fra i diversi datum: RDN2000 (ETRF2000 agg. 2008.0), ETRF89, ED50 e ROMA40.

Esempi di cambio di Datum

A titolo esemplificativo si riportano due diversi sistemi di conversione applicati in due diversi contesti.

1. Trasformazione conforme con variazione di scala a sette parametri.

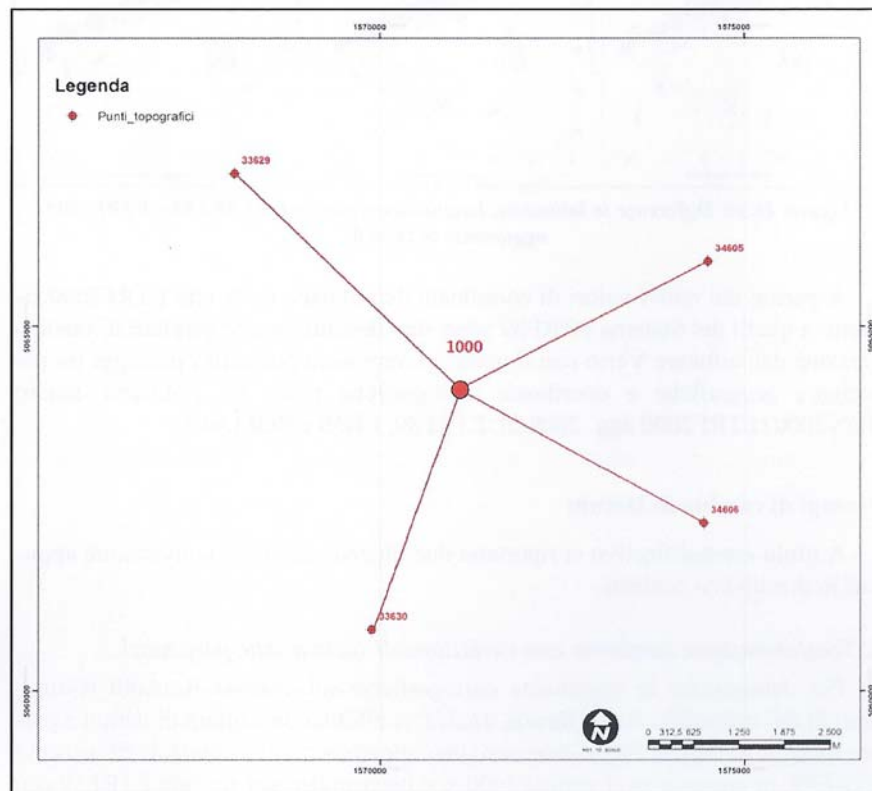
Per determinare le coordinate cartografiche nel sistema Roma40 (Gauss-Boaga) del caposaldo 1000 (*figura, 16.31*), si effettua un cambio di datum a partire da quattro vertici che lo circoscrivono appartenenti al sistema di riferimento ETRF89. In precedenza il vertice 1000 si è determinato nel sistema ETRF89 con una rete di misure GPS a partire dai vertici della rete di inquadramento.

Id Punto	ROMA 40			WGS84		
	Lat.	Lon.	H. (m)	Lat.	Lon.	h. (m)
33629	45°45'11.7311"	-2°34'40.6812"	760.030	45°45'14.1635"	9°52'26.6407"	806.714
33630	45°41'48.3980"	-2°33'16.9112"	450.897	45°41'50.8289"	9°53'50.4159"	496.827
34605	45°44'30.1504"	-2°29'40.5479"	1151.840	45°44'32.5824"	9°57'26.7916"	1198.597
34606	45°42'33.8116"	-2°29'45.2887"	379.331	45°42'36.2426"	9°57'22.0506"	425.620

Tab., 16.4. Coordinate geografiche nei sistemi ETRF89 e Roma40.

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

Le coordinate nei due sistemi (WGS84 e Roma40) per i quattro vertici appartenenti alla Rete di raffittimento IGM95 della Regione Lombardia sono riportate nella *tabella, 16.4*.



Figura, 16.31. Schema di inquadramento

Mediante le relazioni

$$\begin{aligned}
 x &= (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\
 y &= (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \\
 z &= [N \cdot (1 - e^2) + h] \cdot \sin \varphi
 \end{aligned}$$

si ottengono le coordinate cartesiane geocentriche nei due sistemi per i quattro punti, a partire dalle quali si determinano, attraverso le relazioni precedentemente descritte, i sette parametri della trasformazione per passare dal sistema ETRF89 (rilevato con la strumentazione GPS) al sistema Roma40:

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

- $X_0 = 255.2918$ m $Y_0 = 67.1185$ m $Z_0 = 26.1871$ m
- $R_x = 2.29E-10$ rad $R_y = 2.92E-10$ rad $R_z = -2.20E-7$ rad
- $k = -6.40E-11$

A partire da questi 7 parametri e dalla stima della posizione del sistema ETRF, si calcola in maniera diretta, la tripletta delle coordinate del caposaldo 1000 nel sistema Roma40.

- $X_{\text{Hayford}} = 4394157.650$ m
- $Y_{\text{Hayford}} = 767132.917$ m
- $Z_{\text{Hayford}} = 4544390.630$ m

Con le coordinate cartesiane geocentriche è possibile determinare il passaggio alle coordinate geografiche in forma iterativa e successivamente alle coordinate piane nel sistema Gauss-Boaga mediante le formule di Hirvonen.

2. Cambio di datum mediante il software Verto versione 3k

Per la determinazione della posizione di un vertice di inquadramento denominato 2000 è stato effettuato un rilievo GPS in modalità statica della baseline formata dal vertice 2000 e il caposaldo 031710 – Borgo Ticino del sistema geografico nazionale IGM95 con sistema di riferimento RDN - ETRF2000 (European Terrestrial Reference Frame) aggiornato al 2008. Per il rilievo GPS si è utilizzata una coppia di ricevitori a doppia frequenza con una sessione di misura estesa a 2^h. La lunghezza della base è di circa 8 km.

Le osservazioni sono state compensate considerando fisse le coordinate del vertice 031710 – Borgo Ticino nel sistema WGS84-ETRF2000.

Coordinate					
Stazione		Coordinate (m)	Correz. (m)	σ (m)	
031710	Latitudine	45° 41' 36.30710"	0.000	-	fissi
	Longitudine	8° 36' 06.97040"	0.000	-	fissi
	Quota ellissoidica	313.3210	0.000	-	Fissi
2000	Latitudine	45° 42' 46.04038"	0.000	0.0056	
	Longitudine	8° 42' 11.16771"	0.000	0.0033	
	Quota ellissoidica	307.9500	0.000	0.0087	

Tab., 16.5. Stima della baseline 031710-1000.

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

In questo secondo esempio si è ricorsi al cambio di datum utilizzando il software Verto ed il grigliato GK2 associato al vertice 031710 fornito dall'IGM.

A partire dalle coordinate geografiche del caposaldo 2000, determinate nella stima della base, sono state ottenute le coordinate nei vari sistemi.

Punto 2000	Geografiche			Cartesiane		
	Lat.	Lon.	h. (m)	N (m)	E (m)	H. (m)
RDN2000	45° 42' 46.04038"	08° 42' 11.16771"	307.950	5062180.044	476891,857	---
ETRF89	45° 42' 46.03990"	08° 42' 11.16540"	307.883	5062180.031	476891.807	---
ED50	45° 42' 49.39320"	08° 42' 14.97350"	---	5062378.507	476973.447	---
ROMA40	45° 42' 43.59460"	-3° 44' 55.95230"	---	5062199.750	1476918.174	261.502

Tab., 16.6. Coordinate geografiche e cartesiane piane (UTM F32N e 1° Fuso GB) del vertice 1000.

BIBLIOGRAFIA Cap. 16 e SITI INTERNET

Determinazione di Azimuth

1. AA. VV., *Apparent Places of Fundamental Stars*, Astronomisches Rechen-Institut, Heidelberg 1996.
2. Dominici, G., Meloni, A., Miconi, M., Pierozzi, M., *La Rete Magnetica italiana e la Carta Magnetica d'Italia al 2005.0*, Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, n. 1, Firenze 2007.
3. Bezoari, G., Monti, C., Tomelleri, V., *Un contributo alla conoscenza della deviazione della verticale in Milano*, Memorie dell'Istituto Lombardo, Accademia di Scienze e Lettere, Classe di Scienze Matematiche e Naturali, vol. XXVI, Milano 1975.
4. Monti, C., Tomelleri, V., *Risultati della campagna di rilevamenti per la determinazione della deviazione della verticale*, Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, n. 3, Firenze 1977.
5. Monti, C., Pinto, L., *Trattamento dei dati topografici e cartografici*, Clup, Milano 1997.
6. Zagar, F., *Lezioni di astronomia sferica e teorica*, Cedarn, Padova 1941.

INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia:
http://portale.ingv.it/portale_ingv/portale_ingv

NRC Natural Resources Canada - Geological Survey:
http://gsc.nrcan.gc.ca/geomag/index_e.php

USGS Programma Geomagnetico: <http://geomag.usgs.gov/>

NOAA Centro dati geofisici: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/>

NASA Esplorazione del campo magnetico terrestre:
<http://www-spf.gsfc.nasa.gov/Education/wmap.html>

Materializzazione di sistemi di riferimento e cambio di datum

1. Baroni, L., Cauli, F., Donatelli, D., Farolfi, G., Maseroli, R., *La Rete Dinamica Nazionale (RDN) ed il nuovo Sistema di Riferimento ETRF2000*, Servizio Geodetico, Istituto geografico Militare, Firenze.
2. Biagi, L., *I fondamentali del GPS*, Geomatics Workbooks, Volume 8, Como 2009.

LA DETERMINAZIONE DI AZIMUT ASTRONOMICO E MAGNETICO.
I SISTEMI DI RIFERIMENTO E CAMBIO DI DATUM

3. Cina, A., *GPS Principi, modalità e tecniche di posizionamento*, Celid, Torino 2000.
4. Manzino, A., *Lezioni di Topografia*, Progetto didattica in rete, Dip. Di Georisorse e Patrimonio, Politecnico di Torino, Torino 2000.
5. Monti, C., Pinto, L., *Trattamento dei dati topografici e cartografici*, Libreria Clup, Milano 2002.

IGMI Istituto Geografico Militare Italiano: <http://www.igmi.org>

International GNSS : <http://igscb.jpl.nasa.gov>

International Terrestrial Reference Frame: <http://itrf.ensg.ign.fr>

European Terrestrial Reference Frame: <http://www.epncb.oma.be/>