

# Rapporti tecnici

# INGV

**Il nuovo manuale degli  
osservatori geomagnetici italiani**

# 362



Istituto Nazionale di  
Geofisica e Vulcanologia

## **Direttore Responsabile**

Silvia MATTONI

## **Editorial Board**

Luigi CUCCI - Editor in Chief (INGV-RM1)

Raffaele AZZARO (INGV-CT)

Mario CASTELLANO (INGV-NA)

Viviana CASTELLI (INGV-BO)

Rosa Anna CORSARO (INGV-CT)

Mauro DI VITO (INGV-NA)

Marcello LIOTTA (INGV-PA)

Mario MATTIA (INGV-CT)

Milena MORETTI (INGV-CNT)

Nicola PAGLIUCA (INGV-RM1)

Umberto SCIACCA (INGV-RM2)

Alessandro SETTIMI (INGV-RM2)

Salvatore STRAMONDO (INGV-CNT)

Andrea TERTULLIANI (INGV-RM1)

Aldo WINKLER (INGV-RM2)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (RM1)

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.173 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



# Rapporti tecnici INGV

## IL NUOVO MANUALE DEGLI OSSERVATORI GEOMAGNETICI ITALIANI

Lili Cafarella, Domenico Di Mauro, Guido Dominici, Stefania Lepidi, Achille Zirizzotti

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Geomagnetismo, Aeronomia e Geofisica Ambientale)

# 362



## Indice

Introduzione	7
1. Il campo magnetico terrestre	8
1.1 Gli elementi del campo magnetico terrestre	9
2. Gli osservatori geomagnetici	11
3. Gli strumenti in uso presso gli osservatori	12
3.1 Strumenti per la misura di F	12
3.2 Strumenti per la misura delle componenti del campo	13
3.3 Misure assolute	13
4. Gli osservatori geomagnetici gestiti dall'INGV	14
5. Controllo della qualità dei dati	18
Conclusioni	23
Bibliografia	23
Appendici	25
Appendice A: Esecuzione delle misure assolute	27
Appendice B: Calcolo delle basi nel riferimento geografico	34
Appendice C: Confronto tra variometri	37
Appendice D: Programma per il calcolo delle basi	40
Appendice E: Esempio di scheda per misure	46



## Introduzione

Il nostro pianeta è sede di un campo magnetico generato principalmente da correnti elettriche di origine interna alla Terra, che fluiscono nel nucleo esterno fluido, a cui si sovrappone un contributo dovuto a correnti elettriche presenti nella ionosfera e nella magnetosfera. Oggi sono sempre più numerosi i siti permanenti di misura del campo magnetico terrestre, sia per il crescente interesse in questo settore scientifico, che apporta importanti e autonomi contributi alle altre discipline della geofisica, che per la maggiore disponibilità di strumentazione, tecnologicamente migliorata e miniaturizzata a costi ridotti. I geomagnetisti hanno un interesse particolare allo studio del campo magnetico terrestre poiché nella magnetosfera si innescano una serie di fenomeni ancora poco noti e per questo particolarmente attraenti. Sulla scia di questo interesse sono stati installati molti punti di osservazione, gli osservatori geomagnetici, dove effettuare misure di campo magnetico con continuità e per lunghi intervalli temporali.

Anche l'Italia rientra in questa tradizione. Già nel 1958, con il Prof. Franco Molina, veniva installato il primo osservatorio geomagnetico moderno su suolo italiano, a Preturo, a pochi km da L'Aquila.

Oggi l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia gestisce 3 osservatori sulla penisola e 2 in Antartide. La storia dell'evoluzione di questi siti di osservazione è lunga e ricca di aneddoti e fatti interessanti.

In questo manuale gli autori vogliono fare il punto della situazione su quello che gli osservatori geomagnetici sono oggi (settembre 2016) in Italia. Vengono descritti brevemente gli osservatori, la strumentazione ivi installata e alcune accortezze messe a punto negli anni per gestire al meglio la strumentazione.

Questo manuale non può certamente essere esaustivo, né tantomeno pretende di ricostruire interamente la storia dei nostri osservatori, che pure sarebbe interessante. Si vuole lasciare una traccia dello stato dell'arte riassumendo in particolare il percorso seguito in questi ultimi due anni di lavoro, dando così uno strumento a chi lavora e lavorerà presso gli osservatori gestiti dall'INGV.

Gli autori ci tengono a sottolineare che il lavoro svolto presso gli osservatori è portato avanti da un gruppo di persone costituito da personale ricercatore, tecnologo e tecnico. Il contributo di tutti è stato ed è fondamentale per la realizzazione e la manutenzione di tutto quello che oggi abbiamo a disposizione.

Gli autori quindi vogliono elencare lo staff che lavora sugli osservatori italiani e che ha come mansione principale l'installazione e la manutenzione di strumenti, osservatori e banche dati relative:

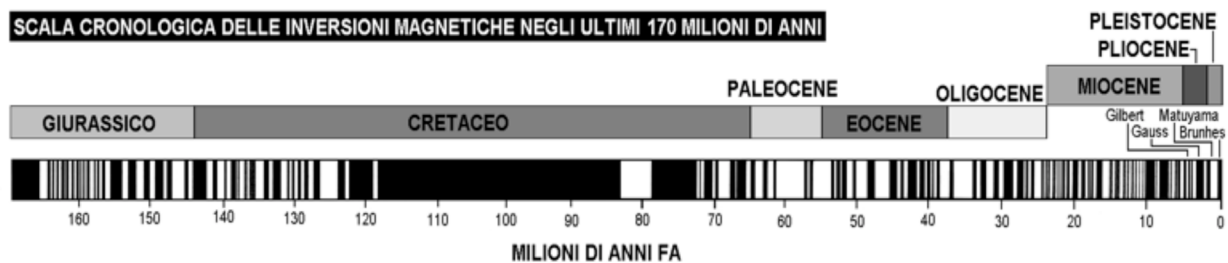
Paolo Bagiacchi  
Giovanni Benedetti  
Fulvio Biasini  
Manuele Di Persio  
Angelo Di Ponzio  
Michele Di Savino  
Lucrezia Fattore  
Cesidio Gizzi  
Luciana Macera  
Massimo Miconi  
Emanuele Petracca  
Andrea Policardi  
Lucia Santarelli  
Sabina Spadoni

## 1. Il campo magnetico terrestre

Il campo magnetico terrestre è generato principalmente da correnti elettriche di origine interna alla Terra che fluiscono nel nucleo esterno fluido. Ad esso si sommano poi ulteriori contributi di diversa origine, come il campo crostale, generato dalle rocce magnetizzate nella crosta terrestre, il campo esterno generato da correnti elettriche che fluiscono nella ionosfera e nella magnetosfera a causa dell'interazione del campo magnetico con il vento solare, i campi di induzione elettromagnetica, generati da correnti indotte nella crosta e nel mantello dal campo esterno variabile nel tempo.

Il campo magnetico terrestre, oltre ad avere una precisa struttura spaziale, è soggetto a variazioni temporali riscontrabili, a seconda della scala temporale, mediante misurazioni dirette di campo magnetico o, per quel che concerne i tempi geologici, attraverso studi paleomagnetici. Il paleomagnetismo è una disciplina geofisica in cui le caratteristiche direzionali e di intensità del campo magnetico terrestre del passato vengono determinate mediante lo studio della magnetizzazione rimanente delle rocce.

Per esempio, con gli studi paleomagnetici, si è evidenziata una caratteristica molto importante del campo magnetico terrestre; a intervalli temporali molto variabili, il campo geomagnetico inverte la sua polarità, cioè il polo nord e il polo sud magnetici si scambiano di posizione. Misure sistematiche su rocce, a scala globale, hanno evidenziato 300 inversioni soltanto negli ultimi 170 milioni di anni (vedi figura 1).



**Figura 1.** Sequenza della polarità normale (bande nere) e inversa (bande bianche) negli ultimi 170 milioni di anni.

Analizzando le diverse tipologie di variazioni temporali se ne possono distinguere varie categorie, riconducibili a due grandi gruppi: le variazioni regolari, che presentano un qualche carattere di regolarità (pulsazioni, in base al periodo, e variazioni pseudoperiodiche, in base a una qualche ciclicità) e le variazioni irregolari, in cui mancano caratteri di riconosciuta ciclicità. Nella seguente tabella (tabella 1), ne sono riportate sinteticamente le principali caratteristiche (ampiezza A e pseudoperiodo T).

Specie	Pseudoperiodo	Ampiezza (nT)
<b>VARIAZIONI REGOLARI</b>		
Pulsazioni	0,1 – 1000 s	0,05 – 300
Variazione diurna solare	24 ore	10 – 80
Variazione diurna lunare	24 ore 50 minuti	2 – 10
Variazione undecennale solare	Circa 11 anni	Circa 10
Variazione secolare		Circa 20 nT/anno
<b>VARIAZIONI IRREGOLARI</b>		
Fluttuazioni		Circa 0.01
Baie		10 – 300
Tempeste		50 – 500
Inversioni		Tra 6 e 12 10 <sup>4</sup>

**Tabella 1.** Variazioni temporali del campo magnetico terrestre.



### 1.1 Gli elementi del campo magnetico terrestre

Il campo magnetico terrestre (cmt) viene di norma misurato sulla superficie terrestre ed è definito in ogni punto dal vettore intensità **F**. Poiché le proprietà magnetiche dell'aria differiscono per pochissimo da quelle del vuoto ( $\mu_0 \cong \mu$  dell'aria) si può usare indistintamente **B** o **H** per descrivere il campo attraverso una terna levogira definita come segue:

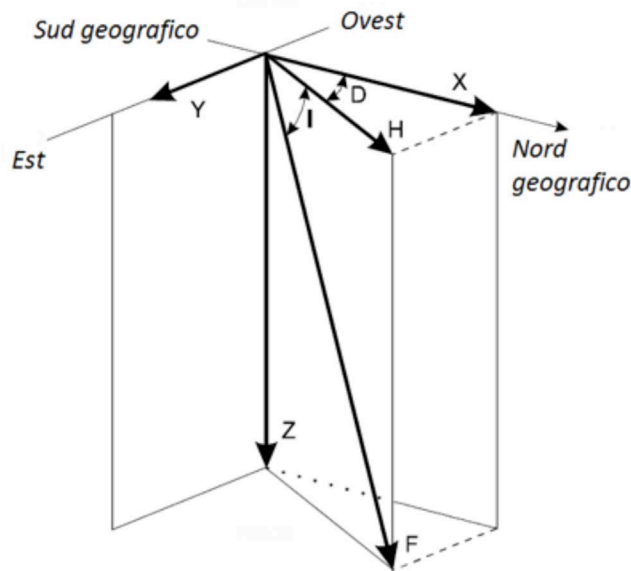
- **X**, lungo il meridiano, diretto verso il nord geografico;
- **Y**, lungo il parallelo, diretto verso est (componente non nulla perché il campo non è prodotto da un dipolo perfetto);
- **Z**, lungo la verticale, positivo verso il basso per l'emisfero nord.

Per convenzione internazionale, l'intensità del cmt viene espressa in termini del vettore induzione **B** e la sua unità di misura è, pertanto, il *tesla* (T), ma nella pratica, essendo un campo debole, viene usato un sottomultiplo, il *nanotesla* (nT=10<sup>-9</sup>T), che numericamente coincide con il *gamma* ( $\gamma=10^{-5}$ G), unità tradizionalmente usata prima dell'uso delle unità SI. In geomagnetismo il vettore d'induzione del cmt è indicato comunemente **F** ed il suo modulo è chiamato "intensità totale".

Il piano verticale che contiene **F** identifica il meridiano magnetico locale. D, declinazione magnetica, è l'angolo tra il meridiano magnetico e il meridiano geografico, mentre l'angolo I, inclinazione magnetica, è l'angolo che **F** forma con il piano orizzontale, tangente al punto di misura sulla superficie terrestre e positivo quando **F** punta verso il basso (figura 2). Aggiungendo la componente orizzontale del campo **H** (proiezione di **F** sul piano xy), i sette elementi del campo sono legati dalle seguenti relazioni:

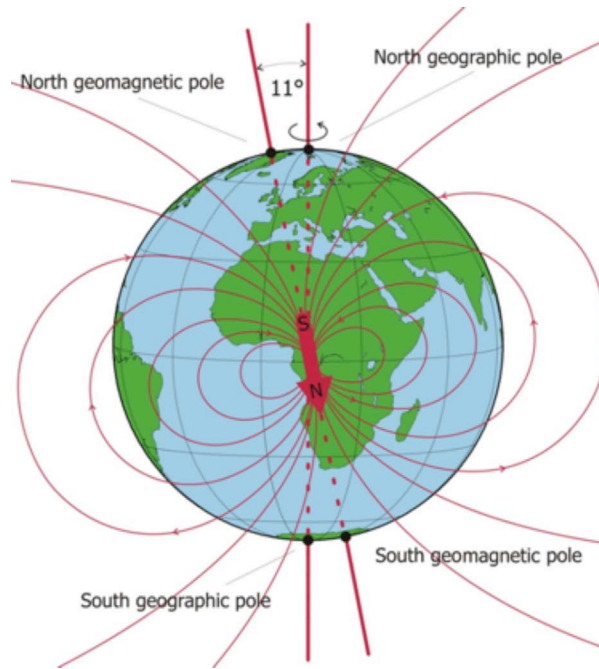
$$\begin{array}{lll} X = H \cos D & Y = H \sin D & Z = F \sin I \\ H = F \cos I & \text{tg } I = Z / H & \text{tg } D = Y / X \end{array}$$

È sufficiente avere tre grandezze indipendenti per definire univocamente il vettore **F** [Parkinson, 1983].



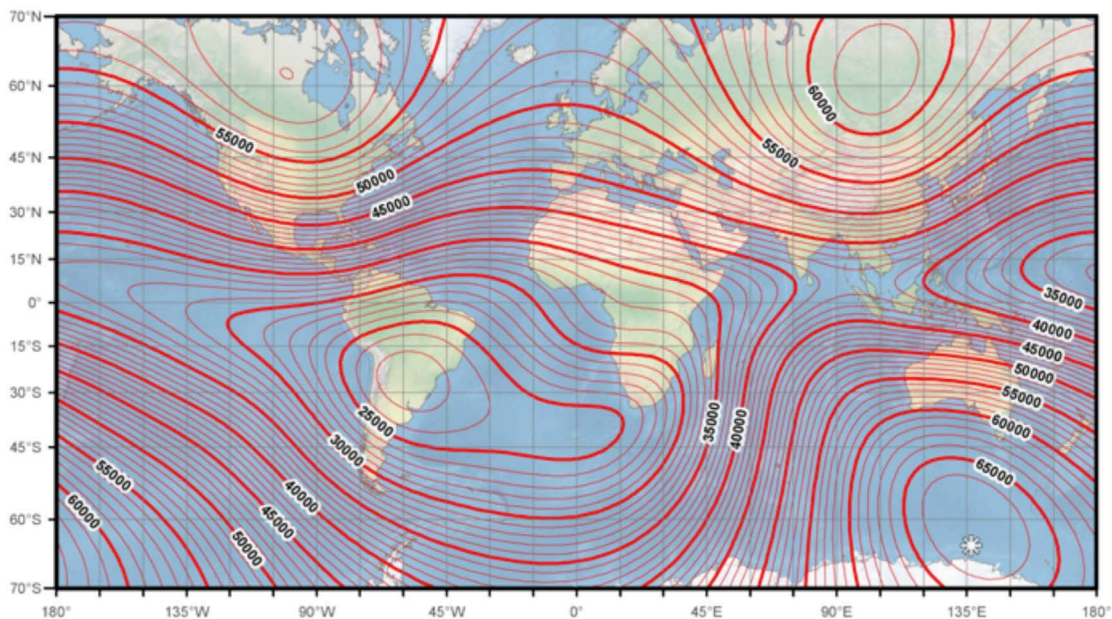
**Figura 2.** Sistema locale di riferimento ed elementi del campo magnetico terrestre.

Ad un'analisi sulla superficie terrestre il cmt si presenta, in prima approssimazione, come quello generato da un momento dipolare posto nel centro della Terra e inclinato di circa 11° rispetto all'asse di rotazione terrestre (vedi figura 3).



**Figura 3.** Rappresentazione del campo magnetico terrestre  
(da [http://roma2.rm.ingv.it/it/tematiche/7/il\\_campo\\_magnetico\\_terrestre\\_principale](http://roma2.rm.ingv.it/it/tematiche/7/il_campo_magnetico_terrestre_principale)).

L'intensità del cmt varia da un minimo di circa 23000 nT nelle zone equatoriali ad un massimo di circa 67000 nT, in corrispondenza dei poli magnetici (punti in cui il campo magnetico è perfettamente verticale; da non confondere con i poli geografici, ottenuti dalla ricostruzione matematica del campo mediante l'analisi in armoniche sferiche al primo grado). Contrariamente all'andamento del campo di gravità terrestre, della distribuzione degli epicentri dei terremoti e dei vulcani nel mondo, il campo magnetico terrestre non sembra risentire della distribuzione delle placche tettoniche. In figura 4 è riportata la carta globale delle isolinee dell'intensità del campo per l'epoca 2015.0.



**Figura 4.** Carta mondiale dell'intensità del vettore  $F$  del campo magnetico terrestre all'epoca 2015.0 (valori in nT, isolinee a 1000 nT). L'asterisco in basso a destra indica la posizione del polo magnetico.

## 2. Gli osservatori geomagnetici

Oggi sono sempre più numerosi i siti permanenti di misura del campo magnetico terrestre, sia per il crescente interesse in questo settore scientifico che per la maggiore disponibilità di strumentazione, tecnologicamente migliorata e miniaturizzata a costi ridotti.

Le misure vengono effettuate principalmente in terra ferma, ma i dati raccolti in mare su apposite navi oceanografiche, quelli aeromagnetici su velivoli predisposti e quelli raccolti nello spazio con dedicati satelliti geostazionari, hanno contribuito enormemente alla definizione di modelli del campo magnetico terrestre sempre più affidabili, permettendo una comprensione maggiore dei fenomeni studiati. Nell'ultimo secolo la morfologia del campo magnetico terrestre e le sue variazioni spaziali e temporali sono così dettagliate e precise da costituire un irrinunciabile vincolo fisico per qualsiasi teoria globale concernente la Terra e la sua dinamica.

La distribuzione degli osservatori nel mondo privilegia ancora l'emisfero nord, per la prevalente presenza di paesi industrializzati (figura 5). Le registrazioni magnetiche, talvolta addirittura sovrabbondanti per alcune regioni dell'emisfero boreale con elevato numero di osservatori, seppur utili, non eliminano l'incolmabile mancanza di dati in vastissime aree dell'emisfero sud. Per la conoscenza dell'evoluzione temporale dei fenomeni terrestri i dati forniti dagli osservatori geofisici permanenti sono quindi di fondamentale importanza. Non sarebbe pensabile costruire modelli del cambiamento globale senza poter fare affidamento su serie storiche di parametri fisici, chimici e in generale ambientali, che vengono raccolti da osservatori come quelli meteorologici, climatologici, magnetici, ionosferici, sismici, geodetici, mareografici.



**Figura 5.** Distribuzione degli osservatori geomagnetici della rete di INTERMAGNET (dal sito di INTERMAGNET [www.intermagnet.org](http://www.intermagnet.org)).

In ogni osservatorio geomagnetico si ricavano valori medi orari, giornalieri e mensili dalla misurazione dei vari elementi del campo magnetico (campionati più o meno fittamente) e viene fornito anche il valore medio annuo centrato ad una determinata epoca: ad esempio il valore al 2015.0 è il valore medio dell'elemento calcolato al 1 gennaio del 2015 (effettuando la media dei valori da luglio 2014 a giugno 2015).

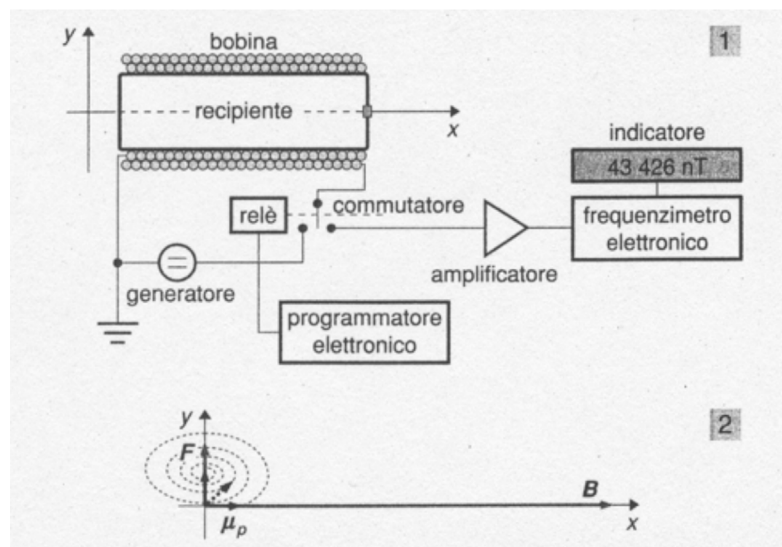
### 3. Gli strumenti di misura in uso presso gli osservatori

Prima di addentrarci nella descrizione della strumentazione utilizzata in osservatorio, vogliamo definire una *misura assoluta*, che è una misurazione che permette di determinare la quantità di interesse in termini esclusivamente di unità fondamentali (indipendente quindi da altri fattori); una *misura relativa* invece è una misura espressa come deviazione rispetto ad un valore iniziale che va fissato in modo indipendente. In un osservatorio geomagnetico sono in funzione degli strumenti in grado di determinare le misure assolute, che fungono poi da riferimento per le misure relative registrate dagli strumenti.

Nel dettaglio, la dotazione minima di un osservatorio geomagnetico è costituita, solitamente, da un magnetometro scalare per la registrazione dell'intensità  $F$  del campo e da un magnetometro vettoriale per la registrazione delle variazioni delle tre componenti cartesiane del campo. Essendo quest'ultimo uno strumento non assoluto (che effettua cioè misure relative), vengono misurati manualmente, con una cadenza tipicamente settimanale, i valori angolari del campo, la declinazione  $D$  e l'inclinazione  $I$ , che sono misure assolute. Queste misure assolute, opportunamente combinate con le misure simultanee dell'intensità del campo  $F$ , permettono di definire i livelli di riferimento (basi) per le variazioni, in modo da ottenere i valori effettivi di tutte le componenti del campo. Le raccomandazioni degli organismi internazionali come la IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy), suggeriscono e incoraggiano la ridondanza della strumentazione per garantire una copertura temporale del monitoraggio del campo priva di interruzioni. Per questo motivo presso gli osservatori INGV sono installati due sistemi completi di misura del campo magnetico terrestre.

#### 3.1 Strumenti per la misura di $F$

I principali strumenti utilizzati per la misurazione dell'intensità  $F$  del campo, sono i magnetometri a protoni e i magnetometri Overhauser. Il magnetometro a protoni (schematizzato in figura 6.1) consta di un recipiente contenente un liquido fortemente idrogenato (acqua, idrocarburi), attorno a cui è avvolta una bobina. Ciascuno dei protoni possiede un momento angolare (spin)  $p$  e un momento magnetico dipolare  $\mu_p = \gamma_p p$  (dove  $\gamma_p$  è il rapporto giromagnetico del protone pari a  $2.6751525 \times 10^8 \text{ T}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ); la direzione del momento magnetico varia con continuità, a seguito degli urti con le particelle circostanti; applicando una corrente elettrica nella bobina, e quindi generando un campo magnetico di alcune centinaia di volte più forte del cmt, i protoni tenderanno ad allinearsi, con i loro momenti, intorno alla direzione del campo polarizzante. Una volta che è stata annullata la corrente, i momenti dei protoni, inizieranno a effettuare un moto di precessione intorno alla direzione del cmt (figura 6.2), con frequenza  $\nu = [\gamma_p / 2\pi] F$  e quindi proporzionale al valore di  $F$ ; ai capi della bobina si genera una tensione alternata della stessa frequenza. Dalla misura di questa frequenza si ricava  $F$ . L'errore assoluto della misura è determinato essenzialmente dall'errore con cui è noto il rapporto giromagnetico dei protoni e di conseguenza risulta essere dell'ordine di 0,1 nT.



**Figura 6.** Schema di principio del magnetometro a protoni (1) e schema del moto di precessione di un protone con momento magnetico  $\mu_p$  (2).

Il magnetometro Overhauser è un magnetometro a protoni in grado di effettuare 10 misure al secondo, invece che 1 misura ogni 10 secondi come è per il magnetometro a protoni. Questa velocità è resa possibile perché l'effetto di allineamento viene ottenuto molto rapidamente aggiungendo al fluido, ricco di protoni, molecole con un elettrone spaiato. Eccitando questi elettroni liberi con un campo magnetico esterno a opportuna frequenza lontana da quella di precessione, questi tornano allo stato normale non emettendo onde em ma alterando l'orientamento del momento di spin dei protoni che così si allineano al campo magnetico ambiente in maniera molto rapida [Santarato et al., 2015].

### 3.2 Strumenti per la misura delle componenti del campo

Per questo tipo di misurazioni si usano i cosiddetti magnetometri a nucleo saturabile o, in inglese, *flux-gate magnetometer* (magnetometro a soglia di flusso). Lo strumento è costituito da un nucleo ferromagnetico magnetizzato di per sé simmetricamente, in forma di sottile cilindretto su cui si trovano due avvolgimenti simmetrici, in serie fra loro ma con versi opposti, di eccitazione, collegati a un unico generatore di forza elettromotrice alternata a bassa frequenza (a  $\sim 1000$  Hz); vi è inoltre un avvolgimento di rivelazione collegato a un dispositivo di misurazione della tensione ai suoi capi. Se il campo magnetico esterno è nullo le tensioni indotte nei due avvolgimenti di eccitazione si compensano e il segnale netto rivelato dall'avvolgimento di rivelazione sarà nullo. La presenza di un campo magnetico esterno modifica questa simmetria e il segnale netto risulterà proporzionale, tramite una costante strumentale, alla sua componente secondo l'asse del nucleo e così, disponendo tre sensori con i relativi assi dei nuclei mutuamente ortogonali, si determinano le tre componenti cartesiane del cmt.

Gli strumenti citati precedentemente vengono utilizzati negli osservatori per registrazioni continue nel tempo delle variazioni degli elementi del cmt (almeno tre indipendenti). Prescindendo dal tipo di strumentazione, è comunque indispensabile ancorare, a intervalli di tempo regolari, le registrazioni variometriche a misure assolute sia per evitare eventuali derive, sia, soprattutto, per corregger disallineamenti e livellamenti dovuti a deformazioni dei supporti meccanici e del suolo. Bisogna dire che a tali fenomeni sono soggetti i magnetometri flux-gate, meno lo sono i magnetometri a protoni.

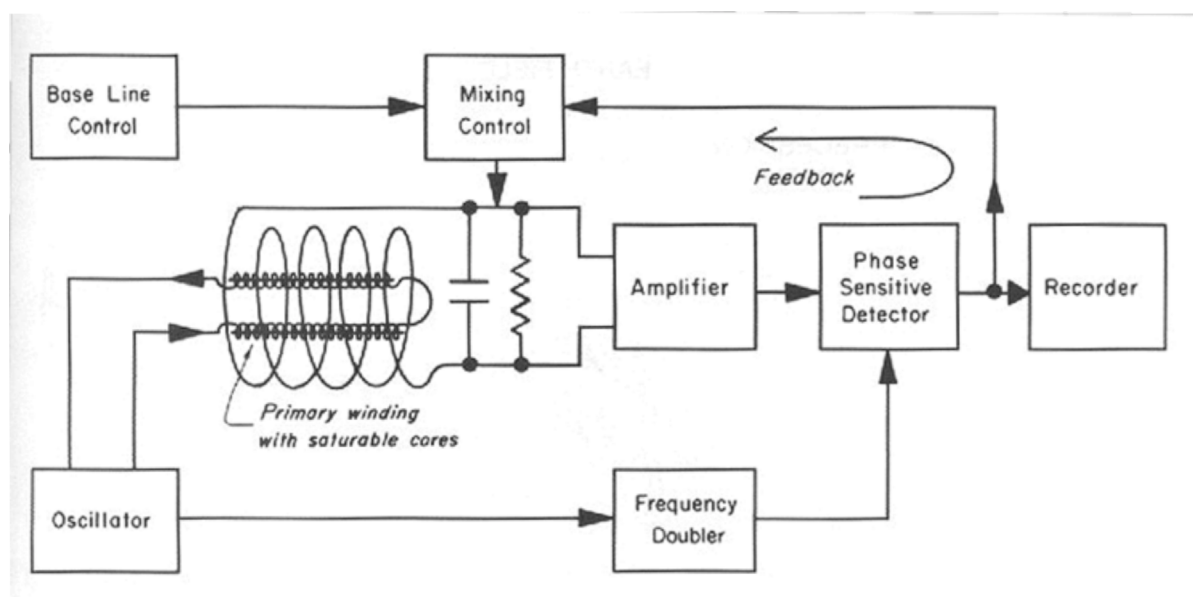


Figura 7. Schema di un magnetometro flux-gate.

### 3.3 Misure assolute

Il DIM (Declination Inclination Magnetometer) consta di un teodolite, costruito con materiali amagnetici, sul cui asse ottico è montato un sensore magnetico di tipo flux-gate: tale strumento permette la misura delle componenti angolari del vettore Induzione. Queste misure vengono effettuate presso gli osservatori con cadenza settimanale. Per i dettagli su come effettuare una misura assoluta vedi Appendice A.

Negli osservatori il teodolite viene posizionato sul pilastrino della casetta dedicata alle misure degli

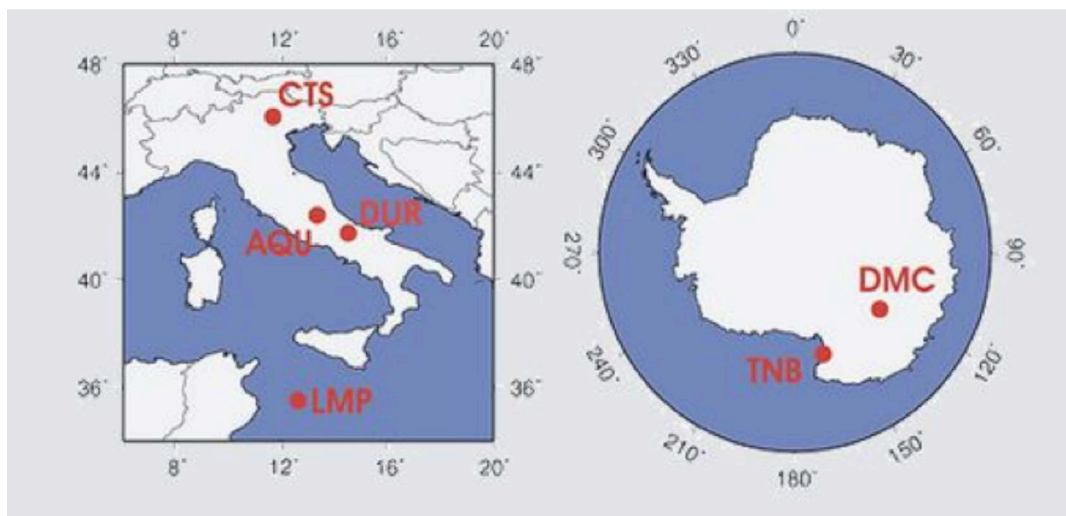
elementi angolari sopra il quale generalmente si trova posizionato il sensore di uno dei due magnetometri scalari di modo che i valori dell'intensità del campo vengano misurati nello stesso punto in cui si misurano gli elementi angolari del vettore  $F$ . In fase d'installazione viene calcolata la differenza dei valori misurati dai due magnetometri scalari e di questo valore va tenuto conto ricontrollandolo periodicamente e riportandolo tra le caratteristiche dell'osservatorio. Le basi calcolate, partendo dalle misure assolute, sono il riferimento per le variazioni registrate dalla strumentazione. La IAGA suggerisce per gli osservatori INTERMAGNET una variabilità delle basi (in un anno) di  $\pm 2.5$  nT [INTERMAGNET Technical reference manual version 4.6, 2012].

#### 4. Gli osservatori geomagnetici gestiti dall'INGV

Gli osservatori geomagnetici dell'INGV vengono gestiti dalla sezione Roma2. L'INGV ha una decennale e ricca esperienza nella gestione di osservatorio geomagnetici. Grazie alla recente riorganizzazione dell'Istituto, oggi tutta la gestione degli osservatori geomagnetici INGV ricade sotto un'unica Unità Funzionale, la UF2 "Osservatori geomagnetici e rete magnetica nazionale" che gestisce 3 osservatori presenti sul territorio nazionale e comprende il personale responsabile dei 2 osservatori realizzati dall'allora ING nell'ambito del PNRA (figura 8).

Gli osservatori geomagnetici sono i seguenti:

- Duronia (DUR,  $41^{\circ} 39' N$ ,  $14^{\circ} 28' E$ ),
- Castello Tesino (CTS,  $46^{\circ} 02' N$ ,  $11^{\circ} 39' E$ )
- Lampedusa (LMP,  $35^{\circ} 31' N$ ,  $12^{\circ} 32' E$ )
- Stazione Mario Zucchelli (TNB,  $74^{\circ} 42' S$ ,  $164^{\circ} 6' E$ )
- Dome C, presso la Stazione Concordia (DMC,  $75^{\circ} 6' S$ ,  $123^{\circ} 21' E$ )



**Figura 8.** Gli osservatori geomagnetici italiani (da <http://mio.ingv.it/index.php>).

L'osservatorio geomagnetico italiano più antico e longevo in realtà è quello, non riportato nell'elenco ma la cui posizione è visibile in figura 8, di **L'Aquila**, fondato dall'allora ING (Istituto Nazionale di Geofisica, divenuto INGV nel 1999) nel 1958 in occasione dell'Anno Geofisico Internazionale. È stato per molti anni il principale osservatorio magnetico italiano fino all'anno 2009, quando un forte terremoto ne ha decretato la chiusura. L'osservatorio sorgeva a Preturo, un piccolo paese a circa 15 km da L'Aquila. Dal 1999 l'osservatorio di L'Aquila è entrato a far parte della rete Intermagnet, una rete internazionale che raggruppa un centinaio di osservatori che forniscono misure del campo magnetico terrestre secondo standard prestabiliti [INTERMAGNET, Technical Reference Manual, 2012]. Il ruolo di osservatorio geomagnetico del centro Italia, dopo la chiusura di L'Aquila, è stato assunto da Duronia. Oggi a Preturo c'è un laboratorio utilizzato per la riparazione e la calibrazione degli strumenti magnetici e un sistema di misura del cmt completo. Settimanalmente vengono eseguite anche le misure assolute.

L'osservatorio geomagnetico di **Duronia** è nato alla fine del 2007 come stazione di monitoraggio elettromagnetico ambientale nell'ambito del Progetto Europeo MEM (Magnetic and Electric fields Monitoring). La scelta del luogo è stata dettata essenzialmente dalla sua posizione geografica che risulta privilegiata sia rispetto le linee ferroviarie che alle aree più industrializzate e più antropizzate dell'Italia Centrale. A seguito del terremoto del 2009, la stazione di misura di Duronia è stata radicalmente modificata e trasformata in un osservatorio geomagnetico di tipo classico. Ciò al fine di poter essere utilizzata in sostituzione dell'osservatorio geomagnetico di L'Aquila chiuso definitivamente il 31 luglio 2010. Dal 1 luglio 2010 sono iniziate tutte le attività proprie di un osservatorio compresa l'esecuzione delle misure assolute con la relativa redazione dell'annuario. A giugno 2016 l'osservatorio di Duronia è l'osservatorio italiano presente nella rete internazionale di INTERMAGNET. Presso gli osservatori di Duronia e di Castello Tesino vengono calcolati automaticamente gli indici K mediante il programma Kasm distribuito dall'Istituto Polacco dell'Accademia delle Scienze di Varsavia che utilizza il metodo dello smoothing adattato, accettato dalla comunità IAGA.

L'osservatorio geomagnetico di **Castello Tesino** è stato fondato dall'ING nel 1964. Si trova in provincia di Trento e proprio per la sua lontananza dalla sede centrale è stato progettato per funzionare in modo automatico e per poter essere controllato a distanza. L'osservatorio era costituito da tre cassette amagnetiche in muratura: una è per le misure assolute, una per i sistemi automatici (computer, strumenti e sensori) e la terza è dedicata ad altri servizi (gruppo di continuità, rete LAN, etc.). Dopo l'edificazione di un campeggio nelle vicinanze della casetta dove erano alloggiati i sistemi automatici si è resa necessaria la realizzazione, nel 2009, di una quarta casetta amagnetica spostata, rispetto alla vecchia, di circa 150 metri in direzione opposta al campeggio per annullarne i disturbi.

L'osservatorio di **Lampedusa** si trova nella punta occidentale dell'isola. Le fasi iniziali dell'istallazione dell'osservatorio sono cominciate nel 2006, e dall'inizio del 2007 la strumentazione, costituita da un solo sistema di acquisizione, ha cominciato a registrare regolarmente i valori del campo magnetico terrestre. Nel dicembre 2014 è stato introdotto un secondo sistema di misura ridondante. Le misure assolute sono state eseguite in modo sporadico fino all'aprile 2015, da quando invece sono state effettuate con la cadenza regolare di tre volte al mese, innalzando lo standard della stazione di Lampedusa a quella di osservatorio. L'osservatorio consiste in una piccola casetta di pietra con tetto in legno situata in una riserva naturale, in una zona caratterizzata da un bassissimo livello di rumore elettromagnetico e in una piccola casetta amagnetica di legno per l'esecuzione delle misure assolute. La corrente elettrica è fornita da pannelli fotovoltaici e la trasmissione dei dati avviene con connessione GSM.

Degli osservatori geomagnetici antartici il più vecchio è quello presso la **Stazione Mario Zucchelli** (che fino al 2003 si chiamava Stazione Baia Terra Nova, da cui la sigla internazionale TNB dell'osservatorio). Nel quadro del programma nazionale Italiano della ricerca scientifica in Antartide (PNRA), durante l'estate australe 1986-1987, è stato installato presso la base italiana a Baia Terra Nova il primo osservatorio geomagnetico italiano su territorio antartico. Nonostante la base sia presidiata solo durante il periodo estivo, dal 1992 l'osservatorio funziona anche durante l'inverno in modo automatico. L'osservatorio è costituito da quattro cassette amagnetiche che ospitano rispettivamente la strumentazione, il pilastrino per le misure assolute, i servizi e una saletta per l'acquisizione. Le misure assolute vengono svolte quotidianamente soltanto durante l'estate australe.

L'osservatorio di **Dome C**, presso la stazione Concordia, si trova a circa 1.200 km dalla costa e prende il nome dal settore del continente antartico noto con il nome di Dome C (da cui la sigla internazionale dell'osservatorio, DMC). Lo spessore del ghiaccio in questo punto supera i 3.200 m ed è qui che italiani e francesi hanno costruito una base permanente destinata a rimanere attiva 12 mesi all'anno. Fra le molteplici installazioni scientifiche vi è anche un osservatorio geomagnetico la cui gestione è condivisa fra colleghi italiani e francesi. La stazione si trova in un punto della calotta glaciale con delle caratteristiche particolari: infatti è ubicato all'interno della calotta polare, in prossimità del polo geomagnetico, dove le linee di campo magnetico sono aperte e direttamente connesse con il campo magnetico interplanetario. Questo offre una preziosa opportunità per lo studio dei fenomeni esterni alle alte latitudini. Le misure assolute vengono eseguite durante tutto l'anno con cadenza bisettimanale, essendo Concordia una base presidiata permanentemente.

I variometri usati presso gli osservatori in Italia (giugno 2016) sono i seguenti:

**Castello Tesino:**

Lemi18, n B41 sospeso

Lemi25, n 43 sospeso

### Duronia:

Lemi25 n 11

Lemi25 n 24

### Lampedusa

Lemi18 n C72 sospeso

Lemi18 n B46 sospeso

I magnetometri vettoriali sono tutti orientati lungo la direzione del meridiano magnetico al momento della loro installazione e misurano quindi le variazioni  $\Delta H$ ,  $\Delta D$  e  $\Delta Z$ . È importante tener presente che in questo caso H non è l'intera componente orizzontale ma la sua proiezione lungo la direzione del meridiano magnetico al momento dell'installazione. Presso gli osservatori ciascun sistema di misura è costituito da un magnetometro vettoriale a cui è associato un magnetometro scalare per la misura l'intensità totale F.

I dati degli osservatori geomagnetici possono essere visualizzati e scaricati attraverso due portali web: *Geomag* (<http://geomag.ingv.it>) e *Ambient* (<http://ambient.int.ingv.it>). Sul primo sono acquistati e visualizzabili i dati in tempo reale dei due sistemi di misura del campo magnetico di ciascun osservatorio. Il secondo server, *Ambient*, è raggiungibile soltanto dalla rete interna INGV ed è utilizzato per la visualizzazione e il controllo del funzionamento della strumentazione di tutti gli osservatori.

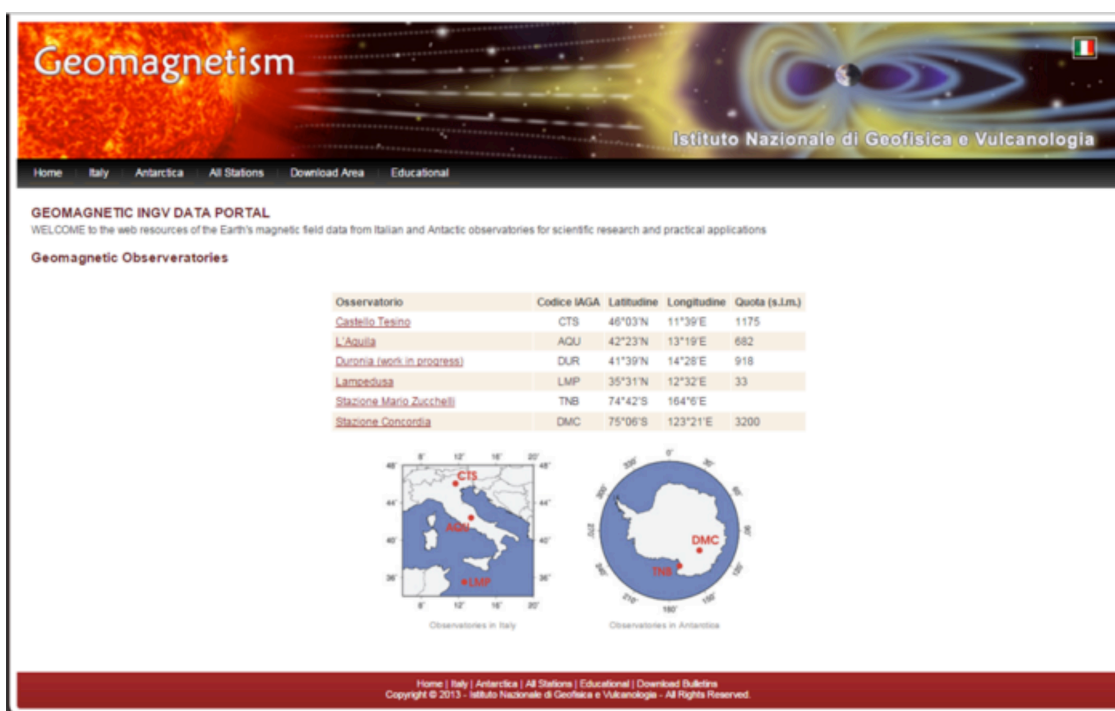


Figura 9. Esempio di pagina WEB (<http://mio.ingv.it/index.php>).

Da queste pagine è possibile ottenere informazioni sullo stato degli strumenti degli osservatori e a effettuare delle verifiche per il controllo automatico dei vari sistemi di acquisizione sia degli osservatori che delle stazioni di misura del progetto FIRB Abruzzo di Preturo, Collebrincioni e Paganica [Di Lorenzo et al., 2016].



Osservatorio	Codice	Vec mag.	Scal. Magg.	Acq. Prog.	WEB
Castello Tesino	CT5	Lemi25 n.43	Gem GSM90(Mis.Ass.)	Mago	
	CT4	Lemi18 n. B41	Gem GSM90 (Cas. Sens.)	Mago	SI
L'Aquila	INT1	Lemi25	Geomag SMR100R	Mago	SI
	INT2	FGE DMI	??	Mago	
Duronio	DUR1	Lemi25 n.11	GEM	Mago	
	DUR2	Lemi25 n.24	Geomag (Mis Ass)	Mago	SI
Lampedusa	LMP1	Lemi18 Sosp. n.C72	Gem GSM90	Serial	SI
	LMP2	Lemi18 Sosp. n.B46	Gem GSM90 (Mis Ass)	Serial	
Stazione Mario Zucchelli	Oasi1	EDA	Gem GSM90	Mago	SI
	Oasi2	FGE DMI	Gem GSM90	Mago	
	Oasi5	Lemi 25	Gem GSM90	Mago	
	Oasi6	DIDD	-	Magrec	
Stazione Concordia	DMC	FGE DMI Sospeso	Gem GSM90	French progr	SI

Observatories in Italy

Observatories in Antarctica

Stazioni FIRB Abruzzo	Codice	Latitudine	Longitudine	Quota (s.l.m.)
Preturo	PRT	46°03'N	11°39'E	1175
Collebrincioni	CLB	42°23'N	13°19'E	682
Paganica	PGN	41°39'N	14°28'E	918

CT4 System, Castello Tesino Geomagnetic Observatory, Italy data viewer - Date

month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Jan	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Feb	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
Mar	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Apr	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3
May	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Jun	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3			3	3	
Jul	3									1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Aug	1	1	1	1	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3					3	3
Sep	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Oct	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Nov	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Dec	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Data available from: 1 System 1  
2 System 2  
3 Both System 1 & 2

Figura 10. Informazioni estrapolabili dal sito *Ambient*.

Dal server *Ambient* è inoltre possibile controllare l'acquisizione degli strumenti graficando i dati su finestre giornaliere, mensili o effettuando confronti tra i vari sistemi in acquisizione per ogni osservatorio (figura 11).

Infine alcune delle pagine WEB istituzionali degli osservatori sono illustrate sul monitor "site show" all'ingresso della sezione Roma2 [Buono et al., 2015] per essere visualizzate insieme ai grafici di altri dati raccolti da altri osservatori nell'ambito delle attività della sezione Roma2.

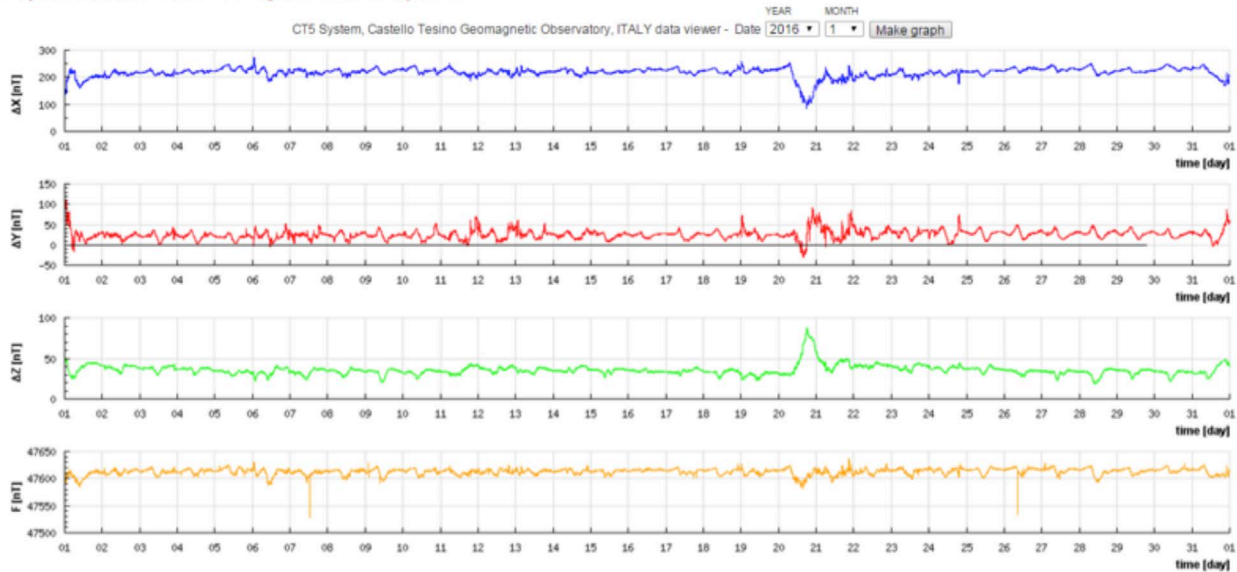


Figura 11. Grafico mensile dei dati dal sito Geomag.

## 5. Controllo della qualità dei dati

Parte fondamentale del processo di generazione di dati per un osservatorio è il controllo della qualità. Come abbiamo già accennato, gli osservatori italiani sono equipaggiati tutti con due sistemi di misura ridondanti e indipendenti, costituiti ciascuno da un magnetometro scalare e un magnetometro vettoriale. In genere uno dei due è alimentato da un sistema di batterie e pannelli solari, mentre l'altro è alimentato dalla rete elettrica. L'utilizzo di due sistemi consente, pertanto, di confrontare i dati acquisiti e fare delle considerazioni sulla loro qualità. Gli strumenti vettoriali degli osservatori geomagnetici italiani sono orientati nel riferimento magnetico. Questo significa che talvolta i sistemi nello stesso osservatorio possono essere orientati diversamente, se installati in momenti diversi. Di questo è necessario tenere conto in fase di confronto, non essendo le componenti direttamente comparabili.

### Controllo dei magnetometri scalari

Il primo controllo da effettuare periodicamente per determinare il buon funzionamento di un osservatorio è il controllo dei valori registrati dai magnetometri scalari. Per fare questo non basta semplicemente graficarne i valori, ma è necessario effettuarne una differenza per evidenziarne eventuali anomalie. In figura 12 per esempio è riportato un caso in cui apparentemente i dati di due magnetometri scalari potevano essere considerati attendibili, mentre la loro differenza ha evidenziato una non corretta temporizzazione di uno dei due sistemi verificatesi in seguito ad una mancanza di dati di 2 minuti a cui è seguita una mancata sincronizzazione del sistema. È anche evidente la vicinanza di un elemento perturbante in prossimità di uno dei due magnetometri, evidenziato dal gradino a circa metà registrazione.

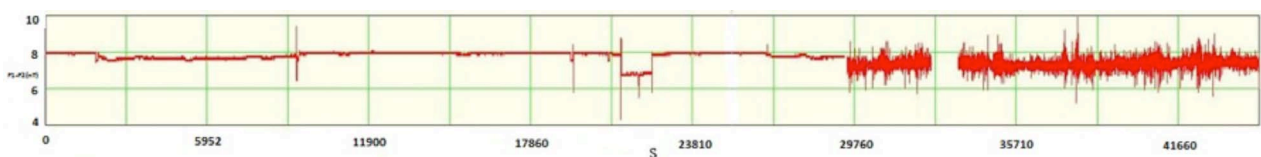


Figura 12. Differenza tra i valori di F (nT) registrati da due diversi strumenti scalari.

### Analisi del $\Delta F$

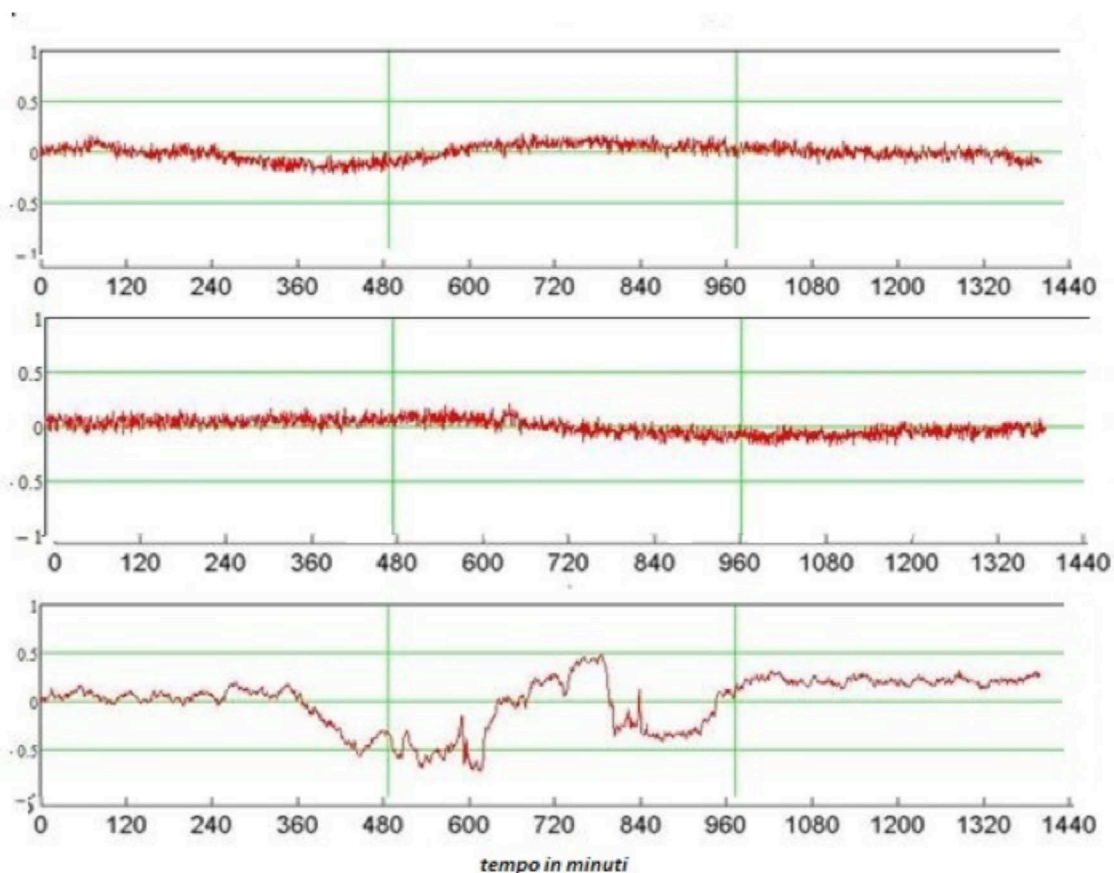
Un altro controllo importante è il controllo del così detto  $\Delta F$ . Il  $\Delta F$  è calcolato dalla differenza tra l'intensità del campo magnetico  $F_m$  misurato dal magnetometro scalare al tempo T e la intensità di  $F$  calcolata utilizzando le componenti misurate allo stesso tempo T dal magnetometro triassiale, corrette con le basi:

$$\Delta F(t) = F_m(t) - \sqrt{X_{mis}(t)^2 + Y_{mis}(t)^2 + Z_{mis}(t)^2}$$

dove le componenti misurate sono corrette aggiungendo algebricamente le corrispondenti basi:

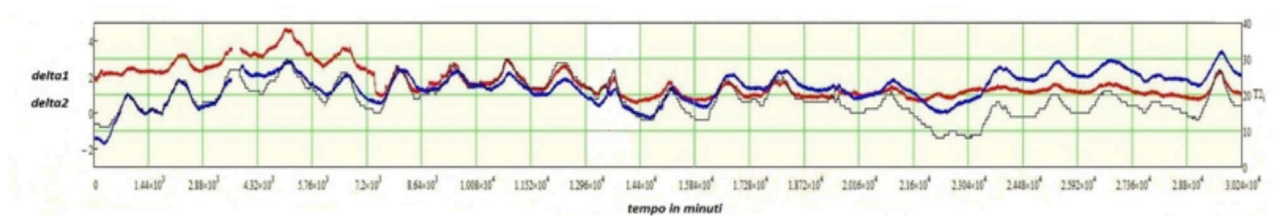
$$B_{mis} = \begin{cases} \Delta X(t) + BaseX \\ \Delta Y(t) + BaseY \\ \Delta Z(t) + BaseZ \end{cases}$$

Il  $\Delta F$ , essendo definito come differenza tra moduli, è un invariante irrotazionale, una grandezza cioè che non dipende dalle rotazioni del sistema di riferimento in cui è orientato il sensore del magnetometro triassiale. L'analisi del  $\Delta F$  risulta essere indipendente dal sistema di riferimento considerato (sia esso geografico o magnetico). Nell'esempio abbiamo riportato le componenti X, Y e Z ma avremmo potuto riportare anche le componenti H, D e Z qualora la strumentazione fosse orientata nel riferimento magnetico. Per il buon funzionamento di un osservatorio è richiesto che la variazione del  $\Delta F$  sia contenuta entro 1 nT. Questa analisi rappresenta un primo test della strumentazione magnetica, sia del magnetometro scalare che di quello vettoriale. Nella figura 13 è riportato un esempio per i tre osservatori. Come è visibile dalla figura, uno degli osservatori soffre del rumore dovuto alla presenza dei pannelli solari, unica fonte di alimentazione per il sistema, non correttamente isolati.



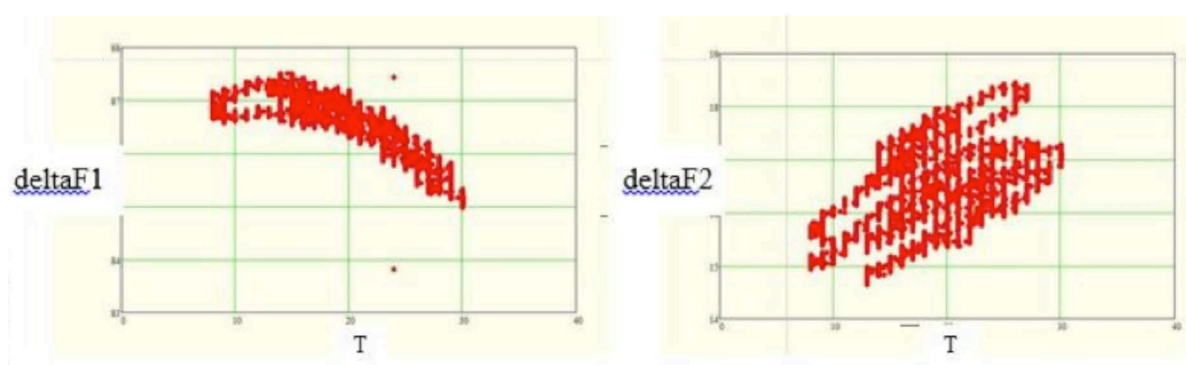
**Figura 13.** Esempio di alcuni  $\Delta F$  calcolati per tre osservatori per il 12 febbraio 2016.

Inoltre, questa analisi dà utili informazioni sulla bontà della coibentazione della strumentazione, essendo in particolare il magnetometro vettoriale sensibile alle variazioni di temperatura. In generale questo test è considerato una prova della corretta installazione dell'alloggiamento del magnetometro vettoriale e in particolare del buon isolamento termico del locale dove è ospitato. I magnetometri vettoriali usati presso i nostri osservatori (LEMI) hanno un coefficiente di temperatura dichiarato di circa 0.2 nT/°C.



**Figura 14.** Esempio di andamento del  $\Delta F$  per due magnetometri vettoriali Lemi25 (rosse e blu) e della temperatura dell'elettronica (in nero) per un periodo di 21 giorni.

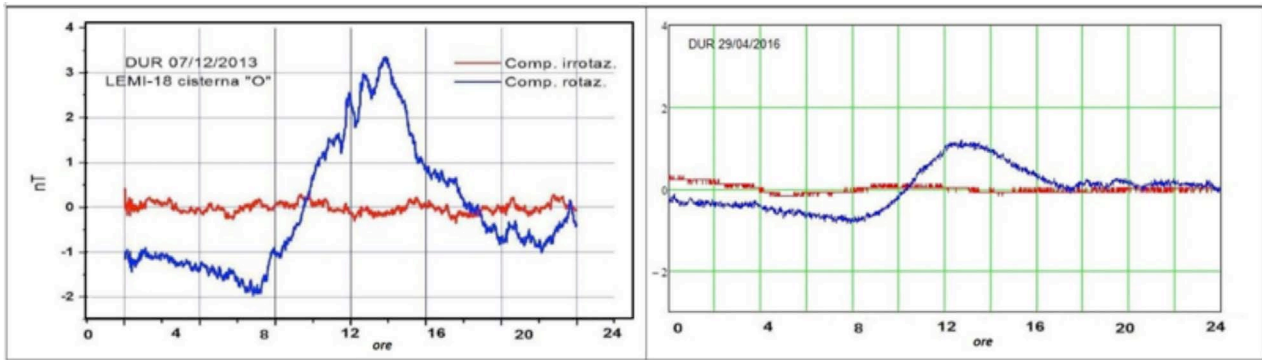
Nella figura 14 è riportato il risultato di una fase di test di due magnetometri vettoriali, entrambi LEMI25. I dati sono stati raccolti su un periodo di 21 giorni. Nella figura sono riportati i valori del  $\Delta F$  per i due sistemi di misura (rosso e blu) a cui è stato sovrapposto l'andamento della temperatura (nero). Nonostante i due magnetometri vettoriali siano apparentemente identici, è chiara invece una diversa dipendenza dalla temperatura, che mostra una grande influenza sul corretto funzionamento degli strumenti. È chiaro quindi che le variazioni di temperatura sono da contenere il più possibile per limitare questo errore indesiderato che non può essere corretto dalle basi. È necessario studiare le caratteristiche di ciascun strumento con accuratezza in fase di installazione. Nell'esempio riportato in figura 15 è riportato il valore del  $\Delta F$  per entrambi i magnetometri, al variare della temperatura  $T$ . Nel primo caso si nota che, nell'intervallo tra 10 e 20°C non si presentano significative variazioni nel  $\Delta F$ , per cui è possibile coibentare il magnetometro in modo che la temperatura non salga sopra i valori critici. Nel secondo caso c'è una dipendenza da  $T$  più marcata, per cui sarà necessario termostatare lo strumento in modo che le variazioni di temperatura siano il più contenute possibile.



**Figura 15.** Esempio di dipendenza di temperatura di  $\Delta F$  di due sistemi di misura (Lemi25).

### Analisi delle componenti

Nell'analisi dei dati dei sensori triassiali flux-gate, a causa della possibile diversa orientazione dei sistemi, un confronto diretto risulta impossibile. Infatti le semplici differenze tra i dati delle componenti sono valide solo per la componente Z (sempre nell'ipotesi della perfetta verticalità dell'installazione). È dunque buona norma effettuare una analisi della componente Z: la differenza delle misure registrate dai due sistemi deve essere contenuta, in caso di buon funzionamento della strumentazione.

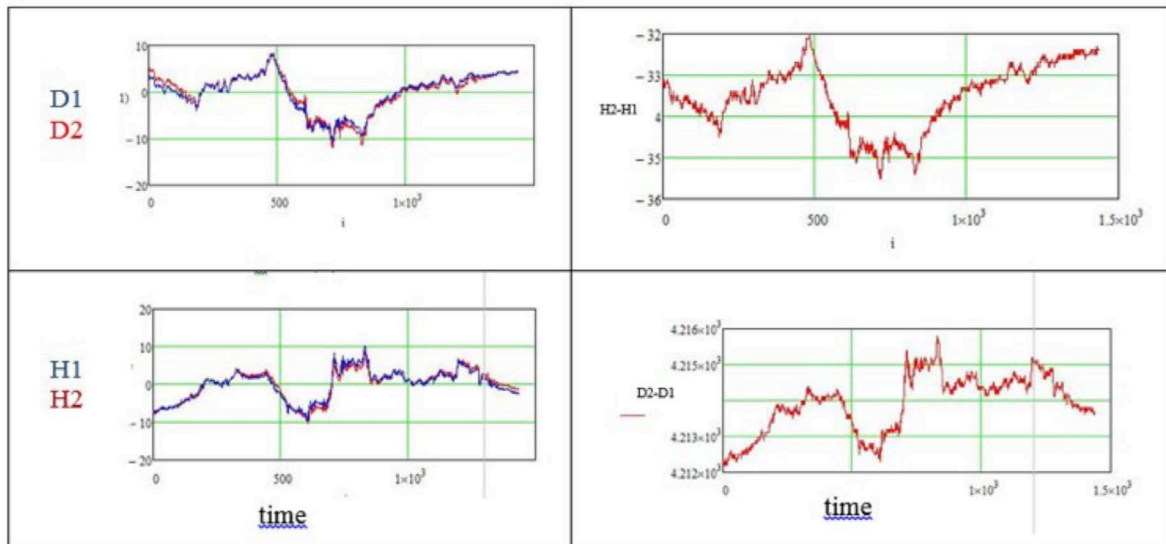


**Figura 16.** Confronto tra rumore totale esibito a Duronia in due diversi momenti di acquisizione.

In figura 16 è riportato un confronto tra il rumore totale esibito tra due strumenti, un LEMI 18 il primo e un LEMI25 il secondo. In rosso è riportato il grafico per il  $\Delta F$  mentre in blu è riportato il contributo della differenza tra le componenti verticali. Dal confronto si evince che la situazione è migliore nel secondo caso, ma ha ancora margine di miglioramento, essendo la variazione della differenza tra le componenti ancora alto, dovuto ad una non perfetta coibentazione dell'elettronica del magnetometro vettoriale.

Questo tipo di grafici riassume le condizioni del sistema di misura. Piccole variazioni corrispondono ad una corretta installazione degli strumenti e ad una corretta manutenzione del locale che li ospita.

Dal confronto delle componenti orizzontali possono essere ottenute altre importanti osservazioni sul funzionamento della strumentazione. Nel caso in cui le terne non siano orientate nello stesso modo, la differenza tra le corrispondenti componenti (ad esempio H2 - H1 o D2 - D1) non può completamente annullarsi. La differenza tra le componenti omologhe registrata da due differenti sensori può presentare un andamento simile a quello della componente ortogonale. In figura 17 è riportato un esempio di una registrazione giornaliera dei dati confrontati con la differenza delle componenti ortogonali: H2 - H1 ha lo stesso andamento (ma con ampiezza differente) della componente D; mentre la differenza D2 - D1 segue la componente H (vedi appendice C).



**Figura 17.** Differenze tra le componenti per i dati del 16 gennaio 2016.

Si parla di *mescolamento delle componenti*, che è possibile ritrovare talvolta nei dati di osservatorio, dovuti a cause diverse. I motivi principali del mescolamento possono essere riassunti nei seguenti punti principali [Palangio et al., 2014]:

- Non ortogonalità degli assi della terne di uno dei sensori.
- Mescolamento delle componenti dovute al disorientamento statico delle terne variometriche (al momento dell'installazione).
- Mescolamento delle componenti dovuto al movimento continuo della terna variometrica a seguito dei movimenti del pilastro o della base che sostiene il sensore.
- Deriva termica dei sensori variometrici.

Per quanto riguarda l'ortogonalità degli assi della terne dei sensori, questa viene misurata dal costruttore mediante una operazione di calibrazione svolta in fabbrica. Questa operazione necessariamente deve essere ripetuta ogni qualvolta la strumentazione subisce delle riparazioni [Di Persio et al., 2015]. Nel caso dei LEMI la precisione con cui viene determinata l'ortogonalità ha un limite superiore minore di 30 minuti di arco nel caso del modello 18, e minore di 2 minuti di arco nel caso del 25.

Considerando la varietà di casi che possono comportare un disallineamento degli assi è necessario monitorare continuamente questa differenza in modo da poter tenere sotto controllo la bontà e la qualità dei dati.

Nel caso si vogliono comunque confrontare le singole componenti provenienti da due variometri orientati diversamente, è necessario effettuare una rotazione del vettore  $\mathbf{F}$  del campo misurato dai sistemi materializzati dalle terne dei variometri al meridiano geografico, in modo da far coincidere l'orientazione dei due sensori. Questo può essere fatto attraverso le misure assolute e le basi generate come esaurientemente spiegato nell'appendice B. Infatti l'angolo di rotazione del sensore rispetto alla terna geografica può essere calcolato con la formula

$$\theta_{ori} = \arctan\left(\frac{Base\ D}{Base\ H}\right)$$

Dalle misure delle basi si possono ricavare gli angoli  $\theta_1$  e  $\theta_2$  dei due sistemi. Volendo orientare il vettore misurato dal sistema 1 sul sistema 2 basterà ruotare il sistema 2 della differenza  $(\theta_2 - \theta_1)$ , oppure ruotare entrambi i sistemi, rispettivamente degli angoli  $-\theta_1$  e  $-\theta_2$ , per avere le componenti rispetto alla terna geografica. Scelto l'angolo si effettua una rotazione delle componenti misurate mediante la relazione:

$$\Delta\mathbf{B}_{rot} = \mathbf{R}(\theta)\Delta\mathbf{B}_{mis}$$

Dove  $\mathbf{R}(\theta)$  è la matrice di rotazione data da:

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Dove il vettore misurato è chiaramente dato dalle componenti misurate dal variometro:

$$\Delta\mathbf{B}_{mis} = \begin{pmatrix} \Delta H(t) \\ \Delta D(t) \\ \Delta Z(t) \end{pmatrix}$$

Questa procedura consente di effettuare un confronto delle singole componenti di due sistemi di acquisizione. Naturalmente è possibile orientare i variometri nel meridiano geografico o nel meridiano magnetico entrambi nello stesso momento, per avere sistemi direttamente confrontabili. In ogni caso è buona norma, in fase di pubblicazione dei dati in versione definitiva, riferire sempre tutto al meridiano geografico (seguendo così le raccomandazioni delle principali banche dati mondiali e in particolare di INTERMAGNET).

## Conclusioni

Questo elenco di operazioni da svolgere sui dati di un osservatorio comprende in linea di massima le più importanti, senza delle quali non si ha la garanzia di aver portato a termine il lavoro con dati di buona qualità. Naturalmente ce ne possono essere altre anche più sofisticate. Questo manualetto non vuole essere esaustivo ma vuole essere una rassegna sullo stato attuale degli osservatori magnetici italiani operati dall'INGV, con lo scopo di fornire essenzialmente un manuale aggiornato con le regole essenziali per il loro funzionamento, in particolare per quanto concerne l'esecuzione delle misure magnetiche assolute.

## Bibliografia

- INTERMAGNET, (2012). *Technical Reference Manual*, Version 4.6.
- Palangio P., Di Lorenzo C., Pietrolungo M., Dominici G., Taccetti Q., De Santis A. and Di Mauro D., (2014). *Validazione dei dati dell'osservatorio geomagnetico di Duronia*. Rapporti Tecnici INGV, n.291.
- Parkinson W.D., (1983). *Introduction to Geomagnetism*, Ed. Scottish Academic Press, pp. 444.
- Santarato G., Zeid N.A. and Bignardi S., (2015). *Lezioni di Geofisica applicata*. Libreria Universitaria.it edizioni, pp. 334.
- Di Persio M., Benedetti G., Zirizzotti A., (2015). *Taratura del magnetometro LEMI 025*. Rapporti Tecnici INGV, n.318.
- Di Lorenzo C., Pietrolungo M., Zirizzotti A., (2016). *Progetto FIRB-UR4. Installazione stazioni elettromagnetiche e validazione dei segnali registrati*. Rapporti Tecnici INGV, n.343.
- Buono A.G, Azzarone A. e Zirizzotti A., (2015). *Site Show Roma2: sistema di visualizzazione siti web*. Rapporti Tecnici INGV, n.324.





# Appendici



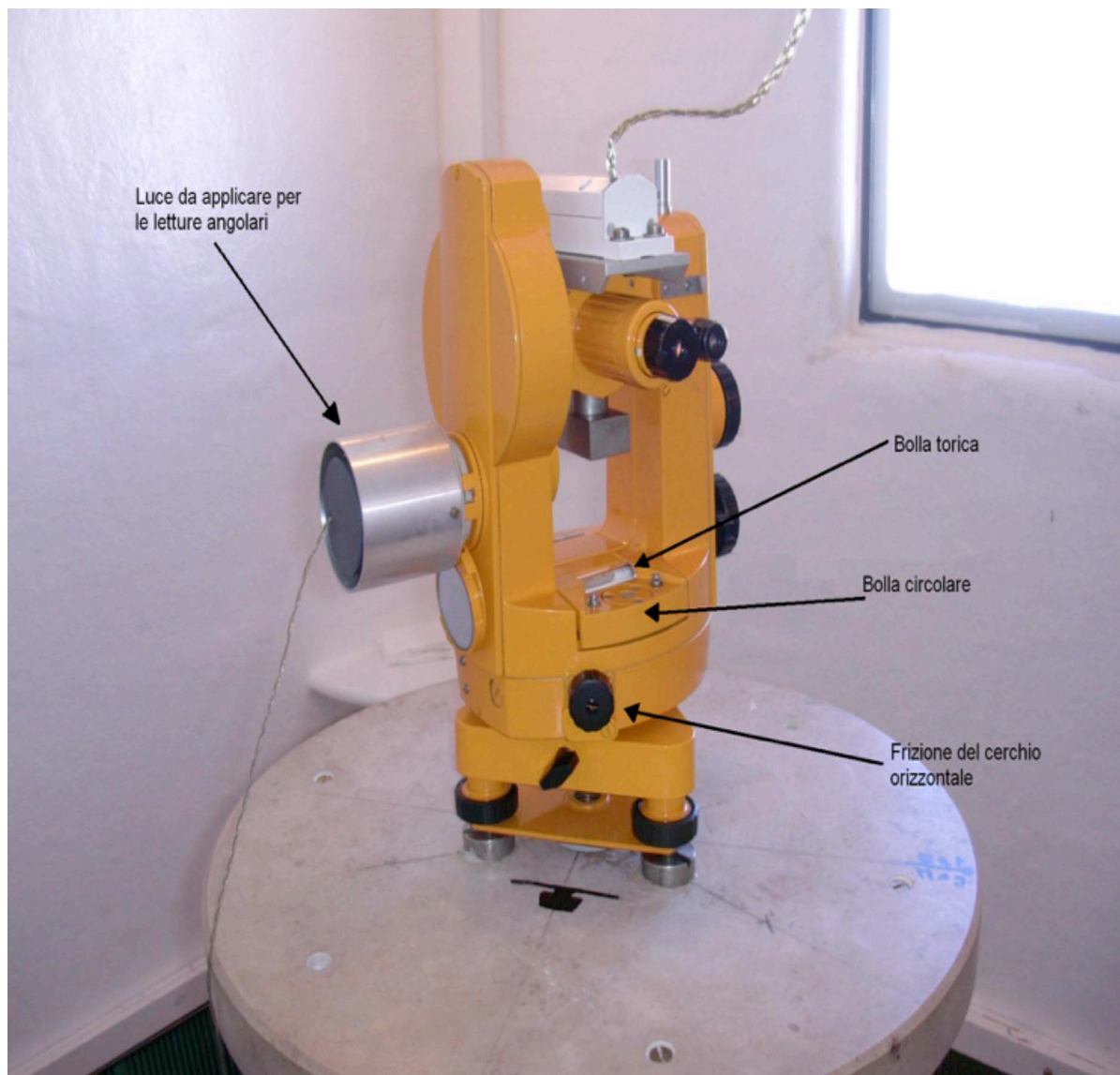
## Appendice A

### Esecuzione delle misure assolute

Il DIM che si utilizza spesso negli osservatori italiani è un teodolite di marca ZEISS (mod. THEO 010A) con scala graduata del micrometro di 1" mentre il sensore flux-gate può essere della Bartington (MAG-01H) oppure Model G (del Danish Meteorological Institute) con relative centraline elettroniche. Anche se meno usati, ci sono anche dei teodoliti centesimali (ad esempio a Duronia); le istruzioni qui riportate si riferiscono ai teodoliti sessagesimali; nel caso si stia usando un teodolite centesimale bisogna fare le opportune conversioni degli angoli. Tale teodolite, per funzionare correttamente, deve essere collocato in un ambiente in cui non siano presenti materiali ferromagnetici, per cui anche l'operatore che dovrà effettuare le misure dovrà preventivamente effettuare una bonifica di tali materiali dal proprio corpo (occhiali metallici, cinture, collanine, orecchini, orologio da polso, abbigliamento con cerniere metalliche, etc.). Una buona misura magnetica è quella che si effettua con calma, con rapidità e naturalmente con precisione. Essendo il campo magnetico terrestre variabile nel tempo si dovrà annotare l'orario in cui verranno eseguite le misure con una buona precisione: nella stanza delle misure assolute di Castello Tesino per esempio è presente un orologio sincronizzato tramite onde radio (sistema DCF77) inviate da una stazione terrestre (Francoforte) che permette un'accuratezza di circa 1 millisecondo (dipendente comunque da imprecisioni e variazioni delle condizioni di propagazione delle onde radio). Affinché sia mantenuto un buon equilibrio termico tra lo strumento e l'ambiente di lavoro, il teodolite deve risiedere presso il locale nel quale si effettuano le misure o esservi lasciato qualche ora prima dell'esecuzione delle misure. Le misure vanno poi trascritte su appositi moduli (appendice E) oppure digitati su opportuni fogli elettronici.



Figura A1. Teodolite DIM.



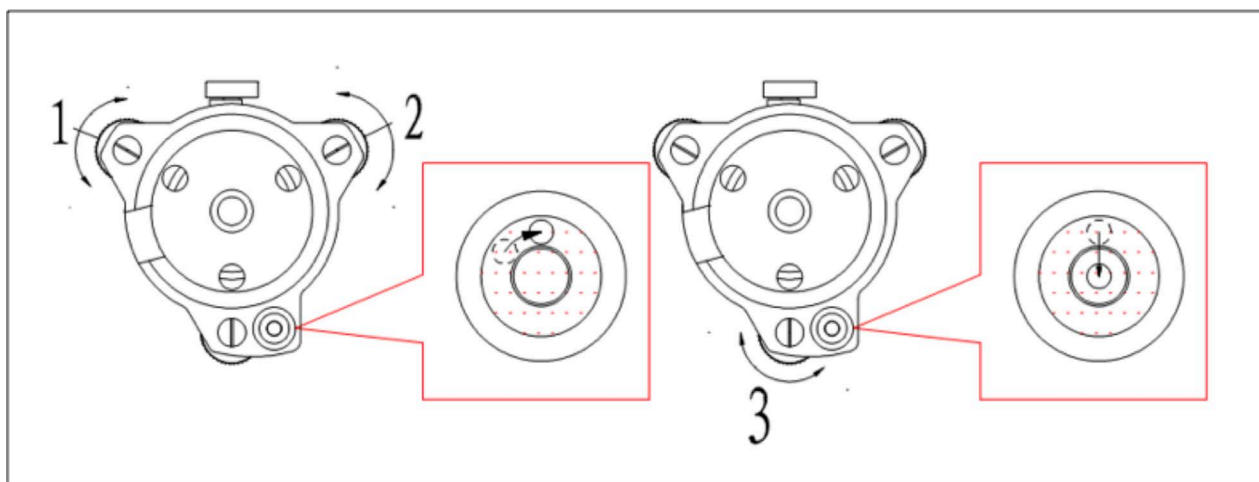
**Figura A2.** Teodolite DI.

Il teodolite va posto sul pilastro e, di solito, vi sono dei punti di riferimento tracciati sulla superficie dello stesso o vi possono essere dei piedini incollati o guide fissate tali che il teodolite si posizioni sempre nello stesso punto (autocentraggio).

#### **Livellamento dello strumento**

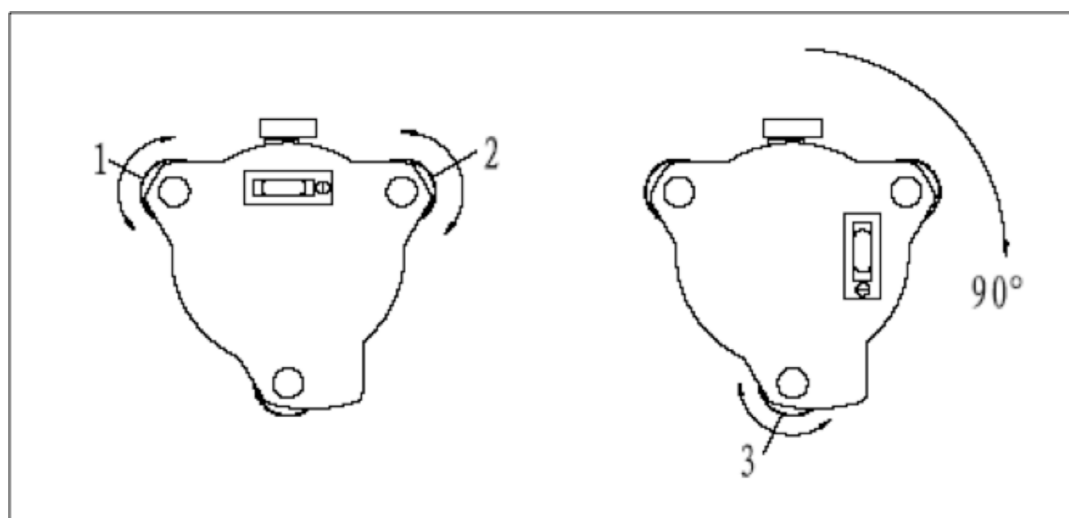
Dopo aver posizionato lo strumento bisogna assicurare un suo accurato e stabile livellamento. A tale scopo, lo strumento è dotato di due livelle ad acqua (figura A2): una circolare (valore angolare corrispondente ad un movimento di 2mm della bolla: 8'') e una a ciambella, ovvero torica, più precisa (valore angolare corrispondente ad un movimento di 2mm della bolla: 20'') le quali, mediante il movimento dei tre piedini regolabili (figura A3), permettono di verificare il suddetto livellamento.

Si procede con la prima messa in bolla tramite quella circolare, come indicato nella figura A3. Si noti che l'assegnazione della numerazione ai piedini regolabili è generica e a discrezione di chi opera. Una volta assegnati tali numeri bisogna però seguire la sequenza ordinata di operazioni come suggerito nel seguito. Agendo su due dei tre piedini si vedrà che la bolla si sposta lungo una traiettoria circolare sino ad arrivare ad una posizione perpendicolare rispetto al terzo piedino; successivamente si porta la bolla al centro del cerchio agendo sulla vite di regolazione del terzo piedino.



**Figura A3.** Vista dall'alto della sola base con i piedini di regolazione. Ingrandimento del movimento della bolla nel cerchio centrale.

Si proceda poi alla regolazione fine della messa in bolla, allentando la pinza di sblocco per gli spostamenti orizzontali (pinza in basso della figura A1). Si ruoti lo strumento sino a porre la bolla torica parallela alle viti di regolazione dei piedini 1 e 2. Centrare la bolla torica ruotando, contemporaneamente, una vite dei due piedini in verso orario e l'altra in verso antiorario (figura A4). Ruotare quindi lo strumento di 90° e centrare nuovamente la bolla torica utilizzando la sola vite di regolazione del piedino numero 3. Ripetere le operazioni descritte ruotando lo strumento di 90° in 90°.

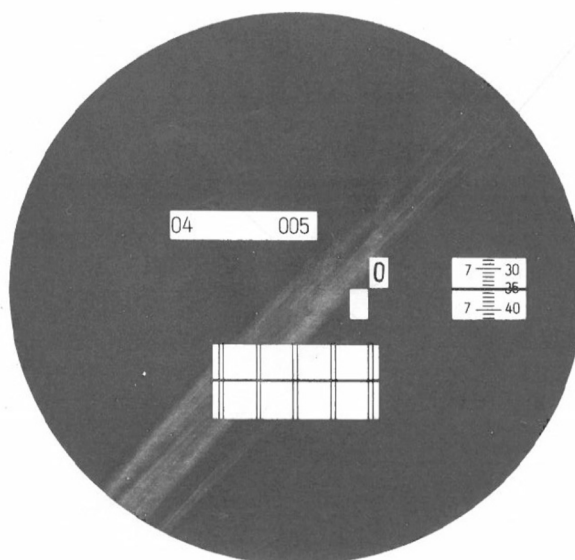


**Figura A4.** Vista dall'alto della sola base con i piedini regolanti. Regolazione fine della bolla torica.

### Letture degli angoli

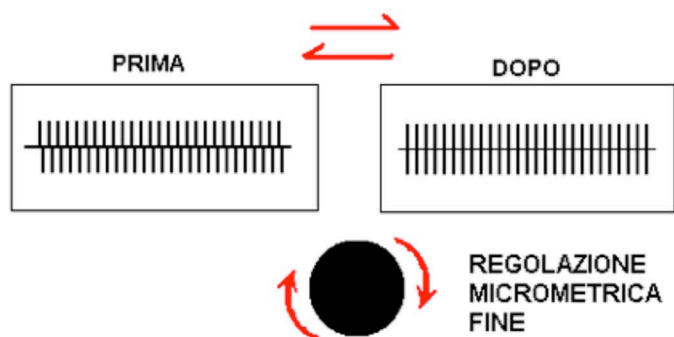
Per la lettura degli angoli sui cerchi orizzontale e verticale, lo strumento è dotato di apposito monocolo di lettura con visione sdoppiata (THEO 010A) attraverso le due posizioni della manopola selezione scala come indicato in figura A1: la scala del cerchio verticale (pallino bianco in alto sull'apposita manopola) è di colore giallo mentre quella orizzontale (pallino in basso) è di colore verde.

Guardando nel monocolo di lettura si avrà una visione (per THEO 010A) come in figura A5:



**Figura A5.**

La lettura va effettuata dopo aver fatto coincidere le barrette superiori ed inferiori nella finestra in basso, ruotando, come mostrato in figura A6, l'apposito pomello della regolazione micrometrica (vedi posizione pomello in figura A1).

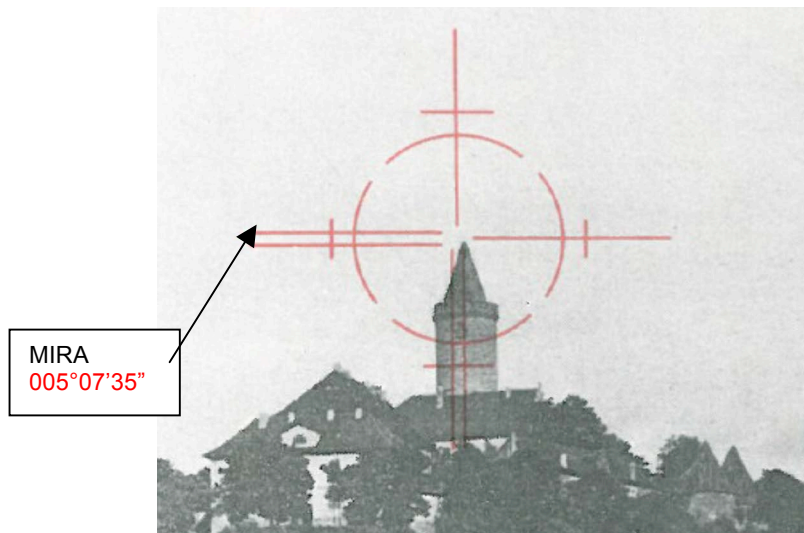


**Figura A6.**

Il valore più in alto indica l'angolo in gradi (il valore leggibile per intero è soltanto uno); il valore sulle finestrelle singole centrali indica le decine di primi e infine nella finestra più a destra si leggono le unità di primi e i secondi. Nel caso della figura A5 il valore è:  $5^{\circ} 07' 35''$

### **Orientamento dello strumento**

Il teodolite deve essere orientato rispetto a delle mire fisse il cui valore di azimut, rispetto allo strumento, è noto con precisione. Per effettuare l'orientamento, sbloccare tramite le pinze la rotazione orizzontale e verticale e puntare l'ottica verso la mira, bloccare i movimenti e centrare la mira con le manopole dei movimenti fini (figura A1), aiutandosi con il crocifilo ottico (linee rosse in figura A7).



**Figura A7.**

Letture del cerchio orizzontale: si impostino i valori delle unità di primo e dei secondi dell'azimut tramite il pomello di regolazione micrometrica fine senza preoccuparsi dell'allineamento del micrometro: ad esempio, se l'azimut è  $5^{\circ} 07' 35''$ , nella finestra a destra, con il pomello in alto della regolazione micrometrica, si imposta il valore 7 alle unità di primo e 35 ai secondi e le linee non saranno, in genere, allineate.

Agendo sulla frizione del cerchio orizzontale (figura A2) ruotare il cerchio stesso fino a leggere il valore di  $005^{\circ}$  nella finestra in alto e 0 in quella mediana, cercando di allineare il micrometro nella finestra più bassa.

Tolta la mano dalla frizione, ricontrollare che la mira sia rimasta centrata, altrimenti ripetere le operazioni prima descritte fino ad ottenere centratura della mira ed allineamento contemporaneo del micrometro alla lettura dell'esempio di  $005^{\circ} 07' 35''$ : tale valore andrà trascritto sul modulo misure assolute nell'apposito riquadro; è buona norma 'ribattere' ovvero ricollimare l'azimut alla fine delle misurazioni della Declinazione magnetica ed Inclinazione magnetica al fine di verificare che lo strumento non abbia subito accidentalmente spostamenti o rotazioni dell'asse ottico durante le misure suddette.

Se siamo riusciti a collimare bene la mira e gli abbiamo assegnato il valore preciso dell'azimut il Nord Geografico avrà il valore di 0 sul cerchio orizzontale e, quindi, lo strumento è orientato. Dopo ciò si deve bloccare la frizione sollevando l'apposito fermo posto sotto la stessa. È anche possibile far coincidere lo 0 della scala con la posizione della mira. In questo caso bisognerà tenere conto del valore dell'azimut nel momento della compilazione della scheda per il calcolo delle basi.

Solitamente in un Osservatorio sono presenti più mire, a distanza diversa dal teodolite, per poter effettuare le misure assolute in diverse condizioni di visibilità; in condizioni ottimali si utilizza la mira più lontana per avere un minore errore angolare. Esse possono essere anche essere utilizzate per un ulteriore controllo dell'orientamento perché ovviamente, una volta orientato il teodolite, l'orientamento deve essere valido in riferimento a ciascuna delle mire.

Di seguito gli azimut delle mire presso i vari Osservatori italiani (nel seguito indichiamo con il termine falso scopo la realizzazione di un riferimento artificiale assunto come riferimento, come ad esempio un picchetto).

**Azimut delle mire per l'Osservatorio di Preturo:**

Croce sulla cupola di S. Bernardino:  $116^{\circ} 39' 16''$

Falso scopo  $179^{\circ} 18' 52''$

Serbatoio lato dx  $358^{\circ} 23' 34''$

**Azimut delle mire per l'Osservatorio di Castello Tesino (CTS):**

Falso scopo: 206° 06' 36"

Croce chiesa Pieve Tesino: 308° 47' 18"

**Azimut delle mire per l'Osservatorio di Lampedusa (LMP):**

Bordo-muro capannone lato sinistro: 77° 35' 45"

Croce cupola chiesa madre: 104° 41' 04"

Falso scopo: Lato sinistro 75° 37' 45" Lato destro 75° 39' 43"

**Azimut delle mire per l'Osservatorio di Duronia (DUR):**

Falso scopo: 171° 12' 50"

In via di definizione a giugno 2016, per spostamento casetta misure assolute

**Azimut delle mire per l'Osservatorio di Stazione Mario Zucchelli (TNB):**

Mira artificiale 1 338° 07' 59" direzione NORD

Mira artificiale 2 60° 13' 36" direzione OASI

Mira artificiale 3 152° 44' 04" direzione Sud

**Azimut della mira per l'Osservatorio di Dome C (DMC):**

Falso scopo: 282.1642 ° N

**Misura di D**

Con lo strumento perfettamente in bolla e una volta orientato lo strumento:

- sbloccare il movimento sul piano verticale per mezzo della pinza in alto portando il sensore flux-gate in alto ed in posizione orizzontale, leggere sul cerchio verticale il valore 90° 00' 00" (*attenzione: tramite manopola della regolazione micrometrica impostare preventivamente sulla finestra a destra di lettura del cerchio verticale il valore di 0 alle unità di primo e 00 ai secondi*), bloccare il movimento con la pinza suddetta e allineare il micrometro con la manopola della regolazione dei movimenti verticali (quella più grande) e non agire in questa fase sulla manopola di regolazione micrometrica;
- sbloccare il movimento sul piano orizzontale per mezzo della pinza in basso, ruotare il teodolite nel piano orizzontale fino a quando si annulla il valore letto sul display. Per eseguire questa operazione è consigliabile porre la levetta della sensibilità sul display prima in posizione "ricerca" e poi in posizione "misura". Per quel che riguarda la centralina danese, essa ha una suoneria che si attenua allorché si è prossimi allo 0. Dopo aver bloccato il movimento orizzontale con l'apposita pinza, si annulla il valore sul display muovendo il teodolite con la manopola della regolazione fine dei movimenti orizzontali (quella più piccola). Una volta raggiunto lo zero prendere nota dell'ora ed eseguire la lettura sul cerchio orizzontale previo allineamento del micrometro: trascrivere la lettura sul modulo misure nel riquadro "bobina alto" e "cerchio N". *Essendo uno strumento di 0, la condizione per cui, con il sensore flux-gate perfettamente orizzontale, il flusso del cmt sia nullo è allorché l'asse del flux-gate si trovi perpendicolare alla componente orizzontale H del campo (a Castello Tesino, alla data di Marzo 2015, tali posizioni si trovano una a 92° e ~ 40' e l'altra è a +180° ovvero 272° e ~ 40')*;
- sbloccare il movimento verticale (pinza in alto), ruotare il sensore in basso fino a leggere sul cerchio verticale il valore 270° 00' 00" (*attenzione: tramite manopola della regolazione micrometrica impostare preventivamente sulla finestra a destra di lettura del cerchio verticale il valore di 0 alle unità di primo e 00 ai secondi*), bloccare il movimento ed allineare le linee del micrometro con la regolazione fine dei movimenti verticali (manopola più grande);
- ruotare il teodolite solo con la regolazione fine dei movimenti orizzontali (sul display i valori sono già prossimi allo zero) fino a quando si annulla il valore letto sul display. Una volta raggiunto lo zero prendere nota dell'ora ed eseguire la lettura sul cerchio orizzontale dopo l'allineamento sul micrometro: trascrivere la lettura sul modulo misure nel riquadro "bobina basso" e "cerchio N";
- lasciare il sensore in basso e, dopo aver sbloccato il movimento orizzontale, ruotare il teodolite nel piano orizzontale di 180° circa fino a quando non si annulla il valore letto sul display: bloccare il movimento con l'apposita pinza. Verificare se, dopo la rotazione di 180° sul piano orizzontale, la lettura del cerchio verticale sia sempre a 270°00'00" ovvero che siano ancora ben allineate le linee, altrimenti dopo aver riallineato il micrometro con la regolazione fine verticale, annullare il valore del



display con la regolazione fine orizzontale. Prendere nota dell'ora ed effettuare la lettura del cerchio orizzontale, previo allineamento del micrometro con pomello regolazione micrometrica: trascrivere la lettura sul modulo misure nel riquadro "bobina basso" e "cerchio S";

- sbloccare il movimento verticale (pinza in alto), ruotare il sensore in alto fino a leggere sul cerchio verticale il valore  $90^{\circ} 00' 00''$  (*attenzione*: tramite manopola della regolazione micrometrica impostare preventivamente sulla finestra a destra di lettura del cerchio verticale il valore di 0 alle unità di primo e 00 ai secondi), bloccare il movimento ed allineare le linee del micrometro con la regolazione fine dei movimenti verticali (manopola più grande);
- ruotare il teodolite solo con la regolazione fine dei movimenti orizzontali (sul display i valori sono già prossimi allo zero) fino a quando si annulla il valore letto sul display. Una volta raggiunto lo zero prendere nota dell'ora ed eseguire la lettura sul cerchio orizzontale dopo l'allineamento sul micrometro: trascrivere la lettura sul modulo misure nel riquadro "bobina alto" e "cerchio S".

A questo punto si calcolano le medie delle 4 misure trascrivendole negli appositi riquadri del modulo misure.

### **Misura di I**

Posizionare il teodolite con il cerchio orizzontale impostato sul valore medio precedentemente calcolato, con il sensore in alto (*a differenza di prima il teodolite verrà utilizzato bloccando i movimenti nel piano orizzontale e verrà ruotato sul piano verticale per cercare dove si annulla il cmt ovvero si muoverà sul meridiano magnetico e si posizionerà il sensore perpendicolare alla direzione del vettore*).

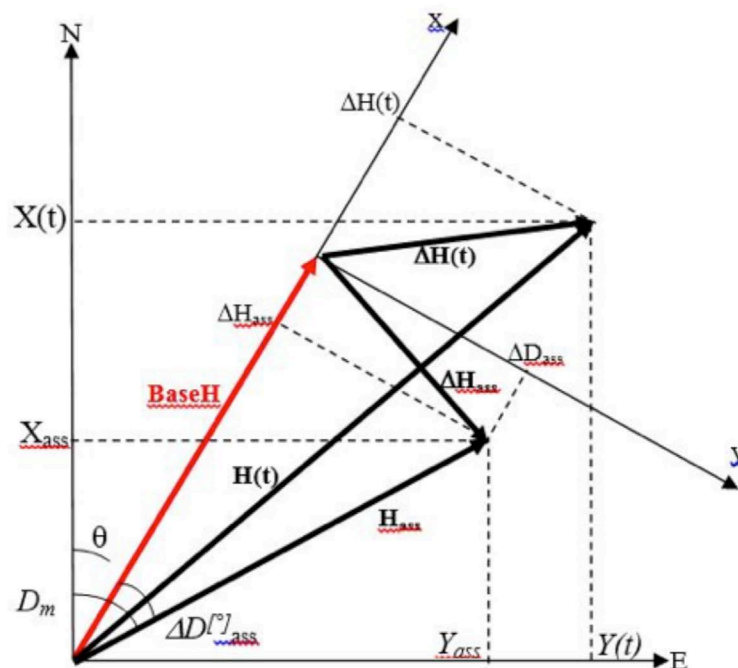
Se, ad esempio, la media delle letture è  $182^{\circ} 41' 25''$ , tramite manopola della regolazione micrometrica impostare preventivamente sulla finestra a destra di lettura del cerchio orizzontale il valore di 1 alle unità di primo e 25 ai secondi, poi ruotare il teodolite fino a leggere 182 nella finestra in alto dei gradi e 4 nella finestra delle decine di primi, bloccare il movimento con la pinza in basso e allineare le linee con la manopola della regolazione fine dei movimenti orizzontali (quella più piccola):

- sbloccare il movimento verticale del teodolite e ruotare lo stesso fino a quando si annulla il valore letto sul display; leggendo nel cerchio verticale, allineare le linee del micrometro con la manopola di regolazione micrometrica, prendere nota dell'ora e leggere il valore angolare (il sensore si trova in alto): trascrivere la lettura sul modulo misure nel riquadro "bobina alto" e "cerchio E";
- sbloccare il cerchio verticale e ruotarlo di circa  $180^{\circ}$  (sensore in basso) fino a quando si annulla il valore letto sul display. Dopo allineamento delle linee del micrometro leggere il valore angolare sul cerchio verticale: trascrivere la lettura sul modulo misure nel riquadro "bobina basso" e "cerchio E";
- sbloccare il movimento orizzontale e ruotare il teodolite di  $180^{\circ}$  sul piano orizzontale: quindi, rimanendo nell'ambito dell'esempio, ruoto fino a  $2^{\circ} 41' 25''$ , cioè fino a quando non leggo sul cerchio orizzontale il valore di 2 nella finestra dei gradi (quella più in alto) e 4 su quella delle decine di primo, blocco il movimento con la pinza in basso, imposto con la manopola della regolazione micrometrica il valore di 1 alle unità di primo e 25 secondi (finestra più a destra), allineo le linee del micrometro con manopola movimenti fini orizzontali (manopola più piccola);
- con il sensore sempre in basso sbloccare il movimento verticale e ruotare fino a quando non si annulla il valore letto sul display. Leggere il valore angolare sul cerchio verticale, previo allineamento con regolazione micrometrica: trascrivere la lettura sul modulo misure nel riquadro "bobina basso" e "cerchio W";
- sbloccare il cerchio verticale, ruotarlo di circa  $180^{\circ}$  (sensore in alto) fino a quando non si annulla il valore letto sul display. Prendere nota dell'ora e leggere il valore angolare sul cerchio verticale, previo allineamento con regolazione micrometrica: trascrivere la lettura sul modulo misure nel riquadro "bobina alto" e "cerchio W".

## Appendice B

### Calcolo delle basi nel riferimento geografico e rotazione delle componenti

Usiamo sempre la convenzione di rappresentare i vettori con le lettere in grassetto e le componenti del vettore con lettere normali. Nella figura B1 la terna di riferimento della misura del campo magnetico terrestre è la terna geografica orientata con l'asse  $x$  lungo il meridiano geografico, l'asse  $y$  nella direzione EST e l'asse  $z$  che esce dall'origine. Nella figura la terna materializzata dai variometri è orientata lungo il meridiano magnetico all'istante iniziale (installazione del variometro) e individuate in figura come  $x$  e  $y$ . Limitandoci a considerare solamente il piano orizzontale in quanto supponiamo gli assi  $z$  perfettamente allineati (sensore in bolla), possiamo schematizzare le loro orientazioni relative come in figura (con esagerate orientazioni relative per chiarezza di rappresentazione). Definiamo  $\mathbf{B}(t)$  vettore del campo magnetico nello spazio e con  $\mathbf{H}(t)$  la sua proiezione nel piano orizzontale al tempo  $t$  generico. Utilizziamo questa nozione per tutti gli altri vettori in modo che  $\mathbf{H}_{ass}$  sia la proiezione della misura assoluta del campo sul piano orizzontale al tempo  $t_{ass}$  (in cui viene effettuata la misura assoluta con il teodolite magnetico). Indichiamo invece con  $\Delta\mathbf{H}(t)$  il vettore proiezione sul piano orizzontale di  $\Delta\mathbf{B}(t)$  misurato all'istante  $t$  dal variometro nel riferimento della terna variometrica. Definiamo inoltre con **BaseH** vettore della differenza tra  $\mathbf{B}(t) - \Delta\mathbf{B}(t)$  la cui proiezione nel piano orizzontale **BaseH** è segnata in rosso in quanto unico vettore che non cambia nel tempo e descrive l'orientazione della terna variometrica nel riferimento geografico.



**Figura B1.** Terna geografica (NE) e terna del variometro (xy) sul piano orizzontale.

La direzione del vettore **BaseH** è la stessa dell'asse  $x$  della terna del variometro in quanto, al momento dell'installazione, è stata annullata la componente  $y$  del campo magnetico così come registrata del variometro (orientazione del sensore nel meridiano magnetico).

Il vettore **BaseH** può essere ricavato dalle misure assolute. Supponiamo ad un certo istante di eseguire le misure nel campo  $\mathbf{B}_{ass} \equiv (H_{ass}, D_m, Z_{ass})$ . Utilizzando un teodolite magnetico è possibile ricavarsi i valori di declinazione  $D_m$  e inclinazione  $I_m$  magnetica in gradi che, con la misura di  $F$  mediante l'utilizzo di un magnetometro scalare, permette di ricavare (nel meridiano geografico) le seguenti grandezze:

$$\begin{cases} |H_{ass}| = F \cos I_m & \text{modulo del vettore } H_{ass} \\ D_m & \text{declinazione di } H_{ass} \text{ rispetto al Nord} \\ Z_{ass} = F \sin I_m & \text{componente verticale} \end{cases}$$

Da notare che è possibile ricavare così la declinazione del vettore  $\mathbf{H}_{ass}$  in gradi:

$$\Delta D_{ass}^{[^\circ]} = \sin^{-1} \left( \Delta D_{ass}^{[nT]} / |\mathbf{H}_{ass}| \right)$$

Si può ricavare a questo punto l'angolo  $\theta$  tra il riferimento geografico e il riferimento del variometro che sarà dato da:

$$\theta = D_m - \Delta D_{ass}^{[^\circ]} \quad \text{B1}$$

elemento  $D$  in gradi, del vettore **BaseB**, nel riferimento geografico.

Dalle misure assolute è possibile ricavarsi  $\mathbf{B}_{ass}$  nel riferimento geografico come:

$$\mathbf{B}_{ass} = \begin{cases} X_{ass} = F \cos I_m \cos D_m \\ Y_{ass} = F \cos I_m \sin D_m \\ Z_{ass} = F \sin I_m \end{cases}$$

se la terna del sensore fosse stata orientata nel riferimento geografico, si potrebbe ricavare facilmente le componenti del vettore **BaseB<sup>N</sup>** come (indicando con l'apice **N** la misure nel riferimento geografico):

$$\mathbf{BaseB}^N = \mathbf{B}_{ass} - \Delta \mathbf{B}_{ass}^N \quad \text{B2}$$

come differenze delle componenti misurate (nello stesso riferimento geografico). Da notare che in prima approssimazione questa formula può esser utilizzata, anche con il sensore orientato magneticamente, considerando che genericamente  $\theta \approx 0$ .

Per poter utilizzare la B2 dobbiamo quindi ricavarci le componenti del variometro nel riferimento geografico. Utilizzando l'angolo  $\theta$  tra il riferimento geografico e il riferimento del variometro è possibile compiere una rotazione antioraria delle componenti del campo misurate nel riferimento del variometro (al momento delle misure assolute)  $\Delta \mathbf{B}_{ass}$  utilizzando la matrice di rotazione:

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Da cui  $\Delta \mathbf{B}_{ass}$  nel riferimento geografico diventa:

$$\Delta \mathbf{B}_{ass}^N = \Delta \mathbf{B}_{ass} \mathbf{R}(\theta) = \begin{cases} \Delta H_{ass} \cos \theta - \Delta D_{ass} \sin \theta \\ \Delta H_{ass} \sin \theta + \Delta D_{ass} \cos \theta \\ \Delta Z_{ass} \end{cases} \quad \text{B3}$$

Nel caso di rotazioni in verso orario (come necessario alle nostre latitudini) la B3 diventa

$$\Delta \mathbf{B}_{ass}^N = \Delta \mathbf{B}_{ass} \mathbf{R}(-\theta) = \begin{cases} \Delta H_{ass} \cos \theta + \Delta D_{ass} \sin \theta \\ \Delta H_{ass} \sin \theta + \Delta D_{ass} \cos \theta \\ \Delta Z_{ass} \end{cases} \quad \text{B4}$$

Da questo al fine possiamo ricavare:

$$\mathbf{BaseB}^N = \mathbf{B}_{ass} - \Delta \mathbf{B}_{ass}^N$$

che non sono altro che i valori delle basi del variometro nel riferimento geografico. Per correggere i valori del variometro in qualunque istante di tempo  $t$  dobbiamo ruotare i dati del variometro di  $\theta$ , utilizzando l'equazione B3 e applicare la formula:

$$\mathbf{B}^N(t) = \mathbf{BaseB}^N + \Delta \mathbf{B}^N(t)$$

Importante notare che anche se più lunga delle altre, questa procedura permette di poter comparare precisamente i dati provenienti da differenti variometri, poiché riportati nello stesso riferimento. Inoltre il calcolo delle basi nel riferimento del variometro comporta comunque una rotazione delle misure assolute nel riferimento del variometro stesso. Se successivamente si volesse eseguire un confronto tra diversi sistemi di acquisizione, sarebbe comunque necessario ruotare i dati nel riferimento geografico, con una inutile doppia rotazione. Si potrebbe ovviare a questo orientando il sensore del variometro direttamente nel riferimento geografico, ma questa operazione non è immediata e potrebbe essere causa di errori.

## Appendice C

### Confronto tra variometri

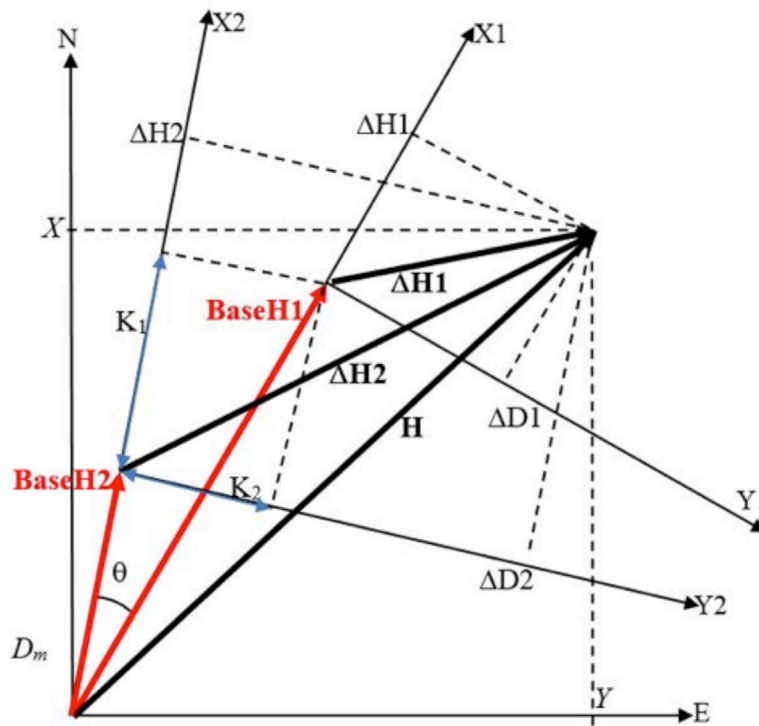


Figura C1. Le terne di due variometri sul piano orizzontale.

Consideriamo adesso il caso di due variometri con le terne orientate diversamente (come usualmente accade quando i variometri vengono orientati magneticamente in tempi differenti). La trasformazione che permette di passare da un sistema di riferimento all'altro è una rotazione di un angolo  $\theta$  differenza tra gli angoli  $\theta_1$  e  $\theta_2$  (Appendice B) e una traslazione della differenza delle basi. Eseguendo una rotazione di un angolo  $\theta$  delle componenti del variometro 1:

$$\begin{pmatrix} \Delta D21 \\ \Delta H21 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta D1 \\ \Delta H1 \end{pmatrix}$$

indicando con D21 e H21 le componenti del primo variometro nella terna materializzata dal secondo variometro (figura C1). Queste componenti non sono da confondere con le componenti del variometro 2 ma sono semplicemente proporzionali ai dati misurati dal secondo variometro. La differenza rispetto al valore esatto è data dalle componenti costanti del vettore:

$$\begin{aligned} k1 &= |\mathbf{BaseH1}| \cos \theta - BaseH2 \\ k2 &= |\mathbf{BaseH1}| \sin \theta \end{aligned}$$

avendo indicato con **BaseH1** il vettore delle Basi del variometro 1 nel piano orizzontale e con **BaseH2** la componente lungo l'asse X2 del vettore delle basi del variometro1. Quindi possiamo scrivere per le componenti del variometro 2 la relazione che lega le componenti dei due variometri:

$$\begin{pmatrix} \Delta D2 \\ \Delta H2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta D1 \\ \Delta H1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k1 \\ k2 \end{pmatrix}$$

Da questi valori possiamo calcolare le differenze delle variazioni delle componenti del campo magnetico tra i due strumenti.

$$\begin{aligned}\Delta D2 - \Delta D1 &= \Delta D1(\cos \theta - 1) - \Delta H1 \sin \theta + k1 \\ \Delta H2 - \Delta H1 &= \Delta D1 \sin \theta + \Delta H1(\cos \theta - 1) + k2\end{aligned}$$

Per angoli  $\theta$  piccoli si ha che

$$\begin{aligned}\sin \theta &\approx \theta - \frac{\theta^3}{3!} \\ \cos \theta - 1 &\approx -\frac{\theta^2}{2}\end{aligned}$$

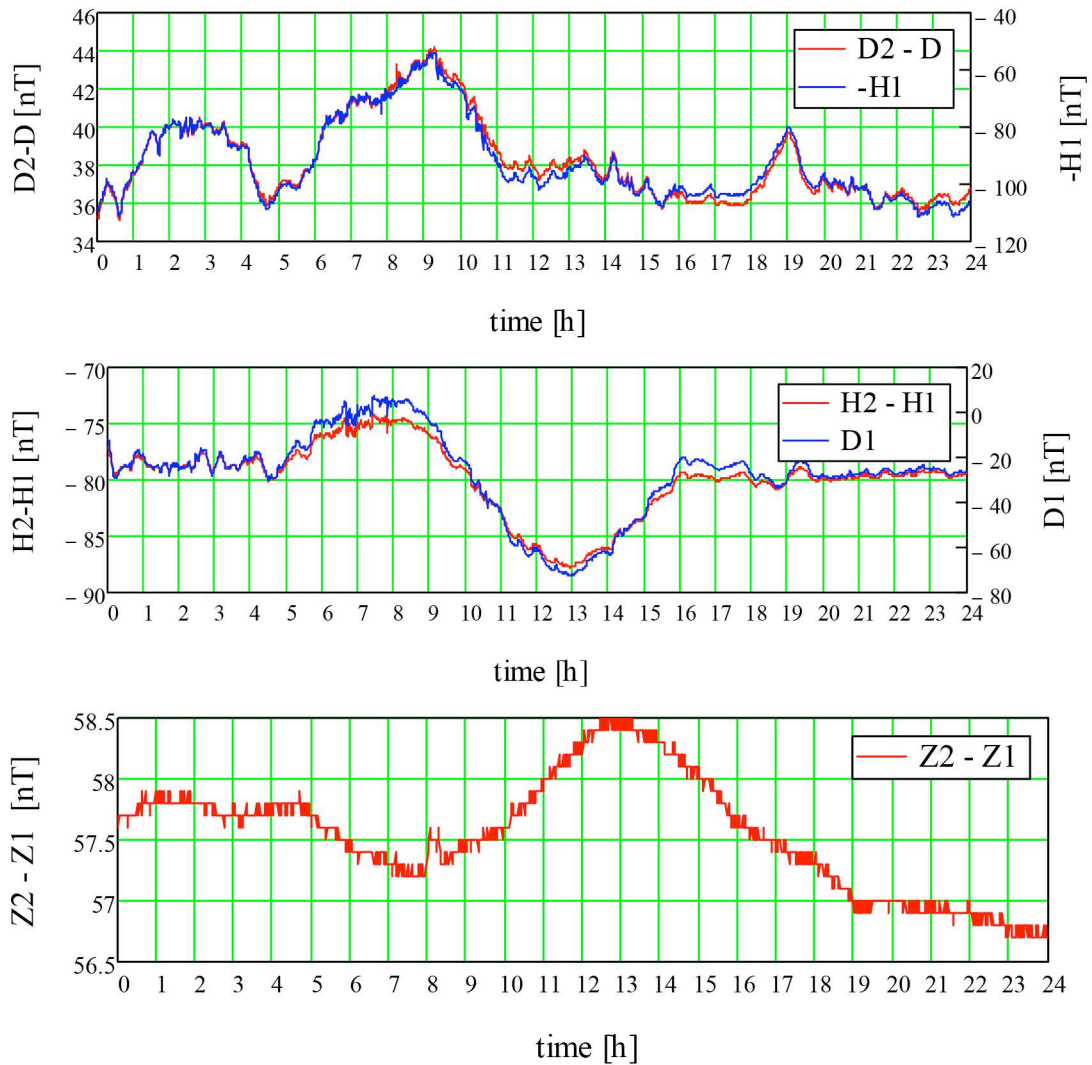
Per  $\theta$  che tende a zero il secondo termine tende a zero più velocemente, quindi

$$\begin{aligned}\Delta D2 - \Delta D1 &= -\Delta H1 \sin \theta + k1 \\ \Delta H2 - \Delta H1 &= \Delta D1 \sin \theta + k2\end{aligned}$$

Questo fatto può essere facilmente evidenziato graficando i dati dei variometri. Nella figura C2 è possibile vedere come la differenza tra le stesse componenti di due variometri è proporzionale all'altra componente.

In figura C2 sono graficate le differenze tra due corrispondenti componenti confrontati con la componente ortogonale. La differenza delle scale degli assi orizzontali è chiaramente dovuta alle costanti  $k1$ ,  $k2$  e  $\sin(\theta)$ . Da notare che nel caso di  $\theta$  negativo i segni delle differenze si invertiranno. Per la  $z$  chiaramente questo discorso non vale perché la componente verticale è sempre equamente orientata nei due sensori (fintanto che viene eseguita la corretta messa in bolla del sensore).

Il confronto tra due variometri, come illustrato nella figura, rimane sempre un valido strumento per una verifica della congruenza dell'installazione e permette di evidenziare problemi legati a malfunzionamento oppure non linearità o effetti del riscaldamento del sensore.



**Figura C2.** Differenze delle componenti di due variometri per il 14 Aprile 2015.

A questo punto è chiaro che, conoscendo le misure assolute e l'angolo di orientazione del sensore rispetto al riferimento geografico per ogni variometro (equazione B1), è sempre possibile ruotare i dati di una quantità pari alla differenza dei due angoli in modo da sovrapporre i dati ed effettuare il confronto.

## Appendice D

### Programma per il calcolo delle basi

Di seguito il listato del programma Matlab per il calcolo delle basi. Il programma accetta in ingresso il file delle misure assolute e dei file contenenti le variazioni e l'intensità del campo per i giorni in cui si hanno le misure assolute. In verde i commenti.

Il programma è scaricabile da \\LIT\lit\Dati\Geomag\software\Calcolo basi.

```
% calcola le basi per le misure assolute eseguite in uno stesso anno;
% i dati delle misure assolute vengono letti da un file di input.
% i dati del variometro vengono letti da file giornalieri che si chiamano
% mmddy.dud (ad es 010815.dud per l'8 gennaio 2015).
% tutti questi file di input (misure assolute e variometro) devono essere in
% questa stessa directory.
% il file di input con le misure assolute contiene una riga per ogni misura;
% ad F non tolgo alcuna costante
% in output vengono prodotti 2 file; uno con le basi e uno con varie
% informazioni e con delle righe di testo di spiegazione
% ad H D e Z prima del calcolo delle basi aggiungo le costanti di calibrazione
% (nel caso di lemi25)
% il programma usa il valore dell'angolo  $\vartheta$ , va utilizzato il valore medio.
% Per ottenere il valore medio, far girare una prima volta il programma usando
% il  $\vartheta$  di ogni singola misura, come output viene calcolato il valore medio di  $\vartheta$ .
% Questo valore definitivo va inserito alla riga 174
% questo programma è la versione per DIM CENTESIMALE
% esempio di file di input delle misure assolute:
% 353 121915 313.5481 313.4295 113.4021 113.5074 135.5559 335.5570 264.4286 64.4244 0 0 0929 0933 0938 0942
% 353 121915 313.5369 313.4156 113.4020 113.5068 135.5565 335.5582 264.4306 64.4265 0 0 0949 0953 0959 1003
% 353 121915 313.5297 313.4111 113.3958 113.5055 135.5569 335.5596 264.4321 64.4291 0 0 1006 1010 1015 1019
% 360 122615 313.5044 313.3811 113.3882 113.4885 135.5641 335.5659 264.4350 64.4304 0 0 1207 1211 1217 1220
% 360 122615 313.5093 313.3856 113.3906 113.4976 135.5652 335.5664 264.4368 64.4314 0 0 1225 1229 1233 1236
% 360 122615 313.5039 313.3793 113.3896 113.4973 135.5646 335.5661 264.4376 64.4332 0 0 1241 1246 1251 1255
% gio data D1 D2 D3 D4 H I2 I3 I4 mira mira T_D T_D T_I T_I

%questo programma è frutto del lavoro di più persone: C. Di Lorenzo, G. Dominici, S. Lepidi e A. Zirizzotti

clear

nomefile='dati_input_CALCULO_BASI_2015_lemi.txt';
dati=load(nomefile);
col_jul_day=dati(:,1);
col_data=dati(:,2);

col_D_Nord_Alto=dati(:,3);
col_D_Nord_Basso=dati(:,4);
col_D_Sud_Basso=dati(:,5);
col_D_Sud_Alto=dati(:,6);

col_I_Est_Alto=dati(:,7);
col_I_Est_Basso=dati(:,8);
col_I_West_Basso=dati(:,9);
col_I_West_Alto=dati(:,10);

% legge la mira;

col_mira_in=dati(:,11);
col_mira_fin=dati(:,12);

col_ora_in_DECL=dati(:,13);
col_ora_fin_DECL=dati(:,14);
```



```

col_ora_in_INCL=dati(:,15);
col_ora_fin_INCL=dati(:,16);

vett_giorni=[56;63;69;76;83;90;98;104;111;119;125;132;139;140;146;154;160;168;173;176;182;190;195;202;208;217;
224;233;240;244;252;259;267;274;282;289;295;302;309;316;323;331;337;345;353;360]; % elencare tutti i giorni

str_nomefile_output='2015';

azimuth_cent=0.6654+189.5722; %NUOVA MIRA
azimuth_sess=azimuth_cent*360/400;

for kg=1:size(vett_giorni,1)
giorno=vett_giorni(kg);
ind_giorno=find(col_jul_day==giorno);
num_misure_giorno=size(ind_giorno,1);
vett_num_misure_giorno(kg,1)=num_misure_giorno;
for k=1:num_misure_giorno
data=col_data(ind_giorno(k));
if data<=100000
nomefile=['0',num2str(data),'dud'];
else
nomefile=[num2str(data),'dud'];
end
mira_in=col_mira_in(ind_giorno(k));
mira_fin=col_mira_fin(ind_giorno(k));
mira_med=mean([mira_in;mira_fin]);

correzione=azimuth_cent-mira_med;

%Calcolo DECLINAZIONE
D_Nord_Alto=col_D_Nord_Alto(ind_giorno(k));
D_Nord_Basso=col_D_Nord_Basso(ind_giorno(k));
D_Sud_Basso=col_D_Sud_Basso(ind_giorno(k));
D_Sud_Alto=col_D_Sud_Alto(ind_giorno(k));

D1=D_Nord_Alto-100;
D2=D_Nord_Basso-100;
D3=D_Sud_Basso-300;
D4=D_Sud_Alto-300;

D_mean=mean([D1;D2;D3;D4]);
D_cent=D_mean+correzione-200;
D_sess=D_cent*360/400;

disp(' ');
disp(' ');
disp(' ')

%calcolo INCLINAZIONE
I_Est_Alto=col_I_Est_Alto(ind_giorno(k));
I_Est_Basso=col_I_Est_Basso(ind_giorno(k));
I_West_Basso=col_I_West_Basso(ind_giorno(k));
I_West_Alto=col_I_West_Alto(ind_giorno(k));

I1=I_Est_Alto;
I2=I_Est_Basso-200;
I3=I_West_Basso-200;
I4=I_West_Alto;
I_Est=200-mean([I1;I2]);

```

```

I_West=mean([I3;I4]);
I_cent=mean([I_Est;I_West]);
I_sess=I_cent*360/400;
disp([nomefile, '- ', 'misura ', num2str(k)])

dati_maa=load(nomefile);
tempo=dati_maa(:,1);
H=dati_maa(:,2)+24537.5;% costanti di calibrazione lemi 25 n24
D=dati_maa(:,3)+3480; % costanti di calibrazione lemi 25 n24
Z=dati_maa(:,4)+39312.5;% costanti di calibrazione lemi 25 n24
F=dati_maa(:,5);

ora_in_DECL=col_ora_in_DECL(ind_giorno(k));
ora_fin_DECL=col_ora_fin_DECL(ind_giorno(k));
disp(' ')
disp(' ')
ora_in_INCL=col_ora_in_INCL(ind_giorno(k));
ora_fin_INCL=col_ora_fin_INCL(ind_giorno(k));
disp(' ')
disp(' ')
index_DECL=find(ora_in_DECL<=tempo & tempo<=ora_fin_DECL);
index_INCL=find(ora_in_INCL<=tempo & tempo<=ora_fin_INCL);
tempo_DECL=dati_maa(index_DECL,1)
tempo_INCL=dati_maa(index_INCL,1)
disp(' ')
disp(' ')
disp(['file ', nomefile])
disp(' ')
disp(' ')

Haa_mean=mean(H(index_INCL));
Daa_mean=mean(D(index_DECL));
Zaa_mean=mean(Z(index_INCL));
Faa_mean_DECL=mean(F(index_DECL));
Faa_mean_INCL=mean(F(index_INCL));

disp(['<Faa>_DECL=', num2str(Faa_mean_DECL, '%5.2f')])
disp(['<Faa>_INCL=', num2str(Faa_mean_INCL, '%5.2f')])
disp(['<Haa>=', num2str(Haa_mean, '%5.2f')])
disp(['<Daa>=', num2str(Daa_mean, '%5.2f')])
disp(['<Zaa>=', num2str(Zaa_mean, '%5.2f')])

disp(' ')
disp(' ')

D=D_sess;
I=I_sess;
disp(' ')
disp(' ')
D_rad=deg2rad(D);
I_rad=deg2rad(I);

% misure assolute nel riferimento geografico N
Hass=Faa_mean_INCL*cos(I_rad);
Xass=Faa_mean_INCL*cos(I_rad)*cos(D_rad);
Zass=Faa_mean_INCL*sin(I_rad);
Yass=Faa_mean_DECL*cos(I_rad)*sin(D_rad);

% D nel riferimento del variometro in rad

```

```

%angolo di rotazione del variometro rispetto al Nord
Dass_var_rad=asin(Daa_mean/(Faa_mean_INCL*cos(I_rad)));

%usare questa riga invece della successiva quando ancora non si sa il valore medio
teta_mis=(D_rad - Dass_var_rad) ; %così viene calcolato teta=teta_mis;

teta=-0.0851; % è il valore fisso medio. deriva dalla media dei teta di cui sopra

% queste sono le le misure del variometro nel riferimento N

Xaa_mean=(Haa_mean)*cos(teta)-(Daa_mean)*sin(teta);
Yaa_mean=(Haa_mean)*sin(teta)+(Daa_mean)*cos(teta);

disp(['teta=',num2str(teta,'%6.4f')])
disp(['Xaa_mean=',num2str(Xaa_mean,'%5.2f')])
disp(['Xass=',num2str(Xass,'%5.2f')])
disp(['Zass=',num2str(Zass,'%5.2f')])
disp(['Yass=',num2str(Yass,'%5.2f')])
disp(' ')
disp(' ')

% basi nel riferimento N

BaseX=Xass-(Xaa_mean);
BaseY=Yass-(Yaa_mean);
BaseZ=Zass-Zaa_mean;

disp(['BaseX=',num2str(BaseX,'%5.2f')])
disp(['BaseY=',num2str(BaseY,'%5.2f')])
disp(['BaseZ=',num2str(BaseZ,'%5.2f')])
disp(' ');
disp(' ');

riga=sum(vett_num_misure_giorno(1:kg-1))+k
vett_jul_day(riga,1)=giorno;

vett_BaseX(riga,1)=BaseX;
vett_BaseY(riga,1)=BaseY;
vett_BaseZ(riga,1)=BaseZ;

vett_Faa_mean_DECL(riga,1)=Faa_mean_DECL;
vett_Faa_mean_INCL(riga,1)=Faa_mean_INCL;

vett_Haa_mean(riga,1)=Haa_mean;
vett_Daa_mean(riga,1)=Daa_mean;
vett_Zaa_mean(riga,1)=Zaa_mean;

vett_Xass(riga,1)=Xass;
vett_Yass(riga,1)=Yass;
vett_Zass(riga,1)=Zass;

vett_D(riga,1)=D_rad;
vett_I(riga,1)=I_rad;
vett_Xaa_mean(riga,1)=Xaa_mean;
vett_Yaa_mean(riga,1)=Yaa_mean;
vett_teta(riga,1)=teta;

thet(riga)=teta_mis;

```

```

end %del k
end %del kg

```

```

fidw_all_testo=fopen(['basiatal_lemi2_',str_nomefile_output,'.txt'],'wt')

```

```

fprintf(fidw_all_testo,'%s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s
%s\n'...
    ,j,'julday','<D>','<I>','teta','Xass','Yass','Zass','<dXaa>','<dYaa>','baseX','baseY','baseZ');
fprintf(fidw_all_testo,'%s\n',' ');
for j=1:size(vett_BaseX,1)
    if vett_Daa_mean(j)<1000
        str_vett_Daa_mean='0';
    else
        str_vett_Daa_mean="";
    end

    if vett_jul_day(j)<10
        str_vett_jul_day=['00',num2str(vett_jul_day(j))];
    end
    if 10<=vett_jul_day(j) & vett_jul_day(j)<100
        str_vett_jul_day=['0',num2str(vett_jul_day(j))];
    end
    if 100<=vett_jul_day(j)
        str_vett_jul_day=num2str(vett_jul_day(j));
    end
    if 0<vett_BaseX(j) & vett_BaseX(j)<10
        str_vett_BaseX=' ';
    else
        str_vett_BaseX="";
    end
    if 0<vett_BaseY(j) & vett_BaseY(j)<10
        str_vett_BaseY=' ';
    else
        if 10<=vett_BaseY(j) & vett_BaseY(j)<100
            str_vett_BaseY=' ';
        else
            str_vett_BaseY="";
        end
    end
    if -10<vett_BaseZ(j)
        str_vett_BaseZ=' ';
    else
        str_vett_BaseZ="";
    end
    fprintf(fidw_all_testo,' %s %5.4f %5.4f %5.7f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f
%3.2f %3.2f %3.2f\n'...
        ,str_vett_jul_day,vett_D(j),vett_I(j),vett_teta(j),vett_Xass(j),vett_Yass(j),vett_Zass(j),vett_Xaa_mean(j)...
        ,vett_Yaa_mean(j),vett_BaseX(j),vett_BaseY(j),vett_BaseZ(j));
    end
end
fclose(fidw_all_testo)

nomefile=['basi_lemi2_',str_nomefile_output,'.txt']
fidw=fopen(nomefile,'wt')
for j=1:size(vett_BaseX,1)
    if vett_jul_day(j)<10
        str_vett_jul_day=['00',num2str(vett_jul_day(j))];
    end
    if 10<=vett_jul_day(j) & vett_jul_day(j)<100

```

```
    str_vett_jul_day=['0',num2str(vett_jul_day(j))];  
end  
if 100<=vett_jul_day(j)  
    str_vett_jul_day=num2str(vett_jul_day(j));  
end  
fprintf(fidw,'%s  %6.2f %6.2f %6.2f\n',str_vett_jul_day,vett_BaseX(j),vett_BaseY(j),vett_BaseZ(j));  
end  
fclose(fidw)
```

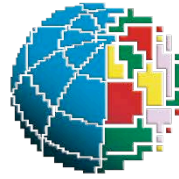
```
mean(thet)  
std(thet)
```

```
figure(2)  
plot(vett_jul_day,thet,'*')  
set(gca,'xlim',[0 370])  
title('2015 DUR lemi2','fontsize',12)  
xlabel('julian day 2015')  
ylabel('theta (rad)')
```

```
grid
```

## Appendice E

### Modulo misure assolute



**INGV** | Sezione Roma 2

Osservatorio di

Lat.:	Long.:	Data
Strumento		Osservatore

Declinazione					ora U.T.	
Bobina	<i>cerchio N</i>	<i>cerchio S</i>	media	Mira	inizio	fine
<i>alto</i>						
<i>basso</i>						
<i>media</i>						
		Correzione				
		Declinazione				

Inclinazione					ora U.T.	
Bobina	<i>cerchio E</i>	<i>cerchio W</i>			inizio	fine
<i>alto</i>						
<i>basso</i>						
<i>media</i>						
		Inclinaz.				

**NOTE:**



# Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..



**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2016 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

**<http://www.ingv.it>**



**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**