



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI TRIESTE

A.A. 2019-2020

*LABORATORIO DI ACQUISIZIONE  
ED ELABORAZIONE DATI GEOFISICI*

**UD5: MAGNETOMETRIA**

## *SCHEMA UD5*

- *Principi fisici del magnetismo terrestre. Campo interno e campo esterno. Classificazione dei materiali geologici e cenni ai modelli di magnetizzazione.*
- *Strumenti e tecniche di misura. Magnetometri e gradiometri. Schemi di misura, correzioni e cenni all'elaborazione dei dati.*

# MAGNETOMETRIA:

## Cenni teoria elettromagnetica (S.I.)

Per campi di induzione deboli (come quello terrestre)

$$\vec{M} = k\vec{H} \quad [\vec{H}] = \frac{A \cdot m^2}{m^3} = \frac{A}{m} \quad \text{Intensita' magnetizzazione (momento dipolo per vol.unit.)}$$

$$k_{SI} = 4\pi k'_{emu} \quad \text{SUSCETTIVITA' MAGNETICA}$$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1 + k)\vec{H} = \mu\mu_0\vec{H} \quad \text{INDUZIONE MAGNETICA}$$

$$[\vec{B}] = \text{tesla (T)}$$

→ INDUZIONE MAGNETICA → INCLUDE GLI EFFETTI DI MAGNETIZZAZIONE

$$[\vec{H}_{cmt}] \approx 50\mu T$$

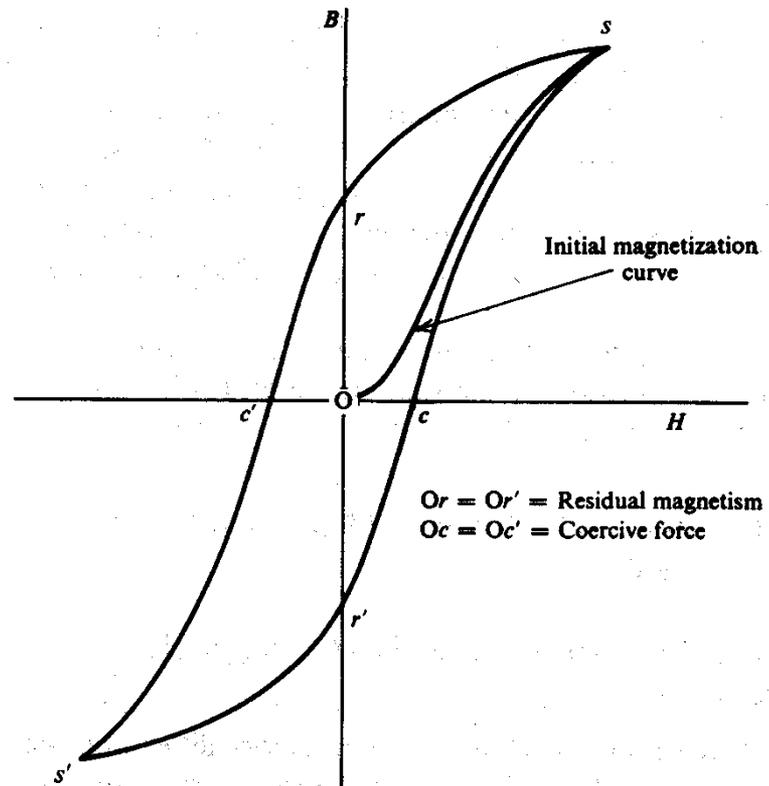
Ma dipende dalla latitudine e...

# MAGNETOMETRIA: relazioni $B, H$

Dipende dalle caratteristiche dei diversi materiali:

Diamegnetici e Paramagnetici  $\Rightarrow$  lineare  $B = \mu H$  (in zona priva di sorgenti)

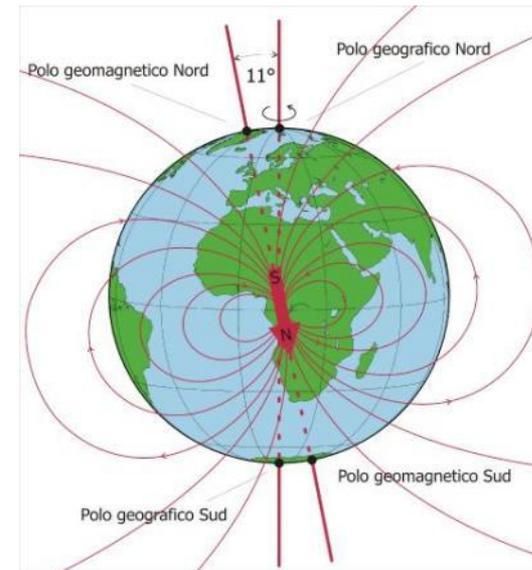
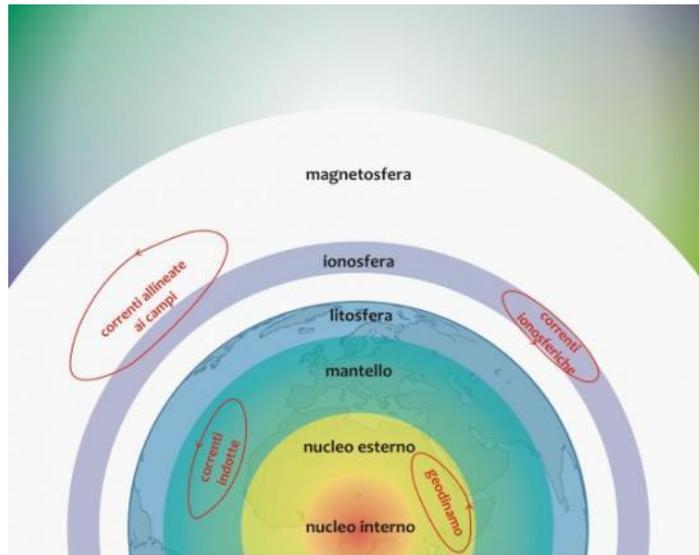
Ferromagnetici,  
Antiferromagnetici,  
Ferrimagnetici  $\rightarrow$  Non  
lineare, ma **ISTERESI**  $\rightarrow$   
 $M \neq 0$  anche se  $H = 0$



# MAGNETOMETRIA: natura campo geomagnetico

**Campo principale:** (99%) origine interna, lentamente variabile nel tempo

**Campo esterno:** (1%) intensita' minore del campo principale (ma anche "tempeste magnetiche"), variazioni rapide

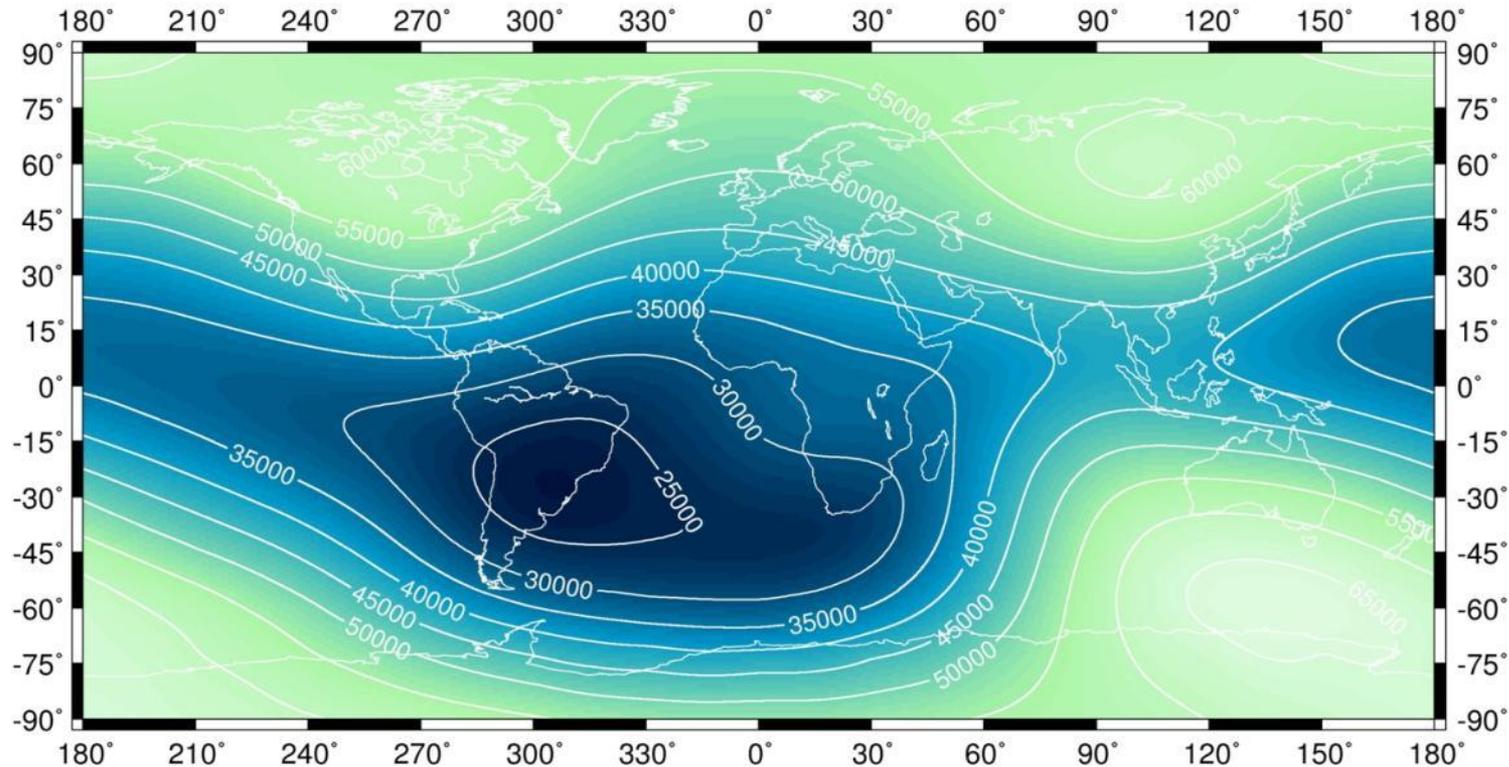


## **VARIAZIONI SPAZIALI DEL CAMPO PRINCIPALE:**

localizzate, costanti in spazio-tempo, dovute ad anomalie magnetiche in crosta terrestre (valori anomali di suscettività magnetica) → questi sono gli **obiettivi delle prospezioni magnetiche**

# MAGNETOMETRIA: campo geomagnetico

**Il campo totale ha valori sulla superficie terrestre mediamente di  $50\mu\text{T}$ , ma con grandi variazioni a tutte le scale (continentale, regionale, locale).**



*Intensità del campo magnetico terrestre (espressa in nT) relativa all'anno 2005 (componente F. Vedi slide successiva). Fonte: Web site INGV.*

# MAGNETOMETRIA:

## Campo principale: elementi magnetici

**Magnitudo, inclinazione, declinazione definiscono completamente il campo**

**X** componente del vettore nel piano orizzontale, diretta verso il Nord geografico

**Y** componente del vettore nel piano orizzontale, diretta verso l'Est geografico

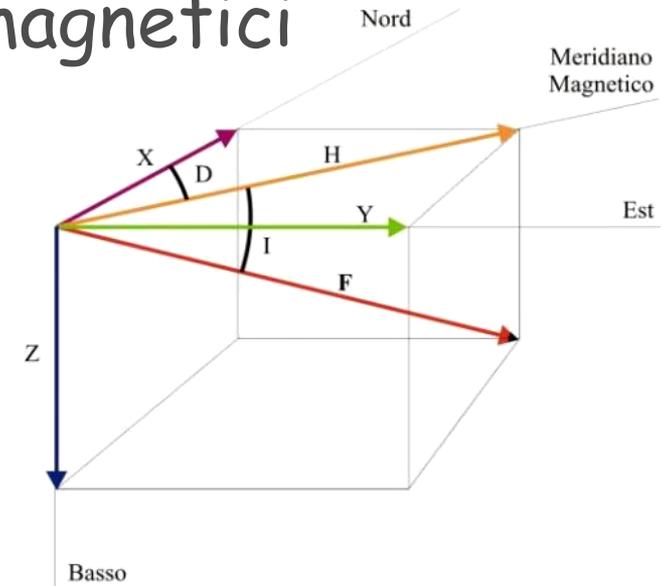
**Z** componente verticale, positiva se è diretta verso l'interno della Terra

**H** componente orizzontale totale

**F** intensità totale del campo

**D** declinazione magnetica

**I** inclinazione magnetica

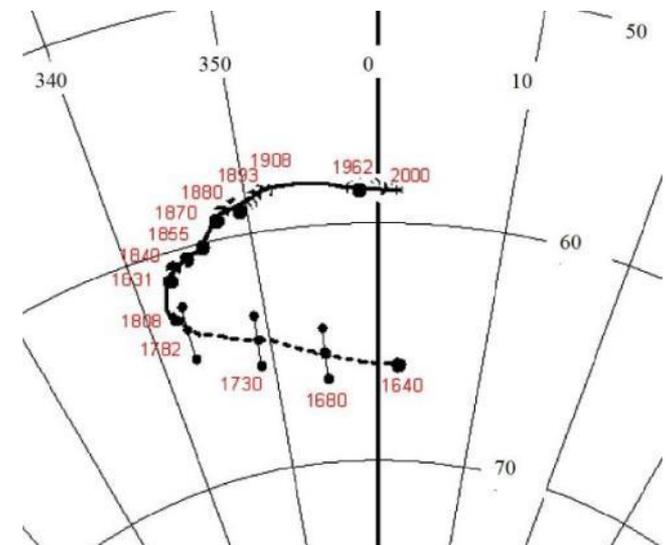


## ORIGINE CP:

Ipotesi: interazione nucleo solido/fluido → dinamo autoinducente

Stabile per brevi periodi, ma

- **Variazioni secolari ( $10^1$ - $10^3$  anni)**
- **INVERSIONI MAGNETICHE ( $10^6$  anni)**



Variazione secolare per l'Italia centrale (1600-2000). Web site INGV

# MAGNETOMETRIA: Campo esterno

## **ORIGINE :**

Ipotesi: correnti elettriche nella ionosfera (fascie di Van Allen)

## **VARIAZIONI TEMPORALI:**

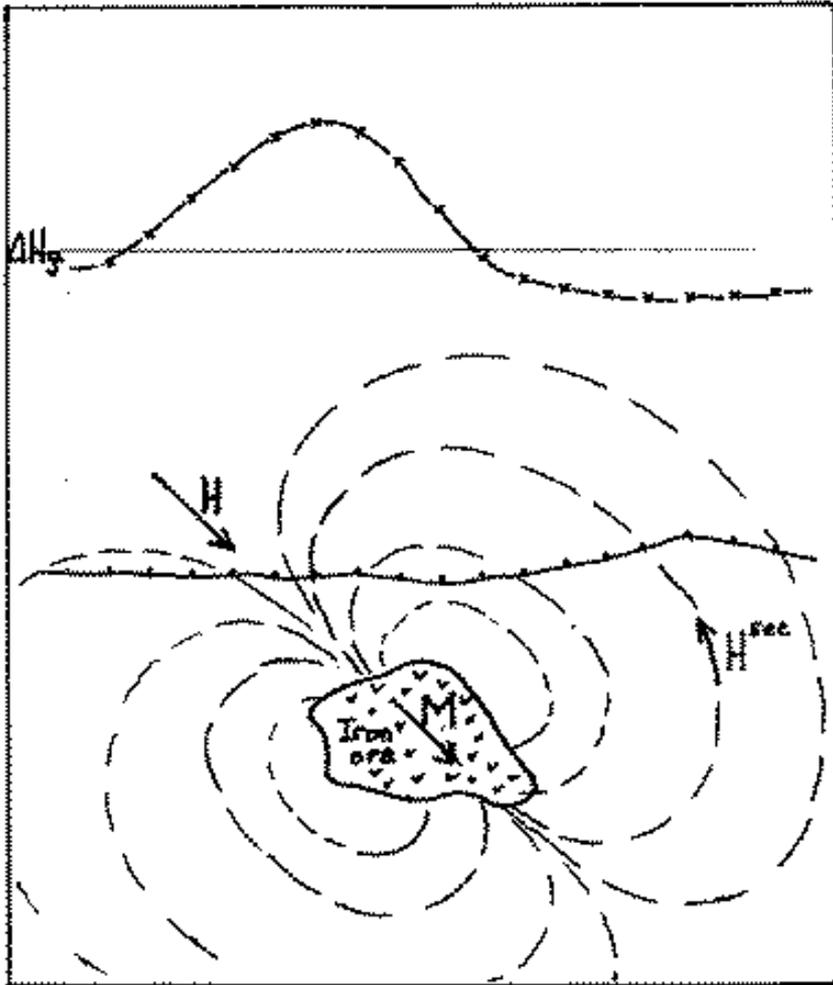
Ciclo 11 anni (macchie solari)

Ciclo diurno ( $T=24\text{h}$ ,  $\Delta$  ca. 30 nT, probabile interazione vento solare-ionosfera)

Variazioni lunari ( $T=25\text{h}$ ,  $\Delta$  ca. 2 nT, probabile interazione luna-ionosfera)

**Tempeste magnetiche** ( $T=\text{ca.}27\text{gg.}$ ,  $\Delta$  medio ca. 1000 nT)

# MAGNETOMETRIA: "Anomalia magnetica"



Un oggetto (in questo caso un deposito di minerali ferrosi) è stato magnetizzato con una magnetizzazione  $M$  nella direzione del campo magnetico terrestre  $H$ .

Il corpo magnetizzato produce un proprio campo magnetico  $H_{sec}$  che, in questo caso, ha forma all'incirca dipolare rappresentata schematicamente dalle curve tratteggiate. Il campo secondario si somma vettorialmente con quello inducente (cioè quello terrestre).

La misura del campo risultante rivela una **ANOMALIA** che è riconducibile al materiale ferroso.

# MAGNETOMETRIA: Magnetismo minerali

## Proprieta' magnetiche sostanze :

### Classificazione magnetica sostanze:

Diamagnetiche ( $k < 0$ ,  $M = 0$  se  $H = 0$ ) [es.: grafite , sale, quarzo]

Paramagnetiche ( $k > 0$ ,  $M \neq 0$  se  $H = 0$ ) [es.: ferro cobalto nickel]

**Effetto ferromagnetismo** dovuto ad allineamento momenti in ampie regioni del materiale (effetto ca.  $10^6$  > diam./param/) NON minerali ferromagnetici in natura

**Antiferromagnetismo** dovuto ad allineamento momenti in ampie regioni del materiale con direzioni opposte ( $k$  relativamente piccola) es. Ematite

**Ferrimagnetismo** dovuto ad allineamento momenti in ampie regioni del materiale con direzioni opposte (uno dei 2 prevale) es. Magnetite >> tutti minerali magnetici in natura sono ferrimagnetici

Temperatura Curie = temperatura AL DI SOPRA DELLA QUALE una sostanza magnetizzata perde la magnetizzazione (diventa diamagnetica)

Magnetite =  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  o meglio  $\text{FeO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3 \approx 850$  °C

# MAGNETOMETRIA: Magnetizzazione rimanente

La Magnetizzazione Naturale Rimanente (NRM) è legata a vari meccanismi:

**Termorimanente:** in rocce ignee durante il raffreddamento a  $T < T_{\text{curie}}$  in presenza di campo esterno. Stabile, si elimina solo per rifusione.

**Detritica rimanente:** deposizione particelle fini magnetiche in ambienti tranquilli, in presenza di campo esterno.

**Chimica rimanente:** accrescimento o modifiche grani minerali magnetici per azioni chimiche per  $T < T_{\text{curie}}$ . Es. in rocce sedimentarie riduzione dell'Ematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) in Magnetite ( $\text{FeO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

**Isoterma rimanente:** residua su rocce già formate, dopo rimozione campo esterno (es. Fulmine).

**Viscoso rimanente:** lunga esposizione a campo esterno → riorganizzazione interna del materiale. Lave, rocce sedimentarie, terracotta

# MAGNETOMETRIA:

## Suscettivita' di rocce

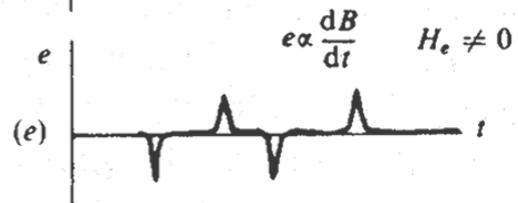
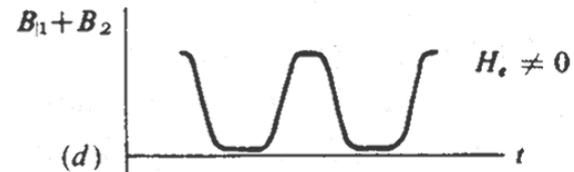
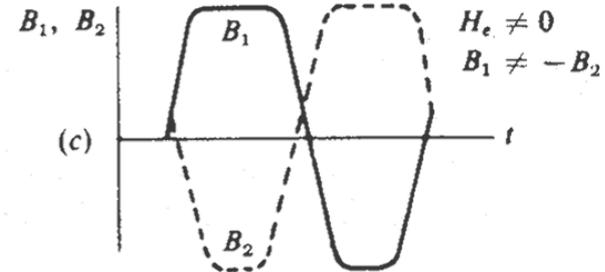
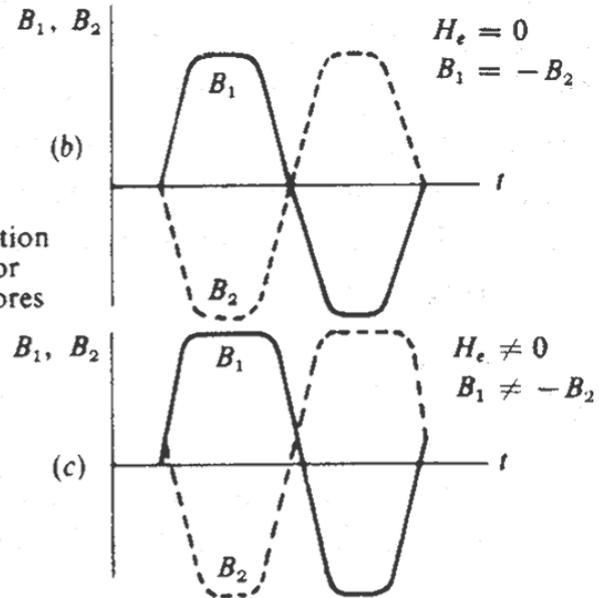
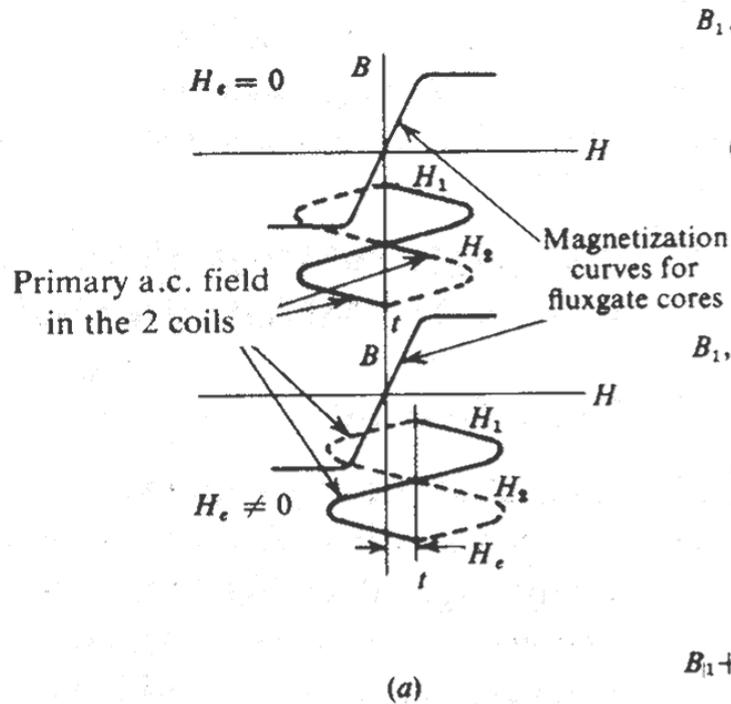
## e minerali

Type	Susceptibility $\times 10^3$ (SI)	
	Range	Average
<i>Sedimentary</i>		
Dolomite	0-0.9	0.1
Limestones	0-3	0.3
Sandstones	0-20	0.4
Shales	0.01-15	0.6
Av. 48 sedimentary	0-18	0.9
<i>Metamorphic</i>		
Amphibolite		0.7
Schist	0.3-3	1.4
Phyllite		1.5
Gneiss	0.1-25	
Quartzite		4
Serpentine	3-17	
Slate	0-35	6
Av. 61 metamorphic	0-70	4.2
<i>Igneous</i>		
Granite	0-50	2.5
Rhyolite	0.2-35	
Dolorite	1-35	17
Augite-syenite	30-40	
Olivine-diabase		25
Diabase	1-160	55
Porphyry	0.3-200	60
Gabbro	1-90	70
Basalts	0.2-175	70
Diorite	0.6-120	85
Pyroxenite		125
Peridotite	90-200	150
Andesite		160
Av. acidic igneous	0-80	8
Av. basic igneous	0.5-97	25

### Minerals

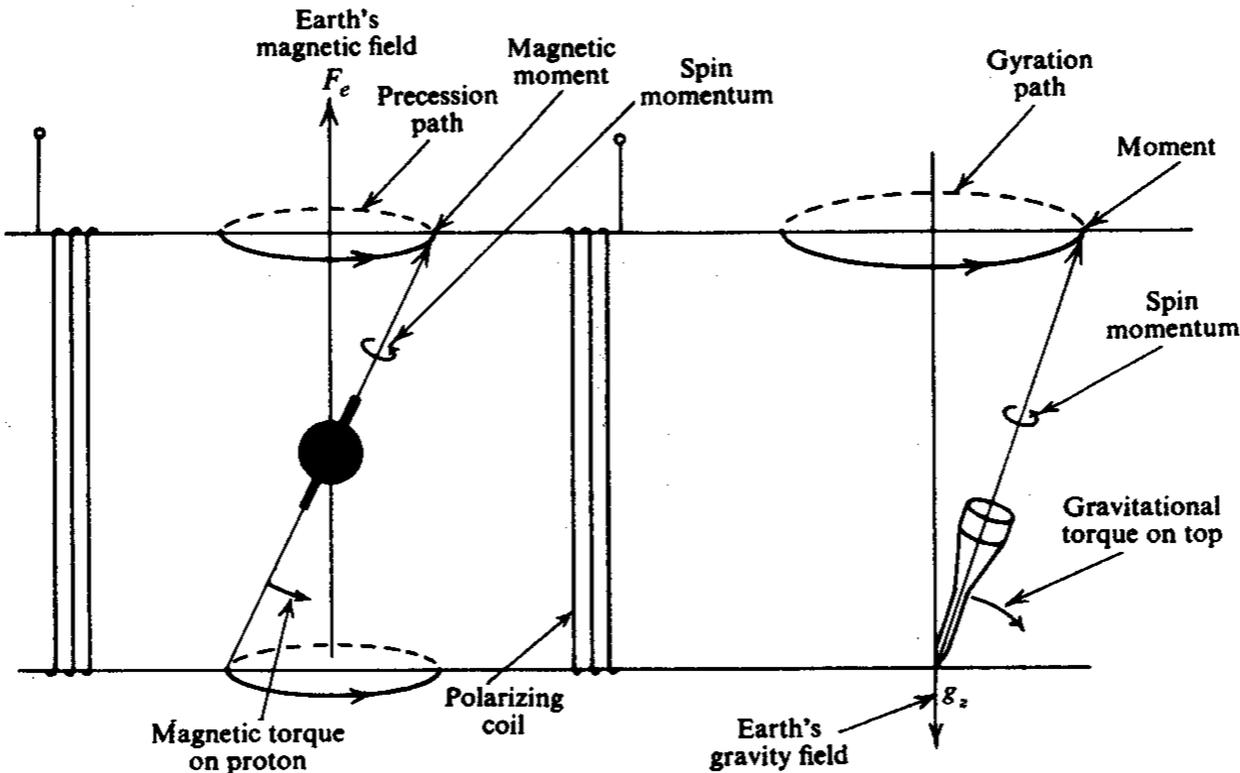
Graphite		0.1
Quartz		-0.01
Rock salt		-0.01
Anhydrite, gypsum		-0.01
Calcite	-0.001 - - 0.01	
Coal		0.02
Clays		0.2
Chalcopyrite		0.4
Sphalerite		0.7
Cassiterite		0.9
Siderite	1-4	
Pyrite	0.05-5	1.5
Limonite		2.5
Arsenopyrite		3
Hematite	0.5-35	6.5
Chromite	3-110	7
Franklinite		430
Pyrrhotite	1-6000	1500
Ilmenite	300-3500	1800
Magnetite	1200-19200	6000

# MAGNETOMETRIA: magnetometro a flusso



# MAGNETOMETRIA:

## magnetometro a protoni



$$\omega = \gamma_p H$$

$$H = \frac{2\pi f_L}{\gamma_p}$$

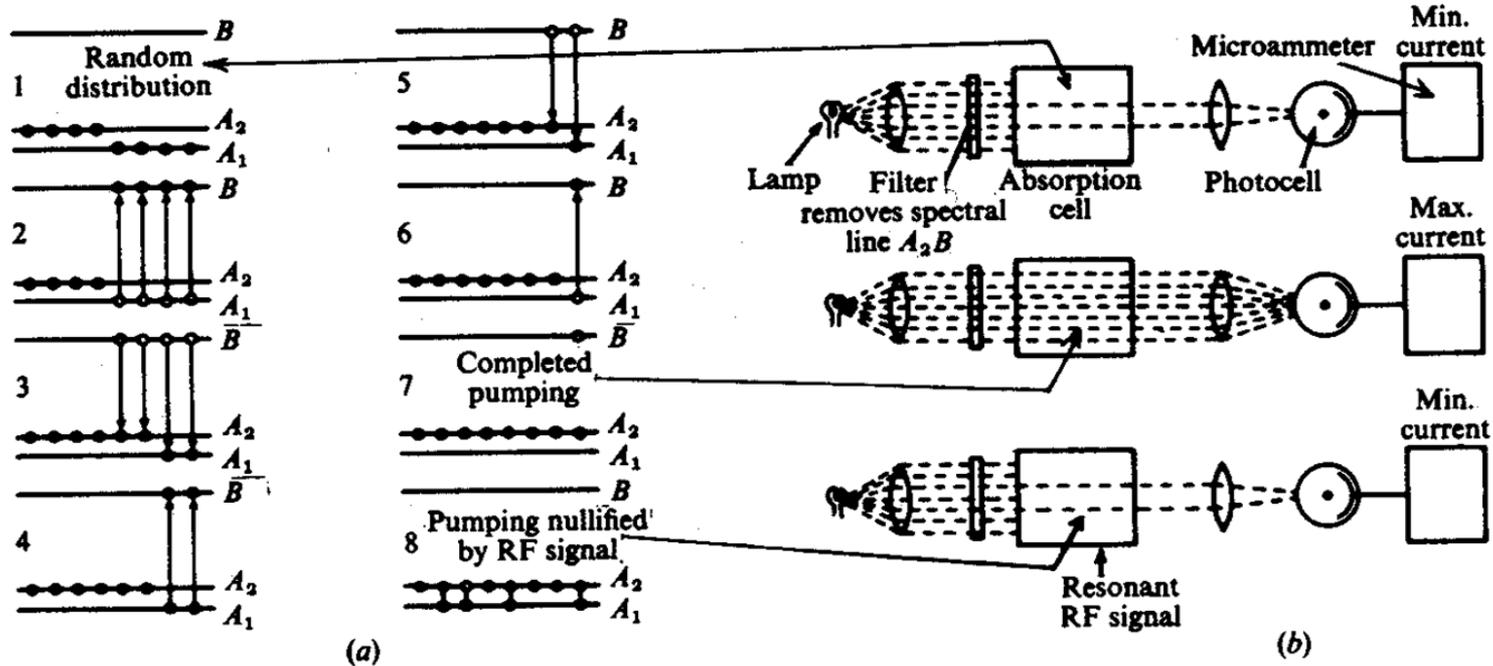
$\gamma_p$  = Rapporto giromagnetico protone

Sensitivita'  $\approx 1$  nT

$f_L$  = Frequenza di Larmor

# MAGNETOMETRIA:

## magnetometro a pompaggio ottico



Si basano sull'  
"effetto Zeeman normale"

Sensitivita'  $\approx 0.01$  nT

$$H = \frac{2\pi f_L}{\gamma_e}$$

$\gamma_e$  = Rapporto giromagnetico elettrone

$f_L$  = Frequenza di Larmor

# MAGNETOMETRIA

## Strumenti di misura: gradiometri

Due sensori a diversa quota o separati orizzontalmente → misura del GRADIENTE (rispettivamente verticale o orizzontale) del campo

### **Benefici:**

- incremento risoluzione orizzontale anomalie
- Eliminazione correzioni (diurna)
- Possibilità di ottenere direttamente un valore di "ANOMALIA"

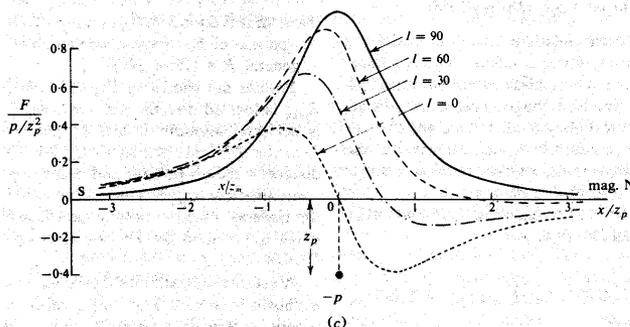
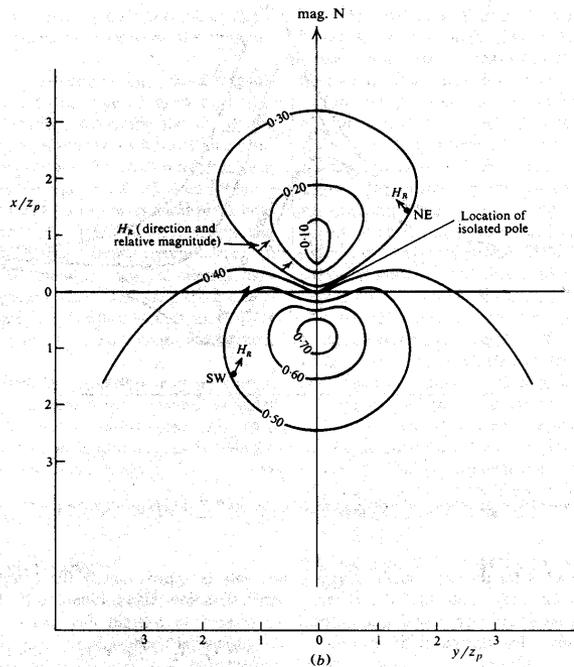
$$\frac{\partial B}{\partial z} = \frac{B_2 - B_1}{\Delta z}$$

# MAGNETOMETRIA: Esempio anomalia

La forma e l'intensità di un'"anomalia magnetica" dipendono essenzialmente da due fattori:

- 1) Forma, dimensioni, orientazione, posizione del corpo magnetico;
- 2) Latitudine dell'area di indagine.

Questo secondo fattore è importante a causa della natura dipolare del CMT. Il campo "inducente" è infatti un vettore che ha un angolo che varia a seconda della posizione sulla superficie terrestre: al polo nord magnetico (attualmente spostato di circa  $11,5^\circ$  rispetto al polo nord geografico) è verticale.



# MAGNETOMETRIA: Cenni di Elaborazione

## Separazione campo regionale-locale

## Miglioramento dati ai fini interpretazione

Derivate

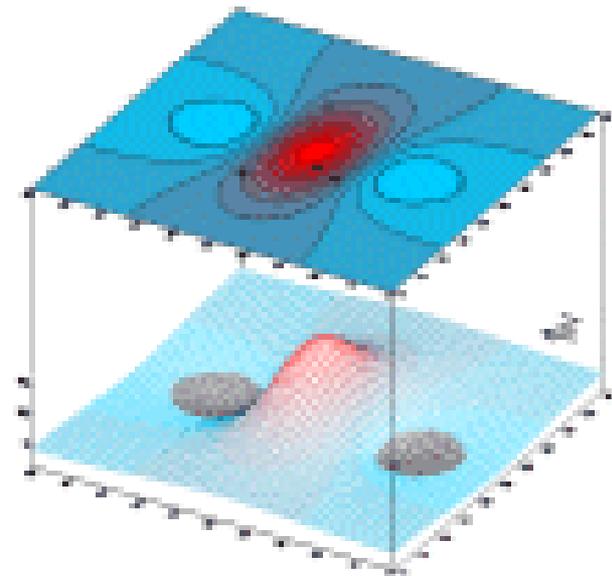
Continuazione

Analisi spettrale

Filtraggio

Riduzione al Polo

- La riduzione al polo ricalcola il dato misurato per un campo magnetico VERTICALE.
- Si calcola il campo magnetico per una serie di anomalie (semplici per forma e distribuzione di valori di suscettività magnetica) e si confrontano i dati osservati con quelli calcolati → Attenzione indeterminazione intrinseca!



## Magnetometro terrestre (gradiometro)



## Magnetometro marino/ da aereo



# Misura del Campo Magnetico Terrestre:

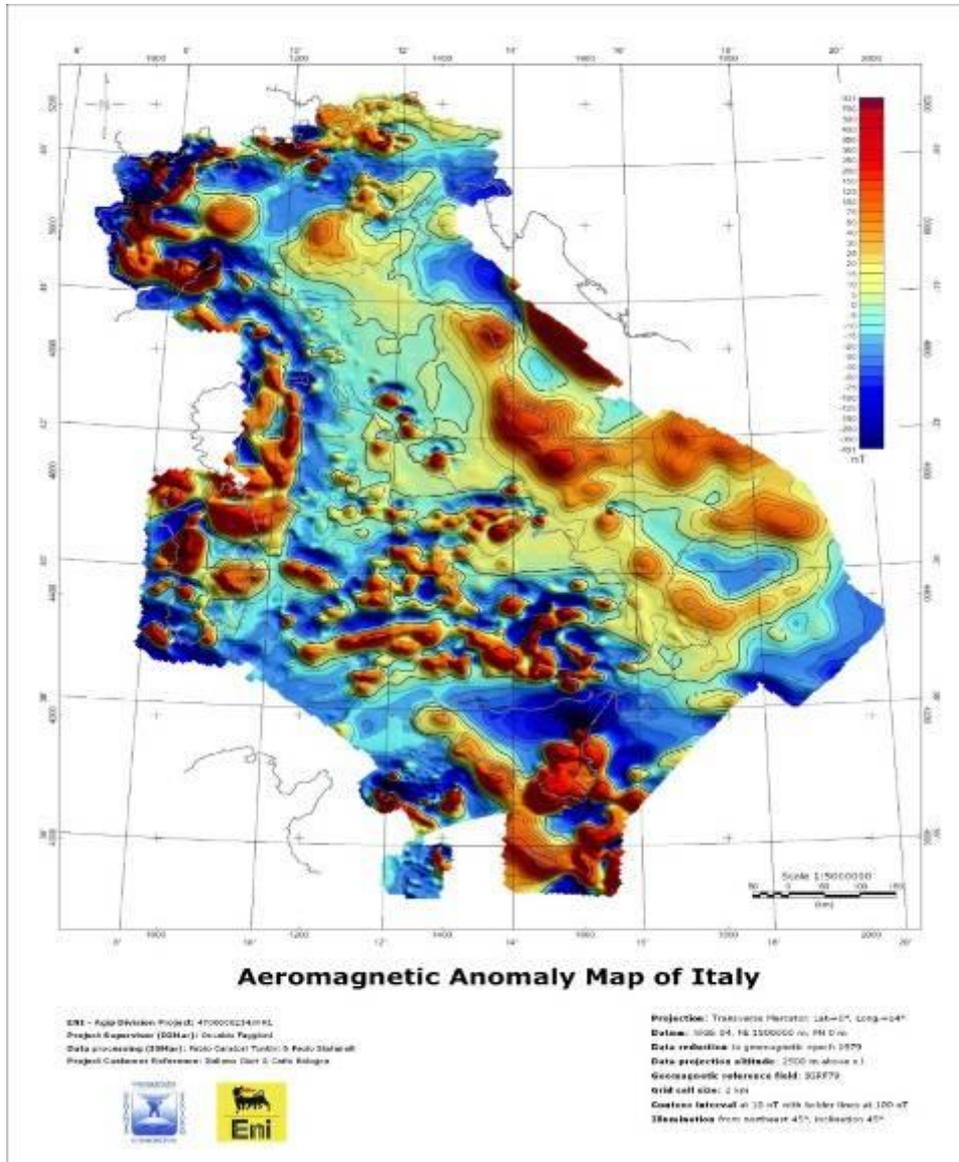
## Anomalie REGIONALI / Anomalie LOCALI

Today, high-resolution aeromagnetic (HRAM) surveys have a resolution in the subnanotesla scale, such that magnetic surveys are no longer restricted to magmatic rocks but can also be used to map intrasedimentary faults, as long as there are some layers containing elevated magnetite concentrations that generate small anomalies ( $> 10$  nT at 150m elevation). Such HRAM surveys are considered industry standard, and they are often used in hydrocarbon exploration, but flight specifications for a high-resolution survey vary from one country to another. Typical exploration HRAM surveys have flight heights of 80–150 m and line spacings of 250–500 m (Millegan, 1998).

**Campionamento spaziale f(dimensioni anomalie cercate)**

# Misura del Campo Magnetico Terrestre:

## Anomalie REGIONALI / Anomalie LOCALI

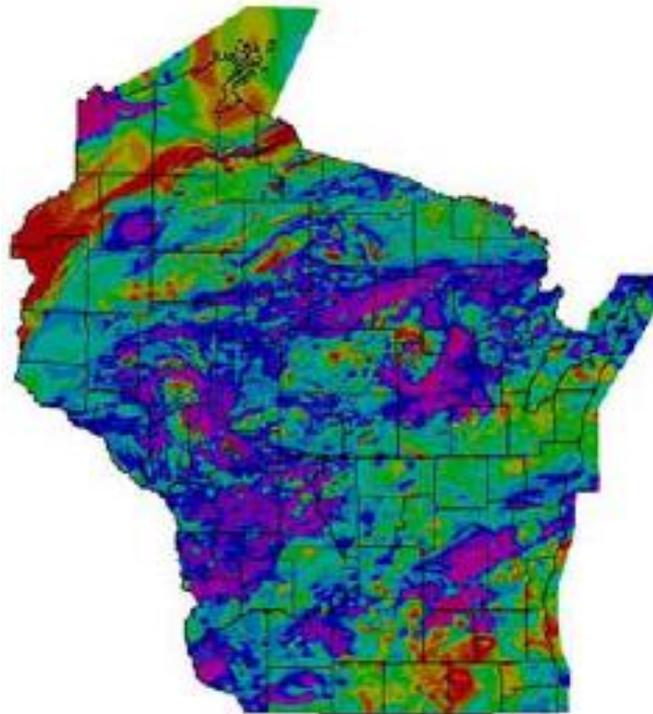


Per rilievi su grandi aree sono di solito utilizzati strumenti aviotrasportati o marini (o integrazione di misure da aereo/nave con misure da terra)

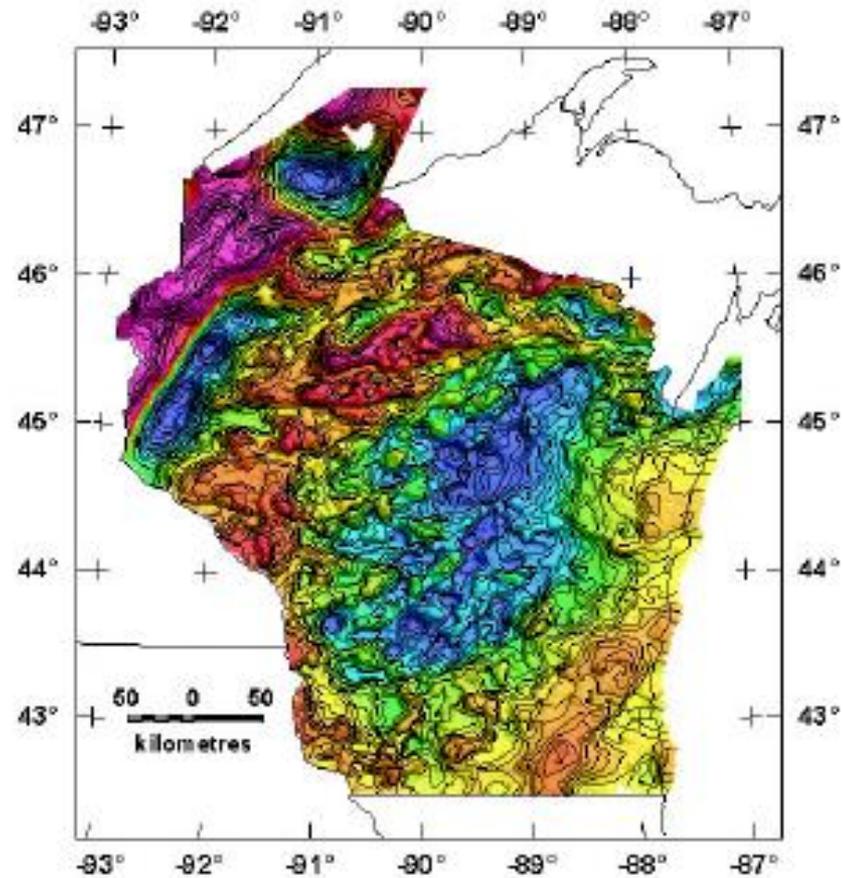
# Misura del Campo Magnetico Terrestre:

## Anomalie REGIONALI / Anomalie LOCALI

Magnetic Field Anomaly

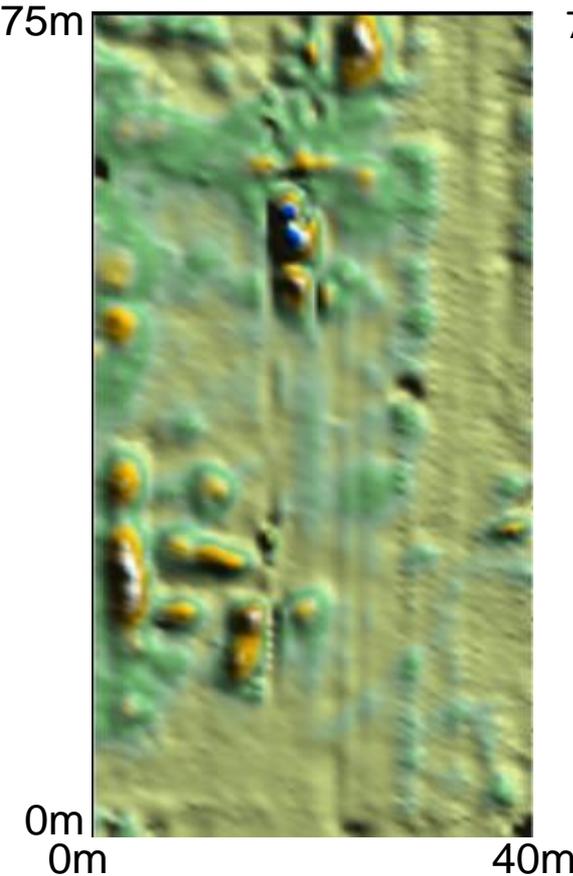


Bouguer Anomaly

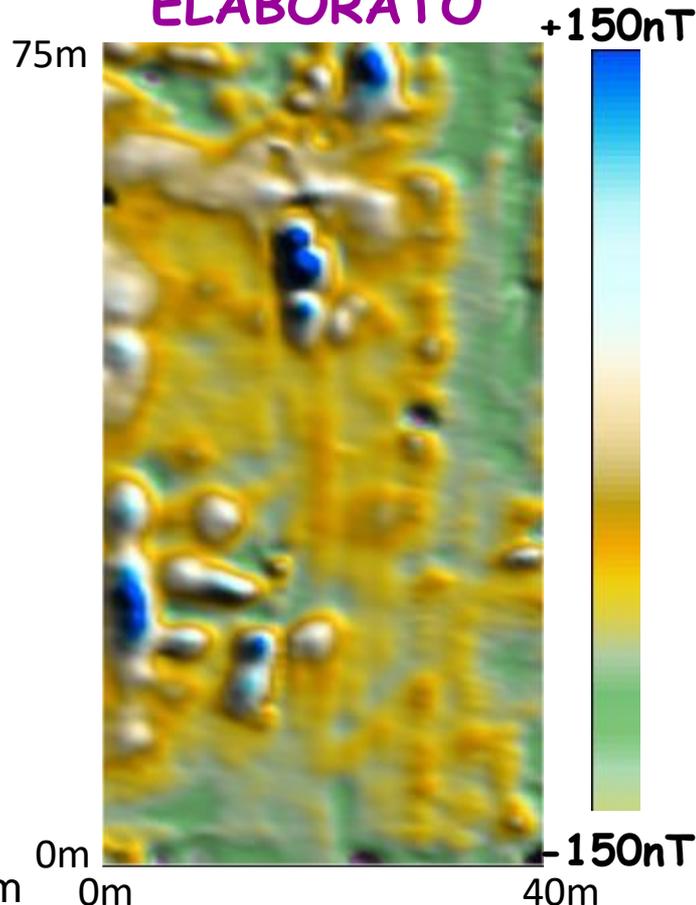


# Misura del Campo Magnetico Terrestre: Anomalie REGIONALI / Anomalie LOCALI

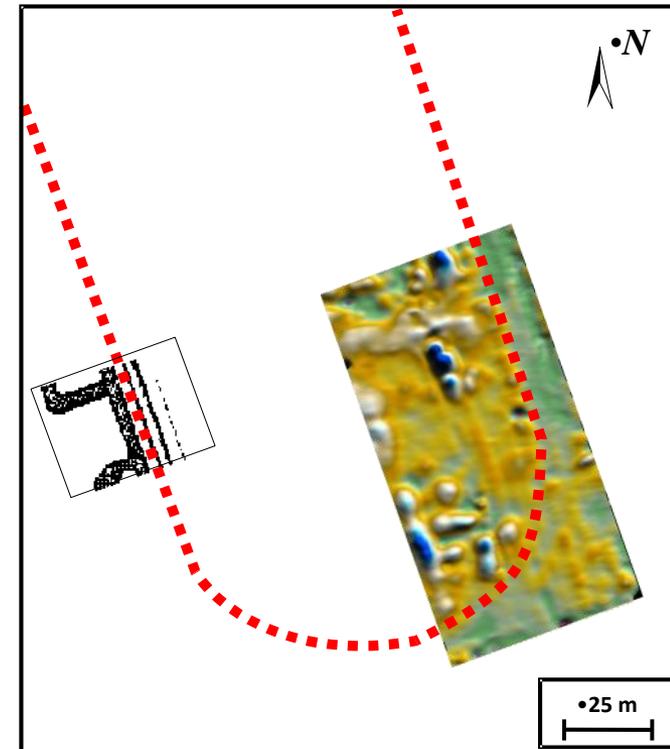
Dato  
ORIGINALE



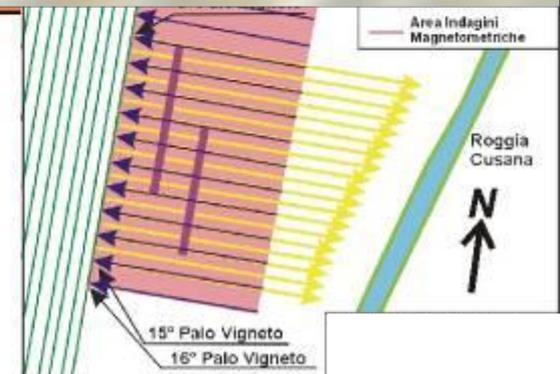
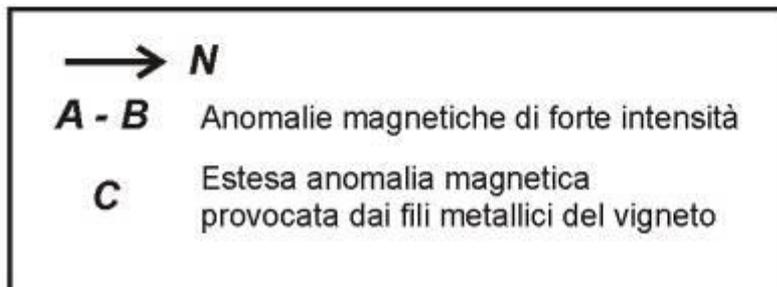
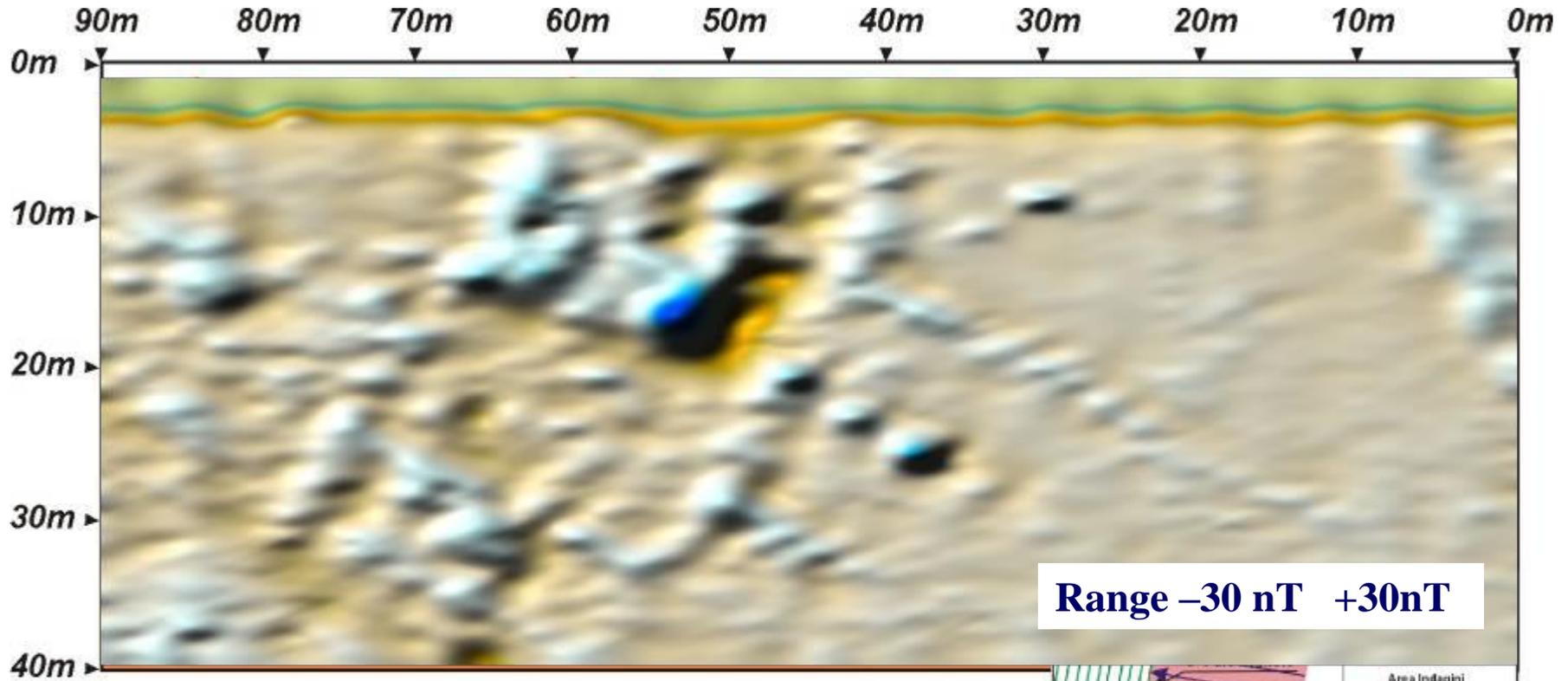
Dato  
ELABORATO



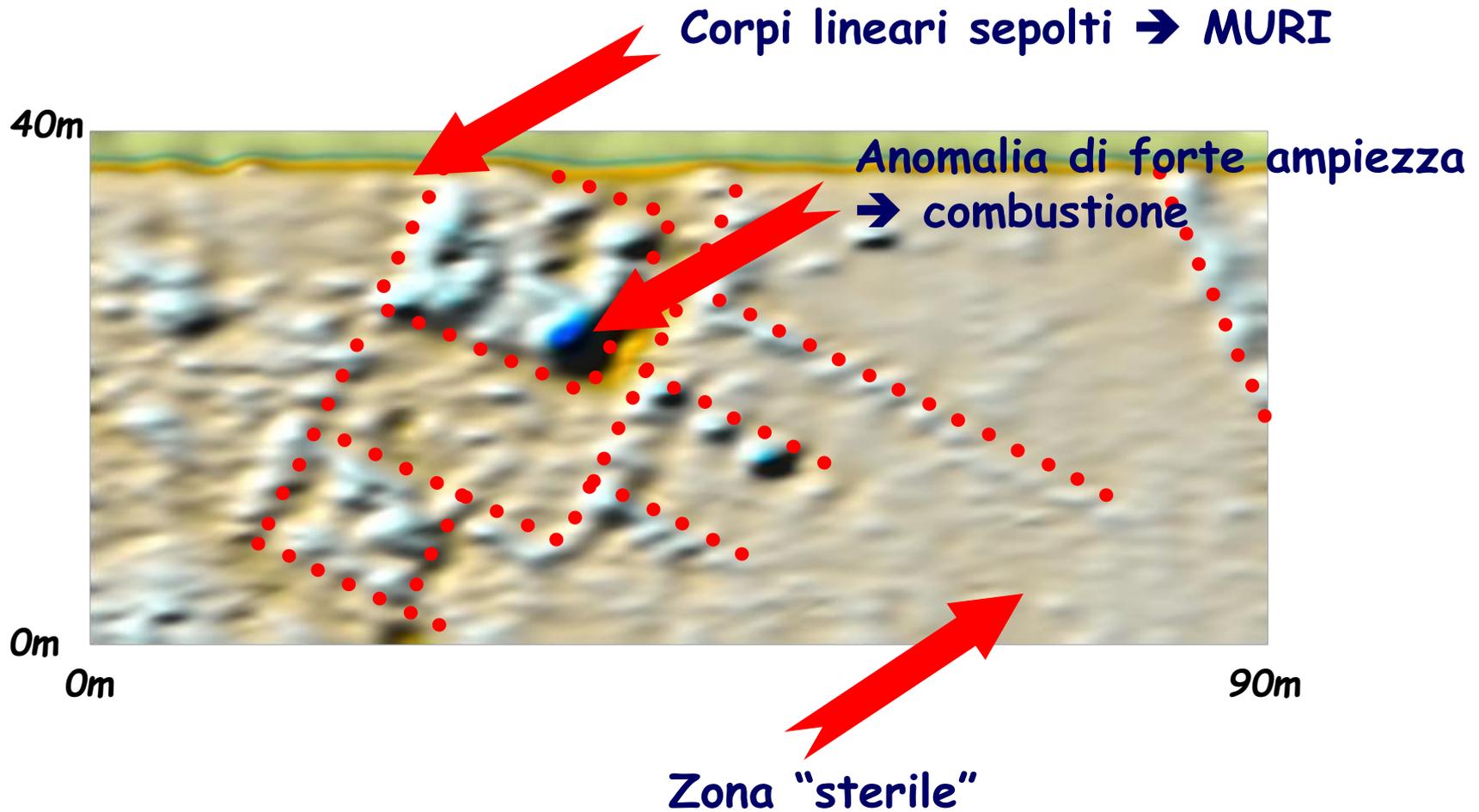
INTERPRETAZIONE



# Elaborazione/interpretazione dati magnetici



# Interpretazione dati magnetici



# Magnetometria PREGI / DIFETTI



1. Costi moderati e grandi aree investigabili in tempi limitati (specie con strumenti aviotrasportati)
2. Non ci sono vincoli teorici relativi a profondità di investigazione, ma...
3. Logistica di acquisizione molto semplice
4. Risultati immediati anche se migliorabili con elaborazione specifica
5. E' spesso sufficiente una sola persona durante a fase di acquisizione



1. Ricostruzione non univoca del sottosuolo (comune a tutti i metodi "di potenziale") → Non è possibile definire senza vincoli derivanti da altre informazioni dimensioni, forma e profondità dei target → più interpretazioni possibili
2. Non sensibile alla presenza di fluidi
3. Limitazioni sia dovute a vincoli logistici (metalli, aree urbanizzate), sia a situazioni anomale nel campo magnetico esterno (tempeste magnetiche)
4. Scarsa risoluzione verticale/laterale
5. Applicabilità a limitate situazioni peculiari, specie se a piccola scala

Domande ???

