

Analisi delle Funzioni di trasferimento tra le componenti delle variazioni del campo geomagnetico durante la sequenza sismica 2008-2009 dell'Aquilano

G. Cianchini, A. De Santis, Di Lorenzo C., Di Mauro D., Di Persio M., Iezzi B., Masci F., P. Palangio, Fratola S., E. Qamili

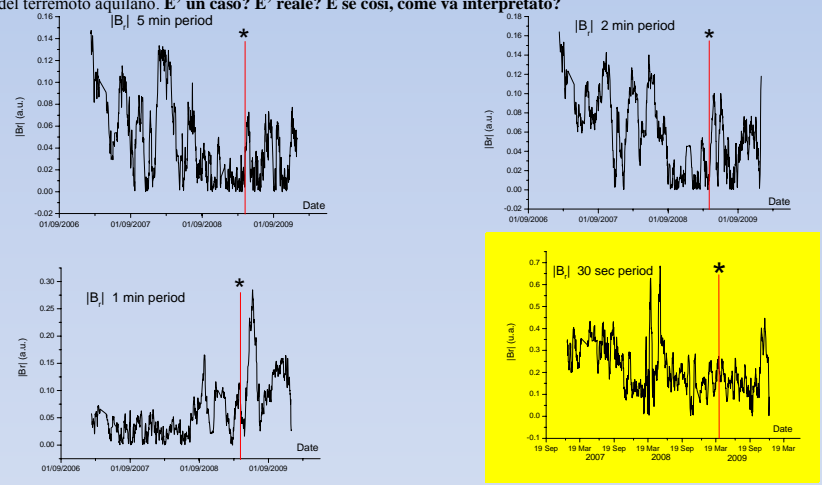
Per comprendere la fenomenologia fisica associata alla sequenza sismica dell'Aquilano, culminata col terremoto del 6 Aprile 2009, ed eventualmente individuare eventuali fenomeni "precursori", si analizzano le componenti del campo geomagnetico misurate all'Osservatorio Geomagnetico de L'Aquila. In particolare, vengono mostrati gli andamenti negli anni 2007-2009 delle funzioni di trasferimento tra le componenti magnetiche orizzontali e quella verticale nel dominio della frequenza, perché strettamente legate alle caratteristiche geoelettriche laterali e in profondità del sito di osservazione. Un'analisi dell'entropia delle stesse funzioni di trasferimento permette di rilevare regimi temporali distinti che precedono la scossa principale della sequenza e possono essere messi in relazione a migrazioni di fluidi e/o variazioni di micro e mesofratturazioni che hanno probabilmente interessato gran parte della litosfera al di sotto della regione aquilana.

Analisi "Convenzionale" delle Funzioni di Trasferimento

A partire dai dati magnetici campionati ad 1 Hz dell'Osservatorio magnetico de L'Aquila, viene effettuata l'analisi magnetovariazionale al fine di studiare lo stato elettromagnetico della crosta al di sotto del sito di misura. Nel dominio della frequenza (qui espressa in termini di frequenza angolare ω), l'equazione che lega le variazioni del campo magnetico verticale a quelle orizzontali è la seguente:

$$Z(\omega) = A(\omega) \cdot X(\omega) + B(\omega) \cdot Y(\omega)$$

dove $A(\omega)$ e $B(\omega)$ sono le funzioni di trasferimento complesse di singola stazione. $A(\omega)$ e $B(\omega)$ sono in relazione alla resistività elettrica e possono variare nel tempo a causa di attività tettonica (ad es. *Niblett and Honkura, 1980*). Le figure qui sotto riportano come esempio il valore assoluto della parte reale di $B(B_r)$ a diversi periodi $2\pi/\omega$. Il momento del terremoto del 6 Aprile, 2009 è indicato con la barra verticale rossa e l'asterisco. Per periodi al di sopra di 30-40 secondi (frequenze più basse di 25 mHz) non si nota nulla di anomalo; a 30 secondi (figura in giallo) notiamo che c'è un valore massimo nelle varie funzioni intorno 10-12 mesi prima del terremoto aquilano. **E' un caso? E' reale? E se così, come va interpretato?**



Conclusioni

L'Analisi convenzionale delle funzioni di trasferimento non consente di rilevare anomalie significative nel loro comportamento durante gli anni che vanno dall'inizio del 2007 fino alla fine del 2009, se non in seconda battuta, dopo aver cioè introdotto l'**analisi dell'entropia di Shannon**. Infatti, laddove si riscontrano alcune differenze di comportamento nelle funzioni di trasferimento, queste sembrano episodiche e casuali. Solo con una successiva analisi in termini di Entropia di Shannon, con la cosiddetta *Transfer Function Entropy*, è possibile individuare alcuni distinti regimi temporali in cui si rileva una significativa diminuzione di questa quantità a circa un anno dal terremoto, con successive oscillazioni con minimi a 10 e 6 mesi prima. Anche se il minimo assoluto di $E(t)$ praticamente coincide con il massimo degli indici K_p i successivi minimi relativi non trovano corrispondenza nell'andamento di K_p . La cosa però più interessante è che in corrispondenza di questa diminuzione complessiva, fa riscontro il contributo in controtendenza di alcune singole armoniche. In particolare i periodi tra **30 e 40 secondi** (frequenza di 25-33 mHz) mostrano dei valori entropici significativamente più elevati rispetto al contributo di fondo. Possiamo interpretare questi risultati come dovuti ad un processo di coinvolgimento alla complessa fenomenologia evolutiva della sequenza sismica aquilana di quelle profondità ($\delta \approx 20$ km) associate alle singole armoniche suddette. Questi eventi prolungati di anomalie delle singole armoniche delle funzioni di trasferimento possono probabilmente essere messi in relazione a migrazioni di fluidi e/o gas e/o variazioni di micro e mesofratturazioni che hanno interessato gran parte della litosfera al di sotto della regione aquilana, con particolare concentrazione a profondità di circa 20 km, e quindi poco al di sotto della profondità ipocentrale (di circa 10 km) dei terremoti della sequenza sismica aquilana.

Analisi "non convenzionale": Transfer Function Entropy

Per analisi "non convenzionale" delle *transfer function* si intende lo studio in termini di entropia del volume di crosta sottostante il punto di misura nel suo insieme, alla ricerca di eventuali momenti anomali per rilevare caratteristiche di ordine/disordine del sistema e di singoli contributi a determinate frequenze. Questo è un tipico approccio di studio ad un sistema complesso (e.g. *De Santis, 2009*). L'ipotesi sottoposta a vaglio è che l'evento sismico del 6 aprile 2009 sia il "culmine" di un lungo e complesso processo che ha "sensibilmente" interessato il volume di crosta nel quale ha avuto poi luogo la rottura meccanica principale con la scossa principale della sequenza. Con questo spirito, sono state analizzate le funzioni di trasferimento $A(\omega)$ e $B(\omega)$ attraverso i concetti e gli strumenti della Teoria dell'Informazione di *Shannon (1948)*.

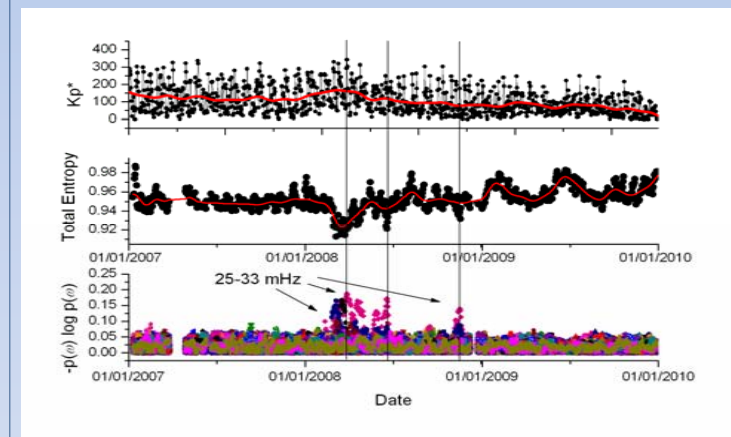
Come funzioni di ω , $A(\omega)$ e $B(\omega)$ contengono informazioni circa lo stato di conducibilità dello strato della crosta che si trova alla profondità δ (*skin depth*)

$$\delta = (2/\mu\omega\sigma)^{0.5}$$

Dalla teoria di Shannon, definiamo *Entropia* (normalizzata) delle Funzioni di Trasferimento (o *Transfer Function Entropy*) la grandezza

$$E(t) = -\sum_{i=1}^n p_i(\omega, t) \cdot \log p_i(\omega, t) / \log n$$

dove $p_i(\omega, t) = K(\omega, t) / \sum_i K_i(\omega, t)$
 n = numero di armoniche e $K(\omega, t) = A_i(\omega, t), B_i(\omega, t)$ al tempo t .



Nella figura riportiamo l'andamento dal 1/1/2007 al 31/12/2009 della somma giornaliera degli indici K_p modificati (K_p^* ; figura in alto); dell'entropia totale $E(t)$ per la parte reale della funzione di trasferimento A (figura al centro). In rosso indichiamo le rispettive medie mobili a 20 giorni. Nella figura in basso viene riportato il singolo contributo, $-p(\omega) \log p(\omega)$, di ciascuna armonica di frequenza angolare ω all'entropia totale. Anche se il minimo assoluto di $E(t)$ coincide praticamente con il massimo degli indici K_p (si veda la media mobile a 20 giorni in rosso) i successivi minimi relativi non trovano corrispondenza nell'andamento di K_p . La cosa però più notevole è che in corrispondenza di questa diminuzione complessiva dell'entropia, fa riscontro il contributo in controtendenza di alcune singole armoniche: in particolare i periodi tra 30 e 40 secondi ($\omega/2\pi = 25-33$ mHz) mostrano dei valori entropici significativamente più elevati rispetto al contributo di fondo. Questo risultato è tanto più importante proprio perché riscontrato in un periodo in cui il sistema risponde all'aumento di attività esterna con una diminuzione complessiva di entropia.

Bibliografia

- De Santis A. (2009). Geosystemics, *Proceedings of the 3rd IASME/WSEAS International Conference on Geology and Seismology (GES'09)* (Invited Paper), Feb. 2009 Cambridge, 36-40.
- Niblett E.R. and Y. Honkura (1980). Time-dependence of EM transfer functions and their association with tectonic activity, *Geophysical Surveys*, 4, 97-114
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication, *Bell Syst. Tech. J.* 27, 379, 623.