

ANALISI FRATTALE DI INSIEMI DI FAGLIE TARDO-QUATERNARIE
IN APPENNINO CENTRALE

INDICE

RIASSUNTO	pag.	305
ABSTRACT	"	305
INTRODUZIONE	"	305
ANALISI FRATTALE	"	308
Generalità	"	308
Metodologia e acquisizione dati	"	310
IMPLICAZIONI SISMOTETTONICHE	"	311
CONCLUSIONI	"	314
BIBLIOGRAFIA	"	314

RIASSUNTO

L'analisi statistica frattale relativa alle faglie del CAFS (The Central Apennines Fault System), è stata effettuata allo scopo di valutare il grado di maturità dell'insieme di faglie tarso-quadernarie dell'Appennino umbro-marchigiano-abruzzese e per investigare la possibile esistenza di eventuali fattori di scala che governano lo sviluppo di strutture di rango differente. Vengono, inoltre, discusse alcune implicazioni di tipo sismotettonico.

ABSTRACT

The Central Apennines Fault System is a regional negative flower structure associated with a roughly N-S trending left-lateral strike-slip fault zone. Fractal analysis of the fault trace pattern of the area has shown that the box-counting curve derived for the CAFS, as a whole, is characterized by a fractal dimension of about 1.4. This type of analysis emphasizes that the system is an immature structure, and that the box-counting curves of the component structures of the CAFS, exhibit different scaling relations. Our results suggest that fault linkage played a major role in the development and evolution of the Central Apennines Fault System. Possible sismotectonic implications are also discussed.

PAROLE CHIAVE: Faglie attive, Sismotettonica, Analisi frattale, Processi di crescita.

KEY WORDS: Active faults, Seismotectonics, Fractal analysis, Fault growth processes.

INTRODUZIONE

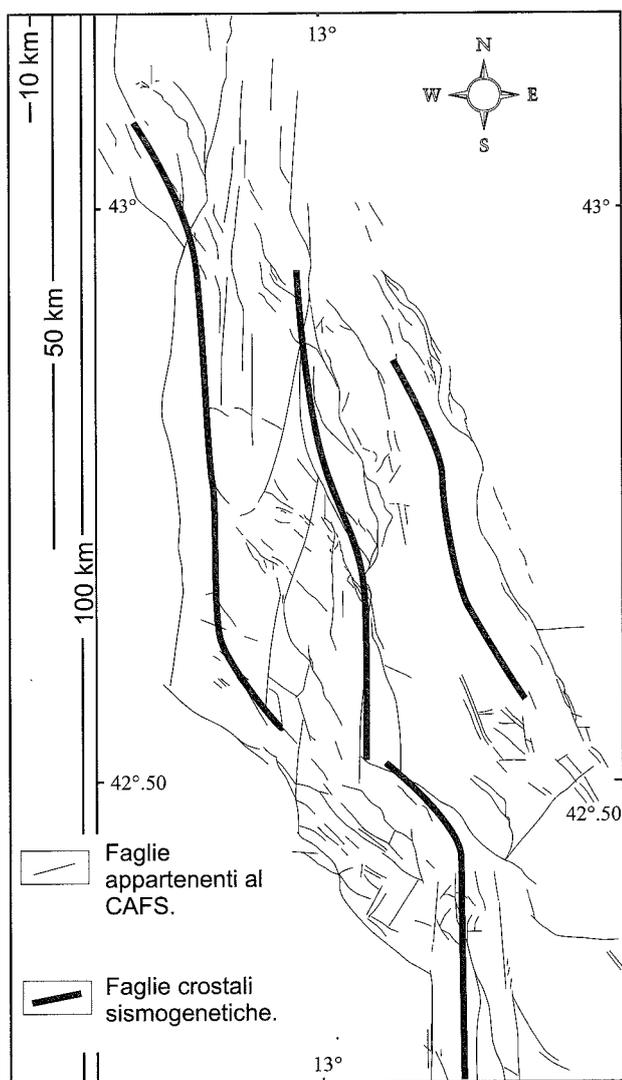
Studi recenti su faglie attive e su strutture in grado

di generare terremoti sufficientemente energetici da provocare evidenti effetti geologici e/o morfologici sul territorio, hanno mostrato che le zone assiali dell'Appennino umbro-marchigiano-abruzzese risultano interessate da un sistema di faglie tarso-quadernarie (Fig. 1) costituenti un *network* di fratture generatosi in risposta ad un regime tettonico di tipo trascorrente-transtensivo (CELLO *et alii*, 1995; CELLO *et alii*, 1997).

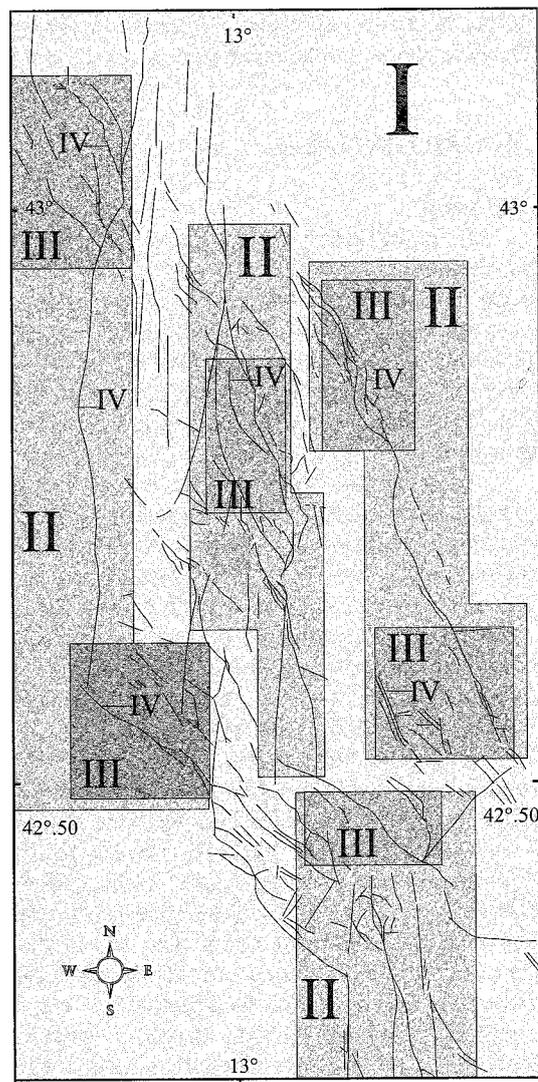
Questo sistema di faglie (di seguito denominato CAFS, da *Central Apennines Fault System*) è costituito da segmenti normali e/o transtensivi ad andamento sub-appenninico (che spesso bordano bacini intramontani di età Pleistocenica) connessi (*linked*) a faglie trascorrenti sinistre con direzione circa nord-sud. CALAMITA & PIZZI (1992) hanno calcolato che l'estensione associata alle faglie normali/transtensive del sistema è alquanto modesta (inferiore al 10%) e che il tasso di scorrimento medio (stimato per gli ultimi 8 Ka) è di circa 10^{-13} sec⁻¹. La gran parte degli Autori considera queste strutture come il fronte più esterno della "distensione Tirrenica" e le associa alla presunta migrazione verso est dei processi di *rifting* impostatisi, nelle aree più occidentali della catena emersa, a partire dal Pliocene (BROZZETTI & LAVECCHIA, 1994; CALAMITA & DEIANA, 1996 e referenze citate).

CELLO *et alii* (1995) ritengono invece che dette strutture, ed i bacini intramontani associati (si veda anche MELETTI *et alii*, 1995), non sono direttamente collegabili agli eventi distensivi Tirrenici. In particolare, mentre MELETTI *et alii*, (1995) ipotizzano che i bacini appenninici intramontani sono la risposta in superficie di processi profondi connessi con la risalita asimmetrica di un cuneo astenosferico, CELLO *et alii* (1995) ritengono che i dati disponibili per il CAFS (compresa la distribuzione areale dei bacini ed il *pattern* sismico dell'area, nonché alcuni dati paleomagnetici CALAMITA *et alii*, 1992) indicano che lo stesso rappresenta l'espressione superficiale di una struttura crostale trascorrente sinistra ad andamento circa meridiano. A livelli crostali superficiali tale struttura è costituita da tre *set* di faglie che interessano l'intero strato sismogenetico fino a profondità di poco inferiori ai 20 km (Fig. 2a) mentre, nella crosta profonda, la stessa localizza la deformazione lungo una *shear zone* a comportamento duttile (CELLO *et alii*, 1995). L'occorrenza di un evento con M = 5.4 avvenuto il 26/03/98 ed ubicato a circa 40-50 km di profondità in un area localizzata poco a nord della zona epicentrale dei terremoti di Colfiorito del settembre-ottobre 1997, suggerisce inoltre che, anche in Appennino centrale, a livelli subcrostali si individua uno strato a reologia elasto-fragile.

*Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Camerino.



a)



b)

Fig. 2 - a) schema delle strutture sismogenetiche; b) gerarchia delle strutture del CAFS e schema di segmentazione areale (rango strutturale decrescente da I a IV). I: *System*; II: *Set*; III: *Array*; IV: *Fault e/o Fault zone* (modificato da CELLO *et alii*, 1995; 1997).

ed evoluzione del CAFS è stata interpretata come un elemento di primo ordine (Fig. 2a) che include una serie di strutture di rango inferiore a loro volta costituite da parti componenti di rango via via decrescente (*Array* e *Fault*) (Fig. 2b; CELLO *et alii*, 1997). Tra le strutture componenti il CAFS, le faglie della zona di Colfiorito (area epicentrale della crisi sismica umbro-marchigiana del 1997-1998) rappresentano un *array* di strutture distensive localizzate alla terminazione settentrionale della struttura bordiera occidentale del CAFS. Queste ultime, già cartografate come faglie capaci (CELLO *et alii*, 1997; TONDI *et alii*, 1997), sono state parzialmente riattivate in risposta ai due eventi sismici con $M_w = 5.7$ e $M_w = 6.0$ del 26 settembre 1997. L'insieme dei caratteri geologico-strutturali e morfotettonici che caratterizzano il CAFS, consente inoltre di descrivere questo sistema come una *composite pull apart zone* (sensu AYDIN & NUR, 1982) in quanto il grado di coalescenza delle faglie è insufficiente per consentire lo sviluppo di un'unica area morfologicamente assimilabile ad un *pull-apart basin* di rango regionale. E' inoltre evidente anche che il CAFS (inteso come struttura di rango superiore se confrontata con i singoli

bacini e/o con le strutture bordiere) rappresenta probabilmente un sistema non completamente evoluto e pertanto tettonicamente ancora attivo.

Un possibile modo per valutare il grado di complessità (e quindi di maturità) di un sistema (non necessariamente un sistema di faglie!) è quello di analizzarlo statisticamente per verificare la possibilità che possa trattarsi di un sistema frattale (MANDELBROT, 1983). In questo caso, infatti, la dimensione frattale che lo definisce può considerarsi come una misura indicativa del suo livello di organizzazione strutturale e quindi del suo grado di evoluzione nel dominio spazio-temporale (TURCOTTE, 1992; BARTON & LA POINTE, 1995; CELLO, 1997).

In questo lavoro vengono illustrati i risultati dell'analisi frattale relativa alle faglie del CAFS (inteso come un sistema di faglie omogenee sia da un punto di vista strutturale che cronologico) e alle faglie costituenti le strutture di rango inferiore (*Set* e *Array*). Lo scopo dell'analisi è quello di valutare il grado di maturità dell'insieme di faglie tardo-quadernarie dell'Appennino umbro-marchigiano-abruzzese e di investigare la possibile esistenza di eventuali fattori di scala che governano lo svi-

luppo di strutture di rango differente. Vengono, inoltre, discusse alcune implicazioni di tipo sismotettonico.

ANALISI FRATTALE

Generalità

In molti settori delle Scienze della Terra appare sempre più evidente che la geometria frattale può rappresentare lo strumento matematico più adeguato per descrivere sia gli "oggetti" geologici, così come vengono osservati sul terreno (ad esempio faglie e fratture), che "eventi" rappresentabili mediante correlazioni (ad esempio la relazione frequenza-magnitudo di una sequenza sismica).

La geometria frattale risulta infatti indispensabile per descrivere forme che sono più complesse di quelle definibili mediante la geometria euclidea (punti, linee, piani e solidi). Una forma (struttura) frattale è definita da una dimensione frattale e i concetti di indipendenza dalla scala (*scale-independence*) e di auto-similarità (*self-similarity*) nel dominio spazio-temporale sono i fondamenti della definizione di frattale (dal latino frangere; MANDELBROT, 1983; FALCONER, 1990).

Esempi ed applicazioni dell'analisi frattale a fenomeni naturali nei campi della Geologia, della Geofisica, della Geomorfologia, della Petrologia etc., sono riportati in numerosi lavori ai quali si rimanda per eventuali approfondimenti (per una sintesi bibliografica si veda BARTON & LA POINTE, 1995 e COWIE *et alii*, 1996). Qui giova solo puntualizzare che perchè una struttura possa considerarsi frattale è necessario che la stessa sia caratterizzata da una geometria auto-similare e scala-indipendente. Ciò significa che gli elementi costitutivi di una struttura appaiono simili a loro stessi quando sono osservati a scale diverse e che le parti componenti il sistema rappresentano versioni ridotte (*scaled-down*) dell'insieme (Fig. 3).

Sulla base di queste evidenze è stata riconosciuta, negli ultimi anni, la natura frattale di diversi oggetti geologici; in particolare, nel campo della geologia strutturale, sono considerati frattali (Fig. 4):

- il rapporto tra la frequenza delle fratture e la sepa-

razione normale alla loro direzione (BARTON & ZOBACK, 1992);

- l'aspetto morfologico (rapporto tra densità spettrale e frequenze spaziali delle asperità) di una superficie di faglia e/o di frattura (POWER & TULLIS, 1991);

- la distribuzione di frammenti di roccia di varie dimensioni nell'ambito di una breccia di faglia (SAMMIS *et alii*, 1987);

- il rapporto tra rigetto e dimensione di una faglia (SCHOLZ & COWIE, 1990; COWIE & SCHOLZ, 1992);

- il pattern delle tracce in superficie di insiemi di faglie e fratture (BARTON & LARSEN, 1985; BARTON & HSIEH, 1989).

Il convincimento che l'analisi frattale rappresenti uno strumento indispensabile per descrivere in termini fisico-matematici molti fenomeni geologici è fondato quindi su numerose osservazioni le quali dimostrano che la gran parte degli oggetti e/o degli eventi analizzati (dalla relazione frequenza-magnitudo dei terremoti alla morfometria delle catene montuose, dalla tessitura delle rocce ignee alla distribuzione di giacimenti minerali e petroliferi, etc.) sono indipendenti dalla scala.

Tale concetto è peraltro certamente familiare a molti geologi di terreno i quali, quando fotografano un oggetto geologico (ad esempio una piega o una faglia), sanno di dover includere nella ripresa anche un oggetto con una dimensione caratteristica (una moneta, una casa, etc.) in modo da poter definire, per confronto, la dimensione della struttura da riprodurre.

Questo stesso concetto è formalizzato, in termini matematici, in un lavoro fondamentale sui frattali (MANDELBROT, 1967) dove si dimostra che la lunghezza di un oggetto (in questo caso la costa della Gran Bretagna) può essere ricavata per confronto con l'unità di misura utilizzata mediante una relazione del tipo:

$$N(s) = AL^{-D} \quad (1)$$

dove $N(s)$ rappresenta il numero di segmenti caratterizzati da una lunghezza maggiore o uguale ad L ; A è una costante e D la dimensione frattale. Allo stesso modo, se si considera la relazione frequenza-magnitudo di GUTENBERG-RICHTER (1954) o la relazione frequenza-momento della sequenza globale di eventi sismici (LAY & WALLACE, 1995), si osserva che essa risulta caratteriz-

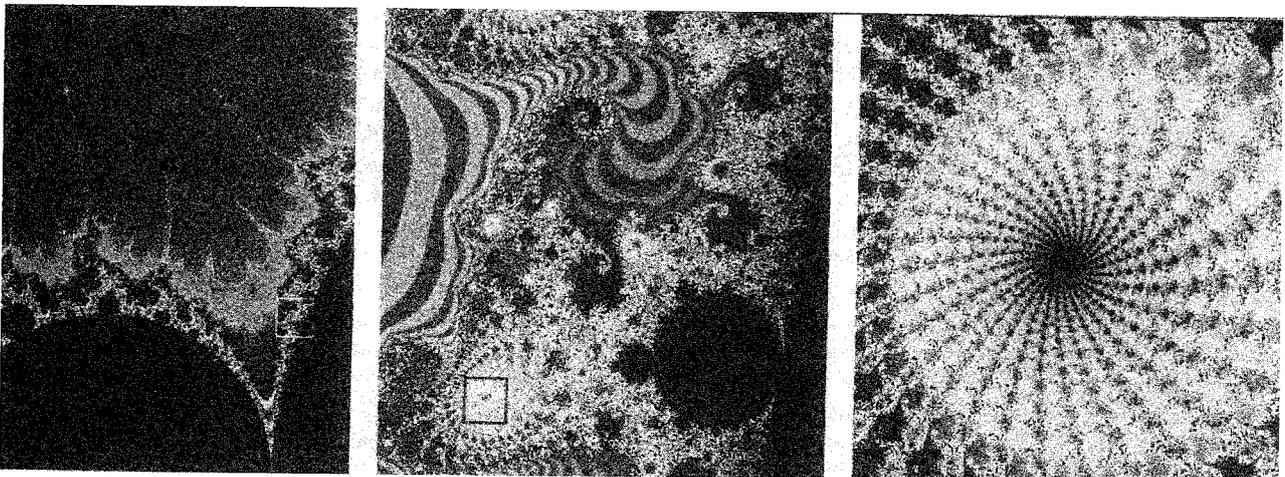


Fig. 3 - L'insieme di Mandelbrot; tre ingrandimenti successivi dell'insieme rivelano strutture simili che si ripetono, fra cui anche copie in miniatura dell'insieme stesso, oltre a forme nuove e differenti (da JURGENS *et alii*, 1990).

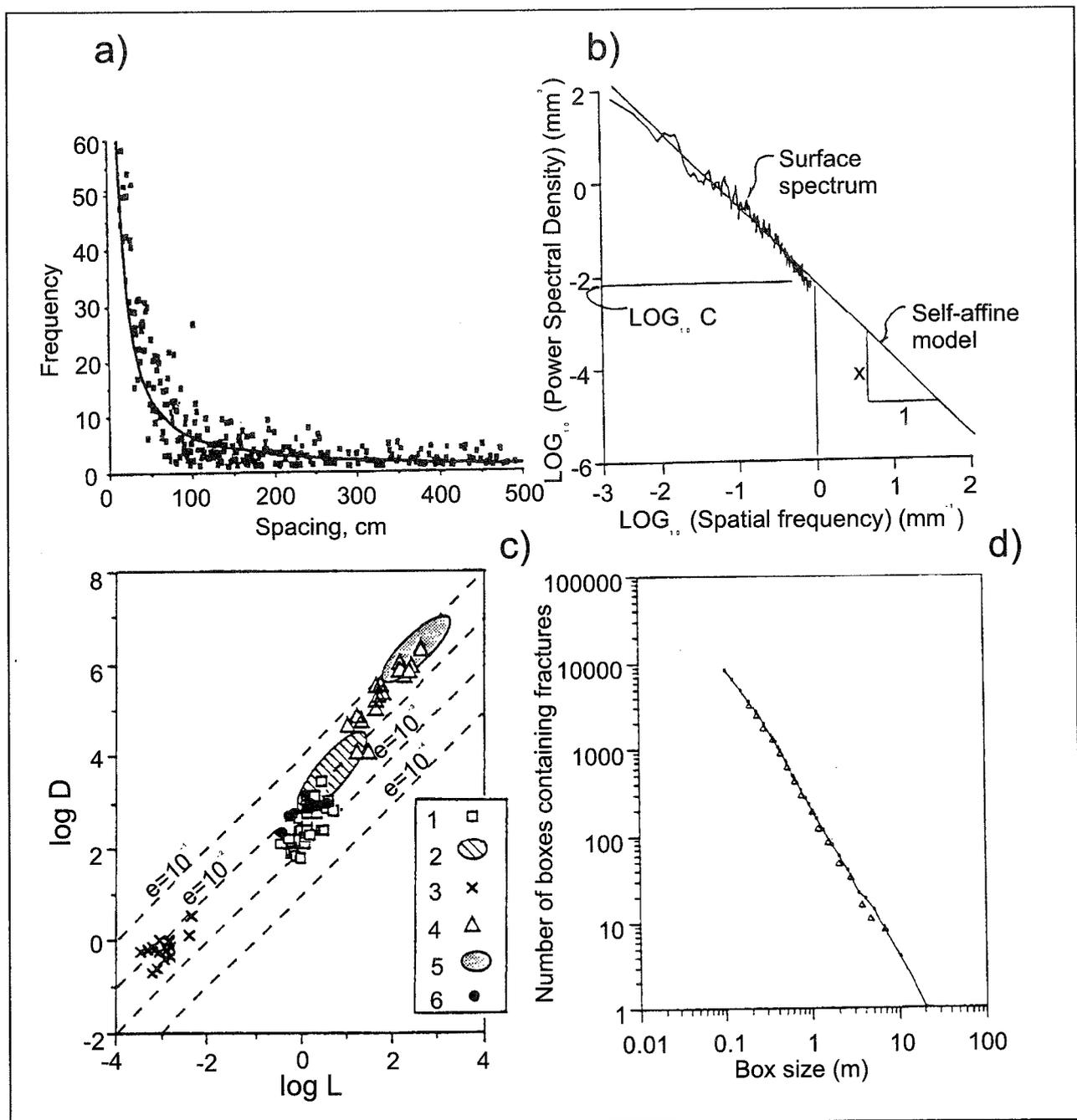


Fig. 4 - Relazioni di potenza mostranti i rapporti tra: a) frequenza delle fratture e separazione normale alla loro direzione (modificato da BARTON & ZOBACK, 1992); b) rapporto tra densità spettrale e frequenze spaziali delle asperità di una superficie di faglia (da POWER & TULLIS, 1991); c) rapporto tra rigetto e lunghezza di una faglia; 1-faglie normali (Inghilterra); 2-faglie normali (Francia); 3-faglie normali (Giappone); 4-sovrascorrimenti (Scozia); 5-faglie trascorrenti continentali; 6-faglie normali (Islanda); (da SCHOLZ & COWIE, 1990); d) il pattern delle tracce in superficie di insiemi di faglie e fratture (modificato da BARTON & HSIEH, 1989).

zata da numerosi piccoli eventi e da pochi terremoti maggiormente energetici (Fig. 5).

Questo tipo di distribuzione, che può anch'esso essere descritto da una relazione potenza, suggerisce che l'intera sequenza può considerarsi frattale e, conseguentemente, che il suo grado di organizzazione può essere definito dal valore dell'esponente (TURCOTTE, 1992).

L'osservazione che numerosi oggetti ed eventi geologici obbediscono a leggi di potenza (e che sono quindi indipendenti dalla scala e pertanto frattali) è fondamentale nelle Scienze della Terra in quanto tali leggi consentono di estrapolare, su un ampio spettro di scale, le infor-

mazioni contenute in un database parziale, permettendo così di prevedere e quantificare assetti geometrici e processi geologici utilizzando *set* di dati incompleti ma statisticamente significativi (MAIN, 1995).

Dal grafico di Fig. 5, ad esempio, si può dedurre che l'informazione contenuta nei cataloghi sismici relativamente ad eventi di elevata energia è nettamente subordinata rispetto a quella relativa ad eventi meno energetici; ciò nonostante l'estrapolazione dei dati disponibili può portare ad una previsione degli eventi di elevata energia poiché la relazione ricavata è statisticamente valida per l'intera sequenza.

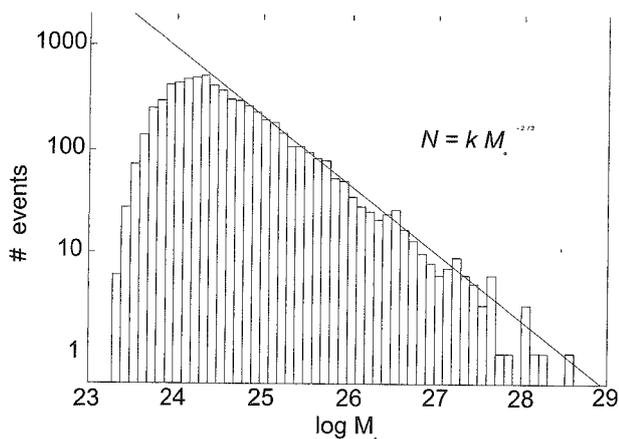


Fig. 5 - Numero dei terremoti in funzione del momento sismico. Sequenza globale di eventi dal 1977 (modificato da LAY & WALLACE, 1995).

Altri tipi di osservazioni sui sistemi naturali (per esempio sulle associazioni strutturali minori che caratterizzano le zone di faglia e/o le *shear zones*) mostrano che quando le parti componenti di un sistema possiedono un elevato grado di autosimilarità su un ampio spettro di scale, le loro proprietà spaziali e temporali possono essere utilizzate per discriminare tra i diversi processi potenzialmente responsabili della loro genesi (MAIN, 1995). Quest'ultimo passaggio richiede però l'uso di modelli numerici sofisticati in grado di simulare processi dinamici capaci di generare strutture frattali. Una simulazione di questo tipo, mirata a definire l'evoluzione dei processi di fagliamento in materiali eterogenei, è stata proposta da COWIE *et alii* (1993) utilizzando un modello SOC (*self organized criticality model*). I modelli SOC sono particolarmente adatti per studiare la fisica dei fenomeni critici non lineari che caratterizzano sistemi naturali di tipo dissipativo quali: flussi turbolenti, valanghe e terremoti (MAIN, 1995).

Il modello proposto da COWIE *et alii* (1993) è basato sull'assunzione che la crosta terrestre si trovi in condizioni di equilibrio metastabile e che, in questo stato critico prossimo alla rottura, il livello di stress agente in regime stazionario è mediamente vicino a quello necessario per vincere la resistenza delle rocce. I risultati della modellizzazione hanno mostrato che un sistema con una geometria resistente (*resistor network*) soggetto a forze di trazione si organizza spontaneamente fino allo stato critico e che, nel tempo, localizza la deformazione su faglie dominanti a geometria frattale (Fig. 6).

In altri termini, ciò significa che i processi di fagliamento evolvono e si organizzano fino a raggiungere un pattern frattale finito che è una misura dello stato di frammentazione (*volumetric strain*) che caratterizza un volume crostale (SCHOLZ & COWIE, 1990). Questo dato, che viene normalmente espresso mediante una dimensio-

ne frattale, può quindi fornire una stima del grado di maturità raggiunto da un sistema di faglie e/o fratture sviluppatesi nell'ambito di un volume roccioso inizialmente indeformato.

Metodologia e acquisizione dati

Tra i numerosi attributi utilizzabili ai fini della caratterizzazione del sistema di faglie tardo-quadernarie delle zone assiali della catena centro-appenninica, nel presente lavoro si è scelto di analizzare in modo specifico il pattern di superficie del CAFS nel suo insieme e il pattern di superficie di insiemi di faglie appartenenti ad esso.

L'analisi frattale di un pattern di superficie viene convenzionalmente effettuata con un metodo di conteggio areale basato sulla tecnica del *box-counting* (MANDELBROT, 1983; BARTON & LARSEN, 1985; WALSH and WATTERSON, 1993 e referenze citate). Detto metodo

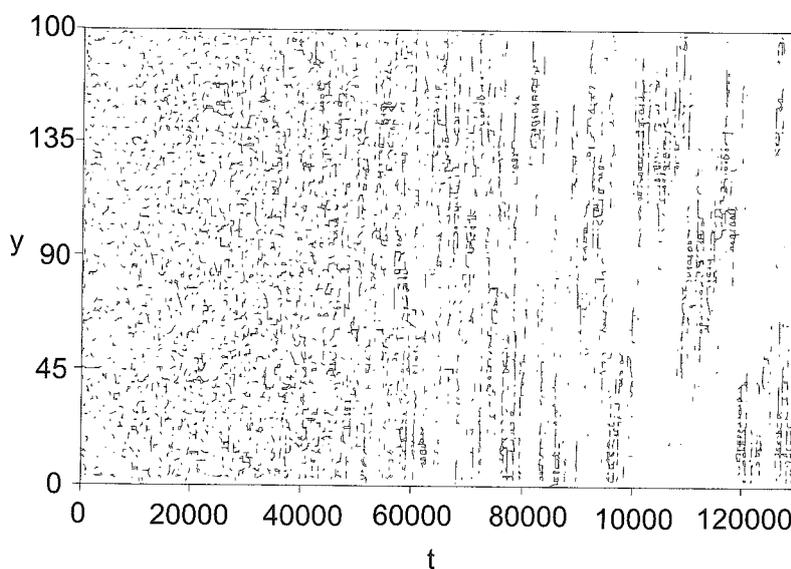


Fig. 6 - Sistema con una geometria resistente (*resistor network*) che soggetto a forze di trazione si organizza spontaneamente fino allo stato critico localizzando la deformazione su faglie dominanti a geometria frattale (leggermente modificato da COWIE *et alii*, 1993).

è stato infatti appositamente studiato per misurare la dimensione frattale (D) di una struttura contenuta in un piano (per definizione, quindi, $1 < D < 2$, poiché $D = 1$ rappresenta il caso limite di una linea singola mentre $D = 2$ descrive una curva che riempie completamente un piano; MANDELBROT, 1983).

Se si dispone di una mappa della struttura che si vuole analizzare (in questo caso di una carta delle faglie), la tecnica più appropriata è quella di sovrapporre alla struttura (Fig. 7) una maglia quadrata (*grid*) con lato uguale ad s e poi conteggiare il numero di *box* che la contengono $N(s)$. Una volta effettuato il primo conteggio, l'operazione viene ripetuta varie volte utilizzando *box* con dimensioni sempre minori (convenzionalmente dimezzate ad ogni conteggio). Terminati i conteggi è possibile costruire un diagramma bilogarithmico (per convenzione in base 10) ponendo $\log N(s)$ sulle ordinate e $\log(S)$ sulle ascisse. Se la distribuzione dei punti ricavati dai conteggi è espressa nel diagramma bilogarithmico dalla relazione lineare

$$\log N(s) = K + D \log(1/s) \quad (2)$$

allora la struttura è frattale e l'esponente della funzione D (che coincide con il valore di pendenza della retta nel diagramma bilogarithmico) rappresenta la dimensione frattale della struttura esaminata.

I dati relativi all'analisi effettuata sulle faglie tardo-quadernarie e capaci (sensu IAEA, 1991) del CAFS e sulle faglie che individuano le strutture di rango inferiore appartenenti ad esso (CELLO *et alii*, 1997, 1998; TONDI *et alii*, 1997) vengono discussi e confrontati con quelli già acquisiti nell'area di Castelluccio-Monte Vettore. In una precedente nota (CELLO, 1997), infatti, è stato mostrato che il pattern di superficie del network di faglie tardo-quadernarie esposte nell'area di Castelluccio-Monte Vettore è frattale e che, nell'insieme, risulta caratterizzata da un valore di D pari a circa 1.3.

I dati relativi al CAFS sono stati "estratti" dalla Carta delle Faglie Tardo-Quadernarie in scala 1:100.000 e dalla Carta delle Faglie Capaci in scala 1:250.000 (TONDI, 1997) mentre la rappresentazione grafica dei conteggi effettuati dalle mappe digitalizzate di Fig. 7, è riportata in Fig. 8.

Come si può osservare dai diagrammi di Fig. 8, i punti ricavati sono perfettamente allineati lungo una retta; quindi, sulla base di questi dati, si può concludere che il CAFS e gli insiemi di faglie appartenenti ad esso rappresentano strutture frattali. La dimensione frattale calcolata per il sistema CAFS ($D = 1,4$), risulta maggiore di quella calcolata per le strutture componenti di rango inferiore ($1,2 < D < 1,3$). Questo risultato si ottiene perchè la dimensione frattale è una misura del grado di complessità geometrica, e sicuramente il CAFS è un sistema più complesso delle singole aree appartenenti ad esso. Il basso valore della dimensione frattale che caratterizza le faglie capaci è dovuto, invece, al fatto che esse coprono un breve intervallo temporale: dell'ordine dei 50-80 ka, rispetto alle faglie del CAFS che hanno agito in risposta allo stesso campo di stress per un periodo di tempo maggiore (ca. 700 ka, per l'Appennino centrale; CELLO *et alii*, 1997).

Se si confronta questo risultato con i dati relativi ad altri sistemi di faglie di rango paragonabile ma tettonicamente più mature (come ad esempio quelle del sistema di San Andreas; TURCOTTE, 1992), si osserva che la dimensione frattale del CAFS è inferiore ai valori caratteristici di dette strutture (1.5-1.7). Ciò confermerebbe quindi che il valore di D può effettivamente essere utilizzato come un indice del grado di maturità di un sistema di faglie.

Un altro dato utile per caratterizzare una struttura frattale naturale è, come si è detto, il suo *range* di validità o fattore di scala (*scaling factor*). In altri termini, ciò che si vuole conoscere è l'ambito di validità entro il quale la struttura in esame può essere considerata auto-similare (cioè frattale). Questa informazione non è di facile acquisizione perchè i dati relativi ad oggetti e/o processi geologici sono spesso insufficienti per definire una soglia minima di validità statistica (COWIE *et alii*, 1996). CELLO (1997) ha però osservato che l'elevato coefficiente di correlazione ($r > 0,99$) che caratterizza i dati derivati dalla struttura di Castelluccio-Monte Vettore (si veda la Fig. 8d), non è di per sé sufficiente per definire frattale l'intera struttura (che presenta dispersioni sistematiche ai bordi del diagramma bilogarithmico) ed ha proposto un metodo di analisi specifico per valutarne il *range* di validità. I risultati dell'analisi hanno mostrato che la struttura di

Castelluccio-Monte Vettore può considerarsi auto-similare solo per dimensioni maggiori ai 625 metri.

Nel presente lavoro questo stesso metodo è stato utilizzato per ricavare il range di validità frattale del CAFS. I risultati dell'analisi hanno mostrato che il sistema, nel suo insieme, può considerarsi auto-similare per dimensioni maggiori ai 1406 metri (Fig. 9). In entrambi i casi, quindi, le strutture esaminate possono essere considerate frattali su di uno spettro di scale che comprende circa due ordini di grandezza (da $6-7 \times 10^2$ a $1-2 \times 10^4$ metri per la struttura di Castelluccio-Monte Vettore e da $10-11 \times 10^2$ a $4-5 \times 10^4$ metri per il CAFS).

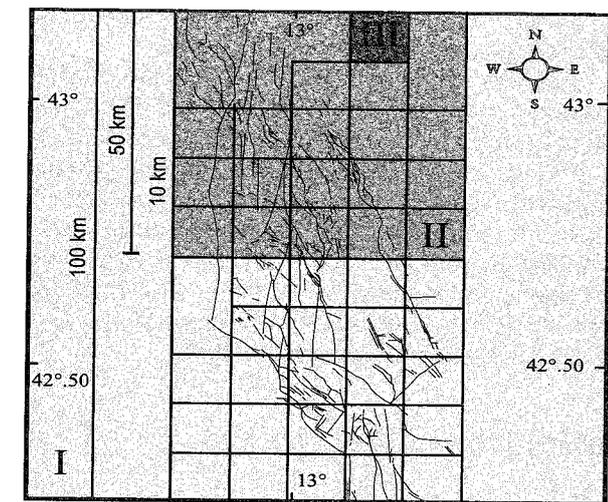
IMPLICAZIONI SISMOTETTONICHE

Studi recenti finalizzati all'analisi di faglie attive in Appennino centrale (CELLO *et alii*, 1997b; TONDI *et alii*, 1997) hanno imposto la verifica dei rapporti esistenti tra strutture superficiali e profonde. Il collegamento tra strutture sismogenetiche e strutture superficiali è stato effettuato ipotizzando che singoli incrementi del movimento in profondità possano essere accomodati, in superficie, su diverse diramazioni di faglie capaci. Per valutazioni più specifiche del potenziale sismico di un'area (per esempio per il calcolo degli *slip rate*, dei periodi di ritorno e delle massime magnitudo attese) si è inoltre constatato che lo studio delle sole faglie capaci (quelle che coprono cioè un intervallo temporale dell'ordine dei 50-80 ka) non è sempre sufficientemente adeguato e risolutivo e che le strutture sismogenetiche possono essere meglio definite utilizzando tutta l'informazione contenuta nelle faglie superficiali che hanno agito in risposta allo stesso campo di stress per un periodo di tempo maggiore (ca. 700 ka, per l'Appennino centrale).

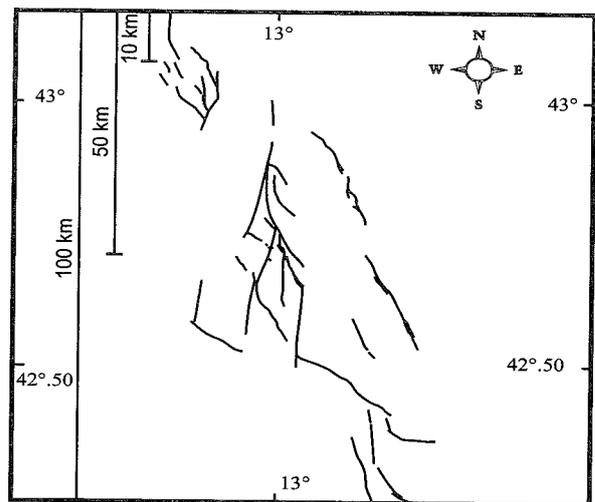
Questa considerazione è supportata dai risultati dell'analisi statistica areale effettuata sia sulle strutture tardo-quadernarie del CAFS che sulle sole faglie capaci. Il basso valore della dimensione frattale che caratterizza le faglie capaci (Fig. 7 e 8b) dimostra, a nostro avviso, che queste ultime sono poco rappresentative della geometria complessiva delle strutture sismogenetiche cristalline; al contrario, il pattern areale dell'insieme delle faglie tardo-quadernarie rappresenta un buon indice del grado di maturità della struttura sismogenetica profonda. Inoltre, per le faglie capaci, il tempo di riferimento è pressochè fisso e quindi la dimensione frattale che le caratterizza rappresenta probabilmente solo un indice degli *slip-rate* associati alle singole faglie e non di quelli tipici dell'intera struttura sismogenetica. L'analisi frattale del *pattern* di superficie del CAFS ha anche evidenziato che faglie con dimensioni lineari superiori a 1,4 km sono *self-similar*. Il calcolo della magnitudo corrispondente a segmenti di faglia con queste dimensioni può quindi fornire una stima della magnitudo minima al di sopra della quale i terremoti che avvengono in questo settore appenninico possono essere considerati come rappresentativi dell'intero sistema. Detto calcolo, assumendo una faglia circolare con $A = \pi (L/2)^2$, consente di stimare la magnitudo (M_s) dalla formula di UTSU and SEKI (1954):

$$\log A = 1.02 M_s + 6.0 \quad (3)$$

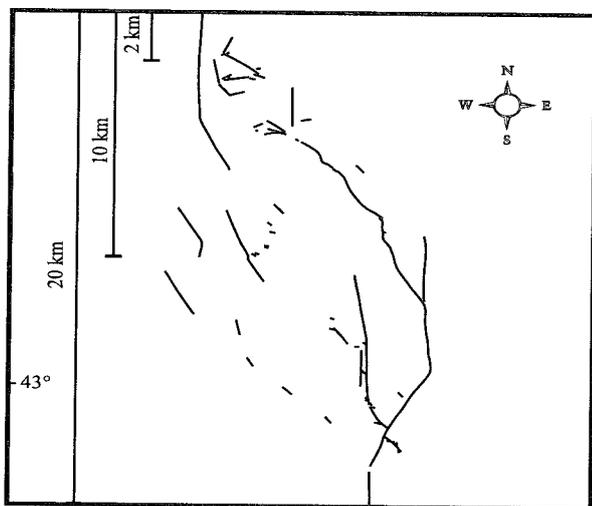
Nel caso del CAFS, si ricava che il valore di M_s minima è pari a quattro.



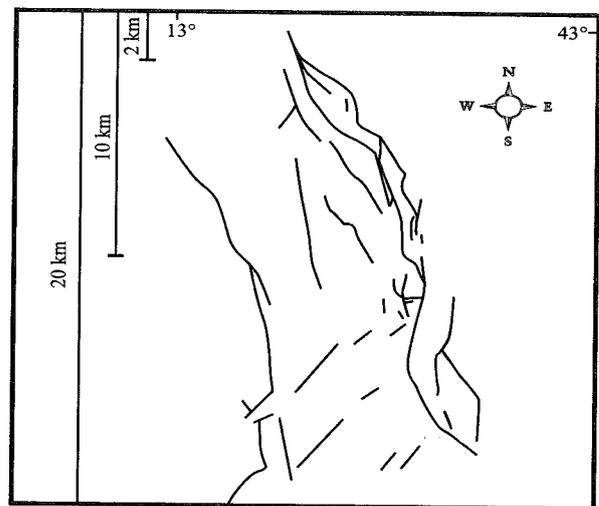
a)



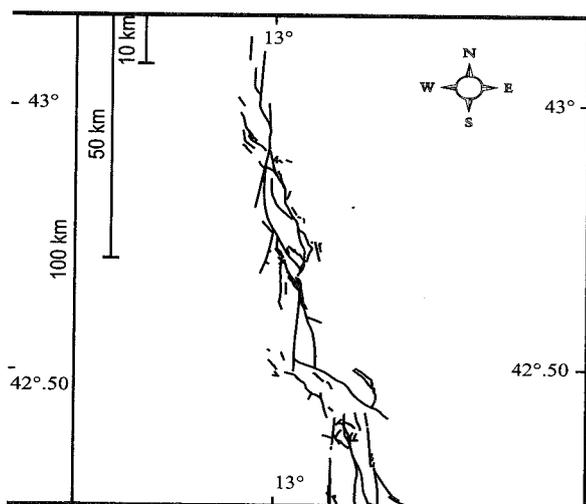
b)



c)



d)



e)

Fig. 7 - Mappe utilizzate per l'analisi statistica areale. a) The Central Apennines Fault System (digitalizzato dalla Carta delle Faglie Tardo-Quaternarie a scala 1:100.000; TONDI 1997); I, II e III mostrano i differenti modelli di configurazione per l'analisi del *box-counting*. b) Carta delle Faglie Capaci (digitalizzata dalla Carta delle Faglie Capaci a scala 1:250.000; Tondi 1997); c) *fault array* nell'area di Colfiorito (digitalizzato dalla Carta delle Faglie Tardo-Quaternarie del Bacino di Colfiorito a scala 1:25.000; TONDI, 1997); d) *fault array* dell'area di Monte Vettore (digitalizzato dalla scala 1:25.000; CALAMITA *et alii*, 1992); e) *fault set* dell'area Norcia-L'Aquila (digitalizzato dalla scala 1: 50.000; TONDI 1997).

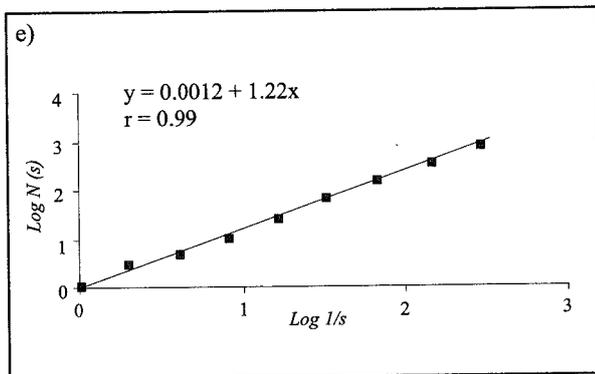
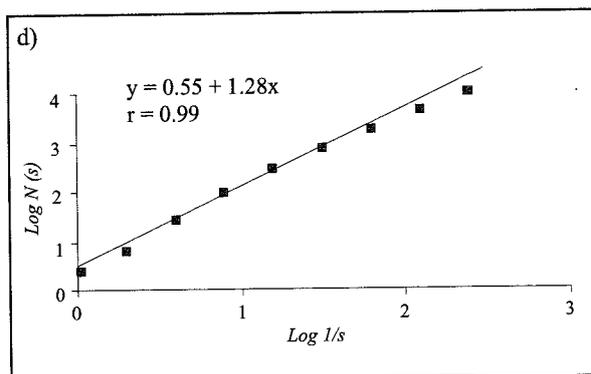
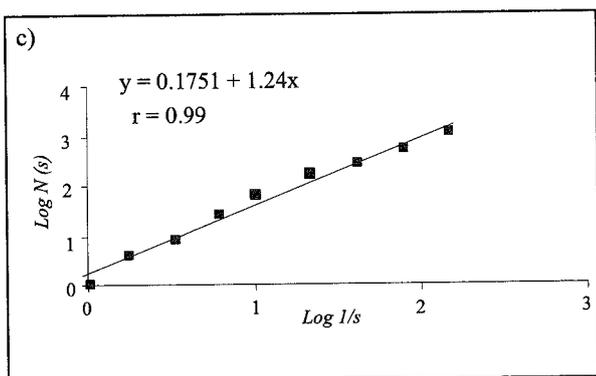
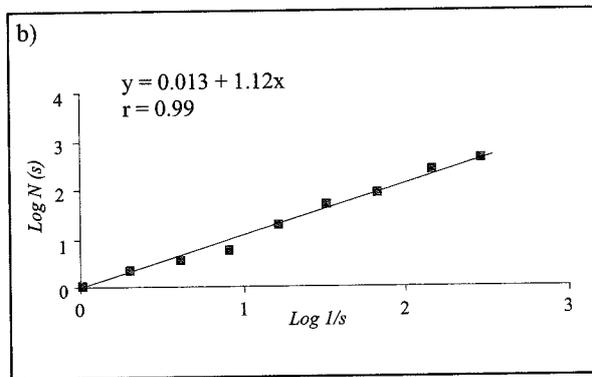
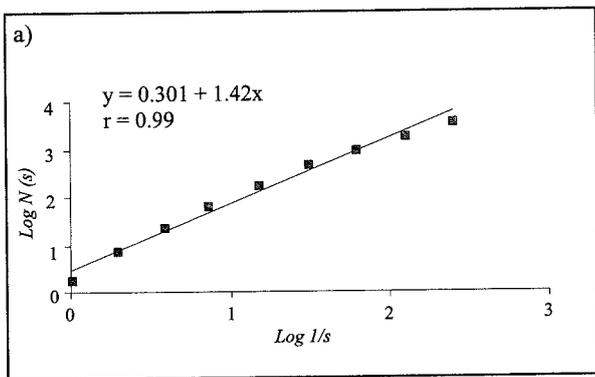


Fig. 8 - Relazioni di scala del *pattern* di superficie delle faglie appartenenti al CAFS (a-b), alla struttura sismogenetica occidentale (c), orientale (d) e centrale (e).

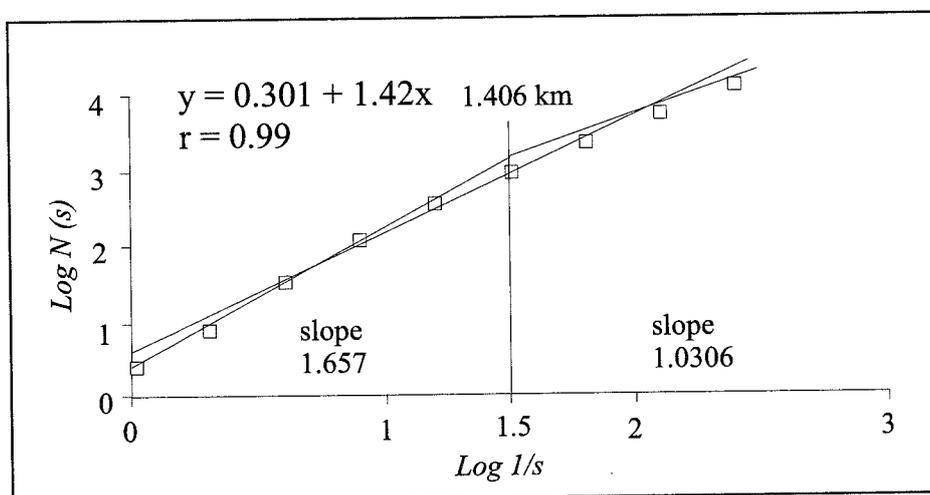


Fig. 9 - Range di validità frattale del CAFS.

CONCLUSIONI

L'analisi frattale del pattern di superficie di faglie e/o fratture può essere utilizzata per acquisire una serie di informazioni utili a definire i caratteri geometrici statistici di un sistema di discontinuità strutturali nel dominio spazio-temporale. La verifica del grado di "frattalità" di una struttura consente di definire un fattore di scala e di derivare la dimensione frattale del sistema.

Le implicazioni che possono derivare da questo tipo di informazioni riguardano i molteplici aspetti (nello spazio e nel tempo) della deformazione in campo fragile e la possibilità di stimare lo strain volumetrico in ammassi rocciosi fratturati.

Le possibili applicazioni dell'analisi frattale ai sistemi naturali investono i più svariati campi delle Scienze della Terra: dalla sismotettonica alla ricerca petrolifera a quella geotermica e dei giacimenti minerali, dalla gestione delle risorse a quella dei rischi ambientali. A fini applicativi risulta particolarmente importante riconoscere le relazioni di scala che legano gli elementi strutturali di rango differente costituenti un sistema; dette relazioni permettono infatti di effettuare previsioni statistiche quantitative sugli oggetti e/o sui processi geologici di interesse.

Nel presente lavoro sono illustrati e discussi i principali risultati ottenuti dall'analisi frattale del sistema di faglie tardo-quadernarie che interessa le zone assiali dell'Appennino centrale.

I dati emersi dall'analisi suggeriscono che:

- il sistema esaminato rappresenta, nell'insieme, una struttura crostale ancora poco evoluta;

- la dimensione frattale di questa struttura di rango superiore (CAFS) è caratterizzata da un valore piuttosto basso di D (se confrontato con altri sistemi di faglie, di rango paragonabile, che interessano contesti geotettonici più maturi);

il CAFS può considerarsi frattale su di uno spettro di scale che comprende poco più di due ordini di grandezza; ciò significa che i caratteri geometrici statistici che caratterizzano la struttura principale sono replicati da quelle parti-componenti del sistema (insiemi di faglie di rango inferiore rispetto al CAFS) aventi dimensioni comprese tra circa un chilometro e qualche decina di chilometri.

BIBLIOGRAFIA

- AYDIN A. & A. NUR (1982) - *Evolution of pull-apart basins and their scale independence*. *Tectonics*, **1**, 91-105.
- BARTON C. C. & LARSEN E. (1985) - *Fractal geometry of two-dimensional fracture networks at Yucca Mountain, Southwest Nevada*. *Proc. Int. Symp. "Fundamentals of Rock Joints"* Bjorkkliden, Sweden, 77-84.
- BARTON C. C. & HSIEH P. A. (1989) - *Physical and Hydrologic-flow Properties of Fractures*. 28th International Geological Congress, Field Trip Guidebook T385, American Geophysical Union, Washington, DC.
- BARTON C. C. & ZOBACK M. D. (1992) - *Self-similar distribution and properties of macroscopic fractures at depth in crystalline rocks in the Cajon Pass scientific drillhole*. *J. Geophys. Res.* **97**, 5181-5200.
- BARTON C.C. AND LA POINTE P. R. (ed.) (1995) - *Fractals in the Earth Sciences*. Plenum Press, New York.
- BROZZETTI F. & G. LAVECCHIA (1994) - *Seismicity and related extensional stress field: the case of the Norcia Seismic Zone (Central Italy)*. *Ann. Tectonicae*, **8**, 36-57.
- CALAMITA F. & A. PIZZI, (1992) - *Tettonica quadernaria nella Dorsale appenninica umbro-marchigiana e bacini intrappenninici*. *Studi Geol. Camerti*, Vol. spec., 17-25.
- CALAMITA F., CELLO G., DEIANA G. & H. RON (1992) - *Evidenze di rotazioni di blocchi nell'area di M.S. Vicino-Cingoli e del M. Vettore (Appennino umbro-marchigiano)*. *Studi Geol. Camerti*, Vol. spec., 73-80.
- CALAMITA F. & DEIANA G. (1996) - *Correlazione tra gli eventi deformativi neogenico-quadernari del settore toscoumbro-marchigiano*. *Studi Geol. Camerti*, Vol. spec., 1995/I, 137-152.
- CELLO G., (1997) - *Fractal analysis of a Quaternary fault array in the Central Apennines*. *J. Struct. Geol.*, **19**, No. 7, 945-953.
- CELLO G., MAZZOLI S., TONDI E. & TURCO E. (1995) - *Tettonica attiva in Appennino centrale ed implicazioni per l'analisi della pericolosità sismica del settore assiale della catena umbro-marchigiana-abruzzese*. *Studi Geol. Camerti*, XIII, 115-138.
- CELLO G., MAZZOLI S., TONDI E. & TURCO E. (1997) - *Active tectonics in the central Apennines and possible implications for seismic hazard analysis in peninsular Italy*. *Tectonophysics*, **272**, 43-68.
- CELLO G., MAZZOLI S. & TONDI E. (1998) - *The crustal fault structure responsible for the 1703 earthquake sequence of central Italy*. *J. Geodynamics*, **26** (2-4), 443-460.
- COWIE P. A. & SCHOLZ C. H. (1992) - *Displacement-length scaling relationships for faults: data, synthesis and discussion*. *J. Struct. Geol.* **14**, 1149-1156.
- COWIE P. A., VANNESTE C. & SORNETTE D. (1993) - *Statistical physics model for the spatiotemporal evolution of faults*. *J. Geophys. Res.* **98**, 21809-21821.
- COWIE P. A., KNIPE R. J. & MAIN I. G. (Ed.) (1996) - *Scaling laws for fault and fracture populations: Analyses and applications*. *J. Struct. Geol.*, Special Issue, **18** (2/3), 135-383.
- FALCONER K. (1990) - *Fractal geometry: Mathematical foundations and applications*. Wiley, Chichester.
- GUTENBERG B. & RICHTER C. F. (1954) - *Seismicity of the Earth and Associated phenomena*. 2th Ed., Princeton University Press, Princeton.
- JURGENS H., PEITGEN H. O. & SAUPE D. (1990) - *Il linguaggio dei frattali*. *Le Scienze* n° 266.
- IAEA SAFETY GUIDE (1991) - *Earthquakes and associated topics in relation to nuclear power plant siting*. Safety Series, 50-SG-S1 (Rev. 1). International Atomic Energy Agency, Vienna.
- LAY T. & WALLACE T. C. (1995) - *Modern Global Seismology*. Academic Press, Inc., 521 pp.
- MAIN I. G. (1995) - *Seismogenesis and seismic hazard*. *Proc. VIII Summer School Earth and Planetary Sciences on "Plate Tectonics: The First Twenty-Five Years"* Siena, Italy, 395-419.
- MANDELBROT B. B. (1967) - *How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension*. *Science* **156**, 636-638.
- MANDELBROT B. B. (1983) - *The fractal geometry of Nature*. W. H. Freeman, New York.
- MELETTI C., PATACCA E. & SCANDONE P. (1995) - *Il sistema compressione distensione in Appennino*. In: "Cinquanta anni di attività didattica e scientifica del prof. Felice Ippolito" Liguori Editore, Napoli, 361-370.
- POWER W. L. & TULLIS T. E. (1991) - *Euclidean and fractal models for the description of rock surface roughness*. *J. Geophys. Res.* **95**, 415-424.

- SCHOLZ C. H. & COWIE P. (1990) - *Determination of total strain from faulting*. Nature **346**, 837-839.
- SAMMIS C., KING G. & BIEGEL R. (1987) - The kinematics of gouge deformation. Pure and Appl. Geophys. **125**, 777-812.
- TONDI E. (1997) - *Analisi di alcuni segmenti di faglie attive in Appennino centrale*. Tesi di Dottorato, pp. 199.
- TONDI E., CELLO G. & MAZZOLI S. (1997) - *Strutture sismogenetiche in Appennino Centrale: potenziale sismogenetico, analisi frattale e processi di crescita*. Il Quaternario, **10**(2), 411-416.
- TURCOTTE D. L. (1992) - *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- UTSU T. & SEKI A. (1954) - *A relation between the area of after-shock region and the energy of main shock*. J. Seismol. Soc. Jpn., **7**, 233-240.
- WALSH J. J. & WATTERSON J. (1993) - *Fractal analysis of fracture patterns using the standard box-counting technique: valid and invalid methodologies*. J. Struct. Geol. **15**, 1509-1512.

