



TOWARDS A MULTI-HAZARD ASSESSMENT AT MT. ETNA VOLCANO (ITALY): INVESTIGATING THE STATISTICAL RELATIONSHIP BETWEEN FLANK ERUPTIONS AND MAJOR EARTHQUAKES IN THE HISTORICAL CATALOGS

**Andrea Bevilacqua⁽¹⁾, Raffaele Azzaro⁽²⁾, Stefano Branca⁽²⁾,
Salvatore D'Amico⁽²⁾, Franco Flandoli⁽³⁾, Augusto Neri⁽¹⁾**

(1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Pisa, Pisa, Italia

(2) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania - Osservatorio Etneo, Catania, Italia

(3) Scuola Normale Superiore di Pisa, Pisa, Italia.

Questo studio è stato in parte finanziato dal
Dipartimento della Protezione Civile, Presidenza del Consiglio dei Ministri,
nell'ambito della Convenzione INGV-DPC 2019-2021.



SCUOLA
NORMALE
SUPERIORE

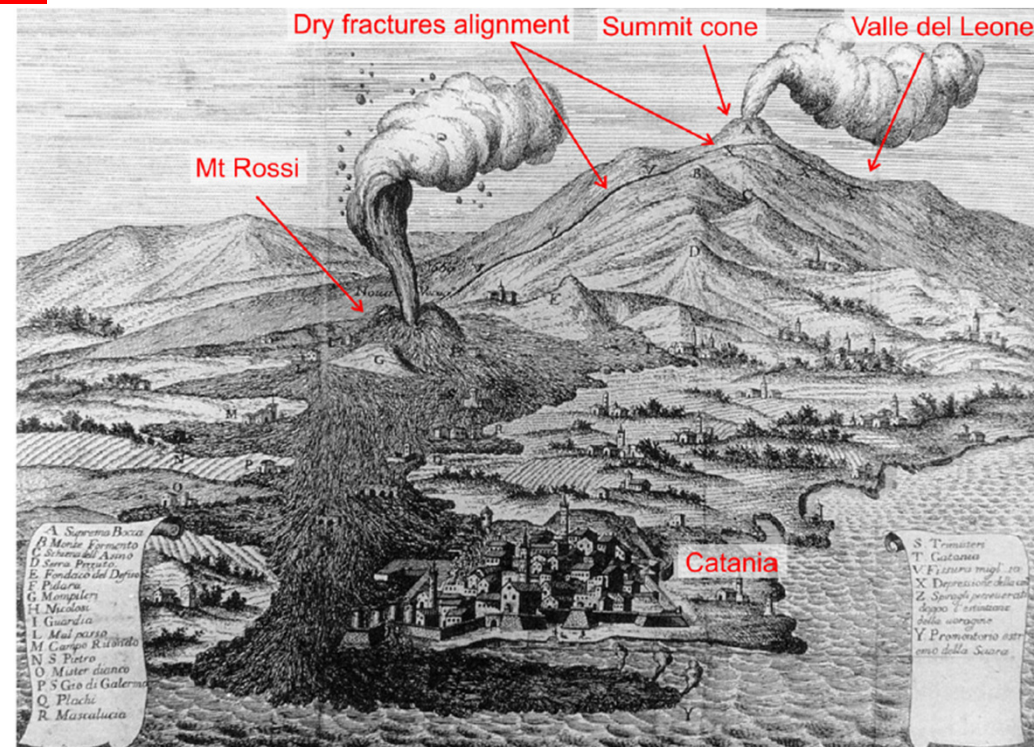




L'Etna negli ultimi 2500 anni è stato caratterizzato da un'attività quasi continua ai suoi crateri sommitali e da **frequenti eruzioni da fessure sui suoi versanti**, dette "eruzioni laterali".

Storicamente, le eruzioni laterali sono state spesso accompagnate da **terremoti distruttivi**, sebbene essi siano avvenuti anche in periodi di quiescenza.

L'impatto di entrambi i fenomeni sul territorio è così caratterizzato da **alternanza e possibile collegamento**.



Grande eruzione laterale del 1669, incisione d'epoca. (Branca e Abate, 2019)

Rotture cosismiche del terremoto del 26 Dicembre 2018 (Gruppo EMERGEO2018, blog INGVvulcani)





Il nostro obiettivo è la quantificazione della dipendenza statistica di **terremoti maggiori** ed **eruzioni laterali** basandoci sullo studio dei loro tempi di ricorrenza.

Nell'ipotesi che le serie storiche degli ultimi due secoli sono rappresentative dell'attività futura, abbiamo stimato:

- **quanto è l'incremento** del tasso di probabilità dei terremoti maggiori nelle settimane e nei mesi dopo l'inizio o la fine di una eruzione laterale,
- **per quanto tempo dura** l'incremento prima che i tassi di probabilità tornino nella media,
- **in che modo i gruppi spaziali** delle fessure eruttive e delle faglie sismogeniche **influenzano** tale dipendenza statistica.



Abbiamo considerato due cataloghi storici:

- il **catalogo macrosismico dei terremoti etnei** (CMTE) – dal 1800 al 2018,
- il **catalogo delle eruzioni laterali dell'Etna** – dal 1600 al 2018.

Abbiamo considerato **due classi di terremoti maggiori**, i.e. che producono danni alle strutture:
 $I_x \geq V-VI$ EMS (danni lievi) e $I_x \geq VII-VIII$ EMS (danni gravi).

EMS=European Macroseismic Scale
(Grunthal, 1998)

In particolare, abbiamo:

- descritto i **tassi temporali** dei terremoti maggiori e quelli delle eruzioni laterali
- analizzato i **tempi di inter-evento** fra i terremoti maggiori e le eruzioni laterali
- calcolato i **tassi condizionali** dei terremoti maggiori nelle settimane e nei mesi precedenti e successivi alle eruzioni laterali

Abbiamo dettagliato le analisi all'interno di **gruppi spaziali** delle fessure eruttive e dei **sistemi di faglie** sismogeniche.



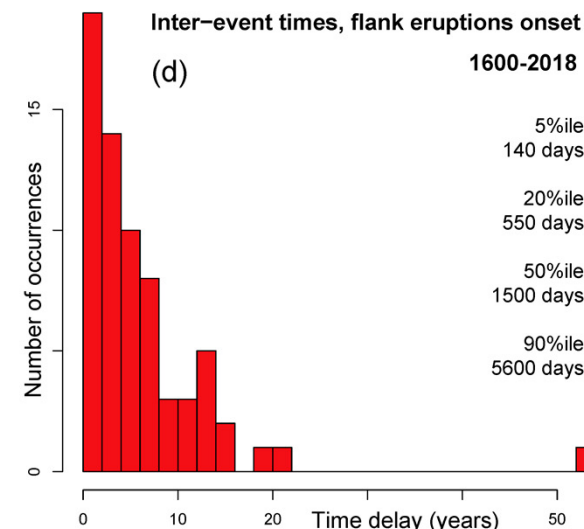
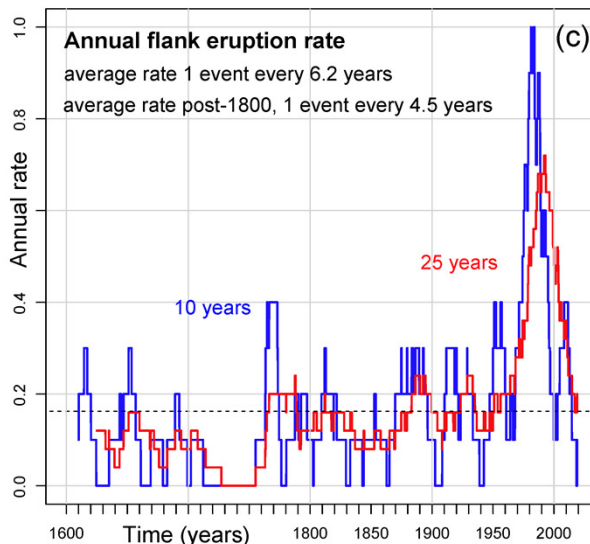
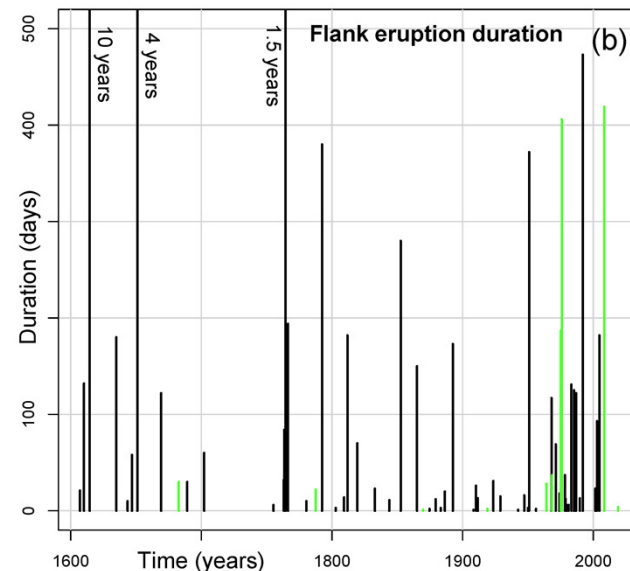
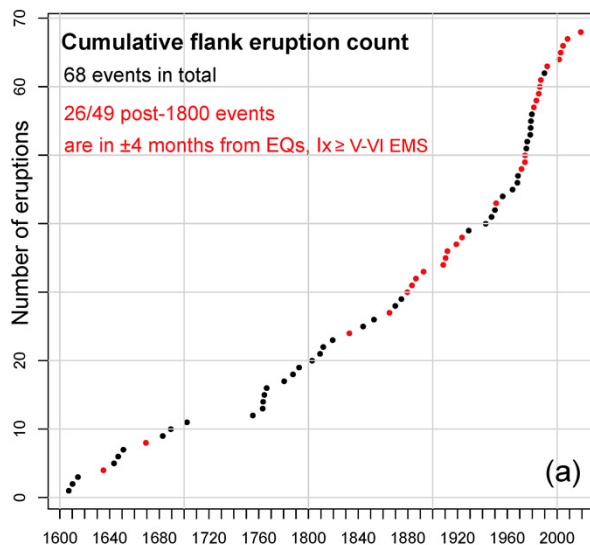
Serie storica delle eruzioni laterali dell'Etna

Dal 1600 al 2018 ci sono 68 eruzioni laterali, una ogni 6.2 anni. Dal 1800 al 2018 sono 49, una ogni 4.5 anni.

Dal 1800 al 2018, 26 eruzioni laterali sono entro ± 4 mesi da un terremoto maggiore, il 53%; rosso in (a).

Dal 1700 la durata varia fra 1 giorno e 1.5 anni. Circa 15% degli eventi sono possibili "eruzioni subterminali" (> 2850 m s.l.m.); verde in (b).

Nei tassi temporali c'è un gap nella prima metà del 1700, e un picco dopo il 1971 fino a 1 evento/anno, concluso dopo il 1990. Vedi (c,d).





Serie storica dei terremoti maggiori dell'Etna

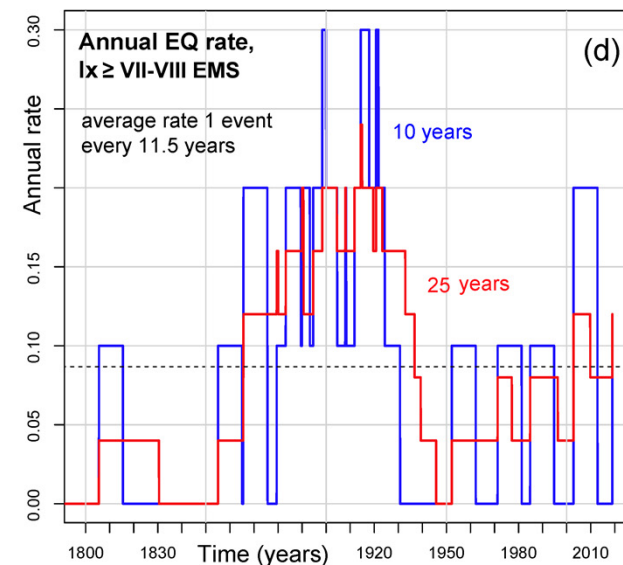
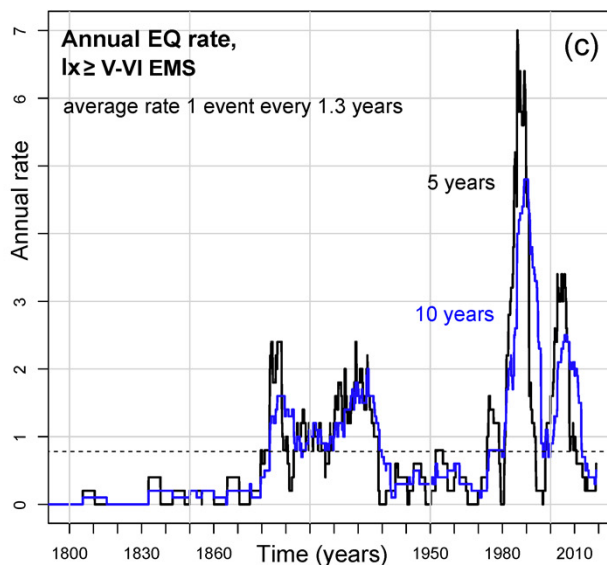
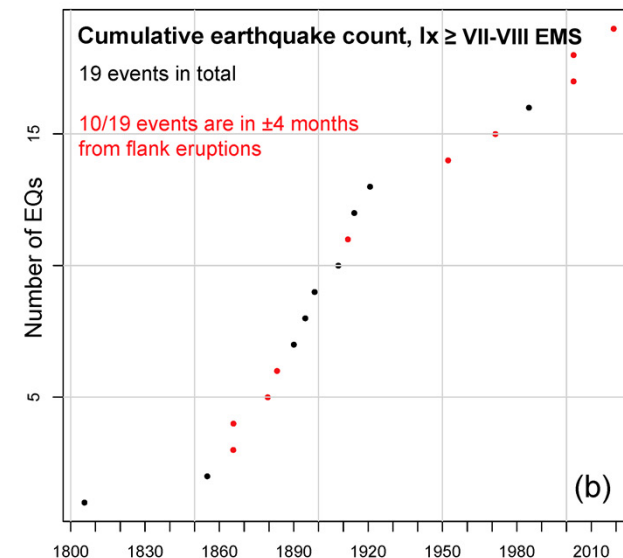
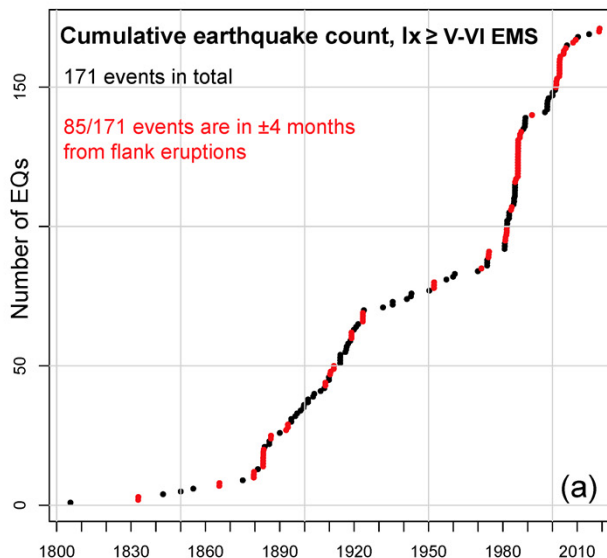
Dal 1800 al 2018 ci sono 171 eventi con $I_x \geq V-VI$ EMS, uno ogni 1.3 anni.

Dal 1800 al 2018 ci sono 19 eventi con $I_x \geq VII-VIII$ EMS, uno ogni 11.5 anni.

50% dei terremoti maggiori sono entro ± 4 mesi da una eruzione laterale; rosso in (a,b).

Ci sono due periodi di tassi incrementati in 1880-1920 e 1970-2010, con tassi massimi a inizio e fine; vedi (c,d).

Tassi massimi fino a:
7 eventi/anno con $I_x \geq V-VI$ EMS,
0.3 eventi/anno con $I_x \geq VII-VIII$ EMS.





Poissonianità di eruzioni laterali e mainshocks

Il Test di Cox, (1955) confronta il conteggio cumulativo dei **tempi di inter-evento** osservati con la statistica di un **Processo di Poisson**, i.e. con tempi di inter-evento esponenziali indipendenti e di media costante.

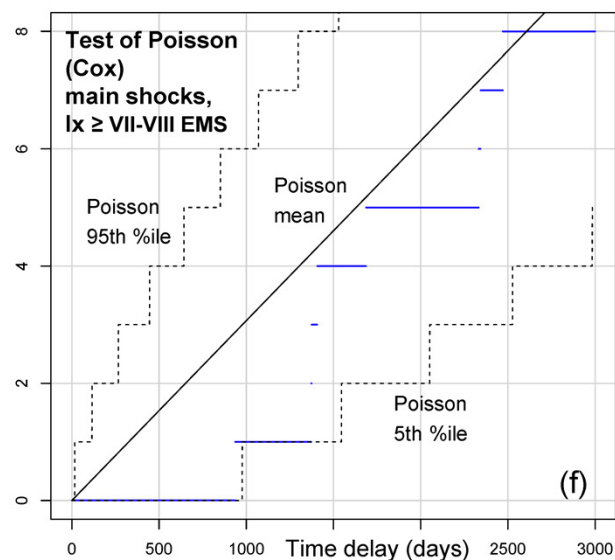
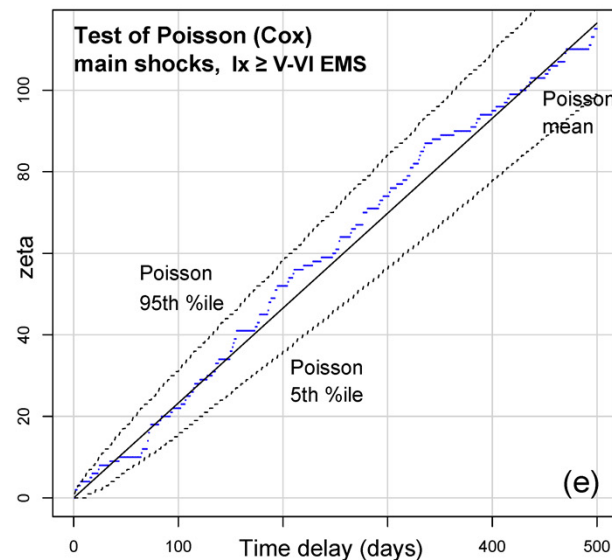
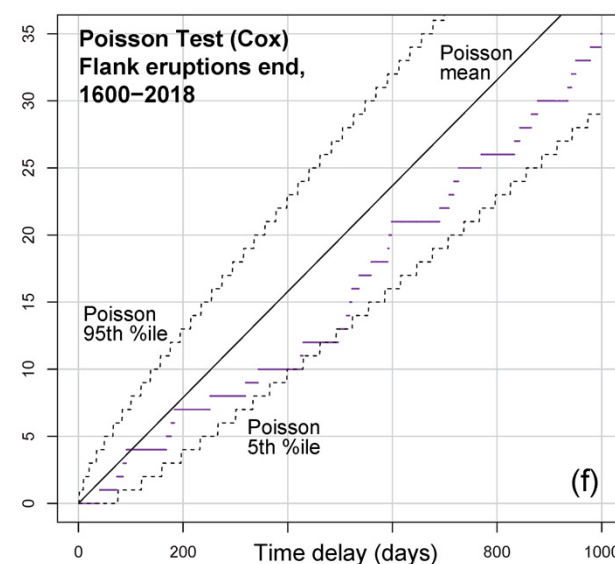
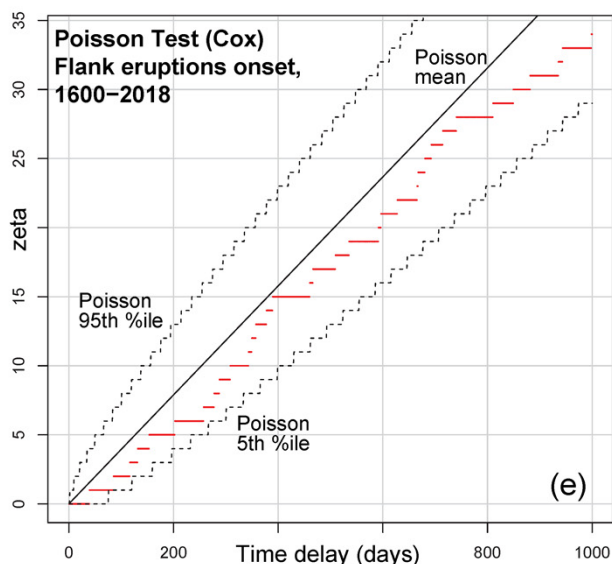
Le sequenze dei tempi di inizio e di fine delle eruzioni laterali sono compatibili con Processi di Poisson a tasso **“lentamente variabile”**, i.e. uguale alla media su 25 anni; vedi (a,b).

Empiricamente si identificano:

106 mainshocks $I_x \geq V-VI$, uno ogni 2.1 anni;

17 mainshocks $I_x \geq VII-VIII$, uno ogni 13 anni.

Anche i mainshocks sono compatibili con Processi di Poisson a tasso lentamente variabile; vedi (c,d).



Conteggio cumulativo dei tempi di inter-evento

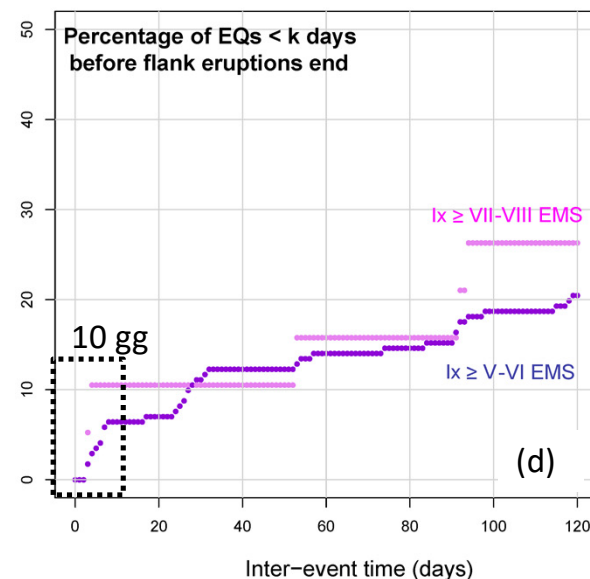
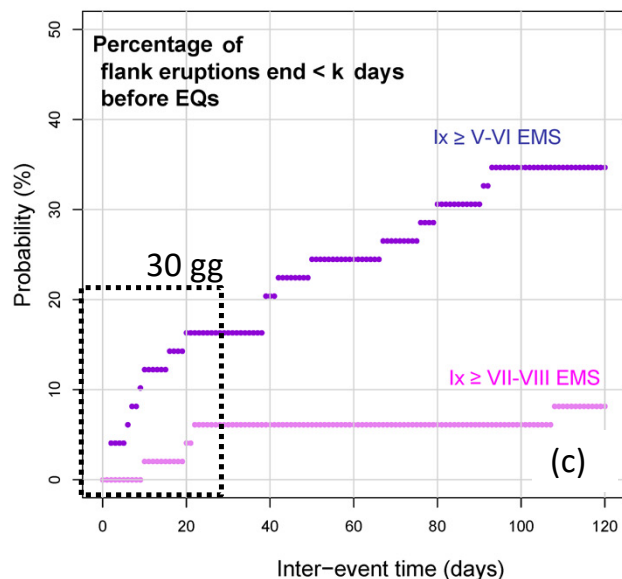
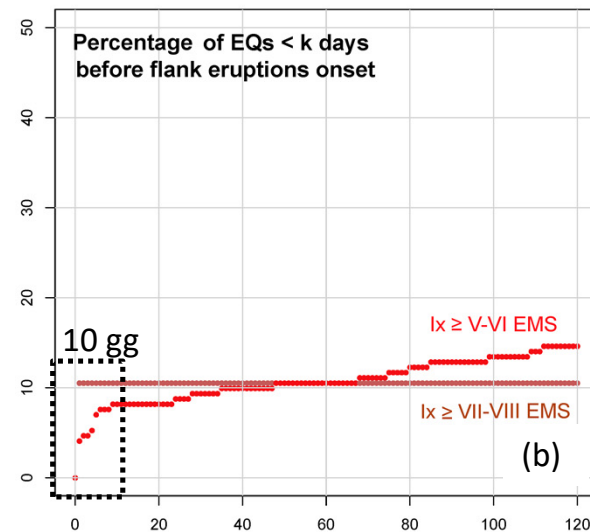
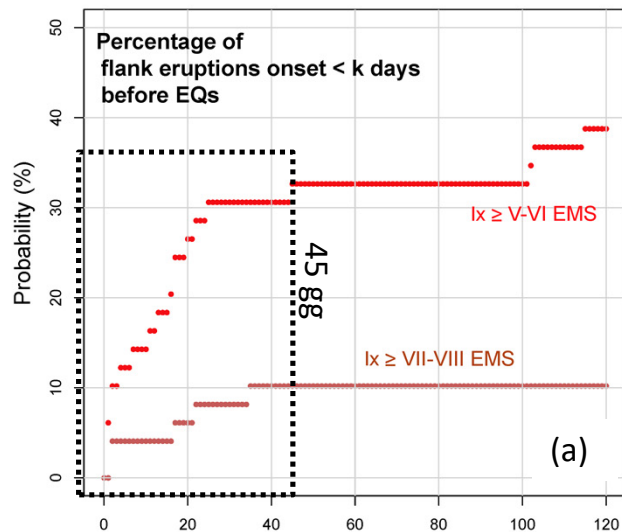
Il Test di Cox, (1955) applicato al conteggio cumulativo dei **tempi di inter-evento** fra eruzioni laterali e terremoti maggiori fornisce anche evidenze **contro l'indipendenza** delle due serie (Sharp et al., 1981; Nercessian et al., 1991).

In particolare, si osserva:

- un eccesso di eruzioni laterali nei **30-45 giorni** che precedono un terremoto maggiore (vedi a,c),
- un eccesso di terremoti maggiori nei **1-10 giorni** che precedono una eruzione laterale (vedi b,d).

Questo è più evidente rispetto al tempo di inizio che al tempo di fine dell'eruzione.

Maggiori dettagli nelle slides successive.





Tempi di inter-evento

Considerando i tempi di inter-evento entro ± 4 mesi:

67% dei terremoti $I_x \geq V-VI$ EMS segue l'inizio dell'eruzione
10% lo precede a meno di 3 giorni (vedi a)

71% dei terremoti $I_x \geq VII-VIII$ EMS segue l'inizio dell'eruzione;
29% lo precede a meno di 3 giorni (vedi b)

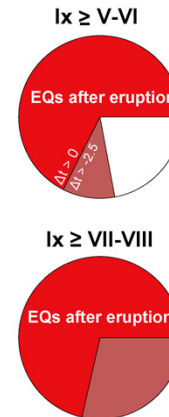
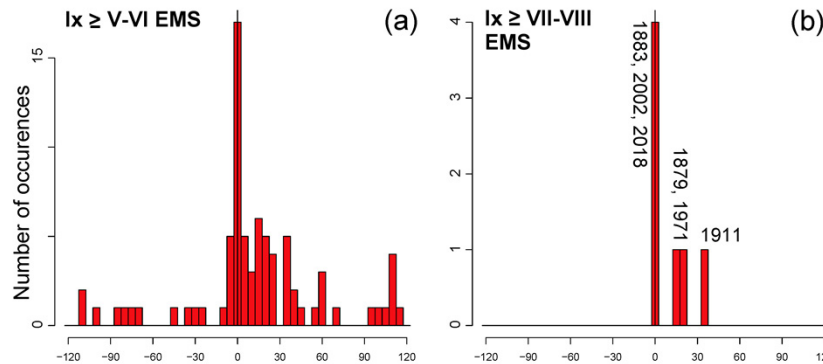
54% dei terremoti $I_x \geq V-VI$ EMS segue la fine dell'eruzione
1.3% la precede a meno di 3 giorni (vedi c)

50% dei terremoti $I_x \geq VII-VIII$ EMS segue l'inizio dell'eruzione
10% la precede a meno di 3 giorni (vedi d)

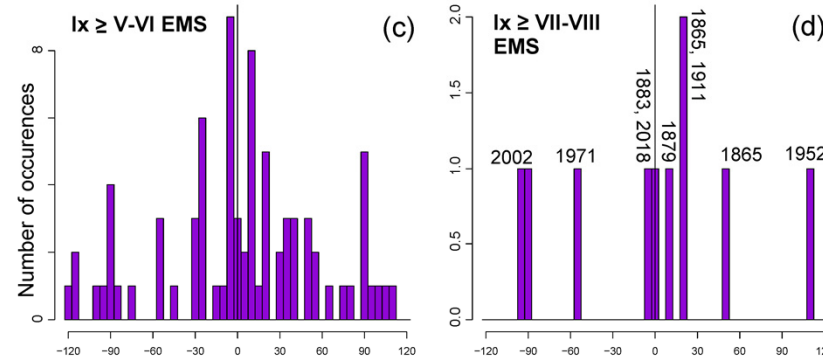
Ma se si escludono i terremoti entro ± 3 giorni da inizio eruzione:
66% dei terremoti $I_x \geq V-VI$ EMS segue la fine dell'eruzione
(vedi e)

83% dei terremoti $I_x \geq VII-VIII$ EMS segue la fine dell'eruzione
(vedi f).

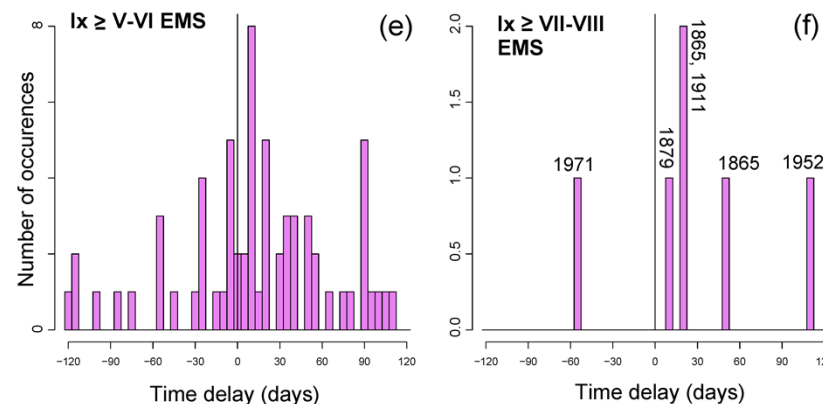
Inter-event times of EQs from flank eruptions onset



Inter-event times of EQs from flank eruptions end



Inter-event times of EQs from flank eruptions end, excluding ± 3 days from onset





Tassi condizionali dei terremoti maggiori

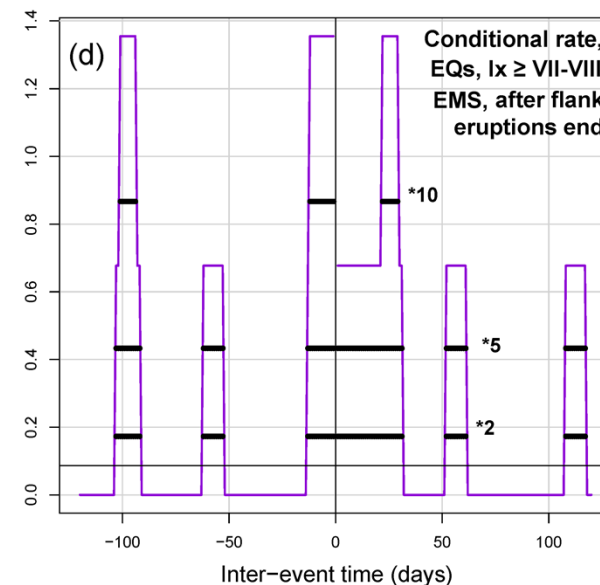
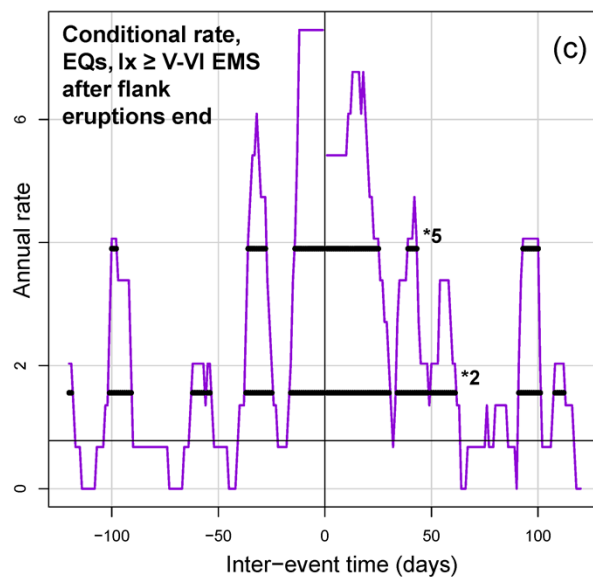
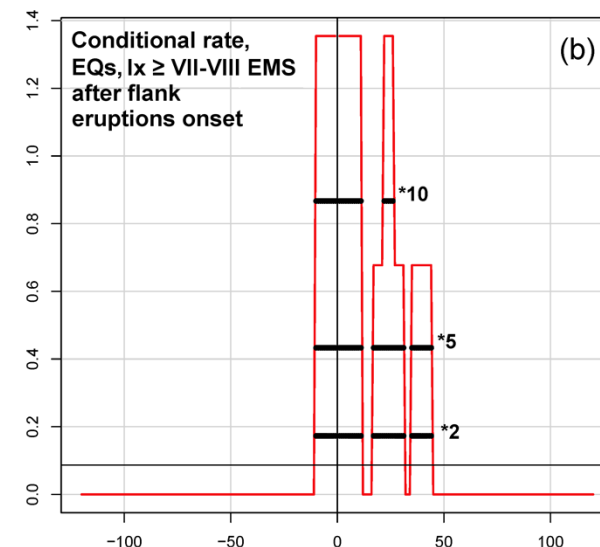
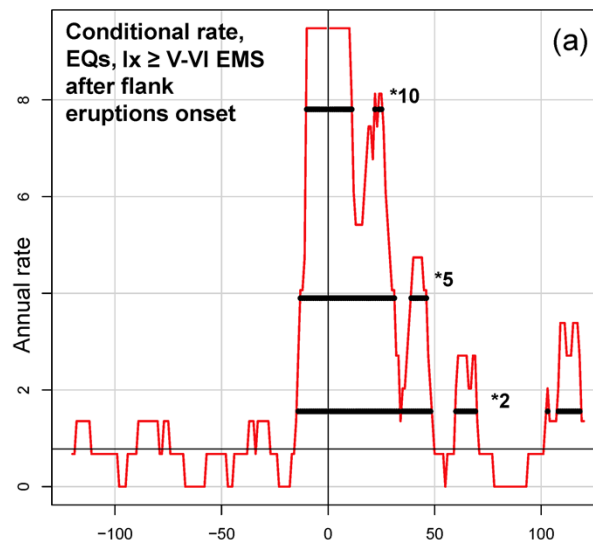
I tassi condizionali dei terremoti $I_x \geq V-VI$ EMS sono:

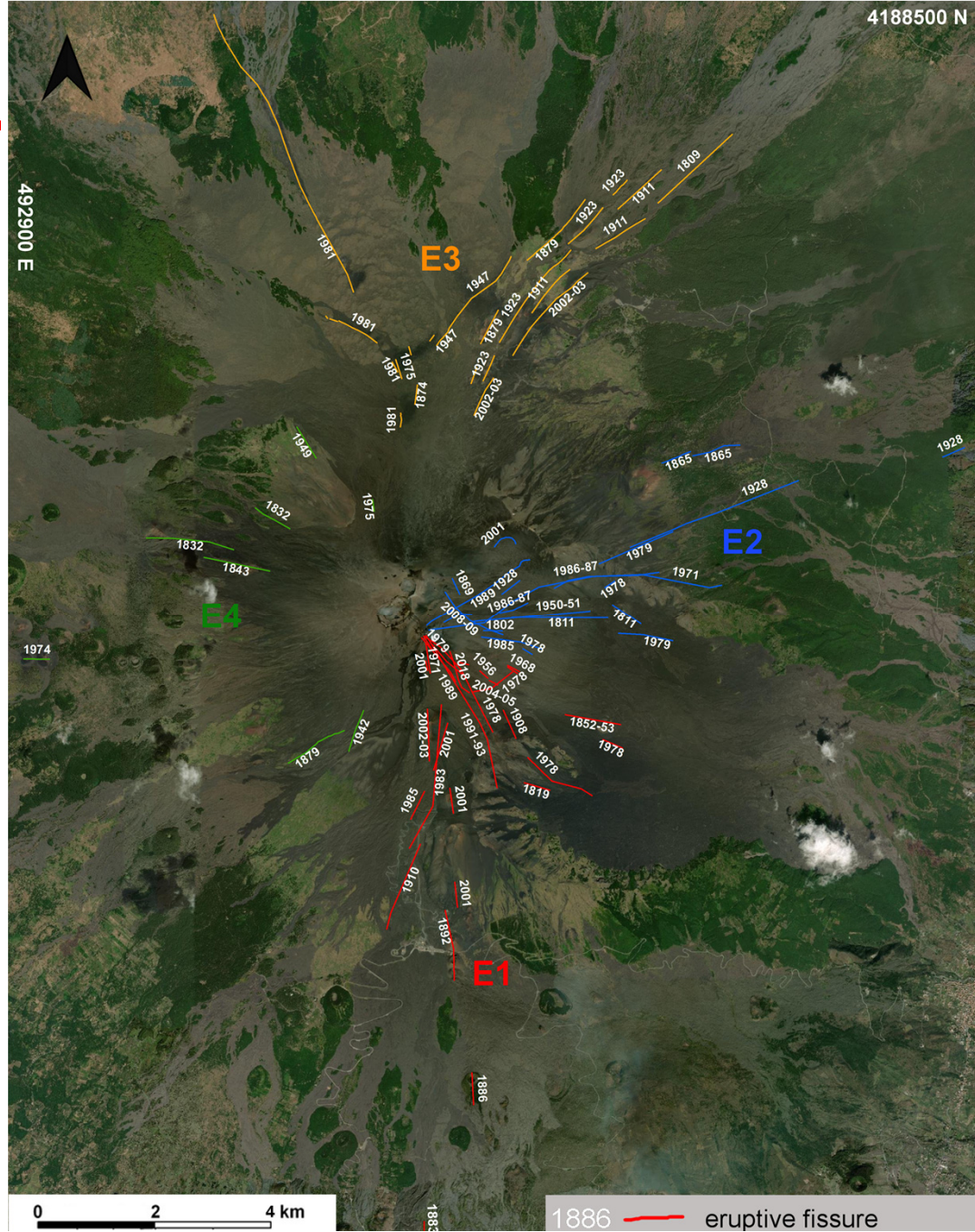
- 10 volte maggiori della media, 0.77 eventi/anno, per 15 giorni ed a 25 giorni dall'inizio di una eruzione laterale;
- 5 volte maggiori per ca. 45 giorni (vedi a).
- 5 volte maggiori della media per 25 giorni ed a 40 giorni dalla fine di una eruzione laterale (vedi c).

I tassi condizionali di $I_x \geq VII-VIII$ EMS sono:

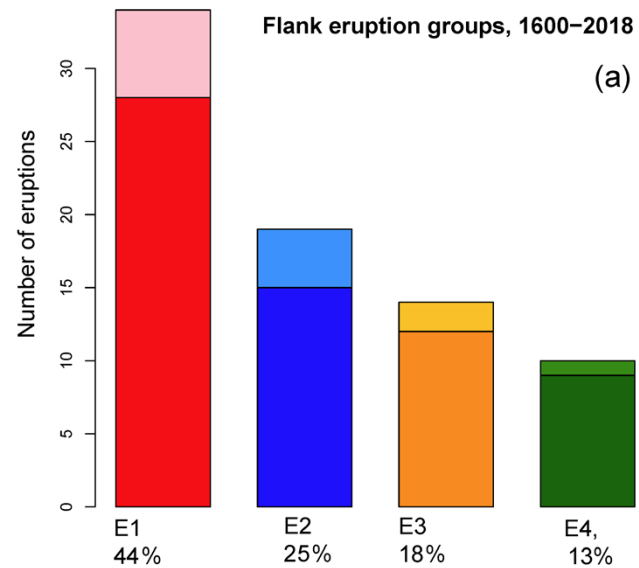
- 10 volte maggiori della media, 0.087 eventi/anno, per 30 giorni dall'inizio di una eruzione laterale;
- 5 volte maggiori per 45 giorni (vedi b).
- 5 volte maggiori della media per 30 giorni dalla fine di una eruzione laterale (vedi d);
- un breve picco 10 volte a ca. 20-30 giorni.

In tutti i casi i tassi sono ca. 10 volte sopra la media anche nei 10 giorni prima di inizio e fine eruzione.



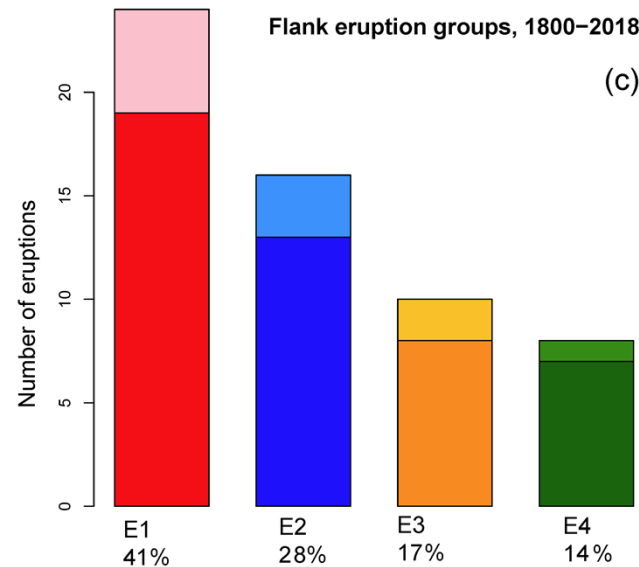


Gruppi di fessure eruttive



Le proporzioni dei quattro gruppi di fessure eruttive sono **consistenti nel tempo** in 1600-2018 e 1800-2018.

Dopo il 1971, nei settori E1 e E2 c'è stato il 76% degli eventi, consistentemente con il passato, i.e. 70%.



Le **eruzioni "subterminali"** sono equamente distribuite nei gruppi, ca. 20% delle fessure (vedi colori chiari nel grafico).

Queste **non danno** un contributo significativo rispetto ai tempi di inter-evento coi terremoti maggiori.



Tassi condizionali

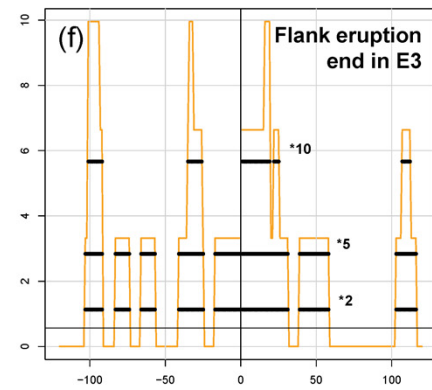
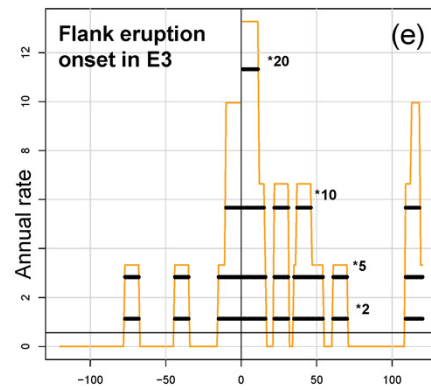
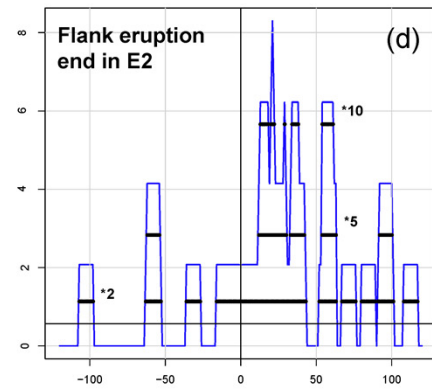
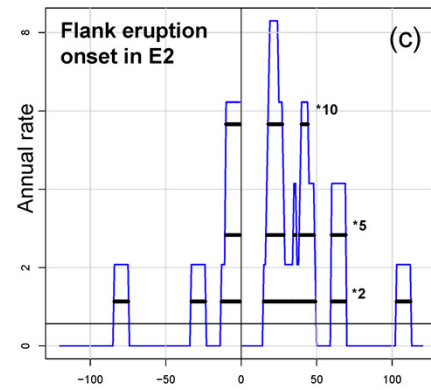
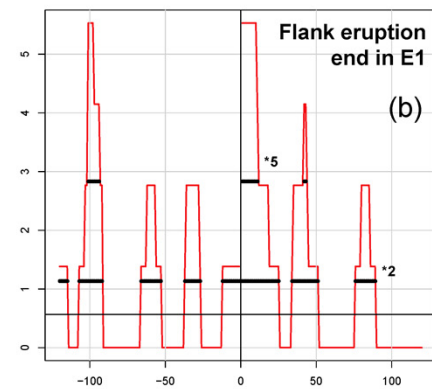
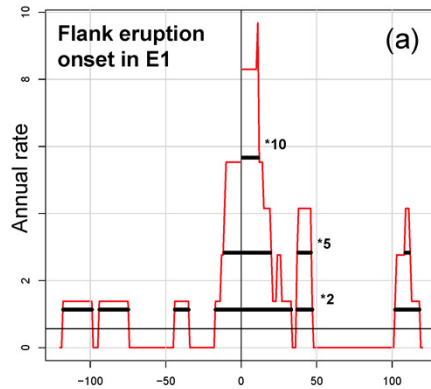
I tassi dei terremoti maggiori dopo inizio eruzione in E1 sono simili a quelli globali (vedi a).

I tassi dopo inizio eruzione in E2 sono ritardati di ca. 15 giorni. Questo ritardo si osserva anche dopo fine eruzione (vedi c,d).

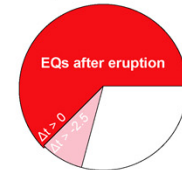
I tassi dopo inizio eruzione in E3 hanno un picco molto intenso e di durata più lunga che nel caso globale (vedi e).

Se si escludono i terremoti entro ± 3 giorni da inizio eruzione, i tassi condizionali (b,d,f) diventano più simili ad (a,c,e).

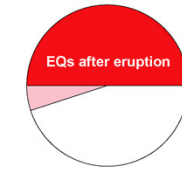
Inter-event times of EQs, $l_x \geq V-VI$ EMS from flank eruptions in spatial groups



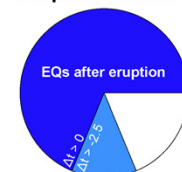
erupt. onset in E1



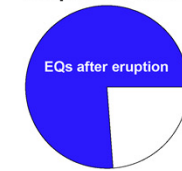
erupt. end in E1



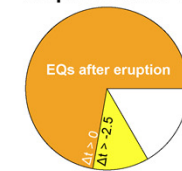
erupt. onset in E2



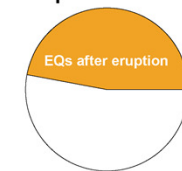
erupt. end in E2



erupt. onset in E3

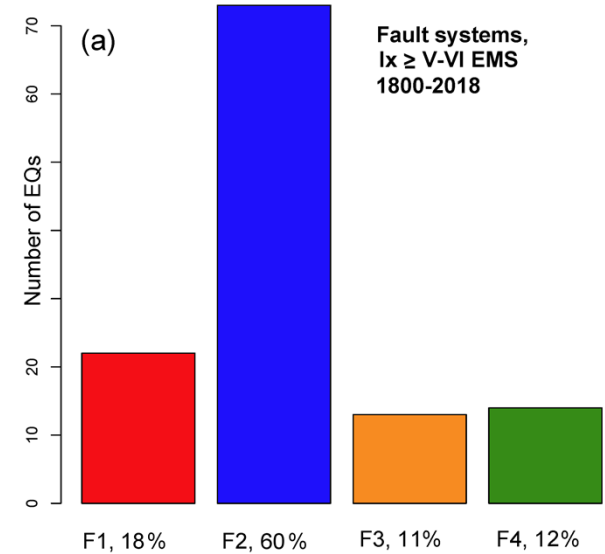
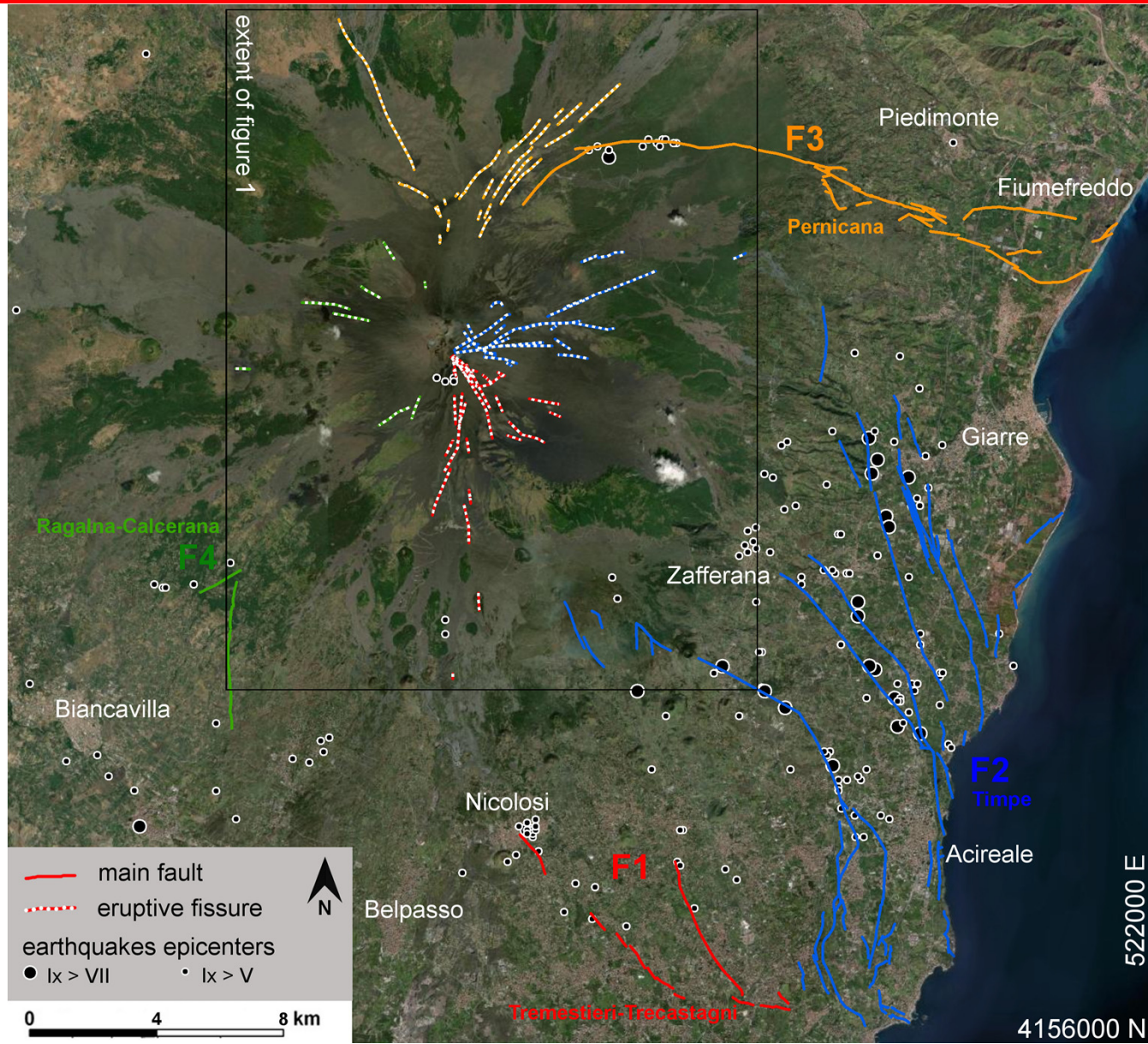


erupt. end in E3

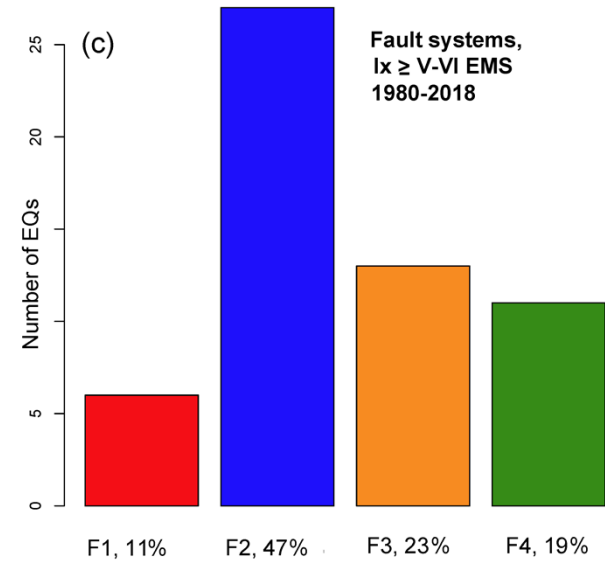




Sistemi di faglie sismogeniche



Le proporzioni dei terremoti di $I_x \geq V-VI$ EMS dei quattro sistemi di faglie.



L'aumento dei terremoti in grado di provocare danni in F3 e F4 dipende dalla recente urbanizzazione di quelle aree.

88% dei terremoti di $I_x \geq VII-VIII$ EMS sono in F2.



Tassi condizionali

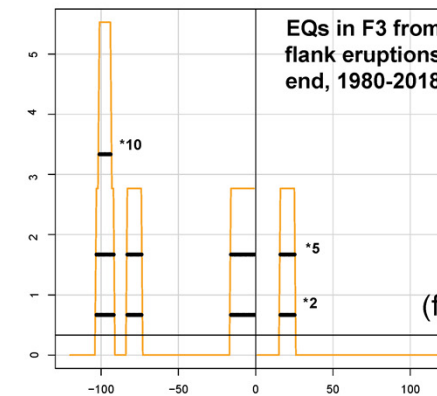
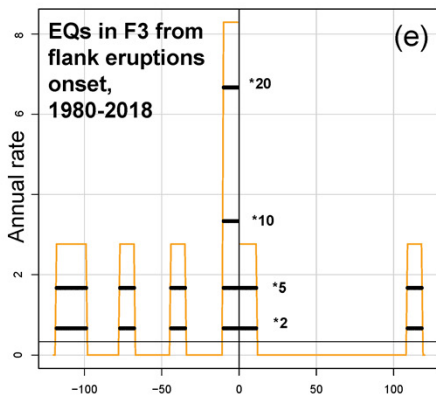
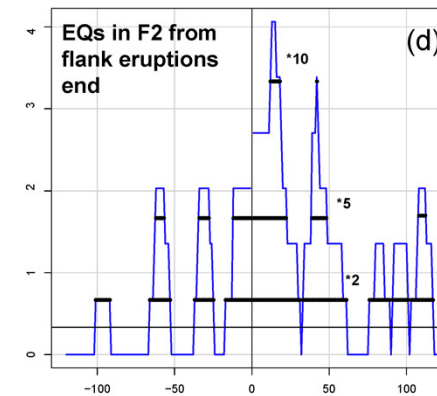
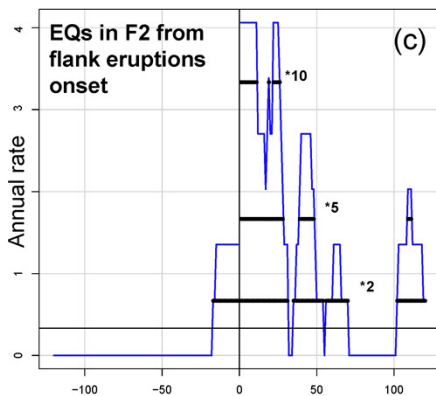
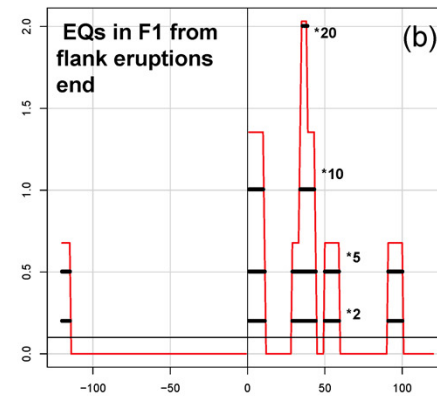
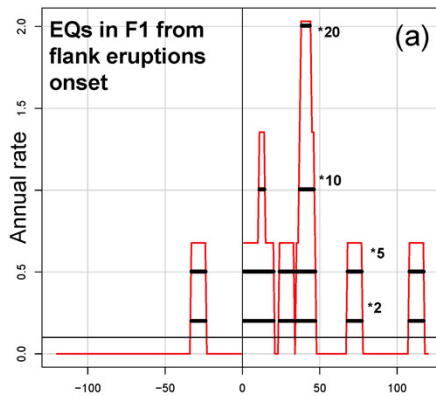
Il tasso dei terremoti maggiori in F1 dopo inizio eruzione ha un ritardo di circa 30-40 giorni rispetto al caso globale (vedi a).

Il tasso in F2 dopo inizio eruzione è simile al caso globale (vedi c).

Il tasso in F3 ha proprietà opposte agli altri sistemi ed il picco nei tassi precede l'inizio dell'eruzione (vedi e).

Se si escludono i terremoti entro ± 3 giorni da inizio eruzione, i tassi condizionali (b,d,f) diventano simili ad (a,c,e).

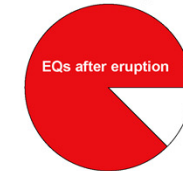
Inter-event times of EQs in fault systems, $I_x \geq V$ -VI EMS from flank eruptions



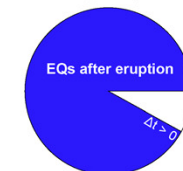
EQs in F1, erupt. onset



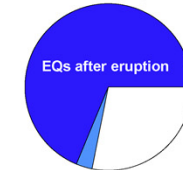
EQs in F1, erupt. end



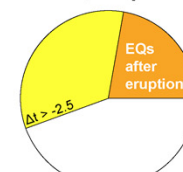
EQs in F2, erupt. onset



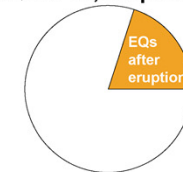
EQs in F2, erupt. end



EQs in F3, erupt. onset



EQs in F3, erupt. end





Tutti i 37 terremoti catalogati in F3 sono avvenuti dopo il 1980.

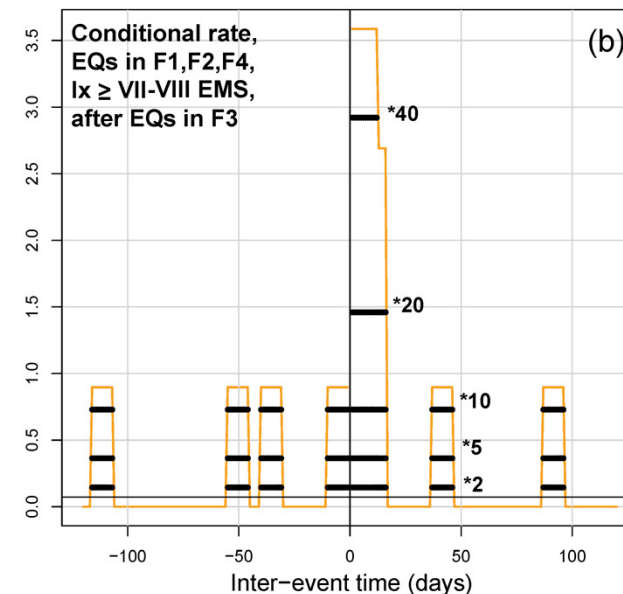
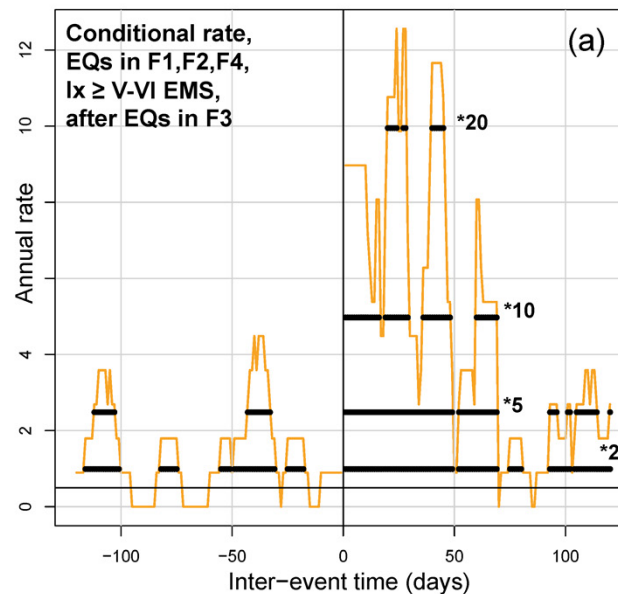
I **tassi condizionali** dei terremoti maggiori negli altri sistemi di faglie dopo un evento sismico in F3:

$I_x \geq V-VI$ EMS
hanno picchi oltre 20 volte sopra la media a 20-30 giorni e 40-45 giorni.

I tassi restano 5 volte sopra la media fino a ca. 70 giorni dal terremoto in F3.

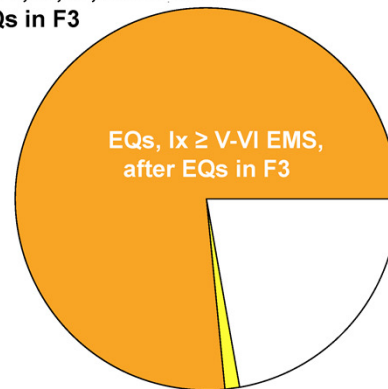
$I_x \geq VII-VIII$ EMS
sono ca. 40 volte sopra la media nei primi 15 giorni dopo un evento in F3.

Inter-event times of EQs in fault systems, $I_x \geq V-VI$ EMS, from EQs in F3



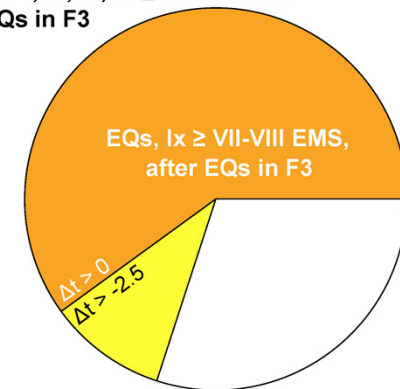
EQs in F1,F2,F4, $I_x \geq V-VI$ EMS after EQs in F3

(c)



EQs in F1,F2,F4, $I_x \geq VII-VIII$ EMS after EQs in F3

(d)





- i. le sequenze dei tempi di inizio e di fine delle eruzioni laterali post 1600 e quella dei mainshock post 1800 sono statisticamente compatibili con **Processi di Poisson a tasso “lentamente variabile”**, i.e. uguale alla media su 25 anni. Su brevi periodi i tempi di inter-evento sono esponenziali indipendenti e di media costante.
- ii. c'è una chiara evidenza statistica che i terremoti maggiori all'Etna **non sono indipendenti** dai tempi di inizio e di fine delle eruzioni laterali;
- iii. la probabilità di terremoti maggiori **incrementa di 5-10 volte** dopo l'inizio ed anche dopo la fine di una eruzione laterale, e questo effetto dura **per 30-45 giorni**;
- iv. le **eruzioni sul versante Est** statisticamente mostrano un **ritardo di due settimane nei terremoti maggiori dopo il loro inizio**, e inoltre producono un più alto **incremento di terremoti maggiori dopo la loro fine** rispetto a quelle sugli altri versanti;
- v. i **terremoti della Pernicana** sono seguiti da un **incremento nella probabilità di ca. 20 volte di eruzioni laterali ed anche di terremoti maggiori** negli altri sistemi di faglie, e questo effetto dura **per 45-70 giorni**.