

Stima della probabilità di eruzioni

Jacopo Selva, Laura Sandri, Warner Marzocchi, Paolo Papale

La complessità e l'inaccessibilità dei sistemi vulcanici rende praticamente impossibile la previsione deterministica delle eruzioni. Si fa perciò ricorso a modelli che studino la probabilità di occorrenza delle eruzioni. Il modello BET_EF è stato applicato ai Campi Flegrei e nessun parametro indicativo di "unrest magmatico" è risultato anomalo. Per questa ragione le probabilità di unrest magmatico ed eruzione non hanno mai raggiunto i valori del 1982-84.

Introduzione

La complessità e l'inaccessibilità dei sistemi vulcanici rende praticamente impossibile la previsione deterministica delle eruzioni (Sparks, 2003). In tempi recenti sono stati sviluppati diversi modelli per studiare la probabilità di accadimento delle eruzioni vulcaniche, delle loro caratteristiche e dei conseguenti fenomeni pericolosi (Marzocchi et al., 2004; Neri et al., 2008; Marti et al., 2006). Questi modelli di "previsione probabilistica" (Probabilistic Volcanic Hazard Assessment, PVHA) stimano la probabilità delle fenomenologie su varie scale temporali (da pochi giorni, a decine di anni), tenendo conto della storia e/o dello stato del vulcano. Negli ultimi anni è stato presentato il modello BET_EF che si basa sul concetto di "albero degli eventi" e utilizza una formulazione Bayesiana (Marzocchi et al., 2008). Questa formulazione permette, da un lato, di effettuare stime della probabilità di eruzione integrando virtualmente tutte le fonti di informazione disponibili, e dall'altro di stimare le incertezze epistemiche, cioè quelle incertezze legate alla effettiva "mancanza di conoscenza" sui fenomeni studiati. Le possibili fonti di informazione sono modelli concettuali, opinione degli esperti, dati geologici, dati relativi alla storia del vulcano e misurazioni di parametri di monitoraggio. La stima probabilistica

è espressa come una distribuzione di probabilità, dove il valore centrale rappresenta la stima migliore della probabilità, mentre la dispersione della distribuzione intorno al valore centrale rappresenta una sorta di misura della precisione della stima prodotta.

Nel corso di diversi progetti finanziati dal Dipartimento della Protezione Civile, il modello BET_EF è stato applicato ai Campi Flegrei. Le informazioni utilizzate per questa applicazione includono la storia eruttiva della caldera, la dinamica delle crisi recenti (dal 1980), i risultati di studi e modelli geostrutturali, l'analisi del comportamento di altre caldere considerate "analoghe", fino a modelli interpretativi delle anomalie registrate dal sistema di monitoraggio. La soggettività delle scelte è stata gestita attraverso un esperimento di elicitazione degli esperti, nel quale è stata raccolta l'opinione di più di 30 ricercatori esperti della storia, della dinamica e del monitoraggio dei Campi Flegrei. Il modello così prodotto (BETEF_CF), recentemente pubblicato in Selva et al. (2012a), è in grado di analizzare in tempo reale i risultati delle misure del sistema di monitoraggio, e di fornire automaticamente stime di lungo termine (basate su modelli e dati relativi alla storia del vulcano) e stime di breve termine (basate sull'interpretazione delle misure di monitoraggio).

In questo articolo, viene presentato il modello BETEF_CF nei suoi principali aspetti. A scopo illustrativo, viene ripor-

tata una sua applicazione durante il periodo di crisi 1982-1985. Infine, vengono proposte alcune considerazioni relative allo stato attuale della caldera.

Modello BET_EF

BET_EF (Bayesian Event Tree for Eruption Forecasting, Marzocchi et al. 2008) è un modello Bayesiano che, come già accennato, stima le probabilità degli eventi vulcanici e le relative incertezze epistemiche. Il modello è basato sul concetto di “albero degli eventi” (Event Tree, ET). Un ET è un grafico ramificato che da un evento generale esplora tutte le possibili evoluzioni del sistema con un livello di dettaglio via via crescente. La ramificazione ad ogni livello (o nodo) rappresenta tutte le possibili conseguenze (fisiche o logiche) di un evento più generale, riportato al livello precedente. L’ET utilizzato dal modello BET_EF è rappresentato in Figura 1. In particolare:

- Al *nodo 1*, l’evento considerato è l’accadimento di un “unrest”, cioè di uno stato di anomalia del vulcano. Questo stato di anomalia viene riferito al livello di base, definito quantitativamente in maniera tale da includere

tutti quegli eventi che possono essere considerati “normali” per il vulcano. Questa definizione, necessariamente soggettiva come ogni definizione di livello di base, si fonda su considerazioni pragmatiche legate alla scala temporale scelta per la previsione probabilistica.

- Al *nodo 2*, si considera la possibilità che un evento di unrest possa essere “magmatico”. Nei sistemi vulcanici attivi, la presenza di magma è scontata. Per questo motivo, a questo nodo ci si riferisce pragmaticamente alla possibilità che corpi magmatici si “attivino”, cioè si muovano, all’interno del sistema.
- Al *nodo 3*, si considera l’evento eruzione, assumendo che ci siano corpi magmatici in movimento (“unrest magmatico”). In altre parole, si analizza l’eventualità che questi corpi magmatici possano raggiungere la superficie, determinando una eruzione.
- Al *nodo 4*, si studiano le possibili posizioni delle bocche eruttive, assumendo che avvenga una eruzione. In un vulcano centrale, come il Vesuvio, la posizione largamente più probabile è il cratere sommitale. Nelle caldere, come i Campi Flegrei, la va-



Figura 1. Generico albero degli eventi (ET) del modello BET_EF (da Marzocchi et al., 2008).

riabilità spaziale è molto più ampia e rappresenta una delle maggiori fonti di incertezza.

- Al *nodo 5*, infine, si considera la taglia (o magnitudo) dell'eruzione. La variabilità delle taglie eruttive è in realtà un continuo, ma si punta a definire pragmaticamente gruppi di eruzioni che possano, nel loro insieme, caratterizzare l'intero arco di taglie eruttive possibili. La metrica per definire la taglia dipende dal tipo di applicazione prevista, ma può generalmente essere riferita al VEI (indice di esplosività vulcanica, equivalente vulcanico della magnitudo sismica).

In pratica, ad ogni nodo, si considerano le possibilità di sviluppo dell'evento definito al nodo precedente. Queste possibilità vengono denominate "rami". Il modello BET_EF definisce le probabilità per tutti i rami ad ogni nodo, condizionate all'accadimento dell'evento al nodo precedente. La probabilità assoluta di ogni evento risulta calcolabile come il prodotto delle probabilità condizionate al nodo e a tutti i nodi precedenti.

Il punto cruciale del modello BET_EF è il modo in cui queste probabilità condizionate vengono calcolate. BET_EF utilizza un modello Bayesiano, nel quale il valore teorico di probabilità (legato a modelli, esperienza, ecc.) definisce la distribuzione *a priori*, che viene aggiornata alla luce dei dati registrati per l'evento considerato attraverso il teorema di Bayes, per determinare la distribuzione *a posteriori*. Questa regola generale viene applicata ad ogni nodo dell'ET. L'aspetto fondamentale sta nel capire quali informazioni siano rilevanti per la stima di queste probabilità.

BET_EF alterna due metodi di stima, definiti di breve e di lungo termine. Quando uno stato di anomalia è rilevato al nodo 1, si possono aspettare variazioni significative dello stato del vulcano in tempi relativamente brevi (mesi). In

questo caso, le stime di probabilità si basano su quanto viene misurato dal sistema di monitoraggio. Questo tipo di stima viene definito di breve termine. Se invece non sono riscontrate anomalie, il sistema di monitoraggio non dà informazioni sullo stato del vulcano. In queste fasi non sono attese variazioni significative nel breve termine e le stime di probabilità sono basate su modelli e su dati relativi alla storia del vulcano. Questo tipo di stima viene definito di lungo termine.

Questa regola generale non è valida per tutti i nodi. Il sistema di monitoraggio infatti non è in grado di dare informazioni su tutti gli eventi dell'ET. In particolare, non è in grado di distinguere le diverse taglie eruttive (nodo 5), e solo parzialmente può essere indicativo della posizione (nodo 4). Per questo, le definizioni relative alle stime di breve periodo si riferiscono ai soli nodi 1, 2 e 3. Per il nodo 5, stime di breve e di lungo periodo coincidono. Per il nodo 4, la distribuzione di alcuni eventi (es., i terremoti) può influenzare le stime di breve periodo (Marzocchi et al. 2008; Lindsay et al. 2010). Limitandoci ai nodi 1, 2 e 3 la definizione del modello BET_EF passa attraverso:

1. la definizione dello stato del livello di base al nodo 1, che determina il passaggio tra stime di breve e di lungo termine;
2. la definizione delle anomalie ai nodi 2 e 3, per la stima delle probabilità di breve termine;
3. la definizione dei modelli e dei dati della storia del vulcano considerata quale riferimento per la stima delle probabilità di lungo termine.

Modello BETEF_CF: applicazione del BET_EF ai Campi Flegrei

La definizione del modello BET_EF per i Campi Flegrei è stata fatta nel corso

di due progetti finanziati dal Dipartimento della Protezione Civile. In particolare, tutte le definizioni necessarie alla interpretazione delle misure di monitoraggio, essendo di natura soggettiva, sono state prodotte attraverso un esperimento ripetuto di elicitazione degli esperti (Selva et al. 2012a). Queste elicitazioni hanno coinvolto più di 30 ricercatori, e hanno comportato cicliche discussioni, compilazione dei questionari e discussione dei risultati, per un totale di 5 esperimenti in 5 anni (2005-2010). Ulteriori esperimenti sono previsti per aggiornare questi risultati alla luce delle più recenti conoscenze scientifiche. I risultati dimostrano una sostanziale convergenza degli esperti verso un quadro interpretativo coerente e consistente. Nello specifico, ad ogni nodo (1, 2 e 3), gli esperti hanno definito quali *anomalie* siano specificamente informative e per quanto tempo (*inerzia*), *le soglie* (un minimo ed un massimo valore di misura) per la definizione delle anomalie, e quanto queste anomalie possano essere considerate informative (*pesi*). I risultati di questo esperimento sono riportati in Tabella 1. Si noti che alcuni parametri sono booleani, cioè possono assumere i soli valori VERO/FALSO. In questo caso, non è ovviamente necessaria la definizione di una doppia soglia.

Particolarmente importante è stata la definizione dello stato di unrest (nodo 1). Infatti, i Campi Flegrei possono essere considerati in uno stato di “anomalia” da molti anni, a partire dagli anni '70, cioè da quando la secolare subsidenza è stata interrotta da periodi di improvviso sollevamento del suolo. Questa definizione di “anomalia”, però, risulta pragmaticamente inutile per stime di probabilità di breve termine. Per questo motivo, si è deciso di identificare i periodi di “specifica attenzione”, nei quali possa essere necessario porsi il problema di eventuali escalation eruttive.

La definizione di background implicita nella definizione di anomalie al nodo 1 è stata poi utilizzata per stimare la probabilità a lungo termine di unrest (Selva et al. 2012a). Modelli concettuali, dati passati ed informazioni da caldere simili ai Campi Flegrei, hanno poi portato alla definizione delle probabilità relative ai nodi 2 e 3. L'insieme di queste analisi ha portato ad una stima di probabilità di eruzione di $1,6 \cdot 10^{-3}$ al mese (migliore stima) e di un intervallo di confidenza [$4 \cdot 10^{-5}$, $4 \cdot 10^{-3}$] al mese. Questa probabilità risulta confrontabile con la stima della probabilità di eruzione al Vesuvio (Marzocchi et al. 2004).

Le probabilità a lungo termine relative al nodo 4 (posizione della bocca eruttiva) sono state effettuate utilizzando dati geo-strutturali e dati relativi alla storia eruttiva recente della caldera. I risultati di questa analisi (Selva et al. 2012b) sono riportati in Figura 2a.

Le probabilità a lungo termine relative al nodo 5 (taglia delle eruzioni) sono state basate sulla distribuzione generica degli eventi in caldere simili, e sulle rivalutazioni delle taglie delle eruzioni avvenute ai Campi Flegrei (Orsi et al., 2009). I risultati sono riportati in Figura 2b.

L'insieme di queste analisi determina una definizione completa del modello BETEF_CF. Questo modello fornisce stime di lungo termine su tutti i possibili scenari eruttivi ai Campi Flegrei. Inoltre, basandosi sulle misurazioni del monitoraggio, può essere utilizzato in tempo reale per analizzare i periodi di crisi, fornendo stime di breve periodo. Un esempio di questo tipo di applicazione è riportato nel prossimo paragrafo.

Applicazione alla crisi del 1982-85

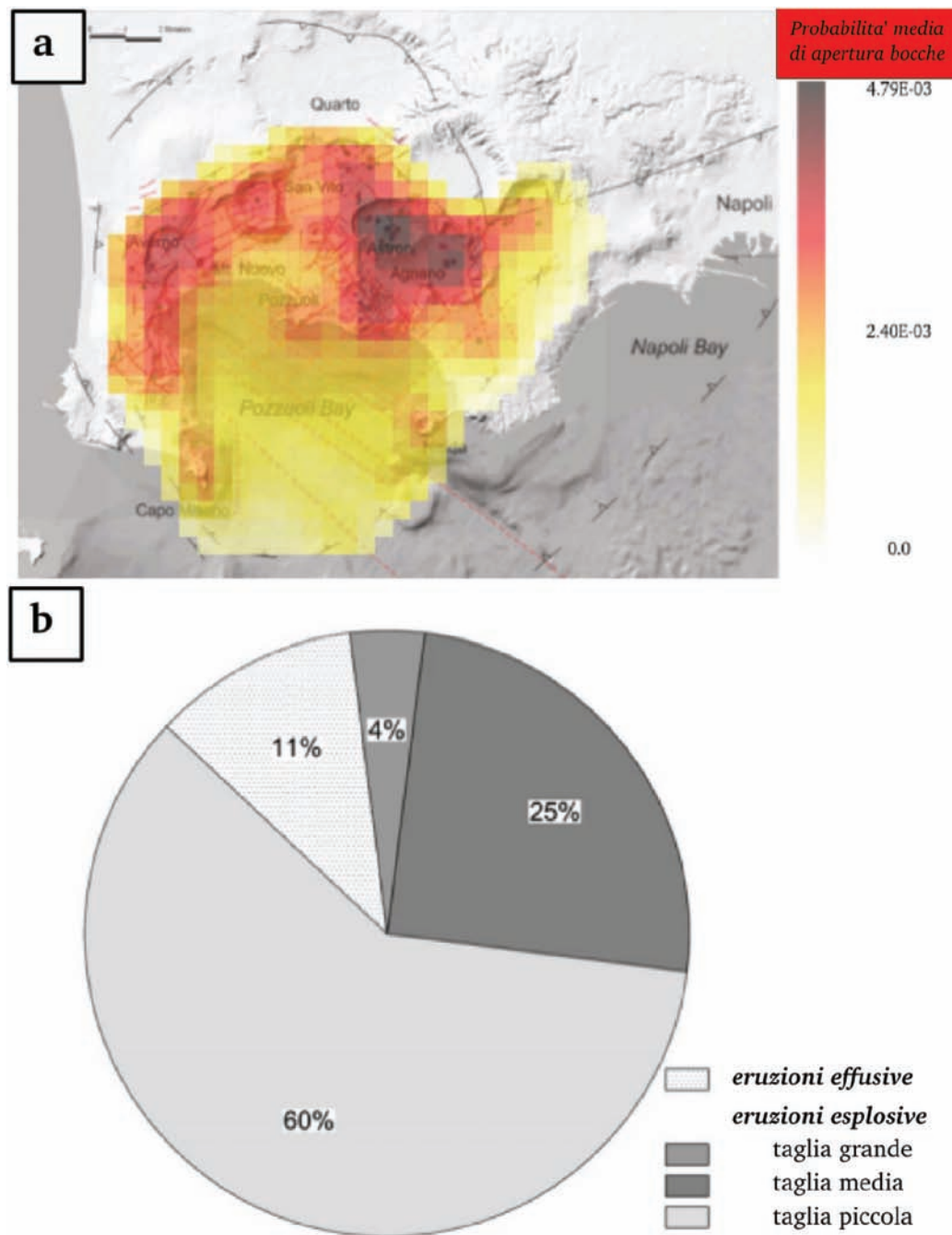
Il modello BETEF_CF è stato utilizzato per effettuare un'analisi retrospettiva delle probabilità di unrest (nodo 1), unrest magmatico (nodo 2) ed eruzione

Tabella 1. Parametri e soglie risultanti dall'esperimento di elicitazione degli esperti. Per ogni parametro e ad ogni nodo, sono riportate soglia inferiore, superiore e relazione d'ordine relative alla definizione dello stato anomalo, peso dell'informazione (per i soli nodi 2 e 3) e inerzia (da Selva et al., 2012a).

	Definizione	Inerzia	Unità	Soglie	Peso
Nodo 1					
1	# VT (M > 0,8)	*	ev/giorno	> 5-15	-
2	# LP/VLP/ULP	*	ev/mese	> 2-10	-
3	Sollevamento	cum. ultimi 3 mesi	cm	> 2-6	-
4	Velocità sollevamento	ultimi 3 mesi	cm/mese	> 0,7-1,3	-
5	Nuove fratture	ultimi 3 mesi	-	SI/NO	-
6	Estensione delle strutture di degassamento o aumento flussi	ultimo mese	-	SI/NO	-
7	Presenza gas acidi (HF, HCl, SO ₂)	ultima settimana	-	SI/NO	-
8	Temperature alla fumarola "Pisciarelli"	ultimo mese	C	> 100-110	-
Nodo 2					
1	# VT profondi (> 3,5 km, M > 0,8)	*	ev/giorno	> 2-20	0,9
2	# LP profondi (> 2,0 km)	*	ev/mese	> 3-20	0,5
3	# VLP/ULP	*	ev/mese	> 1-5	1
4	Presenza di tremore	ultimo mese	-	SI/NO	1
5	Presenza di tremore profondo (> 3,5 km)	ultimo mese	-	SI/NO	1
6	Sollevamento	cum. ultimi 3 mesi	cm	> 5-15	1
7	Nuove fratture	ultimi 3 mesi	-	SI/NO	0,2
8	Variazione macroscopica del pattern deformativo (decine di m)	ultimi 3 mesi	-	SI/NO	1
9	Presenza gas acidi (HF, HCl, SO ₂)	ultima settimana	-	SI/NO	1
10	Variazione nella componente magmatica	ultimo mese	-	SI/NO	0,1
Nodo 3					
1	Accelerazione nel # eventi sismici	ultima settimana	-	SI/NO	1
2	Accelerazione RSAM	ultima settimana	-	SI/NO	0,7
3	Presenza di tremore	ultimo mese	-	SI/NO	1
4	Dispersione ipocentri (range profondità) (10°-90° perc.)	ultima settimana	km	> 1-3	0,3
5	Variazione macroscopica del pattern deformativo (decine di m)	ultima settimana	-	SI/NO	1
6	Migrazione del massimo incrementale (m)	ultima settimana	-	SI/NO	0,7
7	Nuove fratture	ultimi 3 mesi	-	SI/NO	0,4
8	Presenza di gas acidi (HF, HCl, SO ₂)	ultima settimana	-	SI/NO	1
9	Attività freatica	ultima settimana	-	SI/NO	1

* Numero degli eventi osservati diviso per il numero di giorni dall'osservazione.

Figura 2. Migliori stime delle probabilità condizionate ai nodi 4 (posizione bocche eruttive, panel A, da Selva et al., 2012b) e 5 (taglia delle eruzioni, panel B, da Orsi et al., 2009).



(nodo 3) durante la crisi bradisismica del periodo 1982-85. Sono state ricercate in letteratura (ad esempio, Orsi et al., 1999) le informazioni quantitative relative ai parametri sismici e deformativi elencati in Tabella 1, e si è applicato il codice BETEF_CF retrospettivamente

per quel periodo. I risultati sono mostrati in Figure 3 e 4 e mostrano:

1. un sostanziale riconoscimento di un lungo periodo di unrest che ha caratterizzato con certezza (probabilità uguale a 1) quasi tutto il periodo da metà 1982 a inizio 1985 (Figure 3 e 4a);

2. una probabilità media di unrest dovuto ad un ruolo attivo del magma (unrest magmatico) stabile attorno al 70% per buona parte del periodo di unrest (Figura 3), principalmente dovuto all'entità del sollevamento accumulato; tuttavia, essendo questo l'unico parametro indicativo di magma risultato decisamente anomalo sul periodo, la dispersione associata a questa stima di probabilità di unrest di origine magmatica è ampia (dal 10% al 100% in termini di 10° e 90° percentili, Figura 4b);
3. una probabilità media di eruzione stabile attorno al 20% per tutto il periodo di unrest magmatico (Figura 3), con un picco al 40% nell'estate del 1983 dovuto all'aprirsi di una frattura riportata in letteratura (Orsi et al., 1999): anche in questo caso, essendo la frattura l'unico parametro indicativo di magma risultato anomalo, la dispersione associata alla stima di probabilità di eruzione è molto ampia (da valori vicini allo 0% a circa 95% in termini di 10° e 90° percentili, Figura 4c).

I risultati dell'applicazione del BETEF_CF al periodo 1982-85, lungamente discussi con i vulcanologi che operavano all'epoca, riflettono l'opinione, attualmente condivisa, che l'attività osservata in quel periodo fosse la manifestazione superficiale di un'intrusione di magma; non devono pertanto ritenersi esageratamente alte le probabilità di eruzione fornite dal BETEF_CF: il modello "contiene" le opinioni degli esperti ed i suoi risultati riflettono la loro opinione.

Considerazioni sullo stato attuale dei Campi Flegrei

Attualmente è in corso di sperimentazione l'applicazione in tempo reale del BETEF_CF. Da un'analisi preliminare sui dati raccolti dal 2011, BETEF_CF identifica un primo marcato episodio di unrest, dovuto ad un rapido sollevamento (uplift), a partire dalla primavera 2011 e durato fino a fine 2011, benché sull'ultimo periodo l'anomalia della velocità di uplift (e quindi il grado di unrest) fosse più debole. A partire da

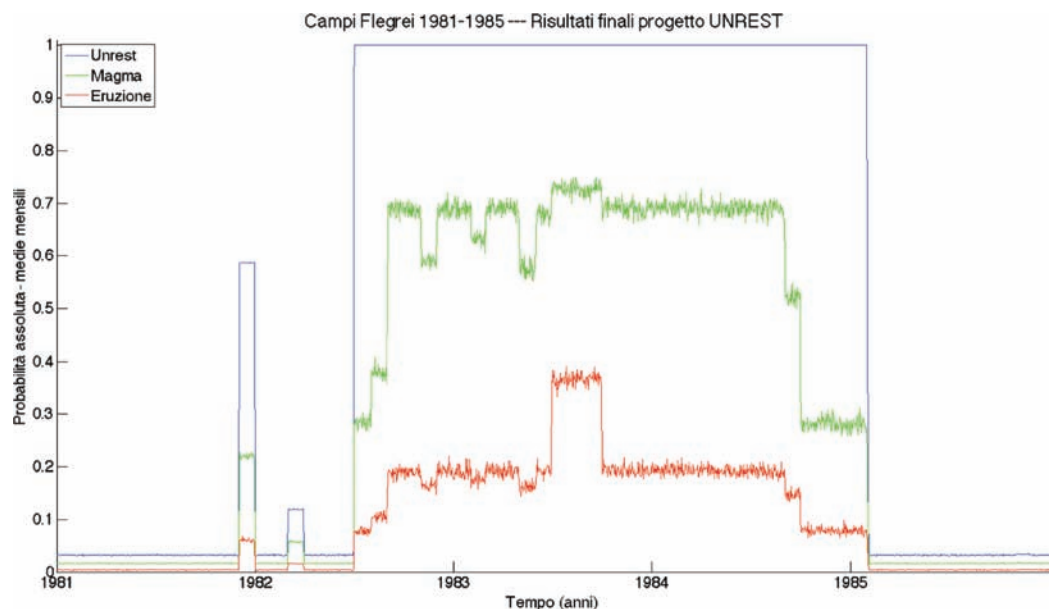
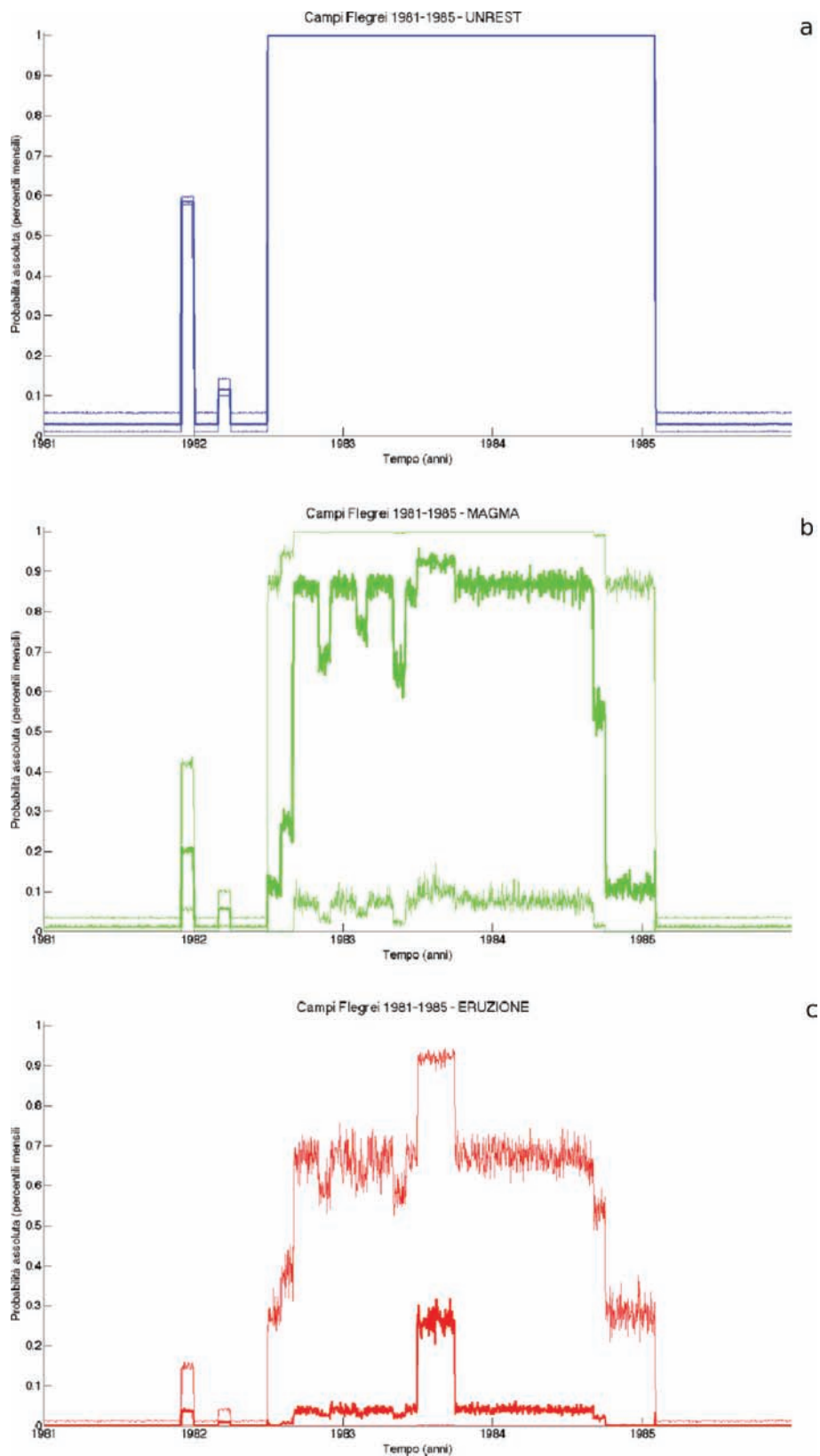


Figura 3. Andamento temporale delle medie mensili delle distribuzioni di probabilità di unrest (blu), unrest magmatico (verde) ed eruzione (rosso) per il periodo 1981-85 ai Campi Flegrei.

Figura 4. Andamento temporale dei percentili mensili delle distribuzioni di probabilità di unrest (a), unrest magmatico (b) ed eruzione (c) per il periodo 1981-85 ai Campi Flegrei. La linea grossa mostra la mediana, mentre le linee sottili mostrano i percentili 10° e 90°.



agosto 2012 circa, si è osservata nuovamente una velocità di uplift superiore alla soglia, e a tutt'oggi l'unrest non è cessato. Tuttavia, nessun parametro indicativo di "unrest magmatico" è risultato anomalo, e per questa ragione le probabilità di unrest magmatico ed eruzione non hanno mai raggiunto i valori del 1982-85.

Bibliografia

- DPC-V1 (2007-2010), UNREST. Realizzazione di un metodo integrato per la definizione delle fasi di unrest ai Campi Flegrei, finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile
- DPC-V3 (2005-2007). Ricerche sui vulcani attivi, precursori, scenari, pericolosità e rischio, finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile
- Lindsay J., Marzocchi W., Jolly G., Constantinescu R., Selva J., Sandri L. (2010). Towards real-time eruption forecasting in the Auckland Volcanic Field: testing of BET_EF during the New Zealand National Disaster Exercise 'Ruaumoko'. *Bull. Volcanol.* 72 (2), 185-204.
- Marti J., Aspinall W.R., Sobradelo R., Felpeto A., Geyer A., Ortiz R., Baxter P., Cole P.D., Pacheco J., Blanco M.J., Lopez C. (2008). A long-term volcanic hazard event tree for Teide-Pico Viejo stratovolcanoes (Tenerife, Canary Islands). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 178:543-552.
- Marzocchi W., Sandri L., Gasparini P., Newhall C., Boschi E. (2004). Quantifying probabilities of volcanic events: the example of volcanic hazard at Mount Vesuvius. *J. Geophys. Res.*, 109, B11201.
- Marzocchi W., Sandri L., Selva J. (2008). BET_EF: a probabilistic tool for long- and short-term eruption forecasting. *Bull. Volcanol.* 70 (5), 623-632.
- Orsi G., Civetta L., Del Gaudio C., de Vita S., Di Vito M.A., Isaia R., Petrazzuoli S.M., Ricciardi G.P., Ricco C. (1999). Short-term ground deformations and seismicity in the resurgent Campi Flegrei caldera, Italy: an example of active block-resurgence in a densely populated area. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 91, 415-451.
- Orsi G., Di Vito M.A., Selva J., Marzocchi W. (2009). Long-term forecasting of eruption style and size at Campi Flegrei caldera (Italy). *Earth Planet. Sci. Lett.* 287, 265-276.
- Neri A., Aspinall W.P., Cioni R., Bertagnini A., Baxter P.J., Zuccaro G., Andronico D., Barsotti S., Cole P.D., Esposti Ongaro T., Hincks T.K., Macedonio G., Papale P., Rosi M., Santacroce R., Woo G. (2008). Developing an event tree for probabilistic hazard and risk assessment at Vesuvius. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 178:397-415.
- Selva J., Marzocchi W., Papale P., Sandri L. (2012a). Operational eruption forecasting at high-risk volcanoes: the case of CampiFlegrei, Naples. *J. Applied Volcanol.* 1:5.
- Selva J., Orsi G., Di Vito M.A., Marzocchi W., Sandri L. (2012b). Probability hazard map for future vent opening at the CampiFlegrei caldera, Italy. *Bull. Volcanol.* 74, 497-510.
- Sparks R.S.J. (2003). Frontiers: forecasting volcanic eruptions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 210:1-15.