

Rapporti tecnici INGV

**Sviluppo di un software per la detezione
e classificazione in near real-time degli
eventi sismo-vulcanici di Vulcano**

300



Direttore Responsabile

Stefano Gresta

Editorial Board

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (INGV - RM1)

Luigi Cucci (INGV - RM1)

Nicola Pagliuca (INGV - RM1)

Umberto Sciacca (INGV - RM2)

Alessandro Settimi (INGV - RM2)

Aldo Winkler (INGV - RM2)

Salvatore Stramondo (INGV - CNT)

Milena Moretti (INGV - CNT)

Gaetano Zonno (INGV - MI)

Viviana Castelli (INGV - BO)

Antonio Guarnieri (INGV - BO)

Mario Castellano (INGV - NA)

Mauro Di Vito (INGV - NA)

Raffaele Azzaro (INGV - CT)

Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)

Mario Mattia (INGV - CT)

Marcello Liotta (INGV - PA)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Barbara Angioni

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it

Rapporti tecnici INGV

SVILUPPO DI UN SOFTWARE PER LA DETEZIONE E CLASSIFICAZIONE IN NEAR REAL-TIME DEGLI EVENTI SISMO-VULCANICI DI VULCANO

Andrea Cannata¹, Vincenzo Milluzzo², Marco Aliotta¹, Carmelo Cassisi¹, Salvatore Gambino¹,
Placido Montalto¹, Michele Prestifilippo¹

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania - Osservatorio Etneo)

²ENI - Angola

3000

Indice

Introduzione.....	7
1. Sviluppo del software.....	8
1.1 Detezione.....	9
1.2 Classificazione.....	10
1.3 Output, interfaccia e utilizzo.....	12
2. Confronto con i conteggi manuali.....	14
3. Importazione dei risultati nel database di sezione e visualizzazione.....	17
4. Conclusioni.....	17
Ringraziamenti.....	17
Bibliografia.....	18

Introduzione

Dati ricavati dall'analisi di eruzioni storiche indicano chiaramente che nella maggior parte dei casi esse sono precedute e accompagnate da periodi di *unrest*, caratterizzati da variazioni fisico-chimiche dello stato del vulcano e/o del sistema idrotermale ad esso associato [e.g., Tilling, 2008]. Tali variazioni possono essere individuate mediante il monitoraggio che può così mitigare il rischio associato ai vulcani. Per esempio, aumenti nel numero ed ampiezza degli eventi sismici registrati nelle aree vulcaniche sono spesso associati a comportamenti pre-eruttivi in molti vulcani come Redoubt [Alaska; Chouet et al., 1994], Galeras [Colombia; Gil Cruz and Chouet, 1997], e Colima [Mexico; Varley et al., 2010].

Vulcano (Isole Eolie, Italia), come la maggior parte dei vulcani attivi nel mondo, è caratterizzato da vari tipi di segnali sismici. Sulla base delle caratteristiche spettrali e delle forme d'onda, lavori recenti [Alparone et al., 2010; Milluzzo et al., 2010; Cannata et al., 2012] hanno suddiviso gli eventi sismici di Vulcano in due gruppi: terremoti vulcano-tettonici (VT) e eventi sismo-vulcanici. I primi, caratterizzati da energia a relativamente alta frequenza (> 5 Hz), bassa magnitudo (< 2.5) e chiare fasi P ed S nel sismogramma, si originano a causa della fratturazione lungo piani di faglia. Gli eventi sismo-vulcanici (vedi Figura 1) invece sono associati alla dinamica della porzione superficiale del sistema idrotermale (profondità minore di 1 km b.s.l.) e sono suddivisi in 4 classi [Alparone et al., 2010; Milluzzo et al., 2010; Cannata et al., 2012]: eventi a lungo periodo (LP), ad alta frequenza (HF), monocromatici (MC) e tornillos (TR). Gli eventi LP presentano un contenuto spettrale nella banda 0.5-5.0 Hz e sono simili agli eventi LP osservati nella maggior parte dei vulcani [e.g., McNutt, 2005]. Tali eventi sono probabilmente associati a risonanza di crack e condotti riempiti da fluidi idrotermali [Alparone et al., 2010]. Gli eventi HF presentano un contenuto spettrale nella banda 5-25 Hz e differiscono dai terremoti VT per gli inizi emergenti e le fasi P e S poco definite nei sismogrammi. Sulla base di tali caratteristiche gli eventi HF possono essere considerati eventi VT-B [Wassermann, 2009]. Come i classici terremoti VT, anche gli eventi HF sono probabilmente generati da fenomeni di fratturazione delle rocce, causati dalla dinamica dei fluidi idrotermali [Alparone et al., 2010]. Gli eventi MC sono caratterizzati da netti picchi di frequenza sopra 5 Hz, e, come gli eventi LP, possono essere causati da fenomeni di risonanza di crack e condotti riempiti da fluidi idrotermali [Alparone et al., 2010]. Infine, gli eventi TR sono caratterizzati da lunga durata (30-50 s) e netti picchi spettrali sopra i 5 Hz. Dal 2004 al 2009 si sono susseguiti diversi aumenti nel numero e nell'ampiezza degli eventi sismo-vulcanici, contemporanei a variazioni nel chimismo e nella temperatura alle fumarole, che sono stati interpretati come associati a incrementi nel rilascio di gas da corpi magmatici profondi e stabili, senza intrusioni nelle porzioni superficiali del sistema idrotermale [Cannata et al., 2012; Milluzzo, 2013].

È stato sviluppato un software per il monitoraggio automatico degli eventi sismo-vulcanici. Grazie a tale software sarà possibile monitorare in *near real-time* le variazioni dell'attività sismo-vulcanica, strettamente associate alla dinamica superficiale del sistema idrotermale.

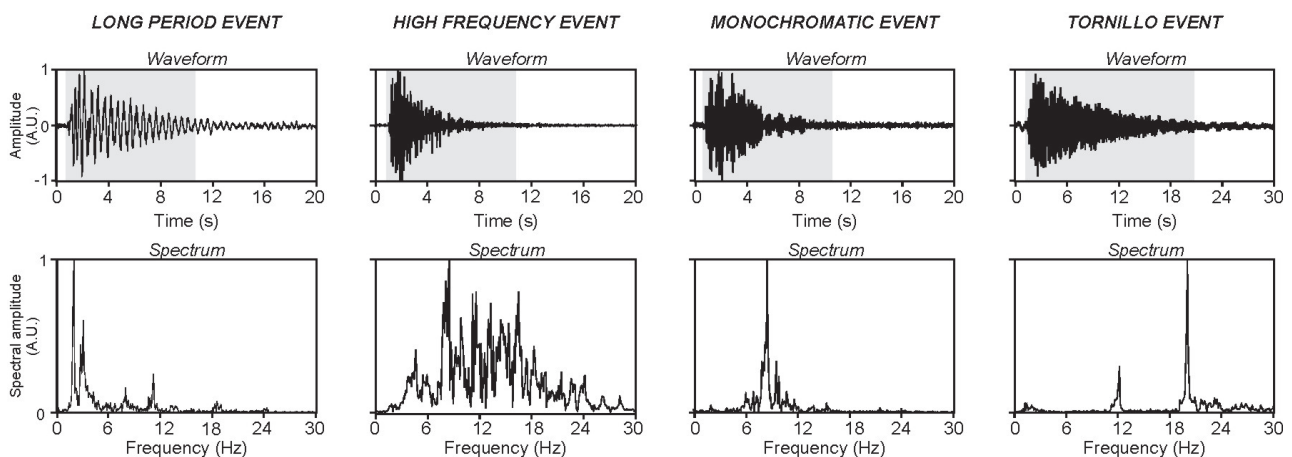
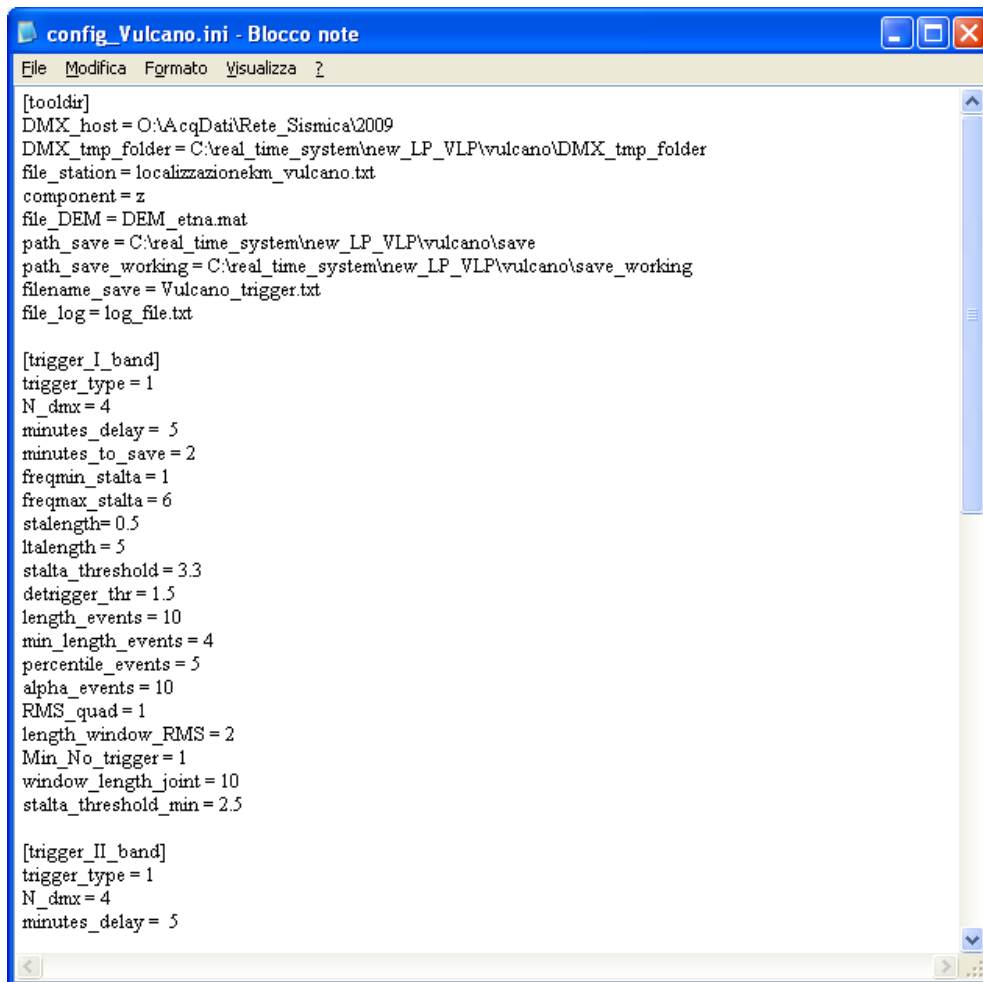


Figura 1. Esempi di eventi sismo-vulcanici, registrati a Vulcano [Cannata et al., 2012].

1. Sviluppo del software

È stato sviluppato un software in ambiente Matlab[®], che permette l'individuazione e la classificazione automatica degli eventi sismo-vulcanici registrati a Vulcano. I parametri necessari per eseguire entrambe le operazioni sono forniti per mezzo di un file di configurazione (“*config_Vulcano.ini*”), che presenta sia input di tipo stringa (e.g., *path* in cui si trovano i file contenenti i segnali sismici o dove salvare i file *txt* con le informazioni riguardanti gli eventi sismici trovati, nomi di file contenenti la lista delle stazioni dove eseguire la detezione) sia input numerici necessari per la detezione degli eventi e la loro classificazione automatica (Figura 2).



```
[tooldir]
DMX_host = O:\AcqData\Rete_Sismica\2009
DMX_tmp_folder = C:\real_time_system\new_LP_VLP\vulcano\DMX_tmp_folder
file_station = localizzazionekm_vulcano.txt
component = z
file_DEM = DEM_etna.mat
path_save = C:\real_time_system\new_LP_VLP\vulcano\save
path_save_working = C:\real_time_system\new_LP_VLP\vulcano\save_working
filename_save = Vulcano_trigger.txt
file_log = log_file.txt

[trigger_I_band]
trigger_type = 1
N_dmx = 4
minutes_delay = 5
minutes_to_save = 2
freqmin_stalta = 1
freqmax_stalta = 6
stalength = 0.5
ltalength = 5
stalta_threshold = 3.3
detrigger_thr = 1.5
length_events = 10
min_length_events = 4
percentile_events = 5
alpha_events = 10
RMS_quad = 1
length_window_RMS = 2
Min_No_trigger = 1
window_length_joint = 10
stalta_threshold_min = 2.5

[trigger_II_band]
trigger_type = 1
N_dmx = 4
minutes_delay = 5
```

Figura 2. Porzione del file *config_Vulcano.ini* contenente i parametri necessari per l'individuazione e la classificazione automatica degli eventi sismo-vulcanici.

Per quanto concerne le stazioni utilizzate da tale sistema, si è scelto inizialmente di considerare 3 stazioni appartenenti alla rete sismica di Vulcano (IVCR, IVLT, IVGP; Figura 3) site vicino La Fossa, dove cadono la maggior parte degli epicentri degli eventi sismo-vulcanici [Alparone et al., 2010; Milluzzo et al., 2010; Cannata et al., 2012]. Nonostante la stazione più “sensibile” per registrare tale tipo di eventi sia IVCR, la scelta di provare ad utilizzare le altre due stazioni dipende dal tentativo di rendere il sistema più affidabile (e quindi di far funzionare il sistema anche nel caso di guasti alla stazione IVCR).

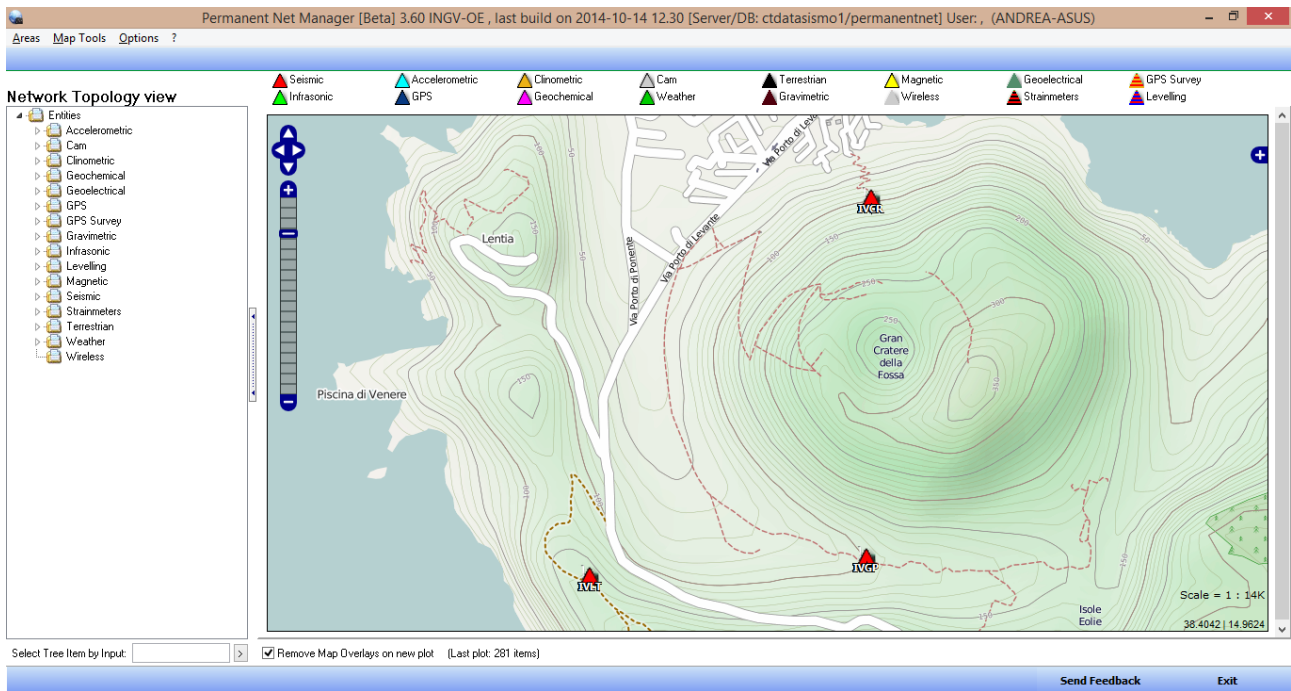


Figura 3. Mappa di Vulcano con le stazioni sismiche (triangoli rossi) usate per l'individuazione e classificazione automatica degli eventi sismo-vulcanici (visualizzazione da *NetManager*, [Aliotta et al., 2010]).

1.1 Detezione

L'individuazione degli eventi è eseguita tramite l'algoritmo STA/LTA (*short time average/long time average*; Withers et al., 1998). Per eseguire tale operazione sono necessari vari parametri di input (letti dal file *ini*, vedi paragrafo 1), quali per esempio:

- lunghezza finestra STA;
- lunghezza finestra LTA;
- soglia per il *trigger*;
- soglia per il *detrigger*;
- minuti di ritardo rispetto al *real-time*;
- durata dei buffer di segnale da considerare;
- bande di frequenza.

Prima di eseguire la ricerca tramite STA/LTA, il segnale sismico delle stazioni scelte viene pre-elaborato. In particolare vengono rimossi gli *spike*, gli eventuali zeri (legati ad assenza temporanea del segnale), e il segnale viene filtrato in due bande di frequenza. I migliori risultati in termini di "*true detection vs false detection*" sono stati ottenuti utilizzando le due bande, parzialmente sovrapposte, 1-6 Hz e 5-15 Hz. Quindi viene eseguito l'algoritmo STA/LTA separatamente alle varie stazioni e alle due bande di frequenza. L'unione dei risultati delle 6 differenti detezioni (3 stazioni * 2 bande di frequenza) viene ottenuto assumendo che un trigger, anche ad una sola stazione in una banda di frequenza, sia sufficiente per dichiarare un evento. Tale apparentemente "poco restrittiva regola" è motivata dal fatto che, come accennato sopra, spesso gli eventi sismo-vulcanici a Vulcano sono visibili alla sola stazione IVCR (vedi Figura 4).

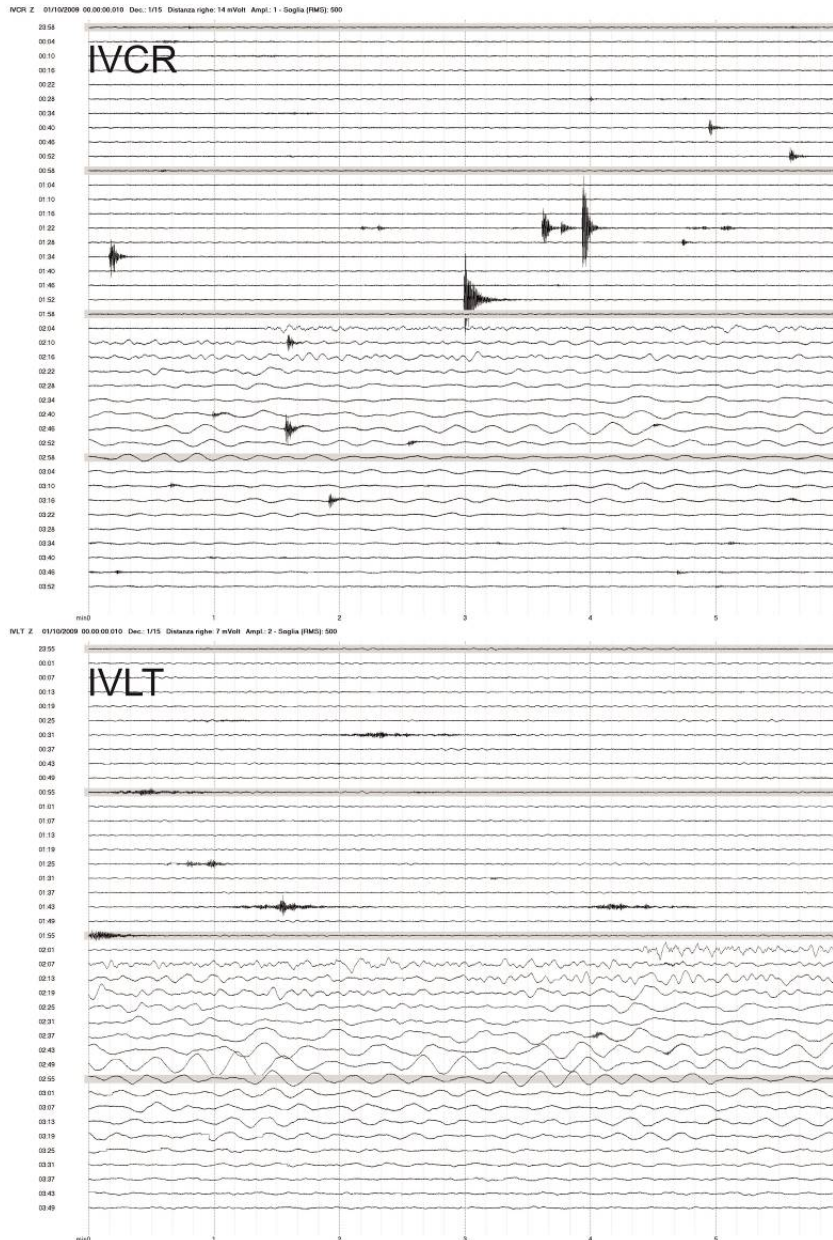


Figura 4. Sismogrammi della componente verticale del segnale sismico registrato alle stazioni IVCR e IVLT dalle 00:00 alle 04:00 del 01/10/2009. Si nota chiaramente come gli eventi sismo-vulcanici siano visibili in questo caso alla sola stazione IVCR.

1.2 Classificazione

Gli eventi, individuati per mezzo dell'approccio descritto nel paragrafo 1.1, vengono caratterizzati e, quindi, classificati. La caratterizzazione consiste nel ricavare per ciascun evento varie caratteristiche descrittive quali: tempo di *picking*, ampiezza picco-picco, durata, frequenza di picco e somma dello spettro normalizzato.

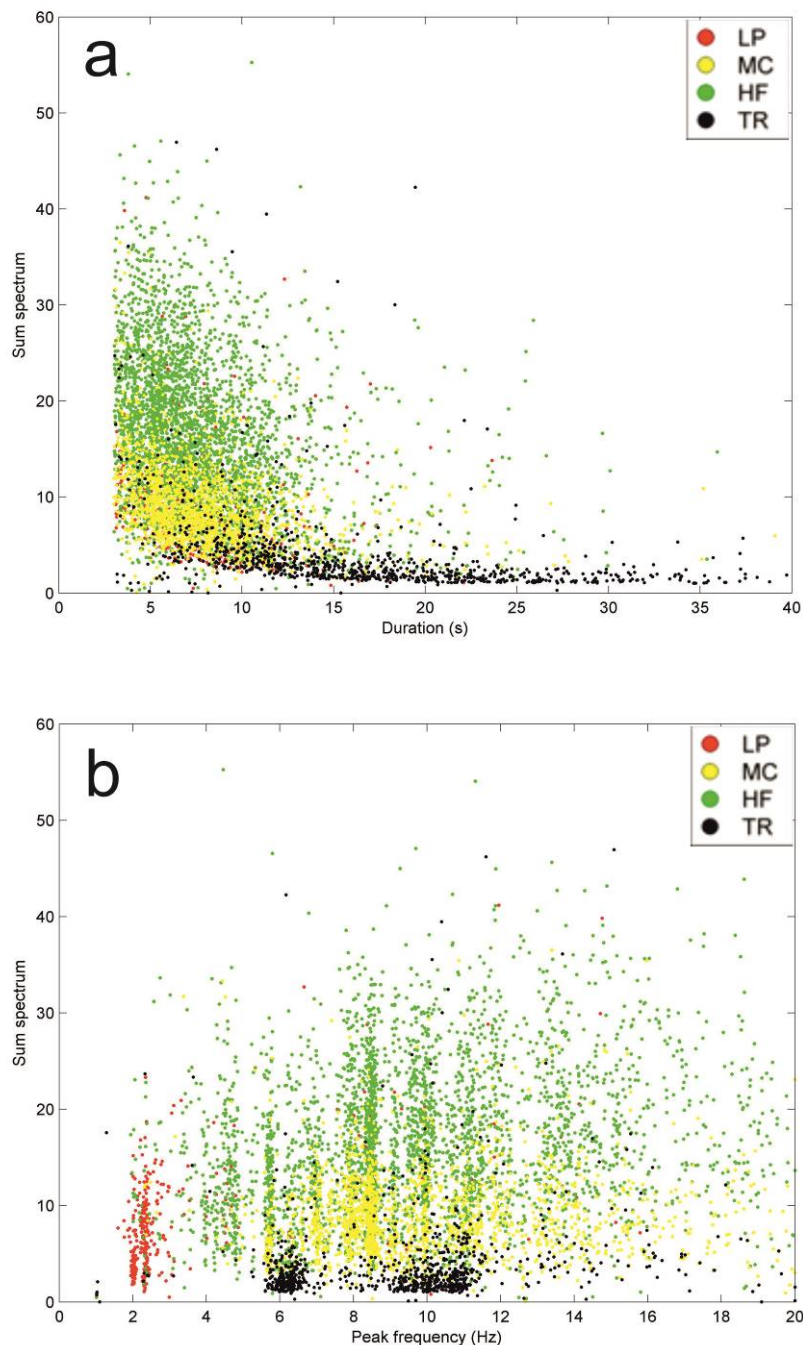


Figura 5. Grafici che mostrano alcune delle caratteristiche ricavate per le varie classi di eventi sismovulcanici. In questo caso per classificare gli eventi sono stati utilizzati i risultati di Milluzzo [2013].

La durata viene stimata tramite l’algoritmo STA/LTA fissando un valore di soglia di *dettrigger* (uno dei parametri presenti nel file di configurazione; vedi “New Manual of seismological Observatory Practice”, 2012). La frequenza di picco, definita come la frequenza caratterizzata dalla massima ampiezza spettrale, è ricavata tramite l’algoritmo Fast Fourier Transform (FFT). L’ultimo parametro (somma dello spettro normalizzato) viene ricavato suddividendo lo spettro per il suo valore massimo e sommando le ampiezze spettrali all’interno di determinate bande di frequenza. In tal modo si riesce a quantificare il carattere “monocromatico” dell’evento. Infatti, le classi di eventi che presentano una spiccata monocromaticità (quali MC e TR) sono caratterizzate da valori di tale parametro più bassi rispetto agli eventi con spettro in frequenza ampio (quali HF). Come mostrato in Figura 5, le caratteristiche così ottenute possono aiutare a

classificare in modo automatico gli eventi sismo-vulcanici individuati. In particolare, la classificazione è eseguita sulla base di semplici regole:

- se la frequenza di picco è minore di $max_freq_LP \rightarrow$ evento LP;
- se la durata dell'evento è maggiore di min_dur_TR e la somma dello spettro normalizzato è minore di $max_sum_spectrum_TR \rightarrow$ evento TR;
- se la somma dello spettro normalizzato è minore di $max_sum_spectrum_MC \rightarrow$ evento MC;
- se nessuno dei casi precedenti \rightarrow evento HF.

Per scegliere i valori dei 4 parametri max_freq_LP , min_dur_TR , $max_sum_spectrum_TR$ e $max_sum_spectrum_MC$ si è proceduto nel seguente modo. Seguendo lo schema sopra mostrato, sono stati classificati automaticamente ~7000 eventi sismo-vulcanici avvenuti durante il 2004-2009 variando in modo sistematico i 4 parametri. Dato che per tali eventi esiste già una classificazione eseguita tramite analisi diretta delle forme d'onda [Milluzzo, 2013], per ciascun set di parametri è stata ricavata la bontà della classificazione, espressa come percentuale degli eventi classificati automaticamente in modo analogo alla classificazione manuale. La percentuale massima (~74%) è stata ottenuta con il seguente set di parametri:

$max_freq_LP = 4$ Hz
 $min_dur_TR = 9$ s
 $max_sum_spectrum_TR = 4$
 $max_sum_spectrum_MC = 11$

Per ulteriormente caratterizzare la bontà della classificazione automatica è stata ricavata la matrice di confusione [Duda et al., 2000]:

		PREDICTED			
		LP	TR	MC	HF
ACTUAL	LP	274	5	31	50
	TR	14	581	230	59
	MC	9	99	1336	516
	HF	23	37	414	2058

Tabella 1. Matrice di confusione degli eventi sismo-vulcanici di Vulcano classificati in modo automatico.

Ogni colonna della matrice rappresenta i valori predetti sulla base dei risultati della classificazione automatica, mentre ogni riga rappresenta i valori ottenuti tramite analisi diretta delle forme d'onda da parte di Milluzzo [2013]. Attraverso questa matrice è possibile osservare se vi è “confusione” nella classificazione. La somma degli elementi della diagonale (traccia della matrice di confusione) divisa per la somma degli elementi della matrice e moltiplicata per cento restituisce la bontà della classificazione (nel caso specifico ~74%). Si nota come i maggiori errori di classificazione avvengono nel caso di eventi MC e HF. L'unica caratteristica che permette di discriminare tali due tipologie di eventi è la monocromaticità degli spettri.

1.3 Output, interfaccia e utilizzo

Ultimate le operazioni di detezione e classificazione all'interno di un dato buffer di segnale, le informazioni relative agli eventi individuati (quali tempo di *picking*, ampiezza picco-picco, frequenza di picco, stazione, durata, somma dello spettro, classe di appartenenza) sono salvate su file *txt*, così da potere poi confluire all'interno di database strutturati (Figura 6).

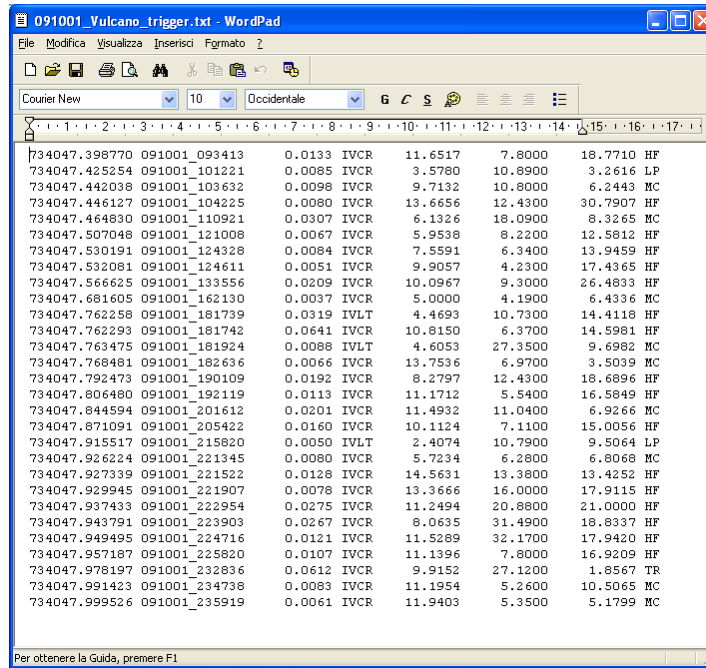


Figura 6. Esempio di file txt contenente le informazioni degli eventi sismo-vulcanici individuati durante una fase di test su segnali acquisiti giorno 1 ottobre 2009.

È stata sviluppata un'interfaccia grafica al software che permette sia di bloccare/riavviare l'elaborazione che di visualizzare varie informazioni quali le operazioni compiute dal software, la lista delle stazioni considerate, i file analizzati e gli eventi trovati con la rispettiva classe di appartenenza (Figura 7).

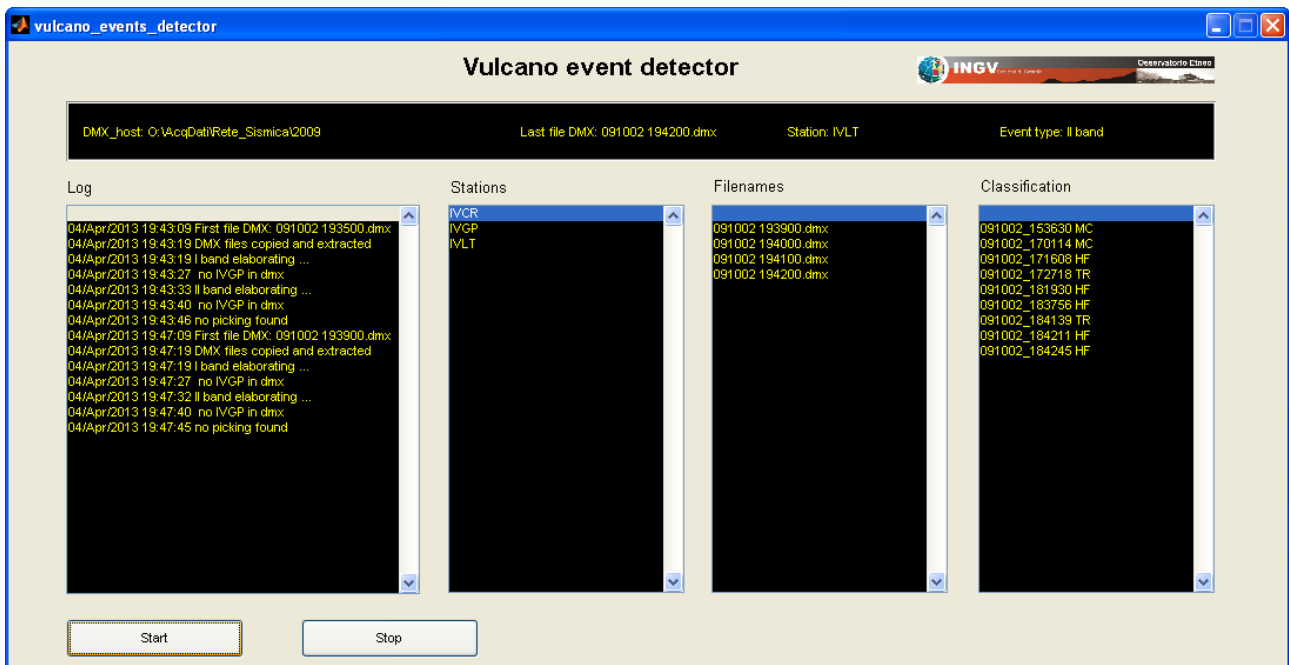


Figura 7. Interfaccia del software di elaborazione degli eventi sismo-vulcanici di Vulcano, durante una fase di test su segnali acquisiti a ottobre 2009.

Il software così sviluppato è stato compilato, e avviato su un PC dedicato a tale scopo.

2. Confronto con i conteggi manuali

I risultati delle elaborazioni da maggio 2013 ad ottobre 2014 sono stati quindi confrontati con i conteggi manuali eseguiti dal personale analista sulla base dell'osservazione dei segnali sismici registrati dalla componente verticale della stazione IVCR.

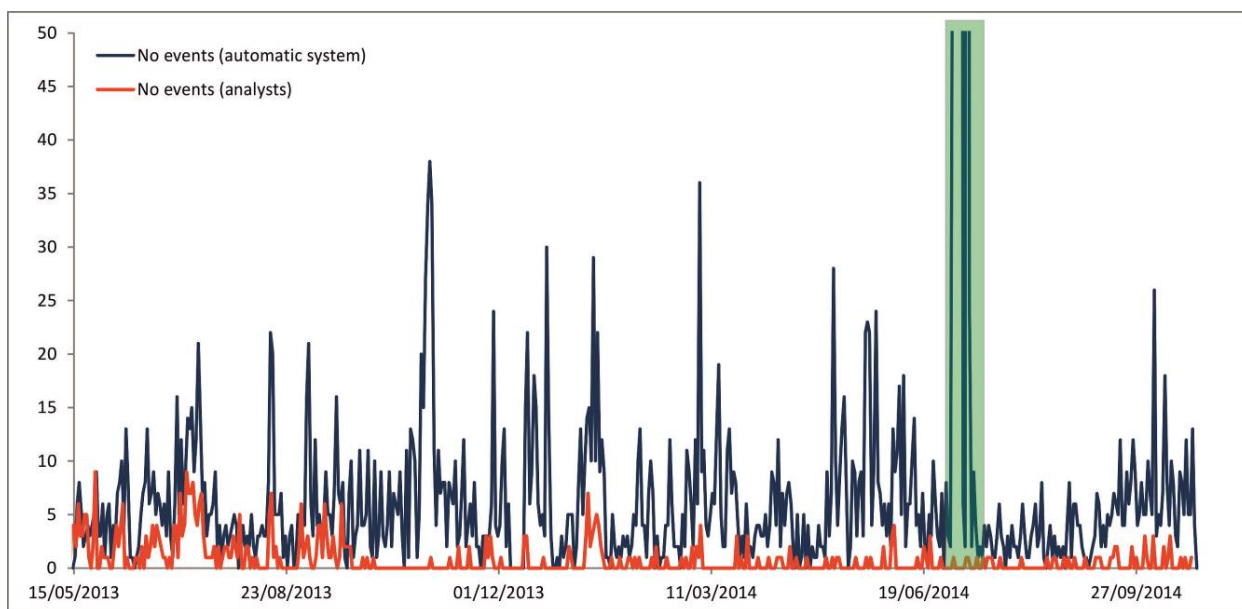


Figura 8. Numero giornaliero di eventi sismici ricavato dagli analisti (rosso) e dal sistema automatico (blu). Il rettangolo verde indica l'aumento nel numero delle detezioni, causato dagli scoppi durante l'esperimento TOMO-ETNA [Cocina et al., 2014]. In questo caso le detezioni del sistema automatico sono state ottenute utilizzando i segnali di 3 differenti stazioni IVCR, IVGP e IVLT.

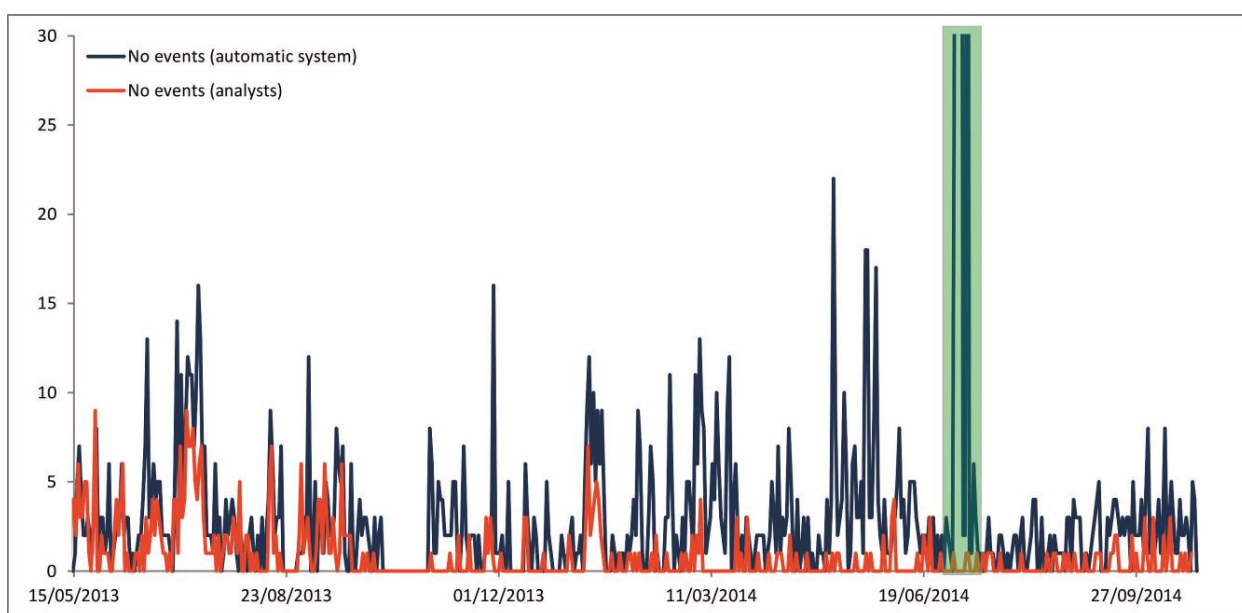


Figura 9. Numero giornaliero di eventi sismici ricavato dagli analisti (rosso) e dal sistema automatico (blu). Il rettangolo verde indica l'aumento nel numero delle detezioni, causato dagli scoppi durante l'esperimento TOMO-ETNA [Cocina et al., 2014]. In questo caso le detezioni del sistema automatico sono state ottenute utilizzando i segnali della sola stazione IVCR.

In Figura 8 si nota chiaramente come il numero di eventi sismici individuati dal sistema automatico sia maggiore rispetto al conteggio degli eventi ricavato dagli analisti. Da un'analisi visuale delle tracce sismiche si è notato come la causa del numero elevato di eventi sismici individuati dal sistema automatico sia, almeno in parte, legata al *noise* nelle tracce di IVGP e IVLT che in molti casi portano a false detezioni. Così, nonostante un sistema automatico basato su una sola stazione non possa essere considerato davvero affidabile, in quanto strettamente dipendente dalla funzionalità di essa, si è deciso di utilizzare solo le detezioni alla stazione IVCR (Figura 9).

Dopo avere preso in considerazione solo le detezioni alla stazione IVCR, il numero di eventi sismici individuati si riduce pur rimanendo tuttavia leggermente maggiore rispetto al conteggio degli analisti. Per comprendere le ragioni di tale discrepanza, si è pensato di fissare una soglia di ampiezza minima. Infatti, gli eventi individuati dagli analisti devono necessariamente avere ampiezze "non troppo basse", altrimenti sarebbero "invisibili" sui sismogrammi in cui vengono cercati. Sono state così testate diverse soglie, e il valore che ha permesso di ottenere una discreta somiglianza tra i conteggi degli analisti e quelli del sistema automatico è risultato pari a 0.008 mVolt. Una volta fissata tale soglia di ampiezza, i conteggi ottenuti dal sistema automatico e dagli analisti presentano trend e valori simili ad eccezione di picchi nel conteggio automatico, a volte legati a disturbi (Figura 10). È bene comunque sottolineare che anche le detezioni di eventi sismici con ampiezza inferiore alla soglia fissata vengono salvate, poiché anche gli eventi di scarsa ampiezza possono avere notevole importanza per il monitoraggio.

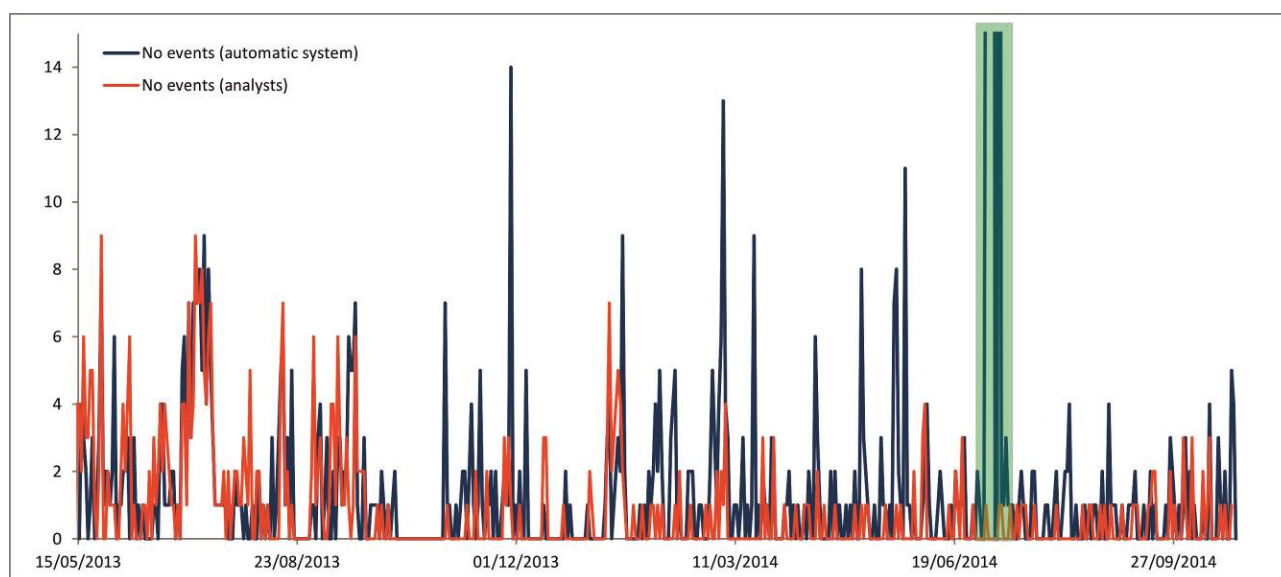


Figura 10. Numero giornaliero di eventi sismici ricavato dagli analisti (rosso) e dal sistema automatico (blu). Il rettangolo verde indica l'aumento nel numero delle detezioni, causato dagli scoppi durante l'esperimento TOMO-ETNA [Cocina et al., 2014]. In questo caso le detezioni del sistema automatico sono state ottenute utilizzando i segnali acquisiti dalla sola stazione IVCR, e una soglia di ampiezza minima pari a 0.008 mVolt.

La maggior parte degli eventi sismici così individuati sono stati classificati dal sistema automatico come eventi HF e MC (vedi Figura 11).

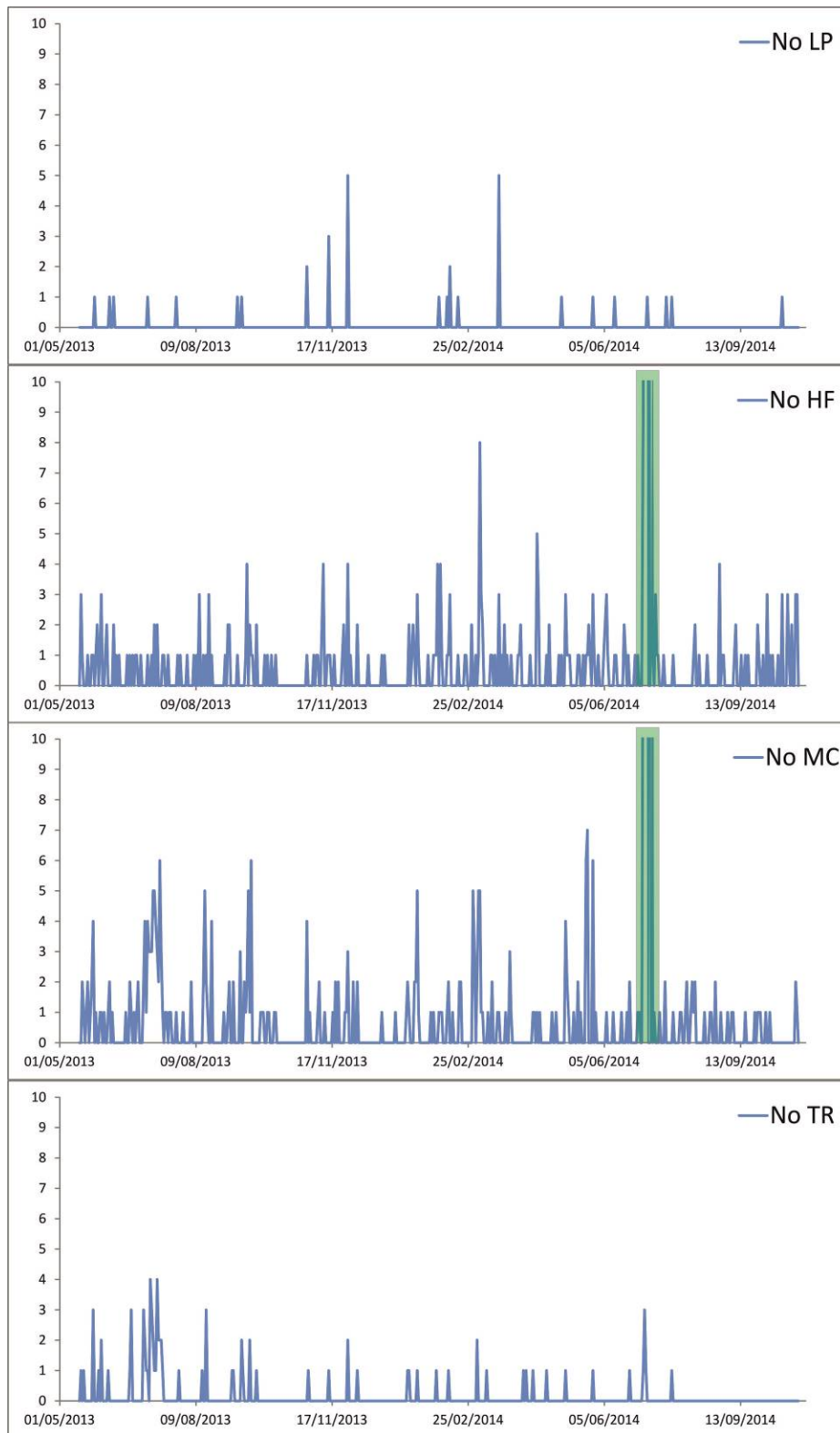


Figura 11. Numero giornaliero di eventi LP, MC, HF e TR ricavato dal sistema automatico. Il rettangolo verde indica l'aumento nel numero delle detezioni, causato dagli scoppi durante l'esperimento TOMO-ETNA [Cocina et al., 2014]. In questo caso le detezioni del sistema automatico sono state ottenute utilizzando i segnali acquisiti dalla sola stazione IVCR, e una soglia di ampiezza minima pari a 0.008 mVolt.

3. Importazione dei risultati nel database di sezione e visualizzazione

Una volta sviluppato il software e scelta la stazione di riferimento (IVCR), i risultati sono caricati in automatico e in *near real-time* nel database dell'INGV-OE tramite software "loader" implementati appositamente [Cassisi et al., sottoposto]. In Figura 12 è riportato uno *screenshot* della pagina web che visualizza in *near real-time* la variazione nel tempo del conteggio giornaliero degli eventi sismo-vulcanici e le relative ampiezze.

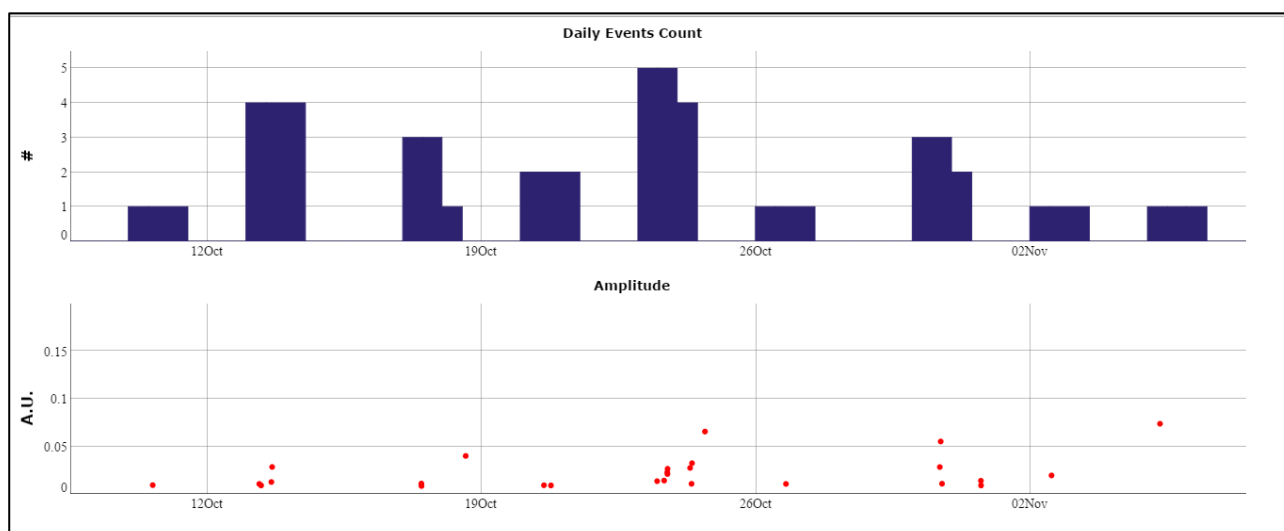


Figura 12. Screenshot della pagina web che visualizza in *near real-time* la variazione nel tempo del numero giornaliero degli eventi sismo-vulcanici e le relative ampiezze.

4. Conclusioni

È stato sviluppato in ambiente Matlab[®] un sistema automatico che, operando sul segnale acquisito dalla stazione IVCR, permette di individuare gli eventi sismici di Vulcano in *near real-time*, con risultati simili a quelli ottenuti mediante il conteggio manuale eseguito dal personale analista. Inoltre, tale sistema permette di ottenere una prima classificazione di essi sulla base del contenuto spettrale e della forma d'onda, seguendo la classificazione di Alparone et al. [2010], Cannata et al. [2012] e Milluzzo [2013].

Come evidenziato nell'Introduzione, tale programma può fornire utili informazioni per il monitoraggio, specialmente se tali dati, riguardanti gli eventi sismo-vulcanici, sono affiancati da altri dati geofisici, vulcanologici e geochimici.

Ringraziamenti

Si ringrazia il personale tecnico dell'INGV-OE per la manutenzione della rete sismica dell'Isola di Vulcano, e il Gruppo Analisi Dati Sismici dell'Osservatorio Etneo per avere fornito i dati dei conteggi manuali degli eventi sismo-vulcanici. Si ringrazia il Dott. Salvatore Alparone, il cui contributo scientifico è stato fondamentale per lo studio dei segnali sismo-vulcanici di Vulcano. Inoltre si ringrazia la Dott.ssa Simona Petrosino per gli utili consigli che hanno permesso di migliorare il report. I risultati di questo report sono stati ottenuti grazie ai progetti V2-Precursori di eruzioni (INGV-DPC 2012) UR 5, e PON01_00683 SIGMA (Sistema Integrato di sensori in ambiente cloud per la Gestione Multirischio Avanzata).

Bibliografia

- Aliotta, M., Montalto, P., Prestifilippo, M., Cannata, A., D'Agostino, M., Ferrari, F., Torrisi, O., (2010). *Banca dati per la gestione delle reti strumentali in dotazione all'INGV - Sezione di Catania: dalla progettazione concettuale al software applicativo*. Rapporti Tecnici INGV, 153.
- Alparone, S., Cannata, A., Gambino, S., Gresta, S., Milluzzo, V. and Montalto, P., (2010). *Time-space variation of volcano-seismic events at La Fossa (Vulcano, Aeolian Islands, Italy): new insights into seismic sources in a hydrothermal system*. Bulletin of Volcanology, 72, 803-816, doi:10.1007/s00445-010-0367-6.
- Bormann, P. (Ed.), (2012). *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*, IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam. <http://nmsop.gfz-potsdam.de>, doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2.
- Cannata, A., Diliberto, S., Alparone, S., Gambino, S., Gresta, S., Liotta, M., Madonia, P., Milluzzo, V., Aliotta, M. and Montalto, P., (2012). *Multiparametric approach in investigating hydrothermal systems: the case of study of Vulcano (Aeolian Islands, Italy)*. Pure and Applied Geophysics, doi: 10.1007/s00024-011-0297-z.
- Cassisi C., Montalto P., Aliotta M., Cannata A., and Prestifilippo M. *TSDSystem: un database multidisciplinare per la gestione di serie temporali*. Submitted to Rapporti Tecnici INGV.
- Chouet, B.A., Page, R.A., Stephens, C.D., Lahr, J.C., and Power, J.A., (1994). *Precursory swarms of long-period events at Redoubt Volcano (1989–1990), Alaska: their origin and use as a forecasting tool*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 62, 95–135.
- Cocina et al., (2014). *TOMO-ETNA: an Active Seismic Experiment at Etna Volcano*. Miscellanea INGV, 25.
- Duda, R., Hart, P. and Stork, D., (2000). *Pattern classification (2nd edition)*. Wiley, New York, ISBN 0-471-05669-3.
- Gil Cruz, F. and Chouet, B.A., (1997). *Long-period events, the most characteristic seismicity accompanying the emplacement and extrusion of a lava dome in Galeras Volcano, Colombia, in 1991*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 77, 121– 158.
- McNutt, S.R., (2005). *Volcanic seismology*. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 32, 461–491.
- Milluzzo, V., Cannata, A., Alparone, S., Gambino, S., Hellweg, M., Montalto, P., Cammarata, L., Diliberto, I.S., Gresta, S., Liotta, M., and Paonita, A., (2010). *Tornillos at Vulcano: clues to the dynamics of the hydrothermal system*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 198, 377-393, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.09.022.
- Milluzzo, V., (2013). *Seismic characterization of Vulcano island and aeolian area by tectonic and seismo-volcanic events*. PhD thesis, Università degli studi di Catania.
- Tilling, R.I., (2008). *The critical role of volcano monitoring in risk reduction*. Adv. Geosci., 14, 3-11.
- Varley, N., Arambula-Mendoza, R., Reyes-Davila, G., Stevenson, J., and Harwood, J., (2010). *Long-period seismicity during magma movement at Volcan de Colima*. Bull. Volcanol., doi:10.1007/s00445-010-0390-7.
- Wassermann, J., (2009). *Volcano Seismology*. In: Bormann, P. (Ed.), *New manual of seismological observatory practice*. IASPEI.
- Withers, M., Aster, R., Young, C., Beiriger, J., Harris, M., Moore, S., and Trujillo, J., (1998). *A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection*. Bull. Seism. Soc. Am., 88, 95-106.

Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2015 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia