

## Mappatura dell'attività fumarolica sul cono de La Fossa (Isola di Vulcano) e sua applicazione al monitoraggio del rischio vulcanico

Paolo Madonia (\*), Marianna Cangemi (\*\*), Michela Costa (\*\*\*),  
Ivan Madonia (\*\*\*\*), Carmelo Sammarco (\*\*\*\*\*)

(\*,\*\*) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Palermo, via Ugo La Malfa 153, 90146 Palermo  
emails paolo.madonia@ingv.it, mariannacangemi@gmail.com

(\*\*\*,\*\*\*\*) Università degli Studi di Palermo, Dipartimento DiSTeM, Via Archirafi 20, 90123 Palermo  
emails michelacosta.pa@gmail.com; ivanmadonia@gmail.com

(\*\*\*\*\*) College of Physical Science, Department of Geology and Petroleum Geology, Meston Building  
Old Aberdeen (UK), email carmelosammarco@abdn.ac.uk

### Riassunto

Lo studio delle variazioni spazio-temporali del flusso di gas dai suoli, la cui principale componente è il vapore acqueo, rappresenta una delle principali metodologie di indagine nel monitoraggio del rischio vulcanico. Il cono de La Fossa nell'Isola di Vulcano (Arcipelago Eoliano), interessato da una intensa attività fumarolica sin dalla fine della sua ultima eruzione (1888-1890), è una delle aree vulcaniche più studiate al mondo con metodologie di questo tipo. Il presente lavoro descrive l'evoluzione delle tecniche di monitoraggio durante gli ultimi 30 anni, con specifico riferimento al mutamento dell'approccio metodologico conseguente all'avvento della geomatica. In particolare, verranno analizzate le problematiche relative all'integrazione di misure dirette posizionate tramite sistemi GNSS e dati telerilevati (termografia IR).

### Abstract

The study of space-time variations affecting the flux of gases through the soil in volcanic areas is one of the most diffused techniques in volcanic risk monitoring. La Fossa cone at Vulcano island (Aeolian Archipelago, South Mediterranean), affected by an intense fumarolic activity since its last eruptions (1888-1890), is one of the most studied volcanoes in the world with such a kind of methodologies. The present paper describes the evolution of the monitoring techniques during the last 30 years, with particular reference to the changes introduced after the advent of the modern geomatics. Particular attention is given in analysing the integration of direct measures, positioned by GNSS systems, and remote sensing (IR thermography).

### 1. Introduzione e descrizione dell'area di studio

Vulcano, facente parte dell'arcipelago delle Eolie, ha un'estensione di 22 km<sup>2</sup> ed è la più meridionale dell'arcipelago, distando non più di 20 km dalla costa settentrionale della Sicilia. L'isola, che topograficamente nel suo punto più alto (Monte Aria) s'innalza per circa 500 metri s.l.m., rappresenta solo una piccola parte di un vulcano che si estende fino a circa 1 km di profondità dal livello del mare. Presenta due depressioni calderiche, una a Sud denominata Caldera del Piano ed un a Nord, detta Caldera della Fossa, all'interno della quale sorge l'omonimo cratere. Un terzo edificio vulcanico, Vulcanello, si ubica alla sua estremità nord-occidentale ed è collegato col resto dell'isola da un caratteristico tombolo. L'ultima eruzione di Vulcano, avvenuta in tempi storici, si verificò nel biennio 1888-1890 e fu ampiamente descritta da Mercalli e Silvestri (1891). Da allora Vulcano ha manifestato una continua attività fumarolica, le cui manifestazioni principali si ubicano nel settore N-NE dell'orlo del Cono della Fossa.

Le variazioni areali e delle temperature del campo fumarolico sono state e sono tuttora oggetto di una intensa attività di ricerca e di monitoraggio ai fini di protezione civile, che ha avuto inizio a partire dai primi anni 80 del XX secolo (Carapezza et al., 1981). Nel corso di questi 35 anni le tecniche di acquisizione di dati di posizione hanno subito una notevole evoluzione, passando dalle strumentazioni di tipo ottico-meccanico alle misure EDM ed ai sistemi GPS prima, e GNSS in seguito. Nel contempo si è verificato un notevole sviluppo dei sistemi di *remote sensing*, con particolare riferimento alla termografia infrarossa che trova oggi ampia applicazione nel monitoraggio dei campi fumarolici (Harris et al., 2000).

Tali profonde mutazioni nelle tecniche di geo-localizzazione hanno ingenerato una serie di problematiche nell'integrazione tra i primi dati, acquisiti con metodologie topografiche classiche basate su inquadramenti e sistemi di riferimento locali, e posizionamenti effettuati con metodologie quali GPS o più in generale GNSS, che utilizzano inquadramenti e sistemi di riferimento di tipo globale. Inoltre, il peculiare assetto geo-ambientale che caratterizza le aree vulcaniche rende spesso problematico l'utilizzo di tecniche di *remote sensing* per la misura delle temperature dei campi fumarolici, sia per le difficoltà legate al reperimento di punti di vista adeguati per le misure a terra sia per le interferenze dovute alla presenza in atmosfera di significative concentrazioni di gas che assorbono la radiazione infrarossa. Tali problematiche verranno analizzate più in dettaglio nei seguenti capitoli.

## **2. Integrazione di dati cartografici acquisiti con metodologie topografiche classiche e GNSS**

L'evoluzione spaziale del campo fumarolico del cono de La Fossa tra il 1983 ed il 1995 è stata descritta nel lavoro di Bukumirovic et al. (1997). I dati riguardanti lo sviluppo planimetrico delle fumarole furono acquisiti posizionandone il contorno attraverso trilaterazioni basate su rollina metrica per la misura delle distanze e di un takeometro per quelle angolari, utilizzando come punti di riferimento alcuni massi rappresentati sulla base cartografica in scala 1:1000 appositamente realizzata nell'ambito dei programmi di sorveglianza di Vulcano. Sebbene tali misure non tenessero conto degli errori introdotti dalla catenaria e dal mancato controllo dell'orizzontalità nelle misure di distanza, un successivo studio di Madonia et al. (2011) ha verificato che i conseguenti errori di posizione potevano essere considerati accettabili dal punto di vista del posizionamento delle fumarole su una base cartografica in scala 1:10.000, come ad esempio la CTR.

Il principale problema affrontato nel confrontare i dati della pubblicazione di Bukumirovic et al. (1997) con le successive misure di posizione acquisite tramite GPS è da riferirsi ai diversi sistemi di riferimento adottati ed alla mancata possibilità di procedere ad una conversione diretta tra i due. I dati pregressi erano infatti riferiti al sistema Gauss Boaga, ma la loro migrazione verso il WGS1984 risultava impossibile in quanto l'isola di Vulcano ricade in un'area per la quale le formule empiriche di conversione utilizzate dai programmi di uso corrente (quali Traspunto o CartLab) non trovano un campo di validità, restituendo trasformazioni affette da errori compresi tra decine e centinaia di metri, variabili in maniera pseudo-casuale anche in un'areale ristretto come quello dell'isola di Vulcano. Risultava inoltre impossibile una nuova georeferenziazione delle mappe originali, acquisendo tramite GPS punti rappresentati in carta e visibili sul terreno, in quanto le mappe originali coprivano un'area caratterizzata dalla totale assenza di manufatti e/o di elementi fisiografici notevoli identificabili senza ambiguità (Fig. 1).

Si decise quindi di procedere modellizzando la variazione areale dell'errore di trasformazione da Gauss Boaga a WGS 1984 attraverso il posizionamento GPS di punti notevoli visibili sul terreno e rappresentati sulla CTR 1:10.000, ed applicando quindi tale fattore empirico di correzione alle vecchie cartografie del campo fumarolico. Tutti i dettagli del metodo seguito sono riportati nella pubblicazione di Madonia et al. (2011), alla quale rinviamo i lettori interessati. Ciò che va rimarcato in questa sede è che tale correzione è stata resa possibile da un fattore casuale, ossia dalla sussistenza nell'area del cono de La Fossa di un gradiente spaziale dell'errore di trasformazione regolare e quindi rappresentabile analiticamente da un algoritmo statistico. In altre zone dell'isola di

Vulcano tale errore variava in maniera del tutto irregolare, impedendo l'implementazione di algoritmi di correzione basati su criteri di interpolazione.



*Figura 1 - Il cratere dell'eruzione 1888-90 del cono de La Fossa (isola di Vulcano) ripreso da Sud. Si noti la totale assenza di elementi fisiografici notevoli da utilizzare come caposaldi di riferimento per rilievi topografici.*

### **3. Integrazione di misure dirette e dati telerilevati: problematiche e prospettive**

La misura della temperatura di un campo fumarolico può essere effettuata attraverso misure dirette, basate su sensori termometrici infissi nel suolo ad una determinata profondità, ovvero attraverso telemisure basate fondamentalmente sulla emissione nel campo dell'infrarosso termico. Le prime presentano il vantaggio di fornire valori diretti, sono localizzabili con precisione attraverso un rilievo GPS, ma ovviamente sono rappresentative di un singolo punto ed hanno quindi bisogno di molte ripetizioni per caratterizzare correttamente le superfici esalanti. Queste misure implicano inoltre che gli operatori e gli strumenti siano a stretto contatto con i gas emessi, costituiti in larga parte da vapore acqueo associato però a composti fortemente corrosivi (HCl, HF, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), comportando la necessità di adottare idonee misure di protezione ambientale sia per il personale addetto che per la salvaguardia delle strumentazioni (Fig. 2). Trattandosi di misure *in situ* la temperatura rilevata è da attribuirsi al trasporto di calore di tipo conduttivo ed advettivo (suolo riscaldato da flusso di vapore).

Di contro, le misure da telerilevamento consentono la rappresentazione simultanea di porzioni anche vaste dei campi fumarolici, senza la necessità di doversi avvicinare alle aree critiche dal punto di vista delle condizioni ambientali, favorendo la sicurezza di operatori e strumentazione. Numerose però sono le controindicazioni legate a questo genere di misure: a) La temperatura misurata non è quella reale dal suolo ma quella apparente influenzata non solo dalle caratteristiche

fisiche dell'atmosfera interposta tra punto di emissione e sensore (in termini di pressione, temperatura, umidità), ma anche dalla presenza di gas come la CO<sub>2</sub>, tipicamente emessa in quantità significative dai campi fumarolici, che assorbendo radiazione infrarossa tende a falsare le misure.



Figura 2 - Misure dirette nel campo fumarolico del cono de La Fossa. Si noti il sistema a prismi in sinistra della fotografia completamente avvolto dalle emissioni acide provenienti dalle fumarole.

Inoltre, la temperatura registrata con le metodologie termografiche si riferisce al trasporto di calore di tipo radiativo, ed è quindi fortemente influenzata dalla presenza del vapore ad alta temperatura che, condensando in atmosfera, può creare un effetto barriera che impedisce la corretta lettura dei valori riferibili al punto di emissione (Fig. 3).

Infine, se si considera che l'effettuazione di misure da piattaforme aeree (elicotteri) è limitata ad eventi occasionali per ragioni essenzialmente economiche, la ripresa da terra presenta come problematica di difficile risoluzione la rettificazione delle immagini termografiche acquisite per la restituzione di mappe georeferenziali *strictu sensu*.

Un problema ulteriore che riguarda entrambe le metodologie, dirette o indirette, è quello della corretta gestione delle variazioni verticali di temperatura. La termografia infrarossa è in grado di registrare esclusivamente la temperatura superficiale del suolo, mentre con le misure dirette è possibile rilevare il regime termico sino a qualche decina di centimetri di profondità (a seconda delle caratteristiche di penetrabilità del terreno). Le misure indirette sono quindi inevitabilmente molto più soggette di quelle dirette al disturbo legato al riscaldamento per irraggiamento solare del suolo, che in terreni vulcanici non soggetti ad attività fumarolica può superare anche i 50°C durante la stagione estiva, mascherando quindi un possibile segnale endogeno. Le misure dirette consentono invece di superare il problema, in quanto già a 30 cm di profondità l'effetto dell'irraggiamento solare è estremamente ridotto. Ciò che non è superabile neanche dalle misure dirette è invece la presenza di croste impermeabili formatesi in seguito ad alterazione idrotermale (Fulignati et al., 2002), che possono impedire nelle ultime decine di centimetri la migrazione verso la superficie topografica del vapore idrotermale, determinando condizioni di apparente assenza di attività fumarolica che rimane invece confinata poco sotto il piano di campagna (Fig. 4).



Figura 3 - Vapore di origine magmatico-idrotermale che, condensando in atmosfera, crea una barriera termica mascherando i punti di emissione, impedendo la corretta esecuzione di rilievi termografici in spettrometria IR.

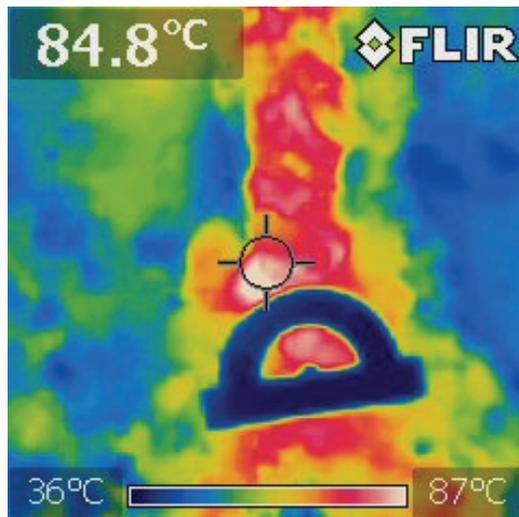


Figura 4 - Immagine termografica di una fumarola che si apre lungo una frattura della crosta di alterazione che ricopre vaste superfici del cono de La Fossa. Si noti come la massima temperatura di emissione si ha nella parte beante della frattura, mentre a brevissima distanza (il goniometro di riferimento misura in larghezza 11 cm) la temperatura del suolo presenta valori riferibili al normale irraggiamento solare (la termofoto è stata scattata nel mese di agosto 2013). Questo fenomeno è determinato dalla bassa permeabilità della crosta di alterazione che previene l'emissione in atmosfera del vapore acqueo.

**Riferimenti bibliografici**

- Bukumirovic T., Italiano F, Nuccio P.M. (1997), “The evolution of a dynamic geological system: the support of a GIS for geochemical measurements at the fumarole field of Vulcano, Italy”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 79:253-263
- Carapezza M., Nuccio P.M., Valenza M. (1981), “Genesis and evolution of the fumaroles of Vulcano (Aeolian Islands, Italy): A Geochemical Model”, *Bulletin of Volcanology*, 44-3:547-563
- Fulignati, P., Sbrana, A., Luperini, W., Greco V. (2002), “Formation of rock coating induced by the fumarole plume of the passively degassing volcano of La Fossa (Vulcano Island, Italy)”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115:397-410
- Harris, A.J.L., Maciejewski, A.J.H. (2000), “Thermal surveys of the Vulcano Fossa fumaroles field 1994–1999: evidence for fumarole migration and sealing”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 102:119-147
- Madonia P., Pecoraino G., Sammarco C. (2011), “Georeferenced cartography dataset of the La Fossa crater fumarolic field at Vulcano Island (Aeolian Archipelago, Italy): conversion and comparison of data from local to global positioning methods”, *Annals of Geophysics*, 54, doi 10.4401/ag-4941
- Mercalli G., Silvestri O. (1891), “Le eruzioni dell’isola di Vulcano incominciate il 3 Agosto 1888 e terminate il 22 Marzo 1890. Relazione scientifica, 1891”, *Annali Ufficiali del Centenario Meteorologico e Geodinamico*, 10 (4): 1-216