Eruzioni pliniane: descrizione delle correnti piroclastiche attraverso simulazioni numeriche.

Il Vesuvio entra nella storia della vulcanologia con l'eruzione del 79 d.C. Essa fu descritta in modo molto accurato nella lettera inviata a Tacito da Plinio il Giovane **[1]**, che da Miseno (distante 20 km dal vulcano) la poté osservare in tutto il suo sviluppo. <<Mi chiedi che io ti esponga la morte di mio zio (Plinio il Vecchio), per poterla tramandare con una maggiore obiettività ai posteri**…** Era a Miseno e teneva direttamente il comando della flotta. Il 24 agosto, verso l'una del pomeriggio, mia madre lo informò che spuntava una nube dal Vesuvio fuori dell'ordinario sia per grandezza sia per aspetto**…** Si elevava una nube che nessun altra pianta meglio del pino ne poteva riprodurre la figura e la forma. Infatti, slanciatasi su come se si sorreggesse su di un altissimo tronco, si allargava in quelli che si potrebbero chiamare dei rami**…** La cenere cascava sulle navi (Plinio il Vecchio si avvicinò al Vesuvio con la flotta, NdA) sempre più calda e più densa, vi cadevano anche pomici e pietre nere corrose e spezzate dal fuoco, e improvvisamente essi si ritrovarono in un bassofondo mentre una frana della montagna impediva di accostarsi al litorale**…** Nel frattempo dal Vesuvio risplendevano in parecchi luoghi delle larghissime strisce di fuoco e degli incendi che emettevano alte vampate, i cui bagliori e la cui luce erano messi in risalto dal buio della notte**…** Altrove era già giorno, là invece (intorno al Vesuvio, NdA) era una notte più nera e più fitta di qualsiasi notte, quantunque fosse mitigata da numerose fiaccole e da luci di varia provenienza**…** Quando riapparve la luce del sole (era il terzo giorno da quello iniziale, NdA) il suo (di Plinio il Vecchio) cadavere fu trovato intatto, illeso e rivestito degli stessi abiti che aveva indossato: la maniera in cui il suo corpo si presentava faceva più pensare ad uno che dormisse che non ad un morto>>. Intere città, tra le quali Pompei ed Ercolano, furono distrutte. I prodotti eruttati dal Vesuvio ricoprirono i campi e riempirono le vie, le case e i templi. Studi più recenti, qualitativi e quantitativi (simulazioni numeriche), consentono di descrivere in modo più dettagliato la dinamica delle eruzioni pliniane sostenute e collassanti, nonché delle correnti piroclastiche associate a quest'ultimo tipo di eruzioni.

Fino ad oggi, sono stati compiuti numerosi studi sull'eruzione del Vesuvio del 79 d.C., e su tante altre eruzioni pliniane che sono avvenute in giro per il mondo. Ciò ha permesso di giungere ad una descrizione qualitativa e completa delle eruzioni pliniane sostenute **[2]** e collassanti **[3]**. Queste eruzioni sono caratterizzate dallo sviluppo, sopra il condotto vulcanico, di una colonna eruttiva costituita da frammenti solidi (piroclasti) dispersi in un flusso gassoso turbolento. La colonna è espulsa verticalmente a getto (**Fig. 1**) dal condotto con una velocità compresa tra 350 km/h e 1000 km/h, una temperatura media interna di circa 900°C, e una densità maggiore di quella dell'aria (~ 1,20 kg/m^3). In questa regione, la colonna è soggetta ad una rapida accelerazione, poiché i gas si espandono a causa della diminuzione di pressione che ha luogo durante la fuoriuscita dal condotto

[2]. In seguito, mentre risale sotto la spinta dei gas, la colonna ingloba altri gas dall'aria circostante a temperatura più bassa. Questo scambio termico, che avviene nella regione di convezione (Fig. 1), causa una notevole diminuzione della densità della colonna. A seconda dell'entità di tale diminuzione, la densità può rimanere più alta o diventare più bassa rispetto a quella dell'aria: ciò porta a due possibili evoluzioni della colonna. Nella parte sinistra di Fig. 1, la densità della colonna è diventata minore di quella dell'aria. La colonna continua a risalire per convezione galleggiando nell'aria, e al termine della spinta si slarga lateralmente a ombrello, simmetrico in assenza di venti. Quando poi l'attrazione dei piroclasti verso il basso prevale sul trasporto all'interno della colonna dovuto alla turbolenza gassosa, i piroclasti dispersi cadono verticalmente al suolo formando depositi da caduta. Nella parte destra di Fig. 1, invece, la densità della colonna è rimasta maggiore di quella dell'aria. Una parte di colonna collassa in una fontana piroclastica, dalla quale ha origine una corrente piroclastica al momento dell'impatto con le pendici del vulcano. L'altra parte di colonna continua a risalire come in precedenza, ma poi si slarga lateralmente a forma di fungo, eventualmente simmetrico.

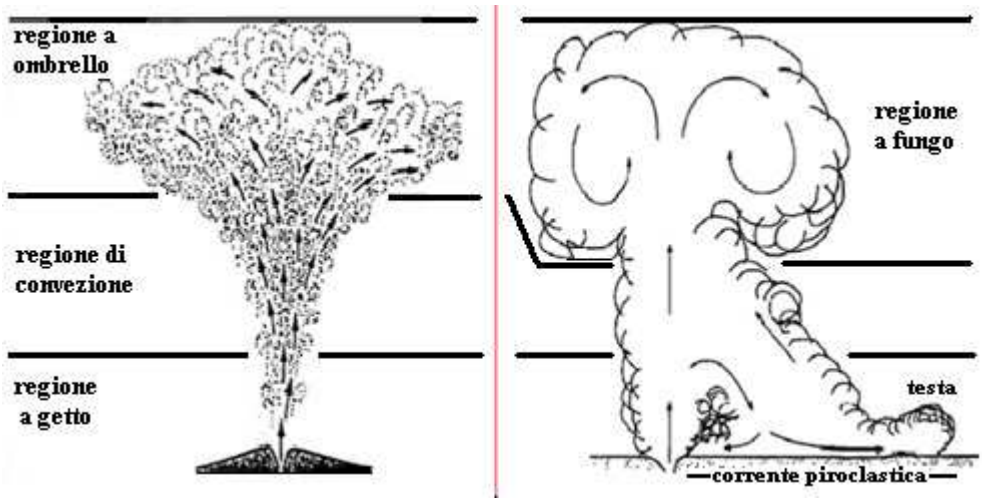


Fig. 1: le due possibili evoluzioni della colonna piroclastica.

Di recente, le correnti piroclastiche sono state descritte come una miscela turbolenta di gas in cui è trascinato un gran numero di piroclasti di tipo diverso, eterogenea nello spazio e nel tempo, ad alta temperatura (600°C ÷ 800°C), che dissipa energia e avanza con una velocità compresa tra 100 km/h e 300 km/h [3]. Nella successiva Fig. 2 è rappresentata la struttura interna di una corrente ad un determinato istante. Dalla figura si vede che è possibile dividere orizzontalmente la corrente in tre parti: coda, corpo e testa. La coda è la parte più sottile, in cui i piroclasti sono trascinati da un flusso gassoso debolmente turbolento. Il corpo presenta uno spessore maggiore: in esso i piroclasti sono trascinati da un flusso gassoso con una moderata turbolenza. La testa è la zona più spessa: qui, i piroclasti sono trascinati da un flusso gassoso che presenta una turbolenza elevata

con formazione di vortici sulla cresta. La differenza di spessore tra la testa e il resto della corrente è dovuta all'aria esterna che è inglobata nella corrente dalla testa. Essendo la temperatura esterna molto più bassa, lo scambio termico conseguente è tale da provocare nella testa una forte espansione dei gas inglobati. L'aria mescolata nella testa si trasferisce poi al corpo diluendosi ulteriormente: ciò favorisce la formazione di un pennacchio galleggiante al di sopra. Alla coda, perciò, arriva soltanto una piccola quantità dell'aria entrata inizialmente.

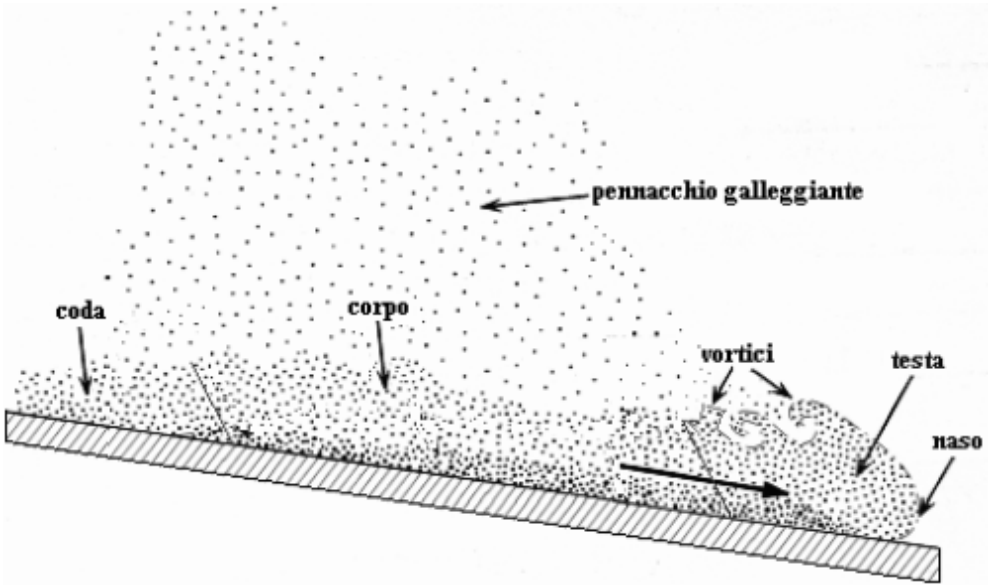


Figura 2: la struttura interna delle correnti piroclastiche.

Analizzando la corrente piroclastica verticalmente ad una distanza fissa dal cratere a tempi diversi, invece, si distinguono due parti **[3]**. Nella parte superiore di **Fig. 3** il moto dei piroclasti è turbolento, mentre in quella inferiore è controllato dal tipo e dal numero di urti tra di essi. Mentre le correnti scorrono lungo le pendici del vulcano, i piroclasti precipitano in quantità sempre maggiore dalla parte superiore a quella inferiore (sedimentazione). Tale processo avviene quando le forze di contatto col terreno e quella gravitazionale superano la forza di trascinamento dei piroclasti dovuta alla turbolenza della corrente. La parte superiore, perdendo solidi, diventa sempre più diluita, mentre quella inferiore diventa sempre più ricca in solidi. Il risultato del processo è la formazione di uno strato (**Fig. 3**) alla base della corrente, dove lo scorrimento dei piroclasti dipende dalla loro concentrazione. Superata una certa concentrazione, da questo strato avviene la deposizione per accumulo verticale dei piroclasti in successioni regolari con diametro crescente o decrescente. Se la concentrazione massima è bassa, il deposito che si forma risulta stratificato. Invece, il deposito risultante è di tipo massivo, cioè senza strutture, se la concentrazione massima è alta. Le differenze orizzontali e verticali evidenziate nella corrente si riscontrano anche nei depositi associati: infatti,

anch'essi presentano orizzontalmente diverse tipologie di prodotti, e verticalmente differenti strutture locali.

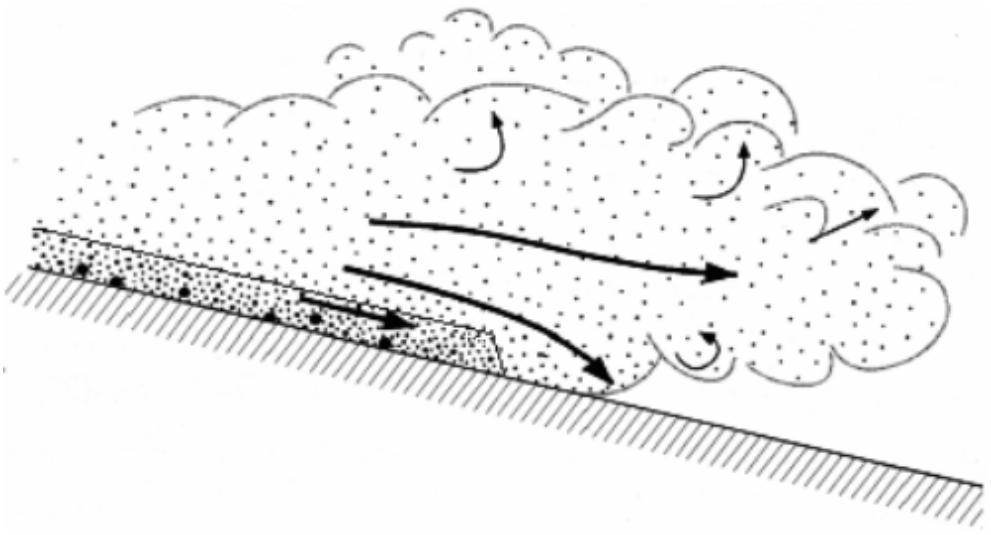


Figura 3: la formazione dello strato inferiore alla base delle correnti piroclastiche.

L'elevata temperatura e la grande velocità di avanzamento dei flussi piroclastici sono condizioni sperimentali che non permettono lo studio di questi sistemi *in situ*. Di conseguenza, per formulare ipotesi sulla loro dinamica interna sono necessarie analisi *in remoto*, per esempio facendo ricorso a riproduzioni al computer, che si sono sviluppate negli ultimi trent'anni **[4]**. Queste riproduzioni prevedono l'uso di programmi che permettono di effettuare simulazioni numeriche di flussi turbolenti ad alta temperatura per analizzare l'evoluzione delle fontane e delle correnti piroclastiche. In tal modo, diventa possibile studiare il comportamento di gas e piroclasti in regime turbolento, il moto dei vortici prodotti dalla turbolenza, le differenti modalità di scorrimento dovute a diversi valori di concentrazione dei piroclasti, e i processi di formazione dei depositi stratificati e massivi. La modellizzazione dell'evoluzione dei flussi piroclastici, turbolenti e quindi eterogenei nello spazio e nel tempo, prevede l'analisi numerica delle trasformazioni orizzontali e verticali. Attraverso specifici programmi di grafica si può poi fornire una rappresentazione dei dati ricavati, riportando in grafici bidimensionali le isolinee (linee di contorno tra valori uguali) del logaritmo della concentrazione dei piroclasti a tempi diversi in funzione dell'altezza e della distanza dal cratere (**Fig. 4**). Queste rappresentazioni della dinamica dei flussi mostrano in orizzontale una colonna collassante da cui ha origine una corrente piroclastica, divisibile in base allo spessore in coda, corpo, e testa, che risulta essere la parte più espansa. Al passare del tempo, sopra la fontana, così come sopra la coda e il corpo della corrente, si osserva la formazione di pennacchi galleggianti. In verticale, invece, è possibile notare una netta stratificazione della concentrazione dei piroclasti, che aumenta scendendo verso il basso. La parte superiore è, perciò, quella più diluita ed espansa

(dallo strato blu a quello giallo), mentre la parte inferiore è quella più sottile e concentrata (dallo strato giallo a quello rosso). Nel tempo, avviene che sempre più piroclasti sedimentano dalla parte superiore a quella inferiore. Si ha, quindi, lo sviluppo di uno strato inferiore sottile, in cui la concentrazione dei piroclasti cresce nel tempo, prima velocemente e poi lentamente. Quando la concentrazione raggiunge valori intorno al 10%, si formano depositi stratificati, mentre quando si attesta attorno al 60% si formano quelli massivi. Da questa breve analisi appare evidente l'utilità delle simulazioni dei flussi piroclastici: arricchire e migliorare l'illustrazione qualitativa esposta nelle **Fig. 1-3**, giungendo così ad una descrizione quantitativa.

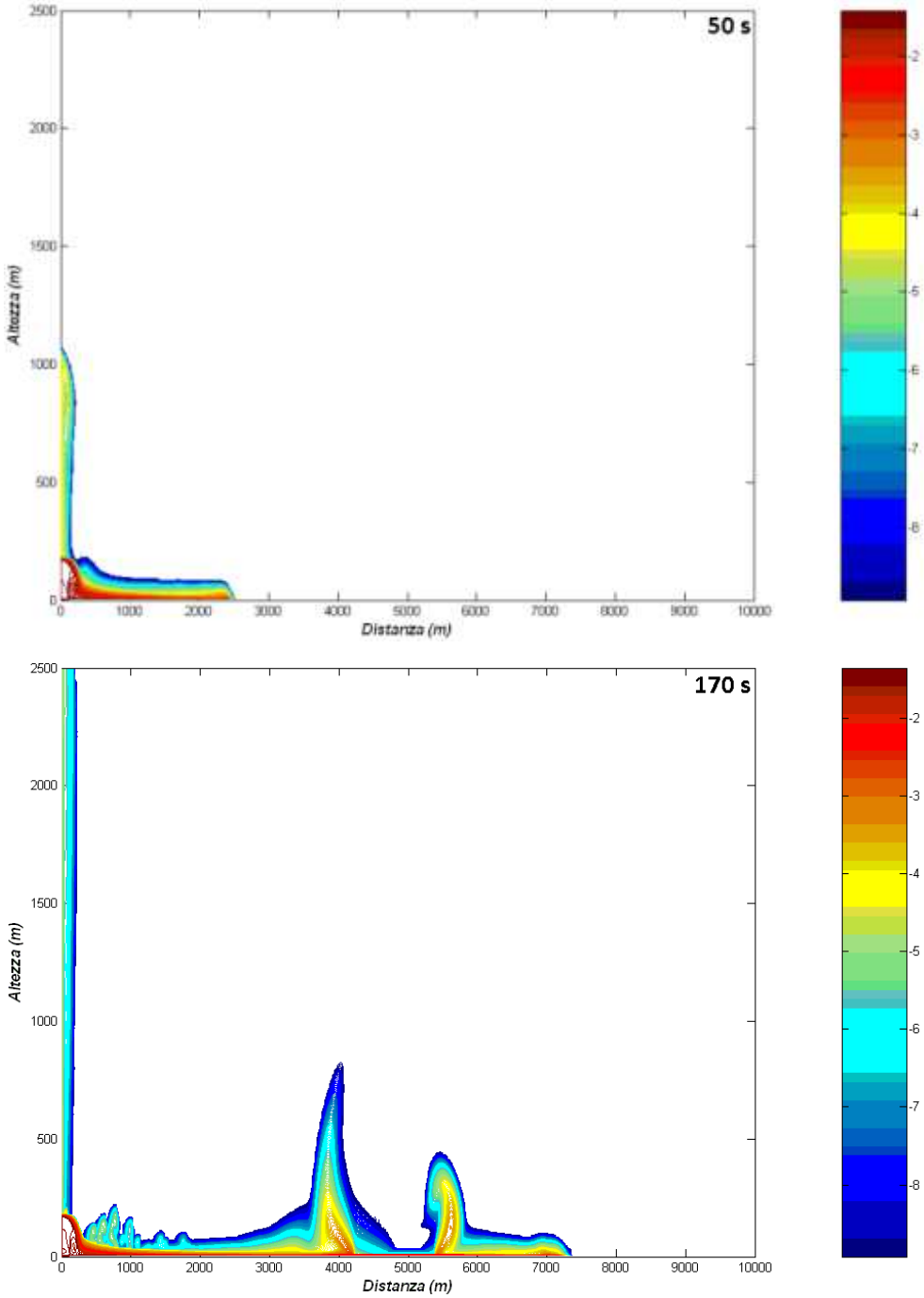


Figura 4: Istantanee a 50 s e a 170 s di una simulazione numerica delle correnti piroclastiche.

La descrizione quantitativa della dinamica delle eruzioni pliniane ha permesso di spiegare in modo più articolato la distribuzione dei danni provocati a Pompei dalla caduta dei piroclasti e dall'impatto delle correnti piroclastiche durante l'eruzione del Vesuvio del 79 d.C. Pompei rimase sepolta sotto tre metri di piroclasti che, scagliati in alto sopra il cratere, ricaddero al suolo come una nevicata **[5]**. Osservando diversi muri successivi della città dall'alto verso il basso, essi risultano progressivamente meno danneggiati quando sono vicini, mentre l'intensità della distruzione è più elevata quando sono abbastanza lontani (**Fig. 5**). All'impatto con i muri, la parte inferiore delle correnti, più concentrata in piroclasti, portò al loro abbattimento. La serie di impatti con muri vicini successivi provocò una diminuzione di energia cinetica: ciò spiega perché il muro w1 è più danneggiato di w2, e i muri w3, w4, e w5 sono progressivamente meno danneggiati (**Fig. 5**). In spazi sufficientemente ampi, in cui non erano presenti ostacoli (come tra w2 e w3), invece, si ebbe una precipitazione maggiore dei piroclasti verso la parte inferiore delle correnti. Al momento dell'impatto col muro w3, perciò, la parte inferiore era diventata più concentrata e più spessa di quanto non lo fosse all'impatto con il muro w2: ciò chiarisce come mai w2 è meno danneggiato di w3 **[6]**. Le correnti che colpirono la città di Pompei, infine, determinarono maggiori danni e vittime nelle zone settentrionali più vicine al vulcano: ciò non si verificò allo stesso modo nella parte meridionale della città verso il mare. Queste correnti avvolsero la città ricoprendola di cenere (piroclasti di piccola dimensione), la quale soffocò gli abitanti in un tempo così breve che essi morirono velocemente per asfissia. L'impatto delle correnti con le persone fu così rapido da non carbonizzarle, lasciandole praticamente intatte. In alcuni posti, però, è possibile che le correnti avessero un'energia cinetica sufficiente da mutilare i corpi a causa, probabilmente, della canalizzazione all'interno di alcuni edifici o corridoi stretti.

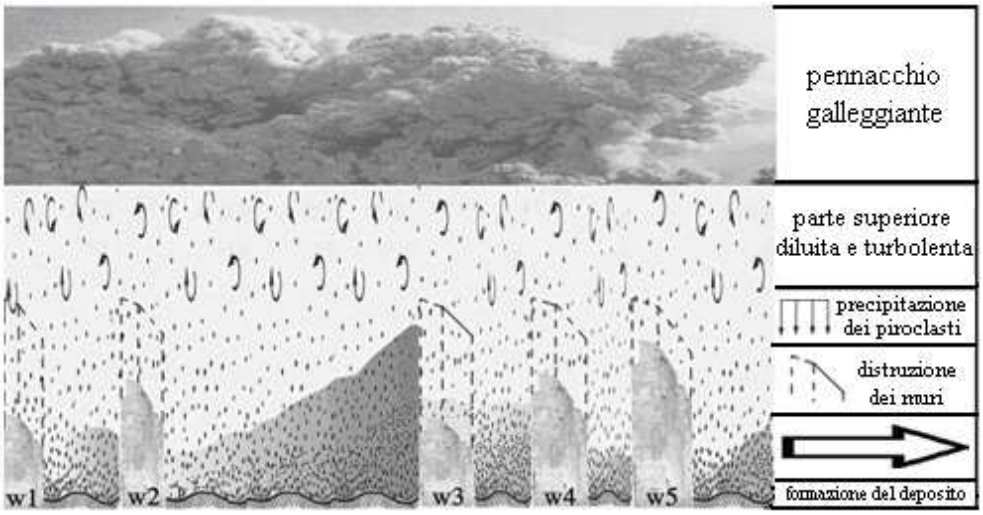


Figura 5: l'impatto di una corrente piroclastica con i muri della città di Pompei.

Bibliografia

[1] Plinio il Giovane, “Eruzione del Vesuvio e morte di Plinio il Vecchio a Stabiae nel 79 d. C.”, Epistolario, 6, 16, 104 d.C.

[2] Valentine G. “Eruption column physics”, “From Magma to Tephra”, A. Freundt and M. Rosi, Elsevier, 91-137, 1998

[3] Branney M., and Kokelaar P. “Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites”, Geol. Soc. Mem., 27, 1-14, 2002.

[4] Lepore S., and Scarpati C. “New developments in describing the dynamics of volcanic pyroclastic density currents through numerical simulations of multiphase flows”, Solid Earth Discuss., 4, 173-202, 2012.

[5] Giacomelli L., e Scandone R. “Vesuvio. Pompei ed Ercolano. Eruzioni ed escursioni”, BE-MA, 2001.

[6] Luongo G., Perrotta A., and Scarpati C. “Impact of 79 AD explosive eruption on Pompeii, I. Relations amongst the depositional mechanisms of the pyroclastic products, the framework of the buildings and the associated destructive events”, J. Volcanol. Geotherm. Res., 126, 201-223, 2003.