

A. CECCHETTI (*), P. MARIANELLI (*), A. SBRANA (*)

L'ERUZIONE DI ASTRONI (CALDERA DEI CAMPI FLEGREI): DATI PRELIMINARI DALLO STUDIO DI INCLUSIONI SILICATICHE

Riassunto - Vengono forniti alcuni risultati preliminari relativi ai prodotti del vulcano di Astroni (Campi Flegrei), ottenuti principalmente dallo studio delle inclusioni silicatiche nei fenocristalli di pirosseno. I campioni studiati sono rappresentativi della frazione juvenile più evoluta ($DI > 80$) emessa dal vulcano di Astroni. La composizione della matrice vetrosa può essere messa in relazione a un processo di mescolamento tra il fuso più evoluto presente nel sistema magmatico e un fuso a grado evolutivo minore. Lo studio delle inclusioni silicatiche dimostra che nell'eruzione sono coinvolti magmi trachitici e fonolitici evoluti, aventi temperature che variano da 800 a 880°C e bassi contenuti in H_2O .

Parole chiave - Campi Flegrei, Astroni, inclusioni silicatiche.

Abstract - *The Astroni eruption (Campi Flegrei): preliminary data from a melt inclusion study.* In this paper preliminary data, based mainly on melt inclusions in pyroxene phenocrysts, are presented. Studied samples represent the more evolved ($DI > 80$) juvenile fraction erupted from Astroni volcano. Glass matrix composition can be related to a mixing process between the more evolved silicate melt and a less evolved melt. This melt inclusion study demonstrate that in this eruption are involved fonolitic and trachytic magmas with temperature ranging from 800 to 880°C and low H_2O content.

Key words - Campi Flegrei, Astroni, silicate melt inclusions.

INTRODUZIONE

Il vulcano di Astroni è ubicato nell'area di massima concentrazione di centri eruttivi del periodo più recente di attività della caldera flegrea. L'edificio vulcanico si è formato in un intervallo temporale tra le eruzioni di Solfatara e Averno, aventi età radiometriche rispettivamente di 4,1 e 3,8 ka (Di Vito *et al.*, 1999). Nella successione vulcanica di Astroni sono state distinte sette unità legate ad eventi separati da intervalli di riposo (Isaia *et al.*, 2003). Astroni è un anello di ceneri (tuff-ring) molto ben conservato formatasi a seguito dell'attività costruttiva di eruzioni freatomagmatiche con subordinate effusioni laviche. Il vulcano è costituito prevalentemente da depositi di surge piroclastico con subordinati livelli pomicei di caduta (Rosi & Sbrana, 1987).

In questo lavoro vengono mostrati alcuni dati di temperatura, composizione, e contenuto in volatili del magma in condizioni pre-eruttive.

TECNICHE ANALITICHE

I campioni di roccia totale sono stati polverizzati, sottoposti a fusione e raffreddati secondo la metodologia proposta da Claisse (1957) per essere analizzati in XRF (spettrometro ARL 9400 XP, Dipartimento di Scienze della Terra Pisa). Per il ricalcolo delle concentrazioni in elementi maggiori è stato utilizzato l'algoritmo di Lucas-Tooth & Price (1961).

Sezioni lucide di minerali, vetri e inclusioni silicatiche sono state analizzate in microanalisi. Elementi maggiori, S e Cl sono stati determinati tramite un sistema microanalitico a Dispersione di Energia SEM-EDS presso il Dipartimento di Scienze della Terra di Pisa utilizzando una strumentazione Philips XL30 equipaggiata con un sistema microanalitico EDAX DX4. Le condizioni operative impiegate sono: 20 kV di tensione di accelerazione, 10^{-10} A di corrente di fascio, diametro dello spot 200-500 nm e tempo di conteggio effettivo di 100 sec. I vetri sono stati analizzati utilizzando un'area di scansione di circa $100 \mu m^2$ per ridurre la diffusione degli elementi leggeri. Su ogni singola inclusione sono state eseguite 3-4 analisi per verificare l'omogeneità dell'inclusione.

Prima di ogni sessione analitica sono stati analizzati standards naturali di minerali e vetri di riferimento (Marianelli & Sbrana, 1998) per controllare la qualità delle analisi.

Tramite spettrometria FTIR è stato determinato il contenuto in H_2O nelle inclusioni vetrose. È stato utilizzato uno spettrometro Nicolet 560 Magna collegato ad un microscopio Olympus presso il laboratorio di inclusioni fluide del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pisa. Le concentrazioni sono state calcolate secondo la legge di Beer-Lambert (Ihinger *et al.*, 1994). Prima di essere sottoposte ad analisi in spettrometria IR le inclusioni sono state scoperte e lucidate su due facce parallele. Lo spessore dell'inclusione vetrosa analizzata è stato misurato utilizzando un microscopio ottico con un errore di $\pm 3-5$ microns.

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, via S. Maria 53, Pisa

PRESENTAZIONE DATI

I campioni studiati provengono dal bordo craterico occidentale del vulcano costituito da livelli stratificati formati da ceneri fini, grossolane e lapilli pomicei con strutture duniformi e lenti subordinate di bombe e lapilli. In particolare è stata campionata la settima unità nella ricostruzione di Isaia *et al.* (2003). La frazione juvenile di questa unità ha grado di vescicolarità e composizione (DI da 72 a 80, D'Antonio *et al.*, 2001) variabili. In questo lavoro sono stati studiati vitrofiri scarsamente vescicolati, ricchi in fenocristalli di feldspato. Il campione studiato è caratterizzato da una composizione evoluta sottosatura, con un DI maggiore di 80 e un contenuto in nefelina normativa di 7. Possono essere classificati come fonoliti utilizzando il diagramma TAS (Le Bas *et al.*, 1986), e come alcali-trachiti con il diagramma Ne normativa vs. DI proposto da Armienti *et al.* (1983) per la classificazione dei prodotti flegrei (Fig. 1). La roccia totale studiata rappresenta il termine più evoluto della frazione juvenile presente nella settima unità.

Osservazioni petrografiche in sezione sottile hanno evidenziato una struttura porfirica in cui si ritrovano fenocristalli (con dimensioni fino al centimetro) e microfenocristalli in una matrice vetrosa (Fig. 2). La composizione del vetro è omogenea, come evidenziato da vari punti di micronalisi in porzioni diverse del campione, e cade nel campo delle fonoliti del diagramma TAS. La matrice vetrosa è più evoluta della

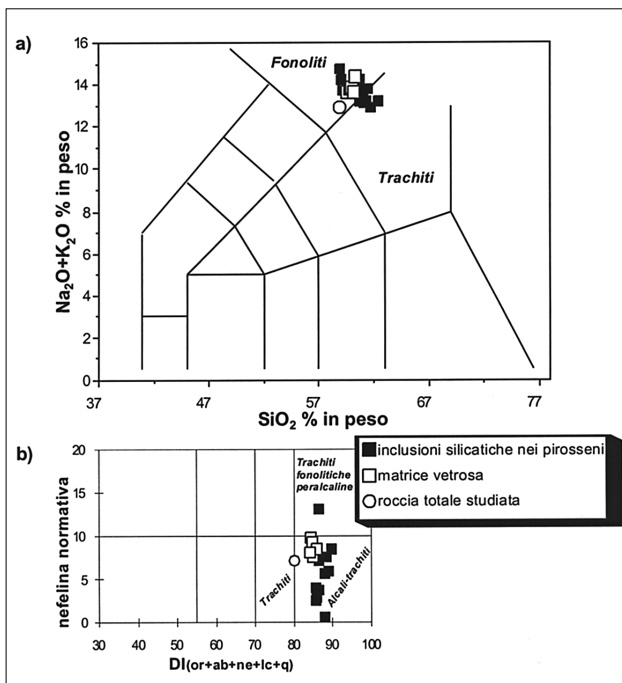


Fig. 1 - Composizione dei prodotti studiati: a) diagramma classificativo TAS (Le Bas *et al.*, 1986) b) diagramma classificativo nefelina normativa-indice di differenziazione (DI = or + ab + ne + lc + q) (Armienti *et al.*, 1983).

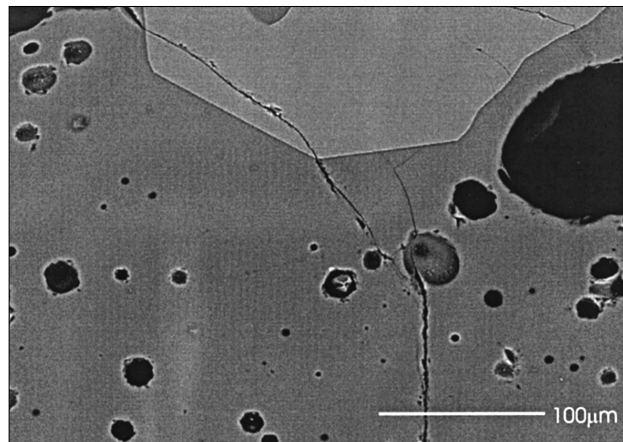


Fig. 2 - Immagine SEM da elettroni retrodiffusi. Notare l'assenza di microliti nella massa di fondo scarsamente vescicolata. La lunghezza della barra corrisponde a 100 μm.

roccia totale ed è caratterizzata da CaO < 2,5% in peso, Na₂O + K₂O > 13% in peso, Cl = 0,7% in peso, ne normativa = 8-9, DI = 85 (Fig. 1, Tab. 1).

La paragenesi dei vitrofiri è dominata, in ordine di abbondanza, da K-feldspato non zonato (or₇₈₋₈₀), plagioclasio spesso zonato (nucleo an₈₂₋₅₉ e bordo an₆₉₋₅₀), da clinopirosseno di composizione prevalentemente salitica (fs₁₂₋₁₈) e da biotite (Tab. 2, Fig. 3). Sono presenti fasi minerali accessorie rappresentate da apatite e minerali opachi.

Nel clinopirosseno sono presenti inclusioni silicatiche primarie, di forma subsferica, con dimensioni fino a 50 μm, costituite da vetro marrone e bolla di contrazione. La composizione delle inclusioni varia da trachite a fonolite (Fig. 1). Le inclusioni presentano un contenuto in CaO = 1,5-2,5% in peso, alto contenuto in Cl (0,9% in peso), DI variabile tra 85 e 89, contenuto in ne normativa generalmente inferiore a quello della matrice.

L'elaborazione degli spettri acquisiti mediante spettrometria IR ha consentito la determinazione del contenuto totale in H₂O delle inclusioni silicatiche. La concentrazione è stata calcolata in corrispondenza della banda di assorbimento per l'acqua a 3550 cm⁻¹ utilizzando un coefficiente di assorbività molare (ε) di 70, come proposto da Silver & Stolper (1989) ed una densità di 2400 g/l (Rosi *et al.*, 1999). I risultati indicano contenuti in H₂O totale poco variabili (2-2,6% in peso) per le diverse inclusioni vetrose (Tab. 3). Negli spettri raccolti il contenuto in CO₂ è inferiore al limite di detezione (50-100 ppm), non essendo rilevabili i picchi delle bande di assorbimento caratteristiche del C.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Questo lavoro si basa principalmente sullo studio delle inclusioni silicatiche nei fenocristalli di pirosseno. Le inclusioni silicatiche primarie si formano durante la

Tab. 1 - Analisi chimiche rappresentative di inclusioni silicatiche, matrice vetrosa e roccia totale.

	MI 1	MI 4	MI 8	Matrice vetrosa	Roccia totale
<i>Analisi SEM-EDS</i>				<i>Analisi XRF</i>	
SiO ₂	60,80	60,65	60,93	59,54	58,90
TiO ₂	0,52	0,67	0,63	0,46	0,55
Al ₂ O ₃	18,58	18,12	19,55	19,10	19,63
FeO _{tot}	3,60	4,14	2,65	3,82	3,55
MnO	0,16	0,31	0,06	0,00	0,11
MgO	0,62	0,44	0,22	0,41	0,91
CaO	1,78	1,91	1,45	2,38	3,38
Na ₂ O	4,79	4,15	5,19	4,45	4,07
K ₂ O	8,28	8,87	8,44	9,27	8,79
P ₂ O ₅	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	0,12
Cl	0,84	0,75	0,85	0,58	<i>n.d.</i>
DI	86,2	85,4	88,8	85,3	80,5
ne	3,8	2,5	5,9	8,4	7,0
Composizione del minerale ospite					
wo	47,7	49,7	47,4		
en	38,5	34,6	39,5		
fs	13,8	15,7	13,1		

Le analisi sono normalizzate a 100. MI: inclusione silicatica; DI: indice di differenziazione (or + ab + ne + lc + q); ne: nefelina normativa; wo: wollastonite; en: enstatite; fs: ferrosilite. La composizione delle inclusioni silicatiche rappresenta la media di almeno tre analisi. La composizione della matrice vetrosa corrisponde alla media di almeno 8 analisi. nd: non determinato.

Tab. 2 - Analisi in EDS rappresentative delle principali fasi minerali.

	Plagioclasio		Feldspato	Clinopirosseno	Biotite
	Nucleo	Bordo			
SiO ₂	46,55	53,18	64,02	51,69	38,05
TiO ₂				0,44	6,22
Al ₂ O ₃	33,81	29,17	19,38	1,99	14,65
FeO _{tot}	0,72	0,52	0,21	8,13	15,79
MnO				0,4	
MgO				13,5	14,47
CaO	16,71	11,76	0,47	23,54	
Na ₂ O	1,92	4,26	2,16	0,31	
K ₂ O	0,29	1,11	13,76		10,82
wo				48,4	
en				38,6	
fs				13,0	
an	81,39	56,56	2,3		
ab	16,92	37,08	18,8		
or	1,68	6,36	78,9		

Tutte le analisi sono normalizzate a 100. Le analisi dei clinopirosseni sono calcolate sulla base di 6 ossigeni; le analisi dei plagioclasii sono calcolate sulla base di 8 ossigeni. wo: wollastonite; en: enstatite; fs: ferrosilite; an: anortite; ab: albite; or: ortose.

crescita dei cristalli (Roedder, 1984). La composizione delle inclusioni può essere assunta come rappresentativa di quella del fuso silicatico da cui il minerale ospite si è formato e quindi registrare diversi stadi evolutivi del magma che ha dato origine alla roccia finale. Dalla composizione del minerale ospite e del fuso in equili-

brio con questo (rappresentata dal vetro delle inclusioni) è stata stimata la temperatura di cristallizzazione applicando il geotermometro descritto da Cioni *et al.* (1999) per i prodotti del Vesuvio. Le temperature ottenute sulla base sia dell'equilibrio minerale/fuso, sia della composizione dell'inclusione (contenuto in CaO)

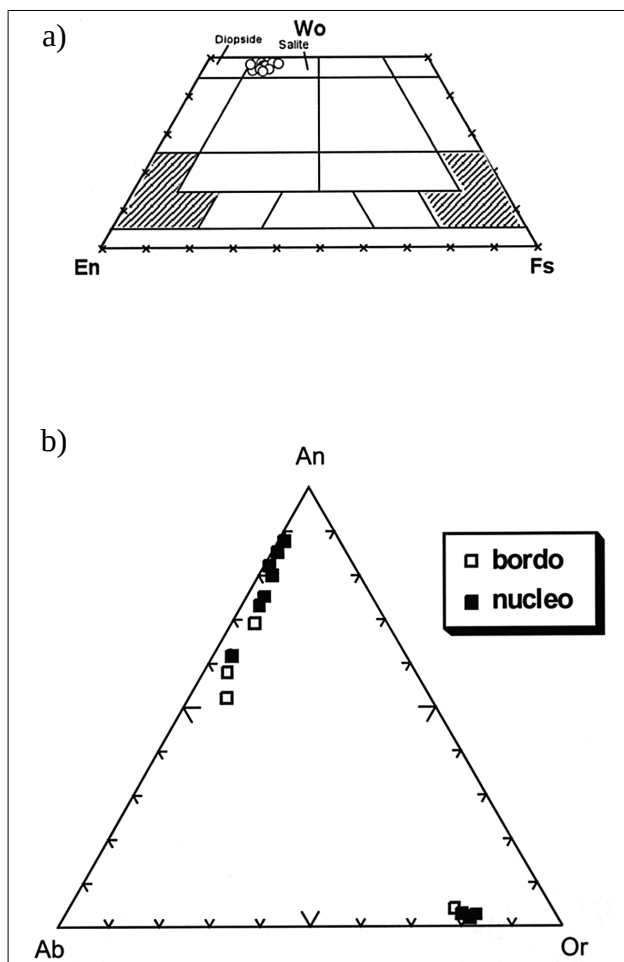


Fig. 3 - Diagrammi di classificazione di (a) pirosseni e (b) feldspati.

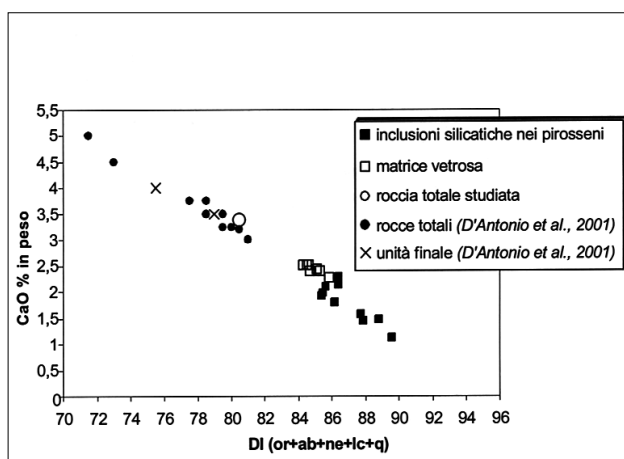


Fig. 4 - Diagramma di variazione CaO vs. DI dei prodotti di Astroni. Ogni punto relativo alle inclusioni silicatiche rappresenta la media di almeno tre analisi.

sono ben correlate. I valori di temperature di cristallizzazione variano da 800 a 880°C per le diverse inclusioni. Utilizzando il software «Kware Magma 2002» di Wholetz è stata calcolata la viscosità in questo intervallo di temperatura per fusi aventi la composizione (elementi maggiori e acqua) delle inclusioni. I valori di viscosità (Bottinga & Weil, 1972; Shaw, 1972) ottenuta variano da 5 a 6 log Pa.s. Applicando la relazione empirica di Cioni *et al.* (1999) anche alle masse vetrose assunte in equilibrio con i bordi delle saliti a contatto (Fs₁₅) si ottiene una temperatura leggermente superiore (890°C), in accordo con la composizione meno evoluta della matrice vetrosa rispetto alla composizione delle inclusioni nei pirosseni.

Le inclusioni presentano un contenuto in H₂O relativamente basso considerato il grado evolutivo dei magmi. Questi tenori corrispondono a pressioni di saturazione < 60 MPa, utilizzando il modello di solubilità di H₂O in fusi fonolitici (Carroll & Blank, 1997). La sequenza eruttiva di Astroni inizia con i prodotti più differenziati (DI 81) e progressivamente si osserva il passaggio ai termini meno evoluti (DI 72) fino alla messa in posto del Duomo di Caprara; i prodotti delle unità successive sono invece caratterizzati da un'ampia variabilità composizionale (DI da 72 a 80 in una singola unità) (D'Antonio *et al.*, 2001). I campioni studiati in questo lavoro sono rappresentativi della frazione juvenile più evoluta (DI > 80) presente nell'unità finale, corrispondenti ai termini più differenziati dell'attività eruttiva del vulcano di Astroni. La composizione chimica dei fenocristalli è in accordo con il grado evolutivo della roccia totale (Tab. 2), essendo caratterizzata prevalentemente da feldspati e clinopirosseni salitici. La composizione delle inclusioni silicatiche e delle matrici vetrose è più evoluta rispetto alla composizione delle rocce totali (Fig. 4). In particolare, le composizioni di fuso più differenziate sono quelle registrate dalle inclusioni silicatiche nei pirosseni (DI = 85-89), e non quelle del vetro residuale (DI = 85). Questo comportamento è in contrasto con quanto si osserva in un normale processo di differenziazione per cristallizzazione frazionata: la matrice dovrebbe rappresentare il fuso residuale finale e quindi avere la composizione più evoluta. La composizione della matrice può essere messa in relazione a un processo di mescolamento tra il fuso più evoluto presente nel sistema magmatico (rappresentato dalla composizione delle inclusioni nei pirosseni), e un fuso a grado evolutivo minore. Un processo di mesco-

Tab. 3 - Valori rappresentativi di H₂O nei campioni studiati

	Spessore (10 ⁻⁴ cm)	ABS (assorbanza a 3500 cm ⁻¹)	H ₂ Owt%
MI 1	27,75	0,561	2,16
MI 4	13,16	0,323	2,62
MI 8	45	0,798	1,90

Le concentrazioni di H₂O sono state calcolate sulla base della legge di Beer-Lambert (Ihinger *et al.*, 1994) utilizzando r (g/l) = 2400 (Rosi *et al.*, 1999) e ϵ_{H_2O} = 70 (Silver & Stolper, 1989).

lamento fisico («mingling») sineruttivo tra magmi a diverso grado evolutivo è stato invocato da D'Antonio *et al.* (2001) per spiegare la variabilità chimica e petrografica degli juvenili presenti nelle unità finali. La composizione omogenea della matrice sembra suggerire che il mescolamento tra fusi a diversa composizione è completo, almeno per la frazione juvenile studiata (termine evoluto della sequenza di Astroni).

Questi dati preliminari rappresentano un primo contributo alla ricostruzione delle condizioni bariche e termiche del sistema di alimentazione dell'area eruttiva centrale recente della caldera flegrea. Lo studio delle inclusioni silicatiche dimostra che nell'eruzione sono coinvolti anche magmi a grado evolutivo maggiore di quello della roccia totale. Queste composizioni non vengono registrate dalle rocce totali a causa dei processi di mescolamento pre- e sin-eruttivi che hanno interessato i magmi presenti nel sistema.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano R. Santacroce per i commenti ed i suggerimenti che hanno contribuito a migliorare la qualità del manoscritto. Si ringrazia P. Dellino per aver messo a disposizione i campioni studiati e M. Tamponi per le analisi in XRF. Il lavoro è stato svolto con il contributo finanziario del GNV-INGV.

BIBLIOGRAFIA

- Armienti M., Barberi F., Bizourd H., Clocchiatti R., Innocenti F., Metrich N., Rosi M., Sbrana A., 1983. The Phlegrean Fields: magma evolution within a shallow chamber. Explosive Volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 17, 289-311.
- Bottinga Y.A., Weil D.F., 1972. The viscosity of magmatic silicate liquids: a model for calculation. *Amer. J. Sci.* 272: 438-473.
- Carroll M., Blank J., 1997. The solubility of H₂O in phonolitic melts. *Am. Mineral.* 82: 549-556.
- Cioni R., Marianelli P., Santacroce R., 1999. Temperature of Vesuvius magma. *Geology* 27: 443-446.
- Claisse F. 1957. Accurate X-ray Fluorescence Analysis without Internal Standard. *Norelco Rep.* 4, 3-17, 17, 19, 95-106.
- D'Antonio M., Di Vito M.A., Isaia R., Orsi G., Andria M.C., Caradente A., 2001. Petrology of volcanic rocks of the Astroni volcano (Campi Flegrei): preliminary results. OV, GNV, 38-43.
- Di Vito M.A., Isaia R., Orsi G., Southon J., de Vita S., D'Antonio M., Pappalardo L., Piochi M., 1999. Volcanism and deformation since 12000 years at the Campi Flegrei caldera (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 91 (2-4): 221-246.
- Ihinger P.D., Hervig R.L., Mc Millan P.F., 1994. Analytical methods for volatiles in glasses. In: Carroll M.R., Holloway J.R. (eds.), Volatiles in magmas. *Reviews in Mineralogy*, Washington D.C. 30: 67-121.
- Isaia R., D'Antonio M., Dell'Erba F., Di Vito M.A., Leeman W., Orsi G., Tonarini S., 2003. Il vulcano di Astroni: un'attività unica nella caldera dei Campi Flegrei e un'opportunità unica di investigare il sistema magmatico flegreo. Abstract, GNV, General Assembly, Roma, giugno 2003.
- Le Bas M.J., Le Maitre E.W., Streckeisen A., Zanettin B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.* 27: 745-750.
- Lucas-Tooth H.J., Price B.J., 1961. A mathematical method for the investigation of interelement effects in X-ray Fluorescence Analysis. *Metallurgia* 64: 149-152.
- Marianelli P., Sbrana A., 1998. Risultati di misure standard di minerali e di vetri naturali in microanalisi a dispersione di energia. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat.* 105: 57-63.
- Roedder E., 1984. Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*, Washington D.C., 100: 646 p.
- Rosi M., Sbrana A., 1987. The Phlegrean Field. *CNR Quaderni della Ricerca Scientifica* 114: 1-175.
- Rosi M., Vezzosi L., Castelmannzano A., Greco G., 1999. Plinian pumice fall deposit of the Campanian Ignimbrite eruption (Phlegrean Fields, Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 91 (2-4): 179-198.
- Shaw H.R., 1972. Viscosities of magmatic silicate liquids: an empirical method of prediction. *Amer. Jour. Sci.* 272: 870-893.
- Silver L.A., Stolper E.M., 1989. Water in albitic glasses. *Journal of Petrology* 30: 667-709.

(ms. pres. il 25 novembre 2002; ult. bozze il 31 dicembre 2003)

