

L'attività recente del cratere di Albano tra vulcanologia, storia e leggenda

The recent activity of the Albano crater among volcanology, history and legend

DE BENEDETTI A. (*), FUNICIELLO R. (*†), GIORDANO G. (*),
DIANO G. (*), SCENNA A. (*), GAUDIOSO F. (*)

RIASSUNTO - Il maar poligenetico di Albano è il centro più recente dei Colli Albani. L'attività freatica da questo centro è perdurata nel corso dell'Olocene. Questo lavoro analizza le relazioni tra l'attività del maar e la storia dell'insediamento umano nell'area romana. Molti episodi di fuoriuscita del lago dal margine del cratere hanno generato una successione di depositi da lahar lungo il versante nordoccidentale del maar, verso la piana di Ciampino. L'ultimo episodio catastrofico avvenne nel 398 a.C. a seguito del quale i Romani realizzarono un tunnel drenante che ha mantenuto da allora il livello del lago 70 m al di sotto della soglia più bassa del cratere. Questo tunnel è la prima opera ingegneristica di mitigazione del rischio in aree vulcaniche della storia umana. I risultati di questo studio sono particolarmente rilevanti per la comprensione della storia insediativa dell'area e per la definizione della pericolosità vulcanica.

PAROLE CHIAVE: Colli Albani, lahar, Lago Albano, hazard

ABSTRACT - The polygenetic Albano maar is the most recent centre of the Colli Albani (Alban Hills) volcano. Phreatic activity at the maar occurred throughout the Holocene. This paper summarises the close relationships between the activity of the maar and the history of settlement in the Roman region. Repeated lahars associated to the lake overflows occurred along the northwestern slope of the maar. The last catastrophic overflow occurred in 398 B.C.E., after which the Romans excavated a 1.5 km long drain-tunnel through the maar crater wall, which has since kept the lake 70 m below the lowest point of the rim. This tunnel drain may be regarded as the first construction made to mitigate a volcanic hazard in history. The surprising and still largely unknown results of this study are very important to understand the history of settlement of the area and to assess the hazard of the Roman region.

KEY WORDS: Colli Albani, lahar, Albano lake, hazard

1. - INTRODUZIONE

Roma sorge lungo le propaggini del vulcano dei Colli Albani, attivo a partire da 600.000 anni fa. Lo stato dell'attività del vulcano è dibattuto sin dal XIX secolo da vulcanologi ed archeologi ed ancor prima dagli storici romani, da Tito Livio a Cicerone, per stabilire se il vulcano abbia rappresentato un fattore "passivo" o attivo del paesaggio: se, cioè, i depositi del vulcano inattivo da millenni siano stati solo oggetto della lenta azione di demolizione ad opera degli agenti esogeni o se un'attività recente del vulcano sia responsabile di buona parte del suo attuale aspetto morfologico.

A favore di quest'ultima ipotesi ci sono, in realtà, un insieme di evidenze geologiche, geocronologiche, morfologiche e, sulla base di prove archeologiche, la cronistoria degli spostamenti delle varie popolazioni che abitarono l'area, spostamenti che sembrano proprio condizionati da attività recente del vulcano. Fino a circa dieci anni fa si pensava che le ultime eruzioni fossero quelle di circa 29000 anni or sono, con l'eruzione a carattere freatomagmatico che ha originato i depositi del Peperino Albano, da cui viene la gran parte della pietra intensamente cavata in Epoca Romana e nota col nome di "*lapis albanus*". In realtà il "*lapis albanus*" è un tipo di roccia compatta, non stratificata e con molti inclusi vulcanici e sedimentari che non proviene unicamente dai depositi di questa eruzione, ma anche di almeno altre due più recenti. L'attività degli ultimi 250000 anni di questo cratere è stata definita in termini di stile e di età solo recentemente (attraverso l'analisi di depositi nelle

(*) Dipartimento di Scienze Geologiche, Università di Roma TRE, Italia



vicinanze o in corrispondenza del Raccordo Anulare) mostrando una recentissima attività già indicata da studiosi del XIX secolo (PONZI, 1885; PORTIS, 1893) ma non più considerata fino a tempi recenti (FUNICIELLO *et alii*, 2002, 2003, 2005, 2010; GIORDANO *et alii*, 2006, 2010; DE BENEDETTI *et alii*, 2008).

2. - IL CRATERE DI ALBANO, I DEPOSITI RECENTI E I DEPOSITI DISTALI

L'attività vulcanica più recente dei Colli Albani (fig. 1) ha formato il cratere poligenetico di Albano, al cui interno è ospitato il lago craterico più profondo d'Italia (-165 m), che è il prodotto dalla coalescenza di più centri. In corrispondenza di Albano sono stati riscontrati oltre 30 cm di sollevamento nel corso degli ultimi 40 anni e la

periodica ricorrenza di sciame sismici (CHIARABBA *et alii*, 1997). La batimetria del lago mostra la posizione del cratere più recente e profondo (fig. 2) nella porzione meridionale del cratere (ANZIDEI *et alii*, 2008), che recenti analisi hanno indicato essere il punto di provenienza della prima forte eruzione freatomagmatica successiva alla messa in posto del Peperino Albano (Unità di Villa Doria, FUNICIELLO *et alii*, 2005). I depositi dell'eruzione associata all'Unità di Villa Doria sono stati individuati fino in prossimità del Raccordo Anulare di Roma, ad oltre 15 km di distanza dal punto di emissione. Nei depositi distali i prodotti vulcanici primari sono intercalati a depositi secondari e depositi da *labar*, che sono invece indirettamente legati all'attività vulcanica. Con il termine *labar*, parola di origine indonesiana, si intende infatti una grande colata di fango con capacità di trasportare rocce anche di dimensioni

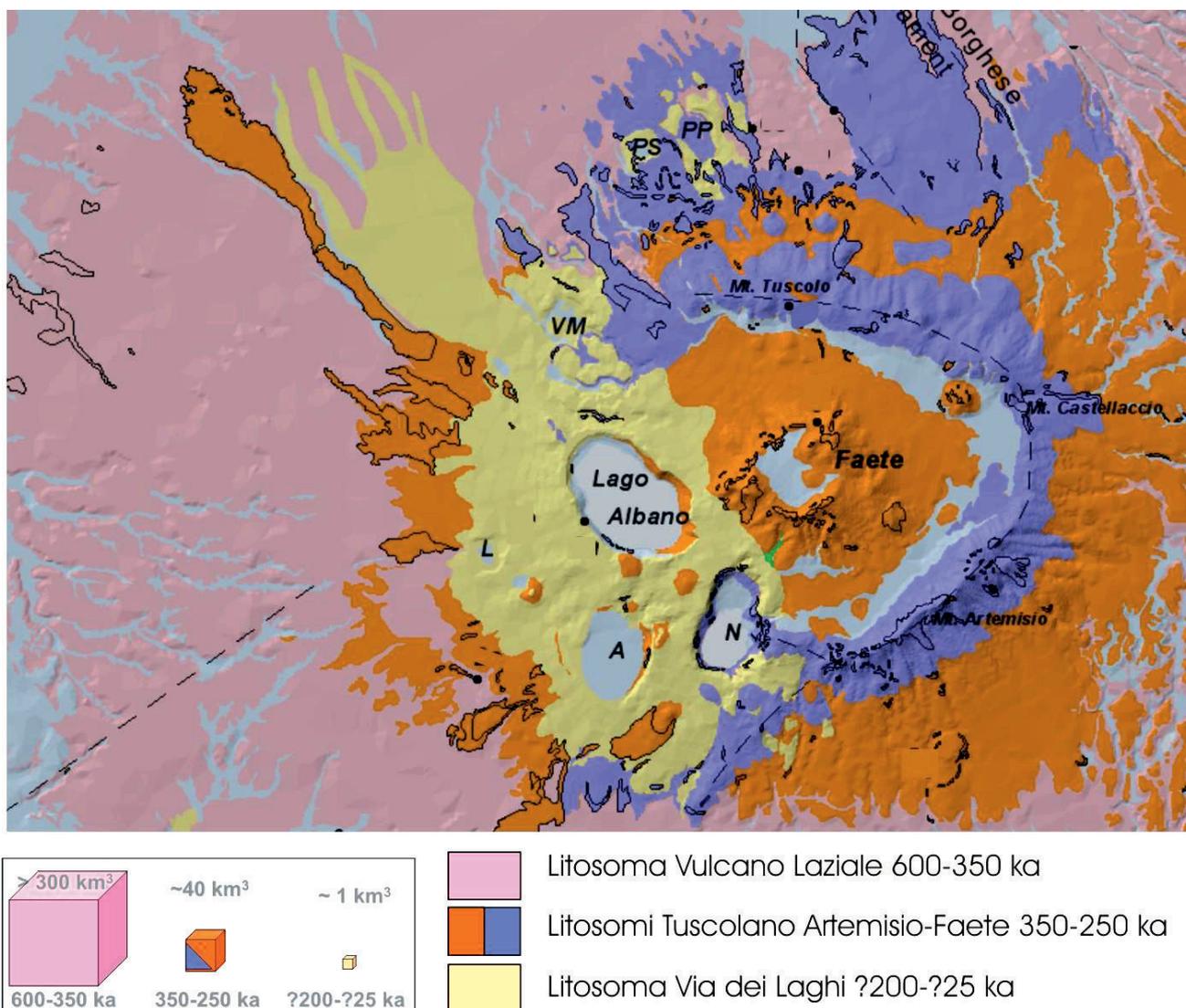


Fig. 1 - Carta Geologica semplificata dei Colli Albani, con i Litosomi formati nei relativi intervalli di tempo. In basso è data una stima dei volumi dei depositi ad essi associati. A=Ariccia, L=Laghetto, N=Nemi, PP=Prata Porci, PS=Pantano Secco, VM=Valle Marciana.
 - Geological Sketch Map of the Colli Albani with the Lithosomes indicating different edifices. The relative volumes of the deposits are also given in the lower left box. A=Ariccia, L=Laghetto, N=Nemi, PP=Prata Porci, PS=Pantano Secco, VM=Valle Marciana.

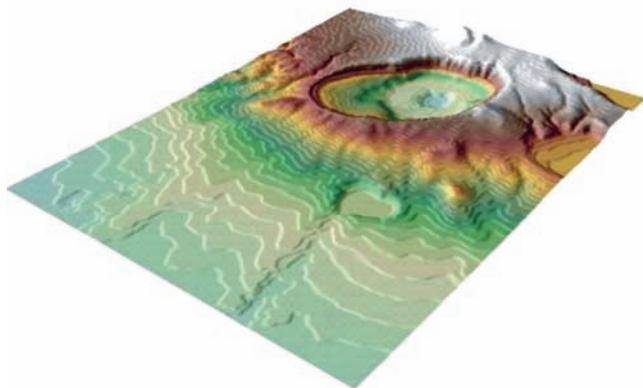


Fig. 2 - Batimetria del lago Albano. La morfologia del cratere Albano è evidenziata dalle variazioni cromatiche di ciascuna quota.
- Bathymetry of Albano lake. The morphology of Albano crater is underlined by the chromatic variations in elevation.

metriche che le conferiscono un grande potere erosivo e distruttivo. I *lahar* si generano presso vulcani esplosivi i cui prodotti, generalmente ceneri e sabbie vulcaniche, si sono rapidamente accumulati sui versanti del vulcano stesso e vengono mobilizzati dalle piogge che generalmente accompagnano le eruzioni a causa del fenomeno della rapida condensa del vapore acqueo atmosferico in prossimità del vulcano, causata a sua volta dalla forte emissione di calore dallo stesso vulcano e dai suoi prodotti in via di raffreddamento.

3. - L'ERUZIONE DEL PINATUBO (1991): UNA CHIAVE DI LETTURA DEI *LAHAR* ALBANI

Le più grandi eruzioni del secolo appena trascorso sono, nell'ordine: (1) Novarupta (Alaska, 1912) con $13 \pm 3 \text{ km}^3$ di DRE (DRE = *Dense Rock Equivalent* = densità della roccia compatta o liquido magmatico) di depositi di flusso piroclastico (ignimbriti) e di caduta; (2) Mount Pinatubo (Filippine, 1991) con $3,7\text{-}5,3 \text{ km}^3$ di DRE di ignimbriti e di caduta; (3) Volcan Quizapu (Chile, 1932) con $\sim 4 \text{ km}^3$ di DRE essenzialmente di depositi di caduta con minori depositi di flusso; (4) Santa Maria (Guatemala, 1902) con $\sim 3\text{-}4 \text{ km}^3$ di DRE riferito a depositi di caduta (NEWHALL & PUNONGBAYAN, 1996). Tra queste enormi eruzioni la recente eruzione del Mount Pinatubo ha offerto la possibilità di studiare con grande dettaglio depositi eruttivi e sin/post-eruttivi (contemporanei, cioè, alla eruzione ma non di semplice e diretta origine vulcanica) sia nelle caratteristiche strutturali dei depositi sia nelle loro modalità di messa in posto. Queste osservazioni hanno consentito di valutare nel modo appropriato i pericoli rappresentati dai *lahar*, originati da depositi di ceneri e materiale leggero accumulati in tempi rapidissimi dall'attività vulcanica e rimobilizzati dagli agenti atmosferici, o dalla semplice gravità, o da eventi sismici (assai frequenti durante un'eruzione vulcanica).

3.1. - *LAHAR* E COLATE PIROCLASTICHE NELL'ERUZIONE DEL PINATUBO

La possibilità di essere investiti direttamente dai materiali eruttati da un vulcano non è l'unico pericolo associato ai fenomeni vulcanici. In caso di eruzioni con grande volume di materiale eruttato in breve tempo, un grande pericolo è rappresentato da fenomeni che possono essere classificati come franosi. Tra le tipologie di frana, le colate *sensu lato* sono tra le più distruttive e, tra quelle che avvengono in condizioni naturali, le più difficili da prevenire. Molti fenomeni franosi che vengono descritti come scivolamenti di detrito, colate di fango e valanghe di detrito, possono essere tutti considerati come colate detritiche (*debris flow*, VARNES, 1978; JOHNSON & RODINE JR., 1984; PIERSON & COSTA, 1987). Esse sono state riconosciute e studiate in ambienti geologici e geomorfologici estremamente diversi (TAKAHASHI, 1981, 1991; COSTA & WIECZOREK, 1987; HUTCHINSON, 1988; CRUDEN & VARNES, 1996; COUSSOT & MEUNIER 1996; MALET *et alii*, 2005). La sistematica relativa a questo tipo di fenomeni è stata recentemente arricchita da HUNGR *et alii* (2001), che considerano "*debris flows*" i flussi da rapidi ad estremamente rapidi di materiale detritico non-plastico saturo che si muove lungo un canale ad elevata pendenza, mentre riservano il termine "*mud flow*" ai materiali nei quali la matrice presenta un indice plastico maggiore del 5%. Naturalmente, in natura sono comuni alcune sovrapposizioni tra le varie tipologie, ma l'adozione della classificazione di HUNGR *et alii* (2001), può aiutare nell'identificazione dei meccanismi dominanti responsabili sia nell'innesco che nella propagazione delle colate detritiche. I flussi a cinematica veloce, ed in particolare i *debris-flow*, si originano nelle parti alte dei versanti a seguito di eventi piovosi intensi e prolungati, muovendosi con velocità da elevate ad estremamente elevate e ponendo ad alto rischio settori del territorio anche molto distanti dalle aree sorgenti.

L'eruzione del vulcano Pinatubo nelle Filippine (1991) ha offerto la possibilità di osservare direttamente i fenomeni connessi all'attività vulcanica esplosiva con caratteristiche confrontabili al ciclo eruttivo dei Colli Albani pur con le dovute relazioni di scala (Albano ha prodotto eruzioni e *lahars* molto inferiori per volume). Le caratteristiche climatiche locali e la grande quantità e il tipo di prodotti vulcanici delle eruzioni del giugno-novembre 1991 hanno creato le condizioni per lo svilupparsi dei caratteristici fenomeni franosi di ambiente vulcanico, i *lahar*, che per un grosso intervallo di tempo hanno mietuto vittime nelle già provate popolazioni filippine. Colate piroclastiche e *lahar* si sono avvicendati in seguito a una serie di pulsazioni eruttive di grandi dimensioni (NEWHALL & PUNONGBAYAN, 1996, figura 3).

Cercando di comprendere la loro natura e le condizioni di origine si può osservare come i *lahar* siano particolarmente fluidi, e quindi la loro distribuzione è funzione della morfologia, sfruttando il precedente reticolo fluviale.



Fig. 3 - Prima e dopo. L'area costiera del Pinatubo sconvolta dal passaggio di un *lahar*.

- Before and after. The coastal area near the Pinatubo changed after the passage of a *lahar*.

I *lahar* dell'estate del 1991 hanno generato una morfologia piatta colmando rapidamente ogni preesistente forma incisa. La caratteristica peculiare di un *lahar* è la sua elevata capacità distruttiva, che dipende dall'abbondante carico solido che caratterizza la miscela liquido-solido in movimento (fig. 3). È da notare, inoltre, come al cessare del flusso si abbia il rapido consolidamento del deposito fangoso, che può rappresentare una trappola mortale per uomini ed animali. L'osservazione diretta dei *lahar* del Pinatubo ha mostrato come anche gli stessi depositi consolidati di un flusso possano essere intensamente erosi dal successivo, generando stratigrafie di non facile analisi.

3.2. - LAHAR E COLATE PIROCLASTICHE AI COLLI ALBANI

Alcune successioni osservate nei tagli della Piana del Tavolato presentano in sezione delle improvvise ed apparentemente inspiegabili troncuture, con perdita di continuità laterale. L'analisi delle forme generate dai

lahar del Pinatubo, ha mostrato come la forte capacità erosiva di questi torrenti di fango generi delle piccole falesie di pochi metri di altezza che, successivamente riempite dai depositi meno erosivi, assumono esattamente lo stesso aspetto, in sezione, dei depositi del Tavolato. L'aspetto dei depositi da *lahar* nell'area compresa tra Ciampino e lo Statuario trova così una chiave interpretativa nelle forme generate dal flusso dei *lahar* del Pinatubo (fig. 4).

3.3. - LA FORMAZIONE DEL TAVOLATO E LA TRINCEA DI LUCREZIA ROMANA

Per studiare la struttura e comprendere l'origine della Piana del Tavolato una trincea "ad hoc" è stata scavata nella zona di Lucrezia Romana nell'ambito di uno studio finanziato dal Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università di Roma Tre. L'analisi di terreno ha evidenziato la presenza di una coltre di depositi vulcanici e vulcanoclastici (fig. 5) che hanno sovrasedimentato ed obliterato il paleoreticolo inciso durante il basso stazionamento del mare dell'ultima epoca glaciale (principalmente tra 90.000 e 18.000 anni fa) determinando la vasta piana di Ciampino. Questa forma morfologica rappresenta a tutti gli effetti una conoide deposizionale che molto ci dice della storia olocenica del cratere di Albano. La correlazione di molte sezioni stratigrafiche ha consentito di individuare la successione di depositi da colata piroclastica fratomagmatica, depositi da *lahar* sin-eruttivi (contemporanei, cioè, all'attività vulcanica primaria), inter-eruttivi (ossia verificatisi tra un evento eruttivo ed il successivo) e depositi fluviali (fig. 5).

3.4. - ETÀ DELLA FORMAZIONE DEL TAVOLATO

La datazione con il metodo ^{14}C del livello unico su cui poggia il *lahar* sin-eruttivo al tetto della successione ha fornito una età radiometrica di $5,8 \pm 0,1$ ka (^{14}C CAL, M. Paterne, Tandetron, Gif-sur-Yvette) ossia di circa 5,0 ka dopo la calibrazione. La datazione con il metodo U/Th di un livello carbonatico alla base della successione a $23 \pm 6,7$ ka (SOLIGO *et alii*, 2003) ed il riconoscimento al suo interno di frammenti di Peperino Albano, datato con vari metodi tra 36 e 19 ka, conferma un'età della successione più recente dell'ultimo glaciale.

Una prospezione elettromagnetica con il GEM 300 ci ha consentito di individuare la geometria dei paleo-canali e, in accordo con la Soprintendenza Archeologica, di eseguire lo scavo di una trincea *ad hoc*. La ricostruzione stratigrafica, le analisi di facies sedimentologica, le analisi granulometriche e petrografiche mostrano che la piana di Ciampino è stata sede di ripetuti fenomeni alluvionali perdurati almeno fino all'età del Bronzo di intensità difficilmente inquadrabile all'interno delle variazioni climatiche note per l'Olocene.

Sono stati dunque misurati i parametri paleoidraulici: tali dati suggeriscono portate fino a centinaia di

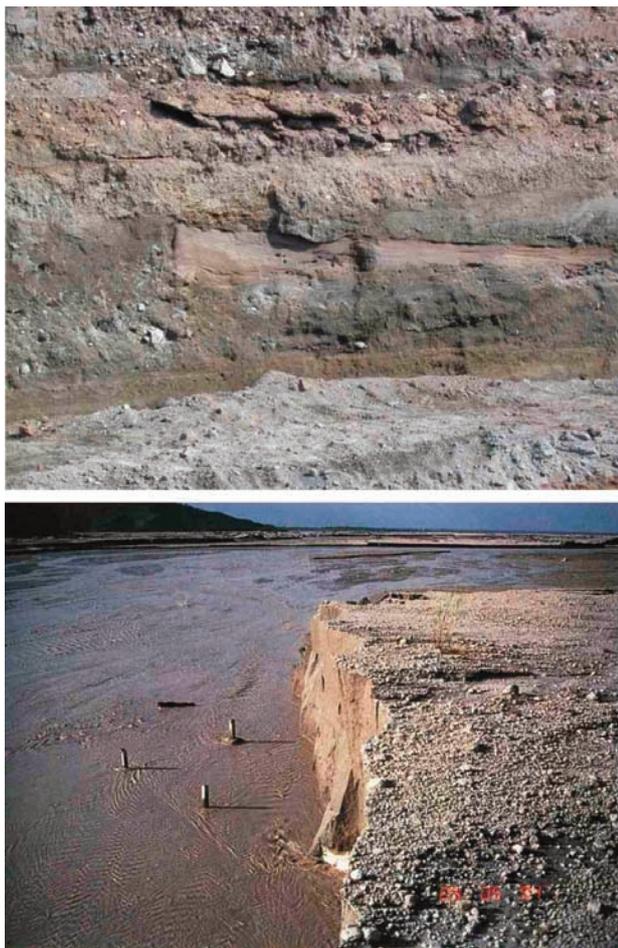


Fig. 4 - Nella foto in alto un particolare della sezione di Lucrezia Romana dove sono visibili le forme antiche di piccole falesie, di cui una è evidente al centro della foto. La comparazione con i depositi dei *lahar* del Mount Pinatubo ha permesso di comprendere il processo di formazione delle stesse falesie dalla meccanica di flusso dei *lahar*.

- In the photo (above) a detail of the geological section of Lucrezia Romana where small cliffs are visible, of which one is evident in the center of the photo. The comparison with the *lahar* deposits from Mount Pinatubo has allowed to understand the process of formation of the same cliffs from the mechanics of flow of the *lahar*.

m^3/s per singolo canale, ovvero due ordini di grandezza maggiori delle portate odierne dell'intero bacino idrografico! Che impatto potrebbe aver avuto questa particolare situazione sulla storia degli insediamenti nell'area romana?

La piana di Ciampino non viene popolata fino a tutto l'Eneolitico. Con il Bronzo Antico (4.1-3.7 ka) si hanno i primi insediamenti e lo sviluppo di un'estesa rete di canalizzazioni, che si ritrovano nel Bronzo Finale (3.3-3.0 ka) ed in epoca Arcaica. L'area è invece abbandonata nel Bronzo Medio.

Nel Bronzo Medio invece viene popolato l'interno del cratere, con il villaggio palafitticolo delle Macine, quando il livello del lago doveva essere prossimo o poco più basso di quello attuale, mentre nel Bronzo Finale gli insediamenti si spostano circa 100 m più in alto sull'orlo più alto del cratere.

La distribuzione nel tempo di siti archeologici pro-

tostorici e preistorici indica la significativa correlazione tra rischio vulcanico e attività umane. Nel Paleolitico gli insediamenti erano situati vicino l'antica linea di costa ed a distanza di sicurezza dall'edificio vulcanico. Durante il Mesolitico ed il Neolitico (<10000 anni, dopo la fine delle eruzioni vulcaniche) le comunità umane occuparono progressivamente aree più vaste lungo le pareti del vulcano. La zona a Nord del lago del maar di Albano, la Piana di Ciampino, rappresenta un'eccezione: rimase completamente disabitata durante l'Eneolitico fino all'età del Bronzo a differenza del successivo intenso sviluppo di canali di drenaggio costruiti dall'epoca del Bronzo all'epoca Romana con un picco durante il II sec. a.C.

I depositi di *lahar* si misero in posto nella piana di Ciampino in un intervallo di tempo comparabile con l'epoca Neolitica. È quindi logico correlare i due fatti, ipotizzando che fosse noto che eventi di *lahar* occasionali ma catastrofici interessavano l'area, impedendo all'uomo di insediarsi.

La piana di Ciampino fu dunque sede di scorrimento superficiale di acque, canalizzate nel Bronzo Antico (4.1-3.7 ka) e nel Bronzo Finale (3.3-3.0 ka), ma rimase arida nel Bronzo medio (3.7-3.3 ka). Cicli simili si sono ripetuti successivamente fino all'epoca Romana. Gli alti stazionamenti della falda freatica determinano un regime fluviale nella piana favorendo sia gli insediamenti che aumentando il rischio di inondazioni. Le comunità umane dell'epoca hanno così dovuto cercare il compromesso tra l'utilità (o necessità) della presenza dell'acqua ed il pericolo geologico e geomorfologico purtroppo ad essa associato (fig. 6).

4. - LA PRIMA MISURA DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO VULCANICO NELLA STORIA (IV SECOLO A.C.)

Molti autori di epoca romana, da Plutarco a Tito Livio, raccontano della catastrofica ed improvvisa risalita ed esondazione del lago verso la piana di Ciampino nel 398 a.C. durante l'assedio di Vejo. A seguito di questo evento, ad opera dei Romani fu costruito in quattro anni un tunnel drenante che da allora regola il livello del lago circa 70 m al di sotto della soglia del cratere. Questa può considerarsi a tutti gli effetti la prima misura di mitigazione del rischio vulcanico nella storia (fig. 6).

5. - LA VIA DELL'ACQUA: IL SISTEMA DEGLI ACQUEDOTTI DI ROMA E LA PIANA DEL TAVOLATO

Appena si ebbe mitigato il pericolo di esondazione del lago, la piana di Ciampino, con la sua conformazione debolmente digradante verso Roma, diventò la

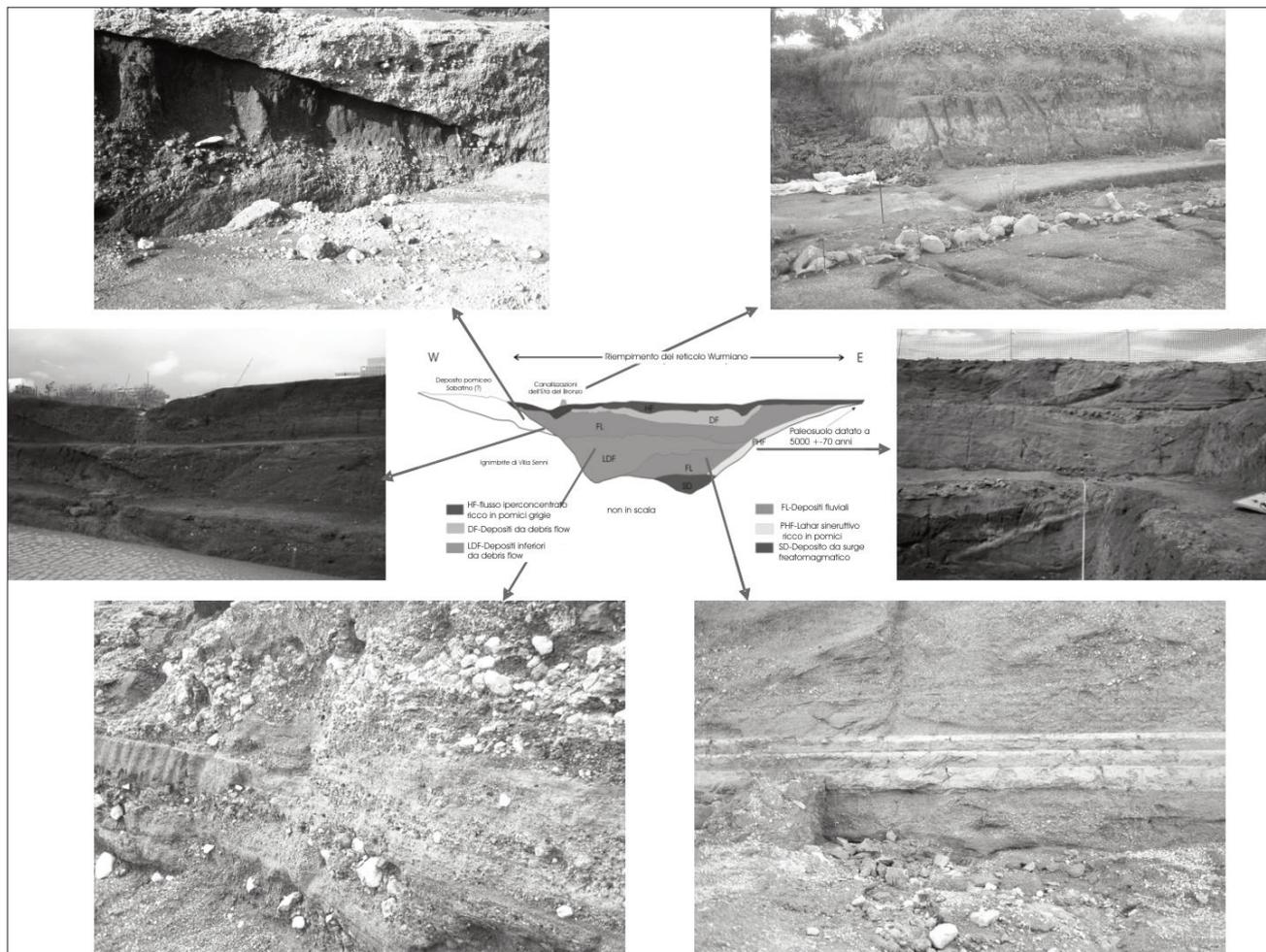


Fig. 5 - La formazione del Tavolato. Presso la trincea di Lucrezia Romana è stato possibile osservare la successione di depositi vulcanici e vulcano-clastici che hanno colmato il paleo reticolo wurmiano (da FUNICIELLO et alii, 2005).
 - The Tavolato formation. At the trench of Lucrezia Romana it was possible to observe the succession of volcanic deposits and volcano-clastics that filled the Würmian paleo network (from FUNICIELLO et alii, 2005).

via dell'acqua, questa volta quella degli acquedotti, sia per necessità ingegneristico-idrauliche sia, forse, per segnare la definitiva conquista del territorio. In questa area si costruirono gli acquedotti detti dell'*Aqua Tepula, Giulia, Appia, Alessandrina, Virgo, AnioVetus, Anio Novus, Claudia e Marcia*. Più a Nord dai Sabatini si avevano anche gli acquedotti dell'*Aqua Traiana* dal lago di Bracciano e dell'*Aqua Alsietina* dal lago di Martignano (fig. 7).

Con la costruzione degli acquedotti si andarono affinando anche le tecniche ingegneristiche ad essi associate: quando il dotto raggiungeva una parete scoscesa una possibile soluzione era di costruire un ponte o viadotto. Un'altra possibile soluzione era quella di utilizzare il metodo del sifone invertito. Generalmente si preferiva allungare il percorso per mantenere una pendenza regolare. Prima di essere incanalata l'acqua passava per le *piscinae limariae*, per far depositare fango e particelle. Infine, in prossimità dell'area urbana l'acqua era di nuovo convogliata in una grande vasca (*specus*) per perdere ulteriormente sedimenti originari o raccolti

durante il tragitto.

Fuori dall'area urbana lo *specus* era sotterraneo e rivestito da una sorta di cemento: il *cocciopesto*. Nelle condotte degli acquedotti è facile rinvenire tipiche sferule di natura calcarea: si tratta di depositi concrezionari di calcite che sono originati da un flusso che determina una caratteristica forma a microsferule a gusci concentrici: indicazioni analitiche su queste sferule (rapporti isotopici dello stronzio e dell'ossigeno) indicano che le acque avevano origine all'interno delle strutture calcaree mesozoiche appenniniche.

7. - LA CO₂ AI COLLI ALBANI

L'area dei Colli Albani, ed in particolare la piana di Ciampino ed il lago Albano, sono sede di intensi fenomeni da degassazione, in particolare di anidride carbonica (CO₂), la cui origine è legata alla decarbonatazione dei calcari a contatto con la camera magmatica in profondità.

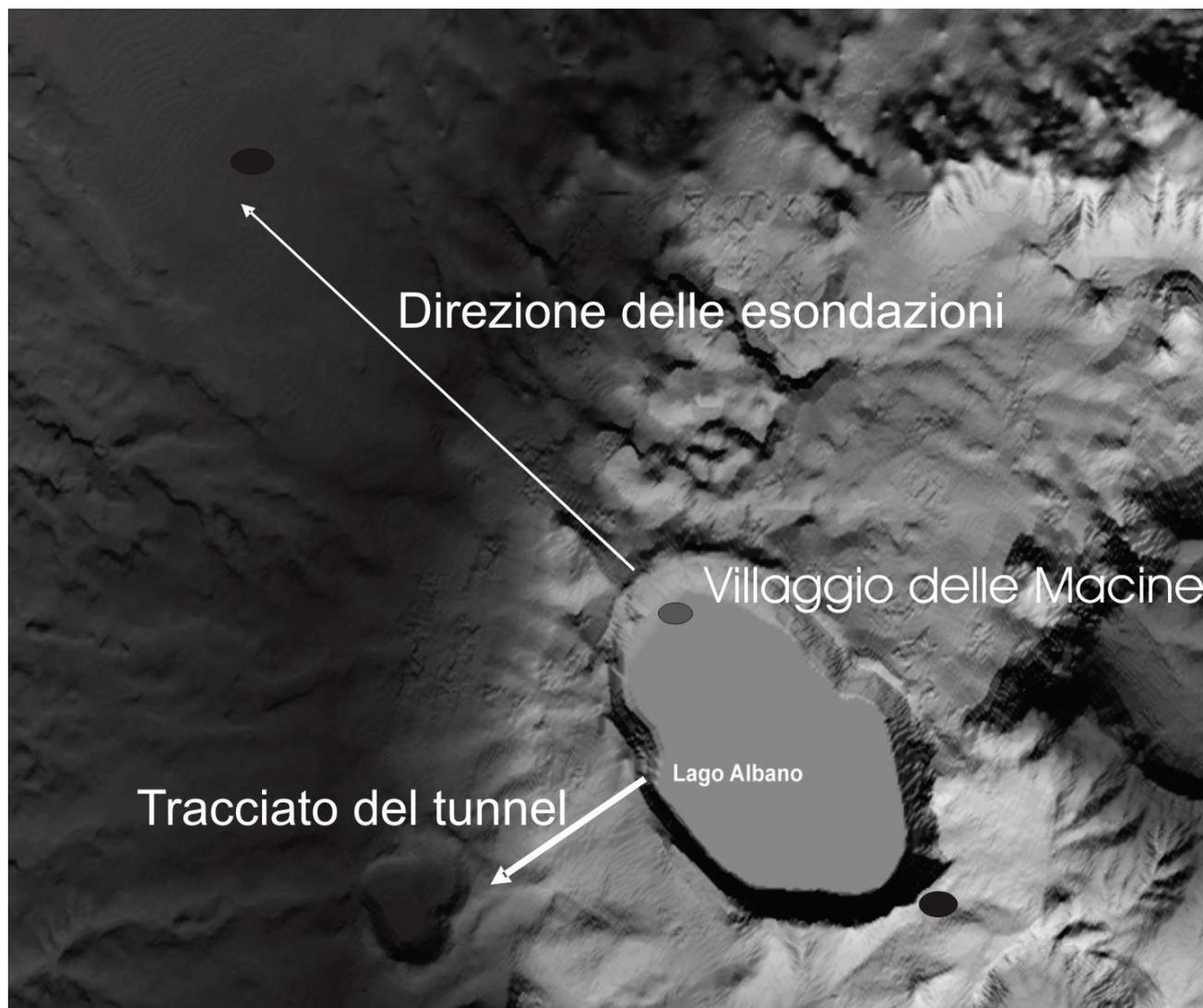


Fig. 6 - Insediamenti preistorici ad Albano e tunnel romano. Nel Bronzo Medio (in rosso) viene popolato l'interno del cratere con il villaggio palafitticolo delle Macine, quando il livello del lago doveva essere prossimo o poco più basso di quello attuale. Nel Bronzo Finale (in grigio) gli insediamenti si spostano circa più in alto sull'orlo sud orientale del cratere. Il tunnel drenante costruito nel 394 a.C. garantisce tuttora un canale di scolo per eventuali risalite del livello del lago.
 - Prehistoric settlements in the area and location of the later Roman tunnel. In the Middle Bronze Age the inside of the crater is populated with the Macine village (red ellipse); at that time the level of the lake had to be next or a little lower than at present. In the Final Bronze Age (dark grey ellipses) settlements moved up hill along the southern crater rim. The draining tunnel built in 394 B.C. by Ancient Romans still guarantees a channel of drainage for the possible uprising of lake level.

Studi indipendenti hanno mostrato come i sedimenti del lago Albano abbiano registrato forti oscillazioni del contenuto in CO_2 , in corrispondenza di forti oscillazioni del livello del lago, oltre alla presenza di uno hiatus sedimentario tra 7.5 e 4.1 ka (PALICLAS project, GUILIZZONI & OLDFIELD Ed., 1996).

La risalita della CO_2 giustifica la diffusa precipitazione di carbonato di calcio nelle grotte dell'area, a volte con evidenze simili a zone carsiche. Recenti studi dimostrano che questa precipitazione è discontinua nel tempo e che le ben note anomalie di temperatura e di concentrazione di gas registrate ai Colli Albani durante eventi sismici possono avere un ruolo determinante su questo fenomeno.

8. - I FATTORI DI PERICOLOSITÀ (IL CRATERE PIÙ RECENTE)

Per quantificare il rischio connesso a questa delicata zona è opportuno valutare i fattori di pericolosità per il lago Albano. Essi sono sostanzialmente i seguenti:

- La profondità del lago: rappresenta un grande fattore di rischio. Il lago Albano, come già detto, è il lago craterico più profondo d'Italia, e quindi la massa d'acqua contenuta al suo interno è notevole, rappresentando un pericolo.

- La concentrazione di CO_2 : poiché è nota l'alta concentrazione di CO_2 nelle profondità del vulcano, al pericolo diretto che deriva dal gas (morte per asfissia

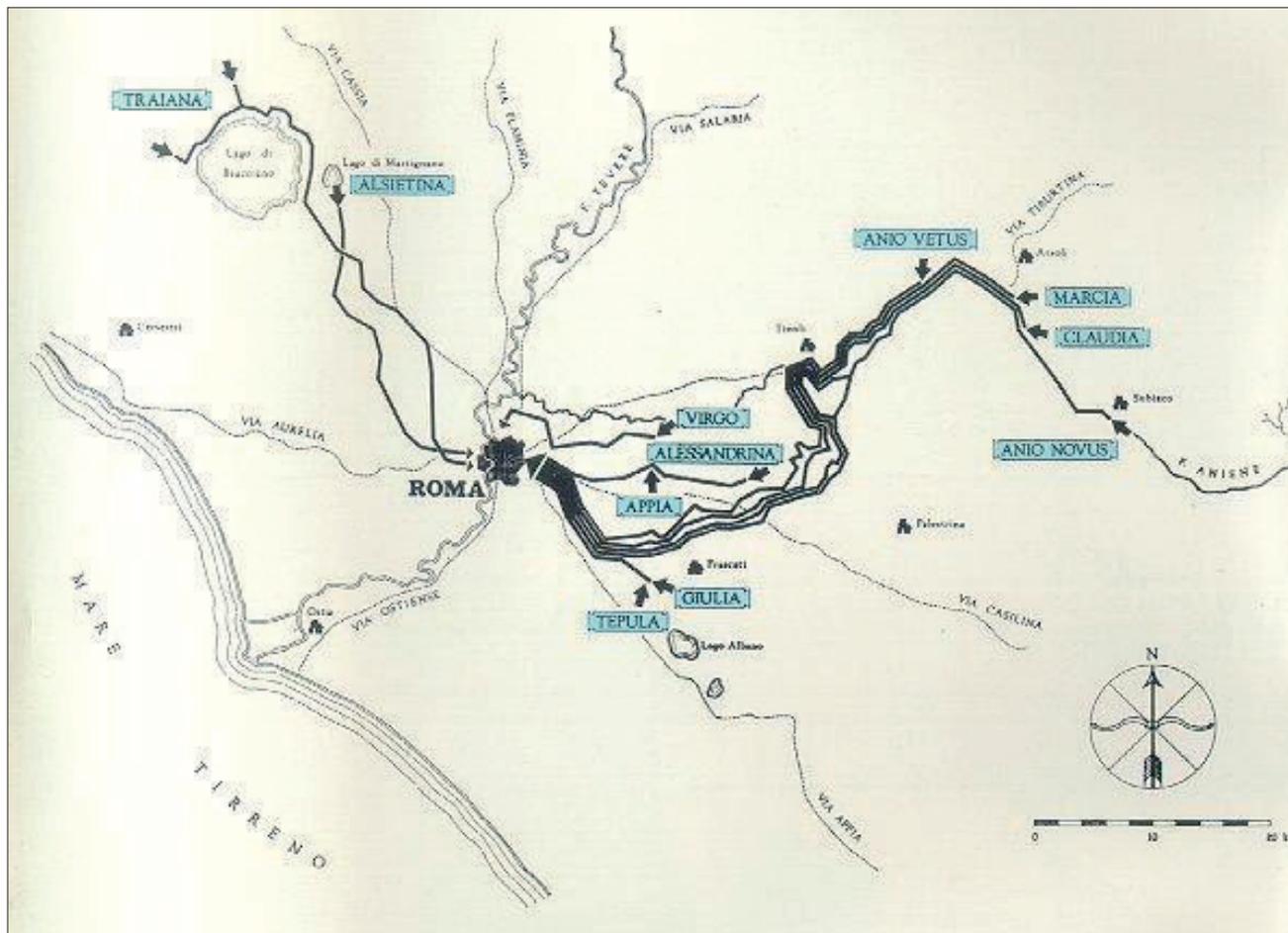


Fig. 7- I principali acquedotti romani che attraversano il Tavolato e di Ciampino.
 - The principal Roman aqueducts that cross the Tavolato and the Plain of Ciampino.

di animali, malori di esseri umani) si associa il suddetto pericolo di esondazione del lago per repentina eruzione di CO_2 . Molti punti di emissione di CO_2 sono noti, infatti, sul fondo e lungo i fianchi del cratere.

- I terremoti: l'area è nota per avere registrato in varie occasioni significative variazioni di temperatura alle sorgenti in corrispondenza sia di terremoti lontani che locali. Immissioni di acque calde provenienti dal sistema geotermico profondo sul fondo del lago potrebbero indurre fenomeni di rovesciamento delle acque e rilascio dell'anidride accumulata in profondità con conseguenze estremamente pericolose. Inoltre possibili frane sottomarine potrebbero causare simili fenomeni.

9. - CONCLUSIONI

Il cratere di Albano è stato sede nel corso degli ultimi 25.000 anni di attività vulcanica e di ripetuti fenomeni di sollevamento della tavola d'acqua che hanno prodotto fino all'epoca romana episodi catastrofici di alluvionamento e di *lahar*, (fig. 8) i quali hanno avuto un ruolo fondamentale nella costruzione della Piana del

Tavolato ed hanno probabilmente condizionato anche i processi di variazione anomala della linea di costa nel litorale ostiense. La storia degli insediamenti nell'area di Roma ne è stata fortemente condizionata ed ha portato ad uno sviluppo tecnologico impareggiato per la mitigazione del rischio, a partire dai sistemi di canalizzazione del Bronzo fino alla costruzione dell'emissario del lago nel IV sec. a.C. (v. fig. 6). Sebbene i pericoli legati all'esondazione delle acque del lago siano stati e siano oggi fortemente mitigati dalla presenza del tunnel drenante, altri fattori legati alla natura vulcanica dell'area concorrono ad aumentare la pericolosità, nel breve, nel medio e nel lungo termine:

- Nel medio termine la pericolosità è legata alla possibile instabilità del sistema idrotermale. Questa instabilità può far variare la concentrazione di CO_2 nel lago e/o rilasciare fluidi caldi sul fondo, processi che potrebbero innescare pericolosi fenomeni di *rollover* analoghi a quelli del lago Nyos in Camerun (1984), con catastrofiche conseguenze.

- Nel lungo termine è da considerare la pericolosità da eruzione freatica e/o freatomagmatica, che va considerata alla luce del fatto che simili episodi si sono ri-

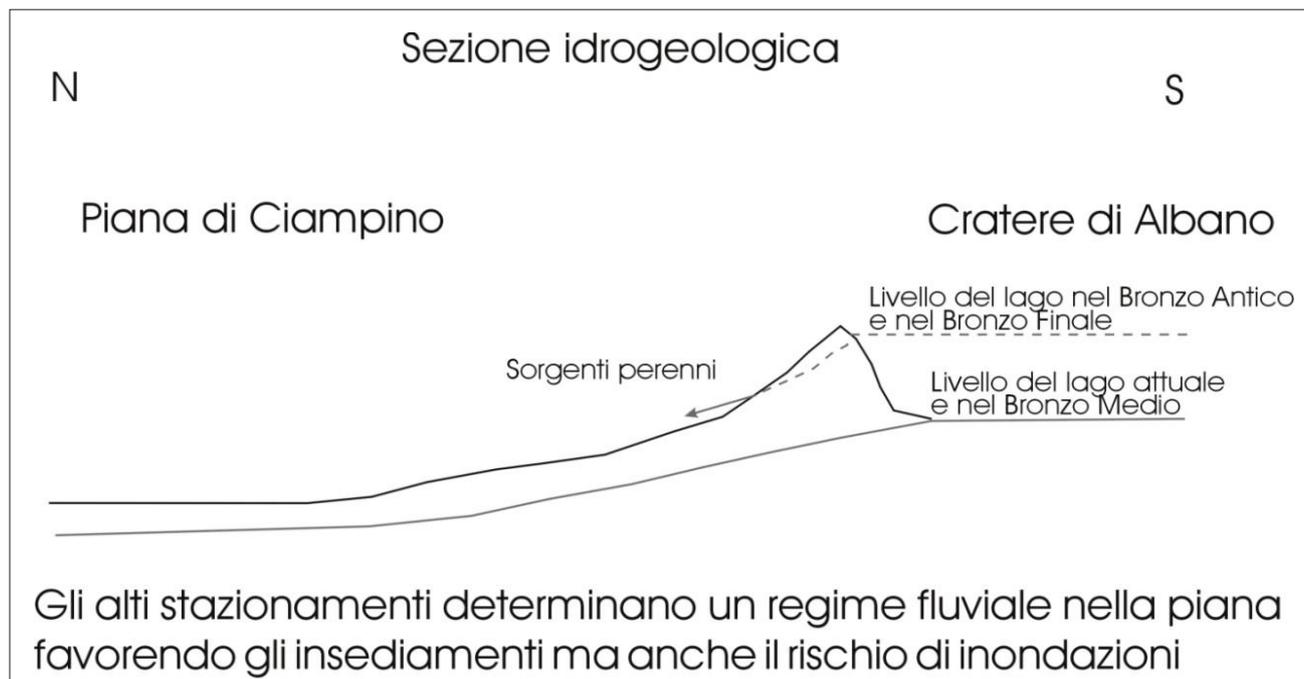


Fig. 8 - Ricostruzione delle oscillazioni positive del livello del lago tra Bronzo Antico (alto stazionamento), Medio (basso stazionamento) e Finale (alto stazionamento). Le condizioni di alto stazionamento sono favorevoli alla presenza di sorgenti perenni spostate verso monte e dunque alla presenza di regimi fluviali nelle valli lungo le pendici del maar di Albano, che divennero dunque favorevoli all'insediamento, mentre durante i bassi stazionamenti i corsi d'acqua risultano in larga misura secchi e le condizioni non favorevoli per le comunità umane. Al contempo nel corso degli alti stazionamenti, eventi di rollover del lago innescati da eventi sismici e/o da frane, furono favorevoli alla generazione di esondazioni e di conseguenti *labar* nella piana di Ciampino.

- Reconstruction of positive fluctuations of lake level between Ancient (high standing), Middle (low standing) and Final Bronze Age (high standing). The conditions of high standing moved perennial springs upstream and promoted fluvial regimes in the river valleys along the slopes of Albano maar, which became therefore favorable to settlement; by contrast, during the low standings, waterways were largely dry and unfavorable for human communities. At the same time during the high standings, events of rollover of the lake, triggered by earthquakes and/or landslides, were favorable to floods generation and subsequent *labar* in the plain of Ciampino.

petuti nel corso dell'Olocene.

Nel breve termine sono di primaria importanza i seguenti aspetti:

- Monitoraggio dei gas: l'alto flusso di CO₂, e soprattutto la sua origine profonda e quindi legata, sebbene indirettamente, al sistema magmatico, rendono il flusso di gas stesso tipicamente instabile e soggetto, quindi, a possibili aumenti improvvisi. Data la natura soffocante della CO₂ si rende necessario potenziare la rete di monitoraggio del gas ben oltre i pochi strumenti oggi operativi e installati a scopo scientifico per comprendere e valutare il sistema di circolazione profondo.

- I terremoti: l'analisi sismica degli ipocentri dei terremoti degli ultimi anni nella zona dei Colli Albani ha evidenziato come gli stessi ipocentri siano ubicati proprio in corrispondenza dei centri abitati. Inoltre, lo studio statistico degli eventi sismici mostra dei tempi di ritorno (l'intervallo di tempo che trascorre mediamente tra un evento ed il successivo) per una magnitudo $M > 5$ di circa 20 anni! Questi dati, assieme al fatto che l'area negli ultimi 10-15 anni ha conosciuto un'intensissima urbanizzazione, rendono necessario che ogni possibile azione tesa a mitigare il rischio sismico nell'area sia effettuata in anticipo sugli eventi che, per il corso naturale degli eventi, sono destinati ad accadere.

BIBLIOGRAFIA

- ANZIDEI M., CARAPEZZA M.L., ESPOSITO A., GIORDANO G., TARCHINI L. & LELLI M. (2008) - *The Albano Maar Lake High resolution bathymetry and dissolved CO₂ budget (Colli Albani District, Italy): constraints to hazard evaluation*. J. Volcanol. Geoth. Res., 171, 258-268.
- CHIARABBA C., AMATO A. & DELANEY P.T. (1997) - *Crustal Structure, Evolution, And Volcanic Unrest Of The Alban Hills, Central Italy*. Bull. Volcanol. 59, 161-170.
- COSTA J.E. & WIECZOREK G.F. (Eds.) (1987) - *Debris flows/avalanches* Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, 7, 125-138.
- COUSSOT P., MEUNIER M. (1996) - *Recognition, classification and mechanical description of debris flows*. Earth Science Reviews, 40, 209-227.
- CRUDEN D.M. & VARNES D.J. (1996) - *Landslide types and processes*. In: "Landslides Investigation and Mitigation: Transportation Research Board", A.K. TURNER & R.L. SCHUSTER (Eds.), US National Research Council, Special Report 247, Washington DC, 153-171.
- DE BENEDETTI A.A., FUNICIELLO R., GIORDANO G., CAPRILLI E., DIANO G. & PATERNE M. (2008) - *Volcanology, History and Myths of the Lake Albano maar (Colli Albani volcano, Italy)*. J. Volcanol. Geoth. Res. Special issue "Volcanoes and Human History", K. CASHMAN & G. GIORDANO (Eds.) J. Volcanol. Geotherm. Res., 176: 387-406.
- FUNICIELLO R., GIORDANO G., DE RITA D., CARAPEZZA M.L. & BARBERI F. (2002) - *L'attività recente del cratere del lago Albano di Castelgandolfo*. Rend. Fis. Acc. Lincei s. 9, v.

- 13, 113-143.
- FUNICIELLO R., GIORDANO G. & DE RITA D. (2003) - *The Albano maar lake (Colli Albani Volcano, Italy): recent volcanic activity and evidence of pre-Roman Age catastrophic lahars events*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 123, 43-61.
- FUNICIELLO R., DE BENEDETTI A.A., DIANO G., GIORDANO G. & PORRECA (2005) - *Le eruzioni esplosive più recenti del cratere di Albano*. (Convegno: "ECOSISTEMA ROMA" 14-16 aprile 2004. Atti dei Convegni Lincei, Accademia Nazionale dei Lincei Ed.), 218, 227-228, Roma.
- FUNICIELLO R., DE BENEDETTI A.A., HEIKEN G. & GIORDANO G. (2010) - *Volcanic Activity of the lake Albano Maar in Roman History and Mythology*. In: FUNICIELLO R. & GIORDANO, G. (Eds.), "The Colli Albani Volcano". Special Publication of IAVCEI, 3, The Geological Society, London, 331-338.
- GIORDANO G., DE BENEDETTI A.A., DIANA A., DIANO G., GAUDIOSO F., MARASCO F., MICELI M., MOLLO S., CAS R.A.F. & FUNICIELLO R. (2006) - *The Colli Albani mafic caldera (Roma, Italy): stratigraphy, structure and petrology*. J. Volcanol. Geoth. Res. Special issue "Explosive mafic volcanism", 155, 49-80.
- GIORDANO G. & THE CARG TEAM (2010) - *Stratigraphy and volcano-tectonic structures of the Colli Albani volcanic field*. In: R. FUNICIELLO & G. GIORDANO (Eds.), "The Colli Albani Volcano". Special Publication of IAVCEI, 3, The Geological Society, London, 43-97.
- GUILIZZONI P., OLDFIELD F. (Eds.) (1996) - *Palaeoenvironmental analyses of Italian crater lake and Adriatic sediments (PAL-ICLAS)*, Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 55.
- HUNGR O., EVANS S.G., BOVIS M.J. & HUTCHINSON J.N., (2001) - *A review of the classification of landslides of the flow type*. Environmental and Engineering Geoscience, 7, no. 3, p. 221-238.
- HUTCHINSON J. N. (1988) - *General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides, Ed.: C. BONNARD, Rotterdam, Balkema, 1988), 1, 3-35.
- JOHNSON A.M. & RODINE J. R. (1984) - *Debris flow*. D. BRUNSDEN & D. PRIOR, D.B. (Eds.), Slope Instability, Wiley, Chichester), 257-362.
- MALET J.P., VAN ASCH TH. W. J., VAN BEEK R. & MAQUAIRE O. - *Forecasting the behaviour of complex landslides with a spatially distributed hydrological model*. Natural Hazards and Earth System Science, 5: 71-85.
- NEWHALL C.G. & PUNONGBAYAN R.S. (1996) - *Fire and Mud*. Eruption and lahars of Mount Pinatubo, Philippines, University of Washington press, 1126 pp.
- PIERSON T.C. & COSTA J.E. - *A rheological classification of sub-aerial sediment-water flows*. J.E. COSTA & G.F. WIECZOREK, 1987, (Eds.): Debris Flow/Avalanches: "Process, Recognition and Mitigation", Reviews in Engineering Geology 7, 1-12 Boulder, CO: Geological Society of America.
- PONZI G. (1875) - *Dei Monti Mario e Vaticano e del loro sollevamento*. Atti R. Acc. Lincei 2, Roma.
- PORTIS A. (1893) - *Osservazioni sopra la formazione stata chiamata Conglomerato del Tavolato*. Storia fisica del bacino di Roma, 259-293, Roma.
- SOLIGO M., TUCCIMEI P., GIORDANO G., FUNICIELLO R. & DE RITA D. (2003) - *New U-series dating of a carbonate level underlying the Peperino Albano phreatomagmatic ignimbrite (Colli Albani, Italy)*. Il Quaternario (It. J. Quater. Sc.), 16:115-120.
- TAKAHASHI T. (1981) - *Estimation of potential debris flows and their hazardous zones; soft countermeasures for a disaster*. J. Nat. Disaster Sci., 3, 57-89.
- TAKAHASHI T. (1991) - *Debris flows*. Balkema, Rotterdam.
- VARNES D.J. (1978) - *Slope Movement types and processes*. R.L. SCHUSTER & R.J. KRIZEK (Eds.), Landslides - Analysis and Control) National Academy of Sciences Transportation Research Board Special Report N° 176, p. 12-33.
- Bull. Volcanol.= *Bullettin of Volcanology*.
 Rend. Fis. Acc. Lincei= *Rendiconti Lincei Scienze Fisiche e Naturali*.
 J. Volcanol. Geoth. Res.= *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
 Atti R. Acc. Lincei= *Atti della Reale Accademia Nazionale dei Lincei*.
 It. J. Quater. Sc.= *Italian Journal of Quaternary Sciences*.
 J. Nat. Disaster Sci.= *Journal of Natural Disaster Science*.