

Rapporto tecnico-scientifico

Simulazione di scenari di ricaduta balistica e flussi
piroclastici in caso di esplosione freatica in località
Spiaggia di Levante, isola di Vulcano

a cura di:

Tomaso Esposti-Ongaro e Mattia de' Michieli Vitturi

INGV, Sezione di Pisa
1/6/2022



Premessa

Nel presente rapporto tecnico si illustrano alcuni scenari simulati di esplosioni freatiche già descritti nell'ambito dei Comunicati straordinari emessi durante l'esercitazione VULCANO 2022 dello scorso aprile, nonché nuovi scenari che esplorano l'effetto di diverse condizioni alla sorgente e che recepiscono, per quanto possibile, i dati osservativi ad oggi disponibili nel caso di evento localizzato nella Spiaggia di Levante.

Le simulazioni sono state realizzate utilizzando il nuovo codice numerico OpenPDAC, sviluppato presso la Sezione di Pisa INGV sulla base del precedente modello PDAC utilizzato per la simulazione di eruzioni esplosive (Neri et al., 2003; Esposti Ongaro et al., 2007; de' Michieli Vitturi et al., 2010). Il modello OpenPDAC costituisce uno strumento di ricerca, la cui validazione è un processo in continuo aggiornamento. Il modello utilizza un approccio Euleriano per la fase gassosa (miscela multicomponente di gas) e per la fase solida fine, mentre utilizza una descrizione lagrangiana per i balistici, la cui dinamica è accoppiata in modo "one-way" con quella della miscela gas/particelle fini.

Ricordiamo le ipotesi fondamentali del modello di esplosione:

1. La roccia frammenta istantaneamente al passaggio dell'onda di rarefazione. La frammentazione non dissipa energia.
2. La fase fluida è già vaporizzata. Non c'è presenza di acqua liquida.
3. I balistici hanno una massa totale molto inferiore a quella del materiale fine. La dinamica dei frammenti balistici non influenza la dinamica del plume e dei flussi.

Con queste assunzioni, la condizione iniziale del modello per la simulazione di esplosioni freatiche è rappresentata da un volume scavato nella topografia e occupato da una miscela ad alta pressione e temperatura di gas (aria e vapore acqueo) e particelle fini, in cui sono distribuiti anche blocchi balistici di diverse dimensioni.

Il modello è già stato utilizzato per la simulazione numerica dell'eruzione della cosiddetta "Breccia di Commenda" a Vulcano (Rosi et al., 2018) e per analizzare i recenti eventi di eruzione freatica a Ontake del 2014, e alla Soufrière de Guadeloupe del 1976 (Esposti Ongaro et al., 2022). Ogni simulazione richiede da una a dodici ore su un nodo (72 cores Intel Xeon) del cluster Vesuvio installato presso la Sezione di Pisa.

Il rapporto descrive la dinamica dei fenomeni sulla base delle condizioni ipotizzate per i relativi scenari simulati. In particolare gli scenari simulati si riferiscono a scale di volume (Dense Rock Equivalent, DRE) "piccolo" ($V=0.75-1.5 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ DRE}$) e "medio" ($V=2.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ DRE}$). Allo stato attuale delle conoscenze non è possibile quantificare la probabilità di occorrenza dei singoli scenari simulati. Relativamente a quest'ultimo aspetto si rimanda alle considerazioni incluse nel "Rapporto tecnico-scientifico sul degassamento dai suoli alla Spiaggia di Levante e sulla fenomenologia in atto nello specchio d'acqua antistante" inviato dall'Istituto al Dipartimento della Protezione Civile in data 26/5/2022.



Vincoli geologici, geofisici, geochimici sulle condizioni iniziali del modello

Ai fini delle simulazioni numeriche, e della valutazione dell'incertezza ad esse associata, gli scenari di esplosione freatica considerati sono caratterizzati da tre parametri fisici principali:

1. posizione della sorgente;
2. volume totale di materiale eruttato;
3. energia specifica (per unità di massa solida) dell'esplosione.

Posizione

La posizione di un eventuale evento freatico non può essere prevista in termini precisi. Tutti gli scenari ipotizzati hanno centro eruttivo sulla Spiaggia della Baia di Levante, in coordinate UTM WGS84 [496469; 4251983] (località "vasca dei fanghi"), dove sono attualmente concentrate le maggiori emissioni di gas di origine vulcanica (Figura A).

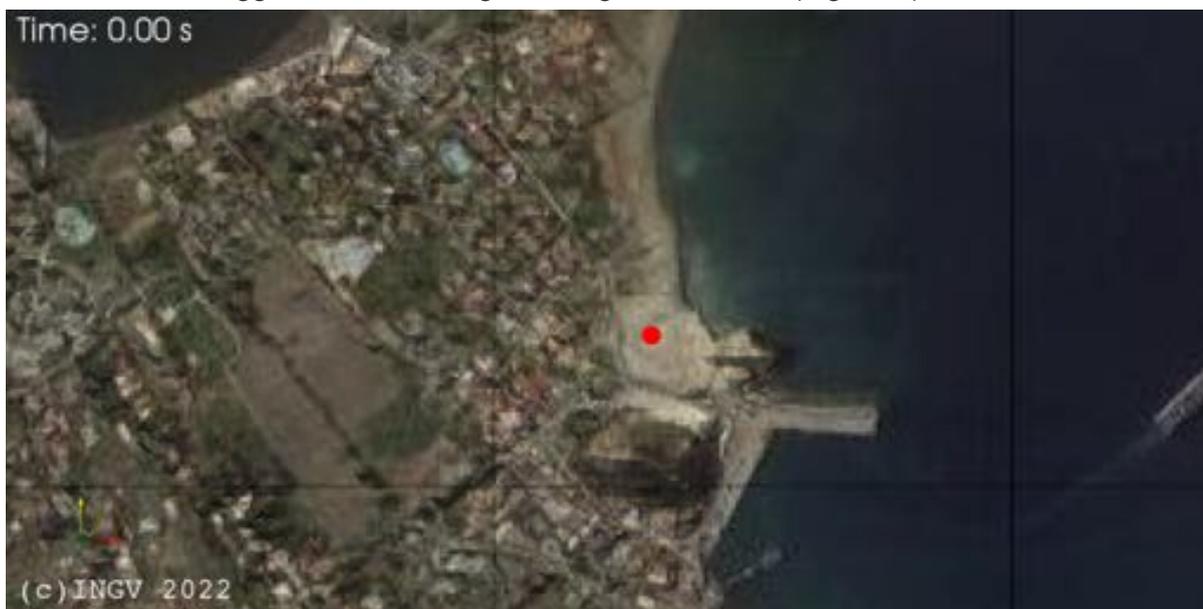


Figura A. Posizione della bocca eruttiva.

Tuttavia va osservato che, in prima approssimazione, la dinamica dei fenomeni simulati è poco influenzata dalla posizione precisa della bocca, almeno per spostamenti limitati della stessa in aree prive di rilievi topografici importanti. Di conseguenza le aree interessate dai fenomeni possono essere stimate, indicativamente, traslando le aree determinate dalle simulazioni.

E' opportuno infine evidenziare che le simulazioni presentate sono rappresentative di esplosioni freatiche che avvengono a terra ovvero non sono banalmente estendibili ad esplosioni che potrebbero avvenire nella baia della Spiaggia di Levante. In particolare, il ruolo dell'acqua liquida nella dinamica esplosiva non è considerato nel modello utilizzato.



Geometria della sorgente

Per i volumi “piccoli”, ipotizziamo che il cratere formato dall’esplosione abbia una geometria semi-ellissoidale verticale, con raggio di 5 metri e profondità 50 metri. Per i volumi “medi” ipotizziamo un cratere conico verticale, con raggio di 20 metri e profondità 100 metri (Figura B).

Crateri inclinati o asimmetrici possono modificare anche significativamente la distribuzione radiale dei prodotti (sia flussi piroclastici che ricaduta balistica).

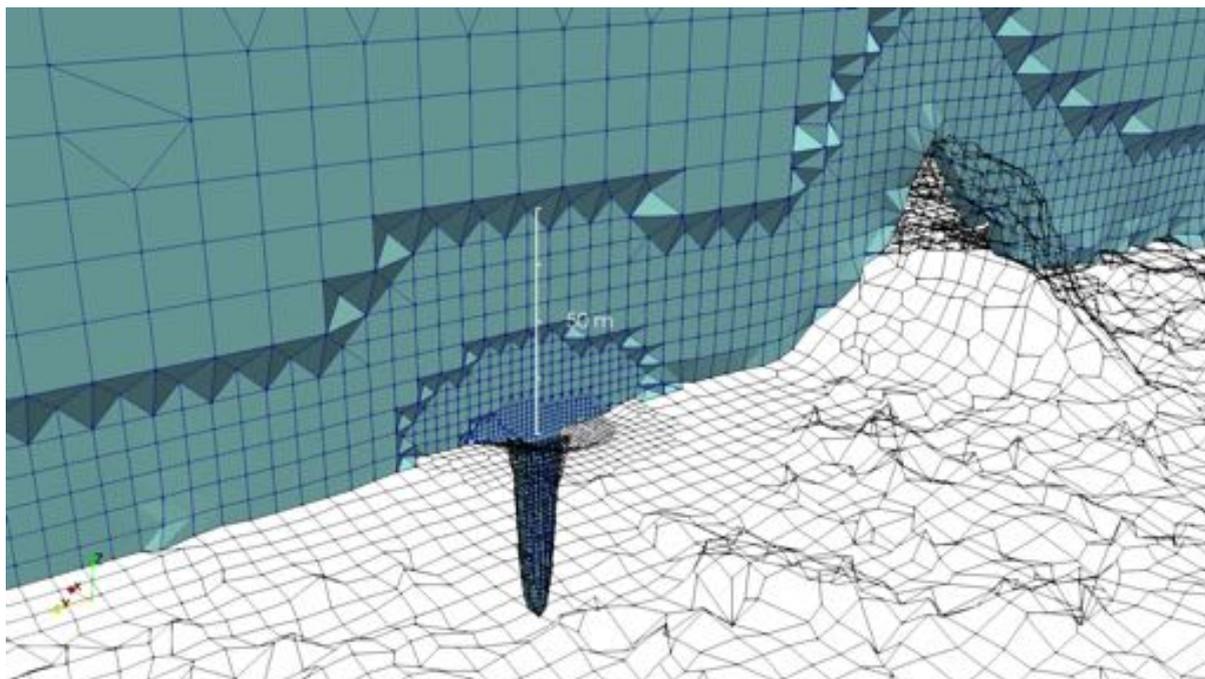


Figura B. Geometria semi-ellissoidale per il cratere dell’esplosione freatica di volume “piccolo” ($R=5$ m, $D=50$ m) e sezione della griglia di calcolo non strutturata utilizzata per le simulazioni.

Volume

Come per altri fenomeni eruttivi vulcanici, assumiamo che esista una correlazione tra magnitudo dell’evento (volume o massa di materiale solido eruttato, in $[m^3]$ o $[kg]$) e intensità (tasso di eruzione, in $[kg/s]$). Gli scenari analizzati sono pertanto classificati primariamente in base al volume di materiale emesso (Selva et al, 2020).

Esplosioni freatiche di **volume “piccolo”** ($V < 10^4$ DRE) sono state documentate ad altri vulcani attivi che ospitano sistemi idrotermali (p.e. a La Soufrière de Guadeloupe; Esposti Ongaro et al., 2022). Esse interessano aree generalmente abbastanza limitate (centinaia di metri dalla bocca eruttiva), ma costituiscono evidentemente un rischio significativo in aree abitate o largamente frequentate da turisti.

Eruzioni freatiche di **volume “medio”** ($10^4 < V < 10^5$) sono da considerarsi meno frequenti e quindi meno probabili. Il caso recente dell’eruzione di Whakaari (White Island, NZ, 2019), appartiene a tale categoria e dimostra l’alto impatto di flussi e proiettili balistici, sebbene in un’area relativamente prossimale ($R \sim 1$ km), di questa categoria di eventi.



Sebbene non siano documentate eruzioni freatiche per taglie medio-piccole a Vulcano (probabilmente a causa della natura effimera dei depositi da esse generati, che hanno spessori medi verosimilmente di ordine centimetrico) tali fenomeni sono considerati possibili, in analogia con quanto osservato per altri vulcani analoghi.

Energia specifica

L'energia specifica coinvolta in un'esplosione freatica non è facilmente quantificabile sulla base dei dati geologici. Generalmente, esplosioni più energetiche producono anche volumi maggiori, ma tale correlazione può cambiare in base al tipo di materiale eruttato, alla resistenza delle rocce, al tipo di processo esplosivo (in particolare, in presenza o meno di acqua liquida). Per quantificare l'effetto dell'energia ci basiamo su modelli teorici (Wilson, 1980; Eq. 1) e sugli studi sperimentali (Montanaro et al., 2016), che quantificano la **densità di energia disponibile** durante un'esplosione freatica nel range 1-10 [MJ/m³], ossia ~1-10 [kJ/kg]. Data l'incertezza su questo parametro, sono esplorati anche episodi più energetici, fino a 20 [kJ/kg].

Nel caso adiabatico, l'energia specifica è espressa dalla seguente formula:

$$\varepsilon_{adi} = \left(\frac{1-\alpha_p}{\alpha_p} \right) \frac{P_0}{\rho_s} \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \right) \left[1 - \left(\frac{P_{atm}}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] + \frac{1}{\rho_s} (P_0 - P_{atm}) \quad (\text{Eq. 1})$$

Si osserva che, in questo modello, l'energia di espansione dipende solo dalla pressione iniziale e dalla massa di vapore disponibile per l'espansione. Il vapore d'acqua è considerato l'unica specie gassosa coinvolta nell'esplosione e quindi nelle simulazioni realizzate non si tiene conto della presenza di altri gas vulcanici potenzialmente coinvolti nell'evento, il cui effetto è comunque di second'ordine nella dinamica esplosiva. La temperatura è ugualmente un parametro importante da considerare in quanto influenza la dinamica del plume eruttivo formato dall'esplosione. La dinamica dei balistici è invece poco sensibile alla temperatura iniziale.

Temperatura

Nei casi in esame, si assumono temperature uguali alla temperatura di equilibrio chimico misurata alle fumarole (200 °C; si veda il "Rapporto tecnico-scientifico sul degassamento dai suoli alla Spiaggia di Levante e sulla fenomenologia in atto nello specchio d'acqua antistante" inviato da INGV al Dipartimento della Protezione Civile in data 26/5/2022). Considereremo in questo studio anche fenomeni in cui la temperatura aumenti fino ad avvicinarsi al punto critico dell'acqua (360 °C).

Pressione

Per definire il range di variabilità della pressione iniziale P_0 , consideriamo i seguenti vincoli:

1. la pressione iniziale non può essere inferiore alla **pressione idrostatica o litostatica** alla profondità dell'esplosione.

Nei casi in esame, ipotizziamo un'esplosione freatica innescata dalla sovrappressione generata dall'aumento della temperatura nell'acquifero sottostante la Spiaggia di



Levante. Questo dovrebbe essere localizzato ad una profondità inferiore a 200 m, corrispondenti ad una pressione idrostatica di 2 MPa e litostatica di 4-5 MPa.

2. la pressione iniziale è uguale o superiore alla **pressione di equilibrio liquido-vapore** alla temperatura iniziale.

Alla temperatura di 200°C, la pressione di saturazione del vapore acqueo in condizioni ideali sarebbe uguale a 1.5 MPa. Alla temperatura di 260°C, la pressione di saturazione del vapore acqueo in condizioni ideali sarebbe uguale a 5 MPa. Alla temperatura di 360 °C la pressione di saturazione del vapore acqueo in condizioni ideali sarebbe uguale a 19 MPa.

3. Infine, assumiamo che la sovrappressione iniziale non possa superare la **resistenza delle rocce**. Indicativamente, assumiamo valori di "rock strength" non superiori a 10 MPa per le tipologie di roccia alterata a Vulcano.

Granulometria del materiale fine e dimensione dei balistici

Assumiamo un diametro medio della cenere emessa durante l'esplosione di 100 micron. Granulometrie più grossolane possono favorire condizioni più collassanti del pennacchio (plume) generato dall'esplosione, e la formazione di correnti piroclastiche più intense, ma non cambiano sostanzialmente la dinamica esplosiva. In tutti gli scenari ipotizzati sono state simulate le traiettorie di blocchi balistici di 3 diametri: 1cm, 5cm e 10cm. Il numero di balistici simulato per ogni taglia non è rappresentativo del numero reale di balistici prodotti durante un'esplosione freatica, ma è sufficientemente grande per poter ottenere mappe di ricaduta a terra.



Scenari simulati

Sulla base dei vincoli geologici, geofisici e geochimici sopra riportati, i parametri principali che definiscono le condizioni iniziali per gli scenari simulati sono riportati in Tabella 1.

Input								Output	
ID	Vent geom (R/D)	Volume DRE [m ³]	α_p	n_g	P [MPa]	T [°C]	Energia specifica ε_{adi} [kJ/kg]	Rmax [km]	PDC runout [km]
1	5/50	750	0.3	0.026	5.0	200°	14.0	0.50	no
2		1500	0.6	0.008	5.0		5.4	0.30	0.70
3		750	0.3	0.013	2.5		7.0	0.25	0.35
4		750	0.3	0.005	1.0		2.8	0.10	0.50
5	5/50	750	0.3	0.020	5.0	360°	14.0	0.50	no
6		1500	0.6	0.006	5.0		5.4	0.30	0.50
7		750	0.3	0.010	2.5		7.0	0.30	0.25
8		750	0.3	0.004	1.0		2.8	0.10	0.45
9	20/100	24700	0.3	0.017	5.0	460°	14.0	0.60	no
10		24700	0.3	0.027	5.0	177°	14.0	0.60	1.0

Tabella 1. Parametri di simulazione per gli scenari di esplosione freatica. ID: identificativo della simulazione; R/D: misure del raggio in superficie e della profondità del cratere (di forma approssimativamente conica) interessato dall'evento esplosivo; Volume (Dense Rock Equivalent) interessato dall'esplosione; α_p : frazione in volume di particelle solide nella miscela esplosiva, subito dopo la frammentazione; n_g : frazione in massa di gas. P: pressione dei gas; T: temperatura del volume interessato dall'esplosione; Rmax: massima distanza ($\pm 10\%$) raggiunta dai proiettili balistici considerati; PDC runout: massima distanza (± 0.1 km) raggiunta dai flussi piroclastici (quando prodotti) a terra (non si considera l'effetto del mare). Si noti che tale distanza è variabile con la direzione, in funzione della morfologia del terreno e della dinamica di collasso del plume.

Risultati

Per ogni simulazione, riportiamo in Tabella 1 le distanze massime di ricaduta balistica e dei flussi piroclastici, quando prodotti. Nelle immagini seguenti sono rappresentate le isosuperfici $\alpha_p=10^{-6}$ ed i valori al suolo della frazione volumetrica delle particelle. Nelle stesse immagini, sono inoltre riportate le posizioni dei proiettili balistici al suolo, colorati in funzione della loro dimensione (in metri). L'immagine satellitare dell'isola di Vulcano è stata sovrapposta al modello digitale del terreno a risoluzione 1 m.

Per alcune simulazioni sono mostrate anche le mappe della distribuzione di balistici a terra, calcolate su una griglia con celle di 20 m di lato. La scala dei colori rappresenta il logaritmo in base 10 della percentuale di balistici caduti in ogni cella.

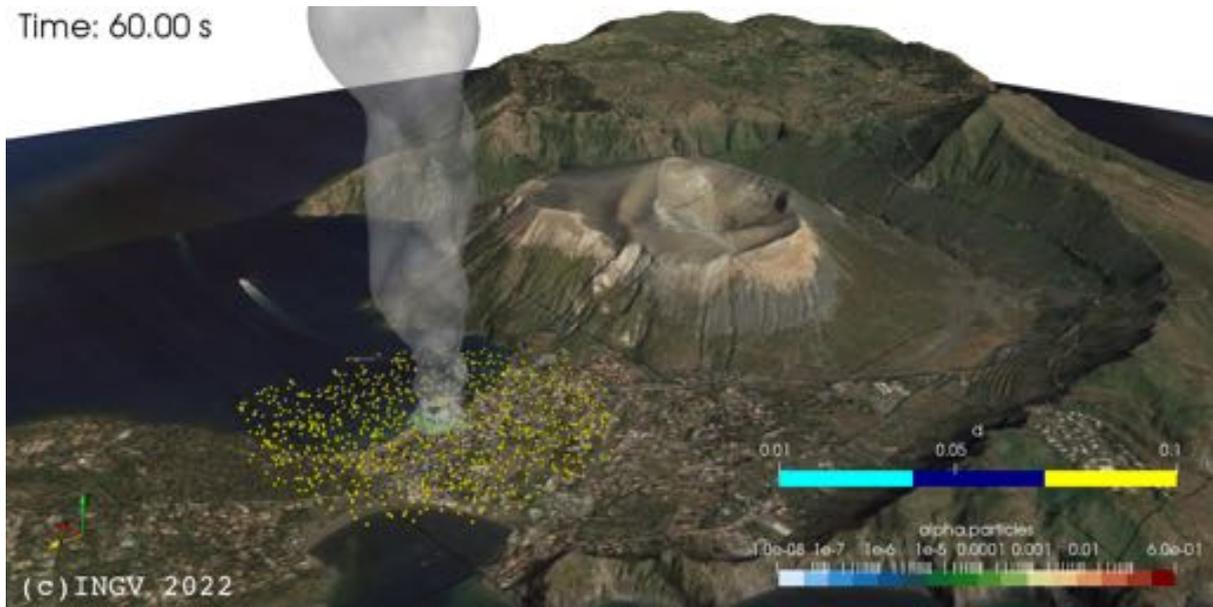


Le mappe mostrate sono disponibili in formato georeferenziato raster ESRI ASCII (.asc).

Esplosioni freatiche di “piccolo volume” ($V < 10^3 \text{ m}^3 \text{ DRE}$) e Bassa Temperatura ($T=200^\circ\text{C}$)

ID1: $\alpha_p = 0.3$; $P=5 \text{ MPa}$; $T=200^\circ\text{C}$

Time: 60.00 s



Time: 60.00 s

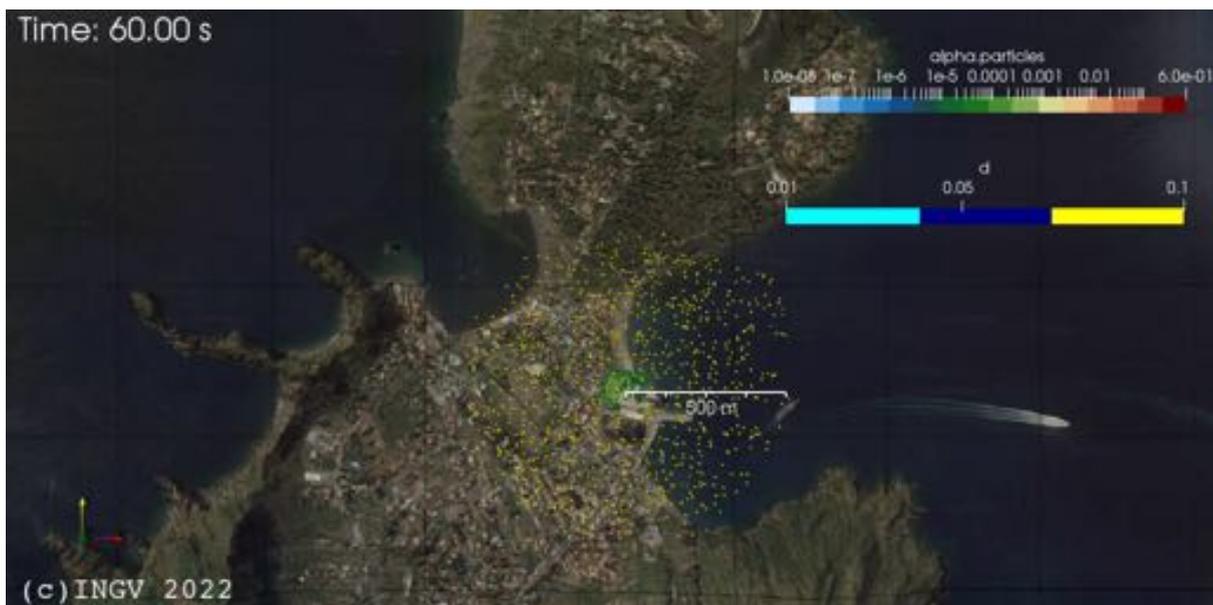


Figura 1 (ID1). Simulazione 3D di esplosione freatica di volume “piccolo” ($V=0.75 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ DRE}$) con bocca localizzata nella Baia di Levante (ID 1 in Tabella 1) al tempo $t=30 \text{ s}$.

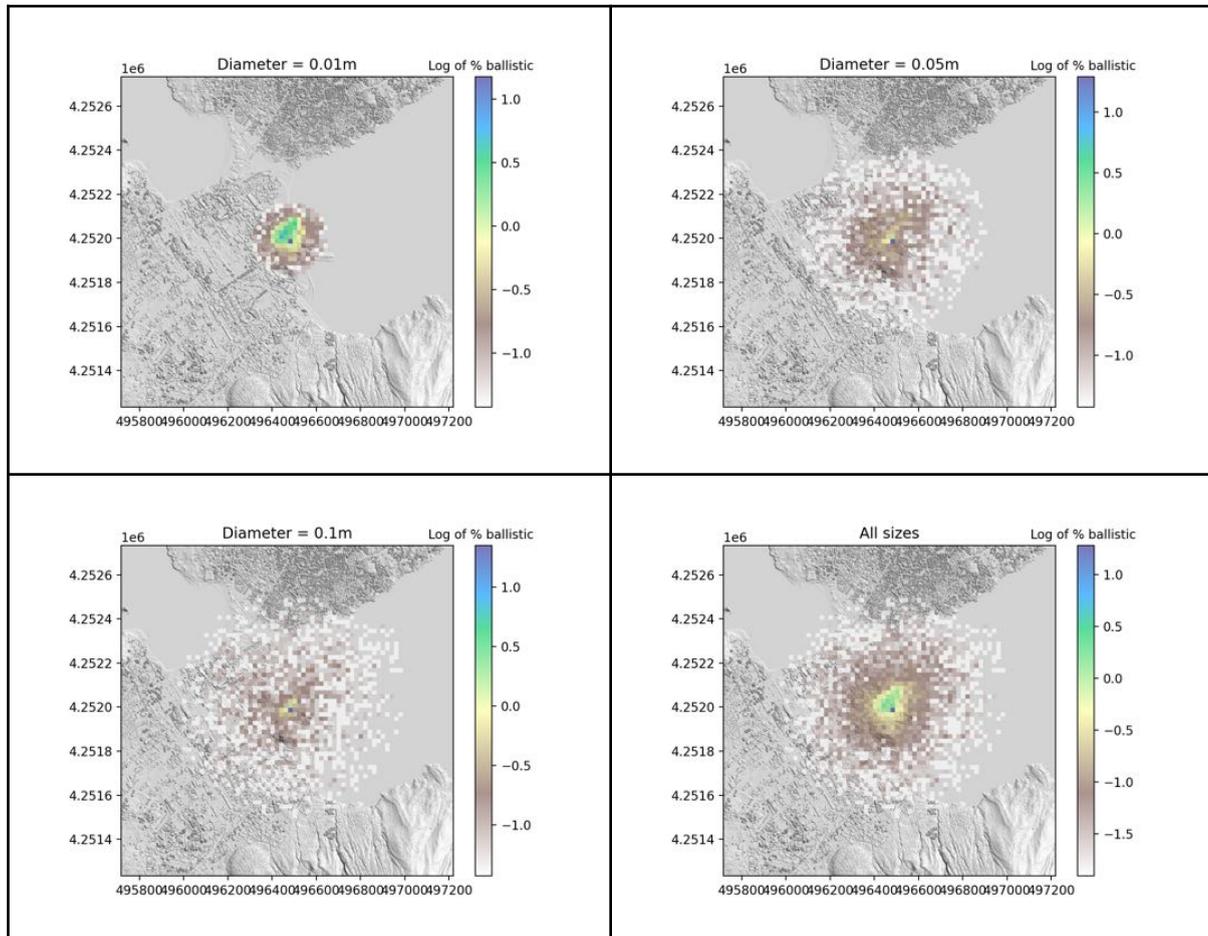


Figura 1B. Mappe di impatto a terra dei balistici per eruzione freatica di volume “piccolo” ($V=0.75 \times 10^3 \text{ m}^3$, DRE) con bocca localizzata nella spiaggia della Baia di Levante e temperatura di $200 \text{ }^\circ\text{C}$ (473 K, ID1 in Tabella 1) e pressione iniziale di 5.0MPa. La scala di colori rappresenta il logaritmo in base 10 della percentuale dei balistici ricaduti nelle celle della griglia di post-processing, con risoluzione di 20m. La mappa in alto a sinistra è relativa ai balistici di 1cm di diametro, quella in alto a destra ai balistici di 5cm di diametro, quella in basso a sinistra ai balistici di 10cm di diametro e quella in basso a destra a tutti i balistici.



ID2: $\alpha_p = 0.6$; P=5 MPa; T=200°C

Time: 60.00 s



Time: 60.00 s



Figura 2 (ID 2). Simulazione 3D di eruzione freatica di volume "piccolo" ($V=0.75 \times 10^3 \text{ m}^3$, DRE) con bocca localizzata nella Baia di Levante (ID 2 in Tabella 1) al tempo $t=30 \text{ s}$.

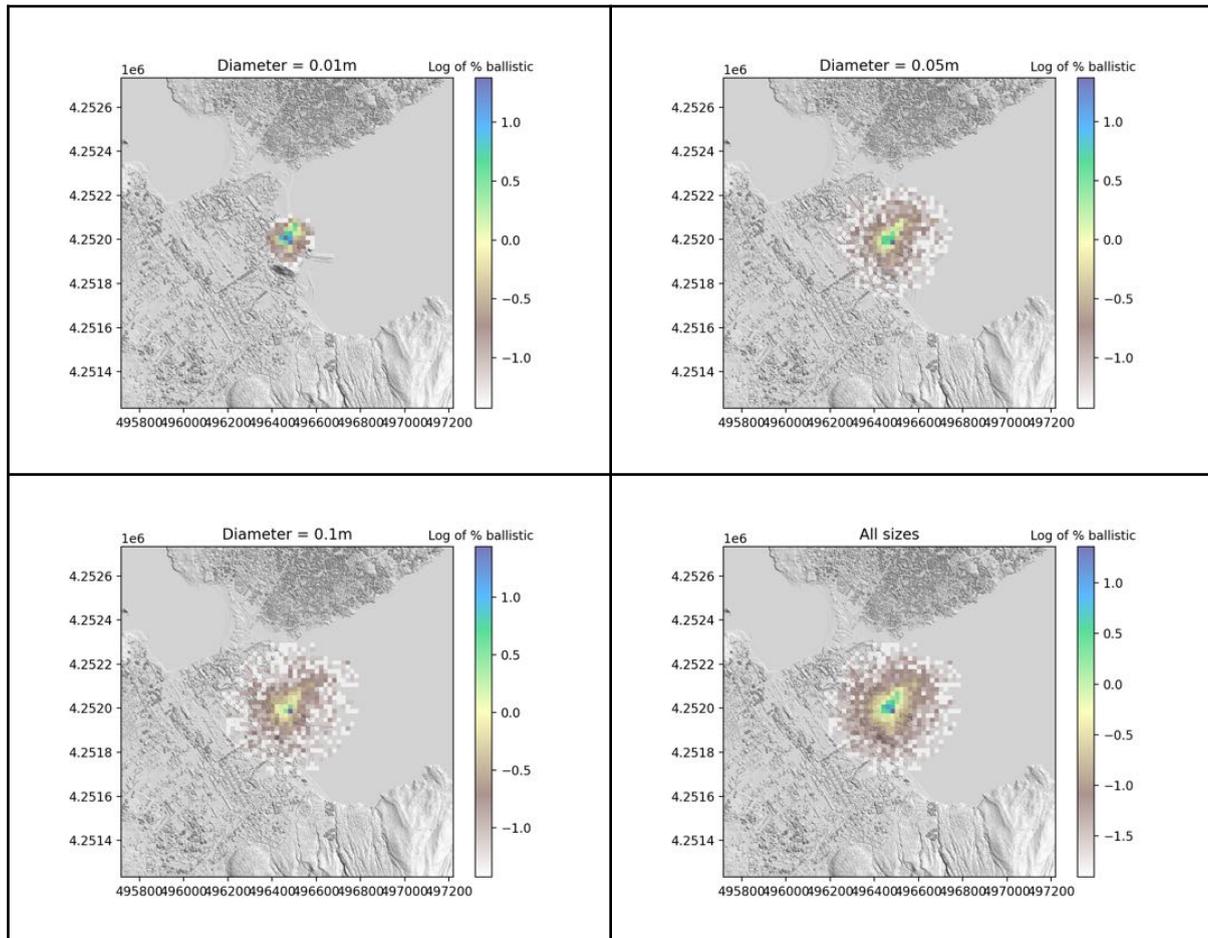


Figura 2B (ID2). Mappe di impatto a terra dei balistici per eruzione freatica di volume “piccolo” ($V=1.5 \times 10^3 \text{ m}^3$, DRE) con bocca localizzata nella spiaggia della Baia di Levante e temperatura di $200 \text{ }^\circ\text{C}$ (473 K, ID2 in Tabella 1) e pressione iniziale di 5.0MPa. La scala di colori rappresenta il logaritmo in base 10 della percentuale dei balistici ricaduti nelle celle della griglia di post-processing, con risoluzione di 20m. La mappa in alto a sinistra è relativa ai balistici di 1cm di diametro, quella in alto a destra ai balistici di 5cm di diametro, quella in basso a sinistra ai balistici di 10cm di diametro e quella in basso a destra a tutti i balistici.



ID3: $\alpha_p = 0.3$; $P = 2.5 \text{ MPa}$; $T = 200^\circ\text{C}$

Time: 60.00 s



Time: 60.00 s



Figura 3 (ID 3). Simulazione 3D di eruzione freatica di volume "piccolo" ($V = 0.75 \times 10^3 \text{ m}^3$, DRE) con bocca localizzata nella Baia di Levante (ID 3 in Tabella 1) al tempo $t = 30 \text{ s}$.

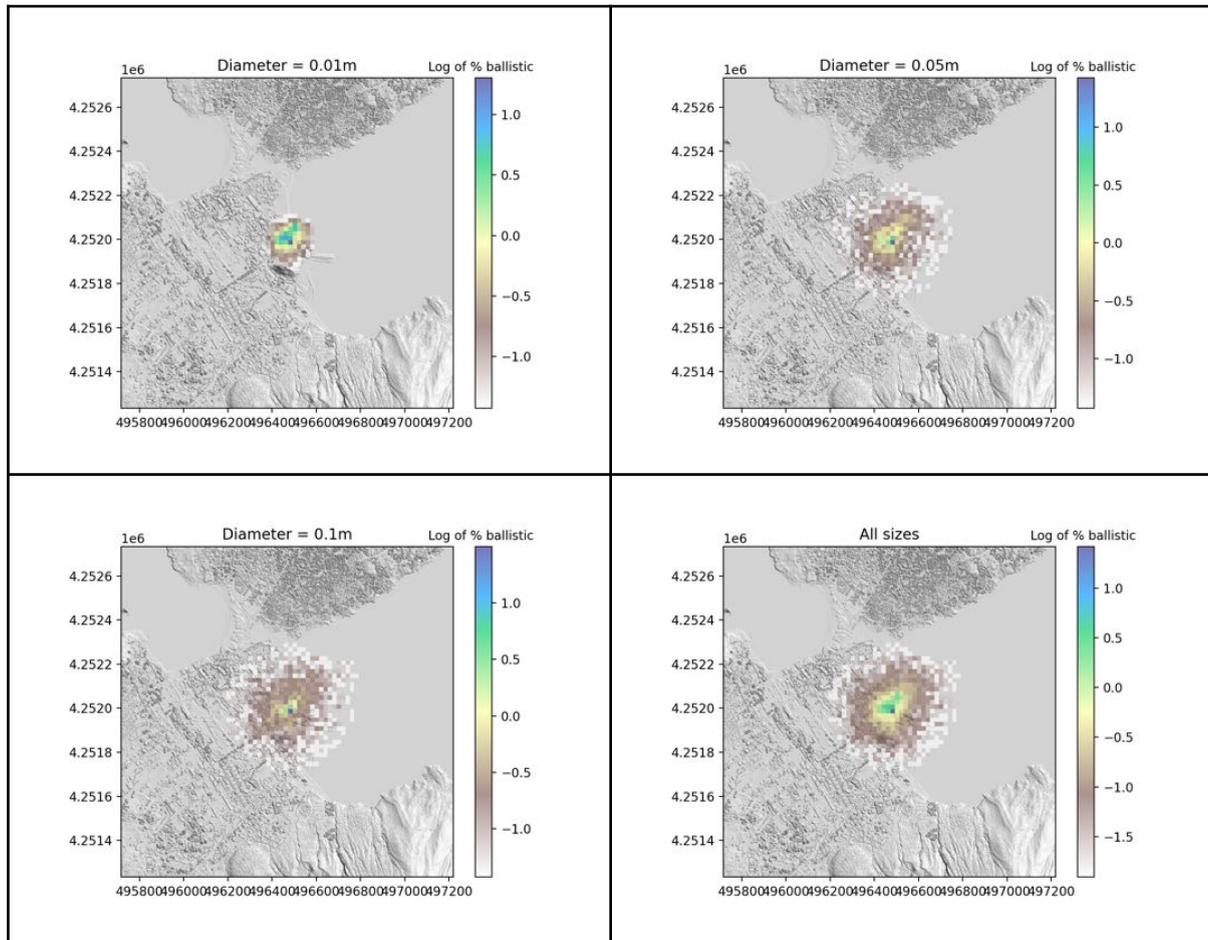


Figura 3B (ID3). Mappe di impatto a terra dei balistici per eruzione freatica di volume “piccolo” ($V=0.75 \times 10^3 \text{ m}^3$, DRE) con bocca localizzata nella spiaggia della Baia di Levante e temperatura di 200 °C (473 K, ID3 in Tabella 1) e pressione iniziale di 2.5MPa. La scala di colori rappresenta il logaritmo in base 10 della percentuale dei balistici ricaduti nelle celle della griglia di post-processing, con risoluzione di 20m. La mappa in alto a sinistra è relativa ai balistici di 1cm di diametro, quella in alto a destra ai balistici di 5cm di diametro, quella in basso a sinistra ai balistici di 10cm di diametro e quella in basso a destra a tutti i balistici.



ID4: $\alpha_p = 0.3$; $P = 1.0$ MPa; $T = 200^\circ\text{C}$

Time: 60.00 s



Time: 60.00 s



Figura 4 (ID 4). Simulazione 3D di eruzione freatica di volume "piccolo" ($V = 0.75 \times 10^3 \text{ m}^3$, DRE) con bocca localizzata nella Baia di Levante (ID 4 in Tabella 1) al tempo $t = 30$ s.

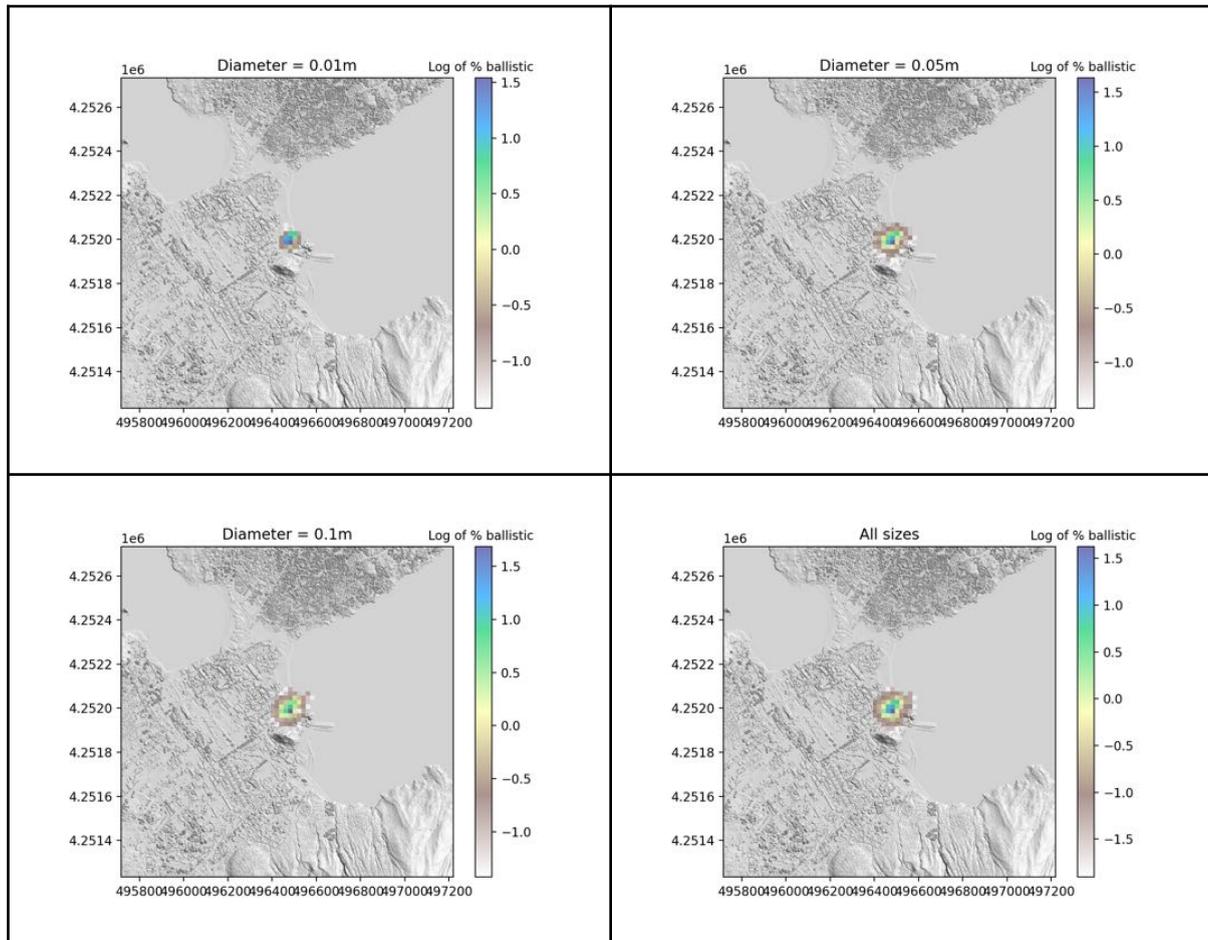


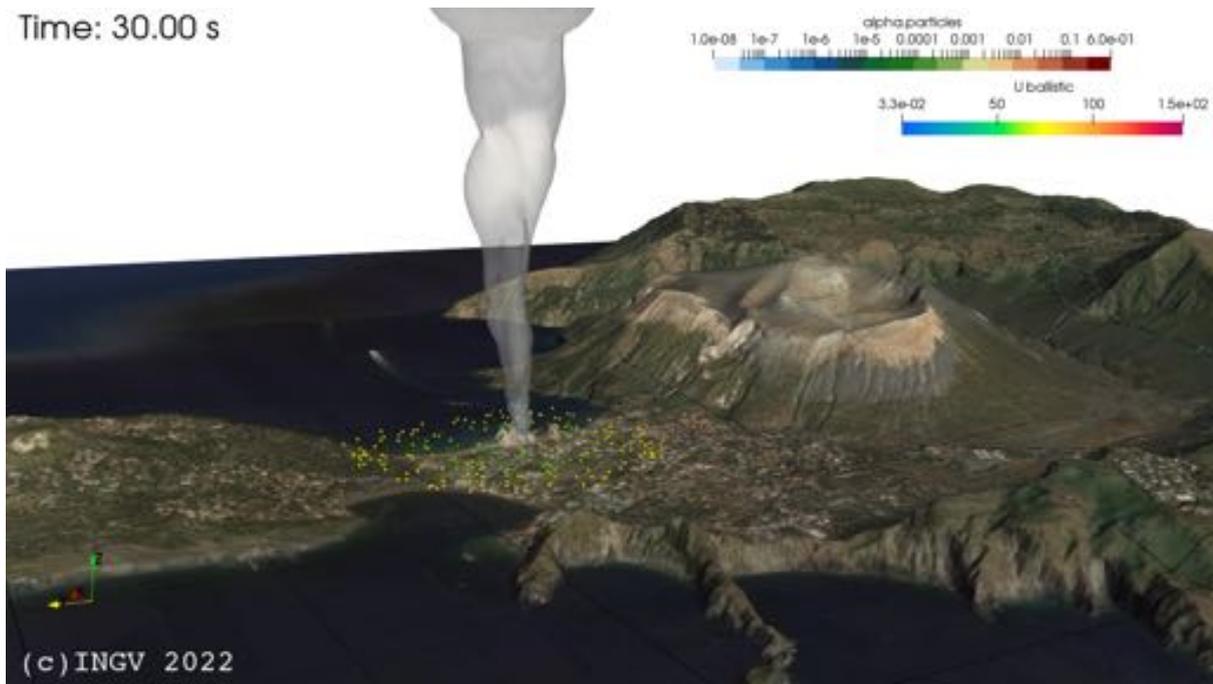
Figura 4B (ID4). Mappe di impatto a terra dei balistici per eruzione freatica di volume “piccolo” ($V=0.75 \times 10^3 \text{ m}^3$, DRE) con bocca localizzata nella spiaggia della Baia di Levante e temperatura di 200 °C (273 K, ID4 in Tabella 1) e pressione iniziale di 1.0MPa. La scala di colori rappresenta il logaritmo in base 10 della percentuale dei balistici ricaduti nelle celle della griglia di post-processing, con risoluzione di 20m. La mappa in alto a sinistra è relativa ai balistici di 1cm di diametro, quella in alto a destra ai balistici di 5cm di diametro, quella in basso a sinistra ai balistici di 10cm di diametro e quella in basso a destra a tutti i balistici.



Esplosioni freatiche di “piccolo volume” ($V < 10^3 \text{ m}^3 \text{ DRE}$), Alta Temperatura ($T=360^\circ\text{C}$)

ID5: $\alpha_p = 0.3$; $P=5 \text{ MPa}$; $T=360^\circ\text{C}$

Time: 30.00 s



Time: 30.00 s



Figura 5. Simulazione 3D del caso di eruzione freatica di volume “piccolo” ($V=0.75 \times 10^3 \text{ m}^3$, DRE) con bocca localizzata nella Baia di Levante (ID 1 in Tabella 1) al tempo $t=30 \text{ s}$.



ID6: $\alpha_p = 0.6$; P=5 MPa; T=360°C

Time: 60.00 s



Time: 60.00 s



Figura 6. Simulazione 3D del caso di eruzione freatica di volume "piccolo" ($V=1.5 \times 10^3 \text{ m}^3$, DRE) con bocca localizzata nella Baia di Levante (ID 6 in Tabella 1) al tempo $t=30 \text{ s}$.

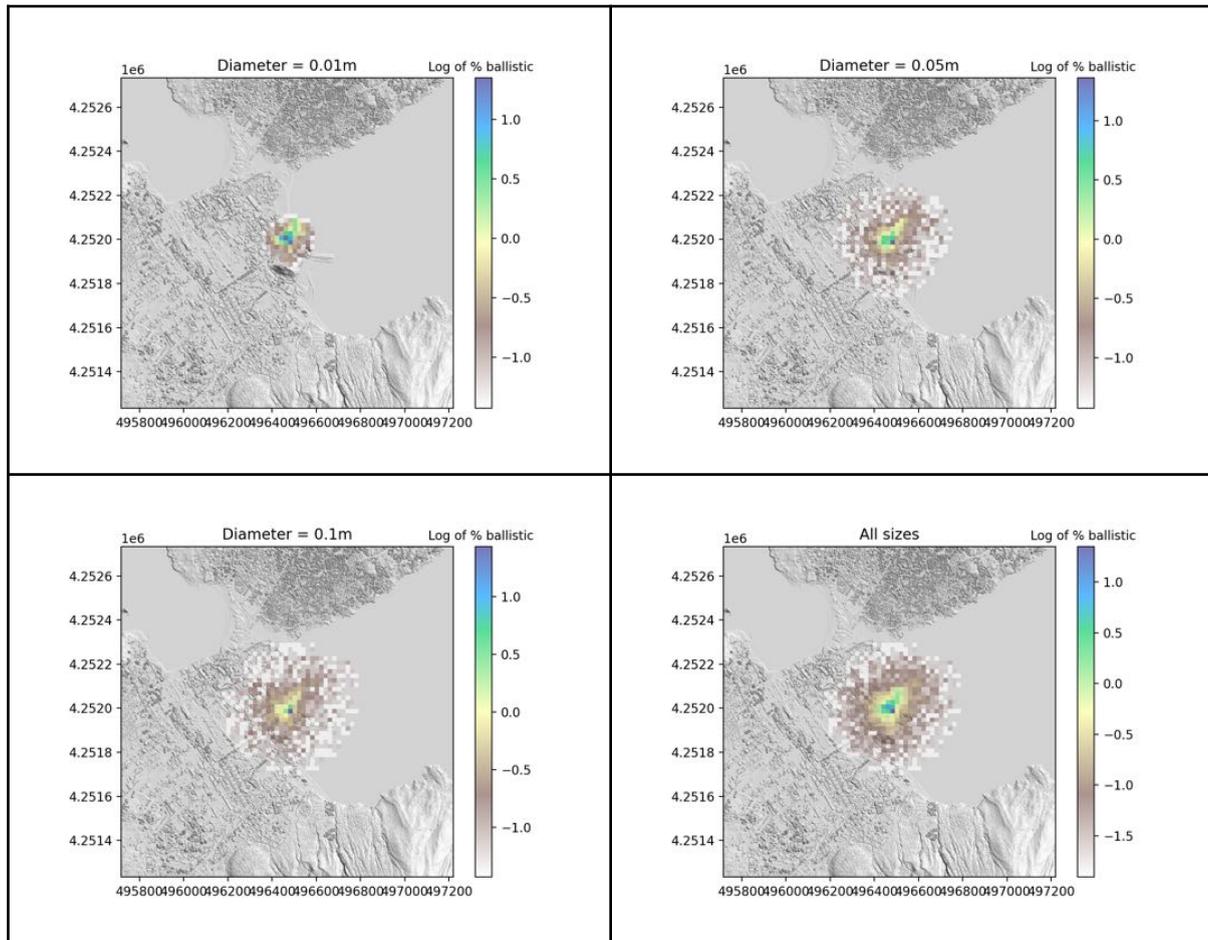


Figura 6B (ID6). Mappe di impatto a terra dei balistici per eruzione freatica di volume “piccolo” ($V=1.5 \times 10^3 \text{ m}^3$, DRE) con bocca localizzata nella spiaggia della Baia di Levante e temperatura di $360 \text{ }^\circ\text{C}$ (633 K, ID6 in Tabella 1) e pressione iniziale di 5.0MPa. La scala di colori rappresenta il logaritmo in base 10 della percentuale dei balistici ricaduti nelle celle della griglia di post-processing, con risoluzione di 20m. La mappa in alto a sinistra è relativa ai balistici di 1cm di diametro, quella in alto a destra ai balistici di 5cm di diametro, quella in basso a sinistra ai balistici di 10cm di diametro e quella in basso a destra a tutti i balistici.



ID7: $\alpha_p = 0.3$; $P = 2.5 \text{ MPa}$; $T = 360^\circ\text{C}$

Time: 60.00 s



Time: 60.00 s



Figura 7 (ID7). Simulazione 3D del caso di eruzione freatica di volume "piccolo" ($V = 0.75 \times 10^3 \text{ m}^3$, DRE) con bocca localizzata nella Baia di Levante (ID 7 in Tabella 1) al tempo $t = 30 \text{ s}$.

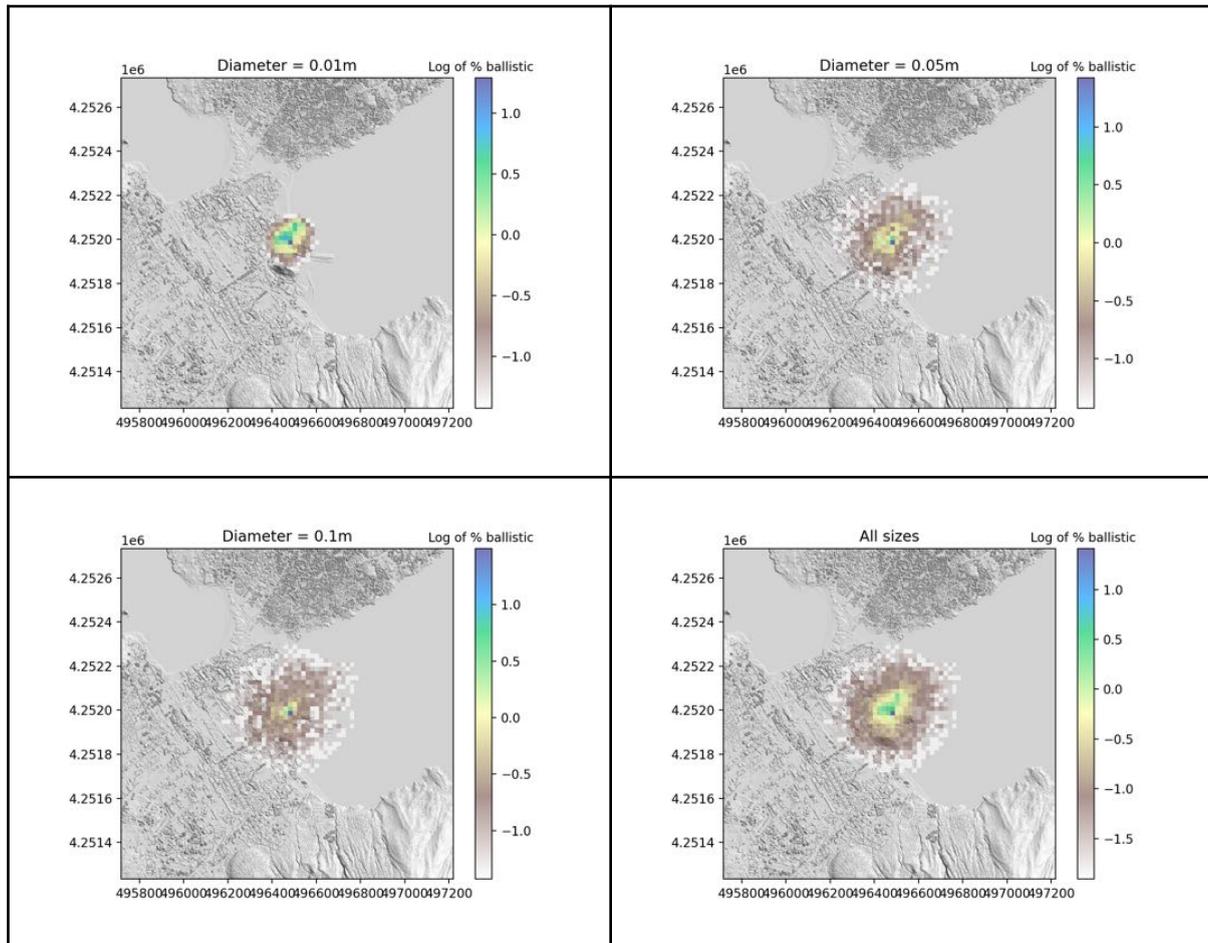


Figura 7B (ID7). Mappe di impatto a terra dei balistici per eruzione freatica di volume "piccolo" ($V=0.75 \times 10^3 \text{ m}^3$, DRE) con bocca localizzata nella spiaggia della Baia di Levante e temperatura di 360°C (633 K, ID7 in Tabella 1) e pressione iniziale di 2.5MPa. La scala di colori rappresenta il logaritmo in base 10 della percentuale dei balistici ricaduti nelle celle della griglia di post-processing, con risoluzione di 20m. La mappa in alto a sinistra è relativa ai balistici di 1cm di diametro, quella in alto a destra ai balistici di 5cm di diametro, quella in basso a sinistra ai balistici di 10cm di diametro e quella in basso a destra a tutti i balistici.



ID8: $\alpha_p = 0.3$; P=1 MPa; T=360°C

Time: 60.00 s



Time: 60.00 s



Figura 8 (ID 8). Simulazione 3D del caso di eruzione freatica di volume “piccolo” ($V=0.75 \times 10^3 \text{ m}^3$, DRE) con bocca localizzata nella Baia di Levante (ID 8 in Tabella 1) al tempo $t=30 \text{ s}$.

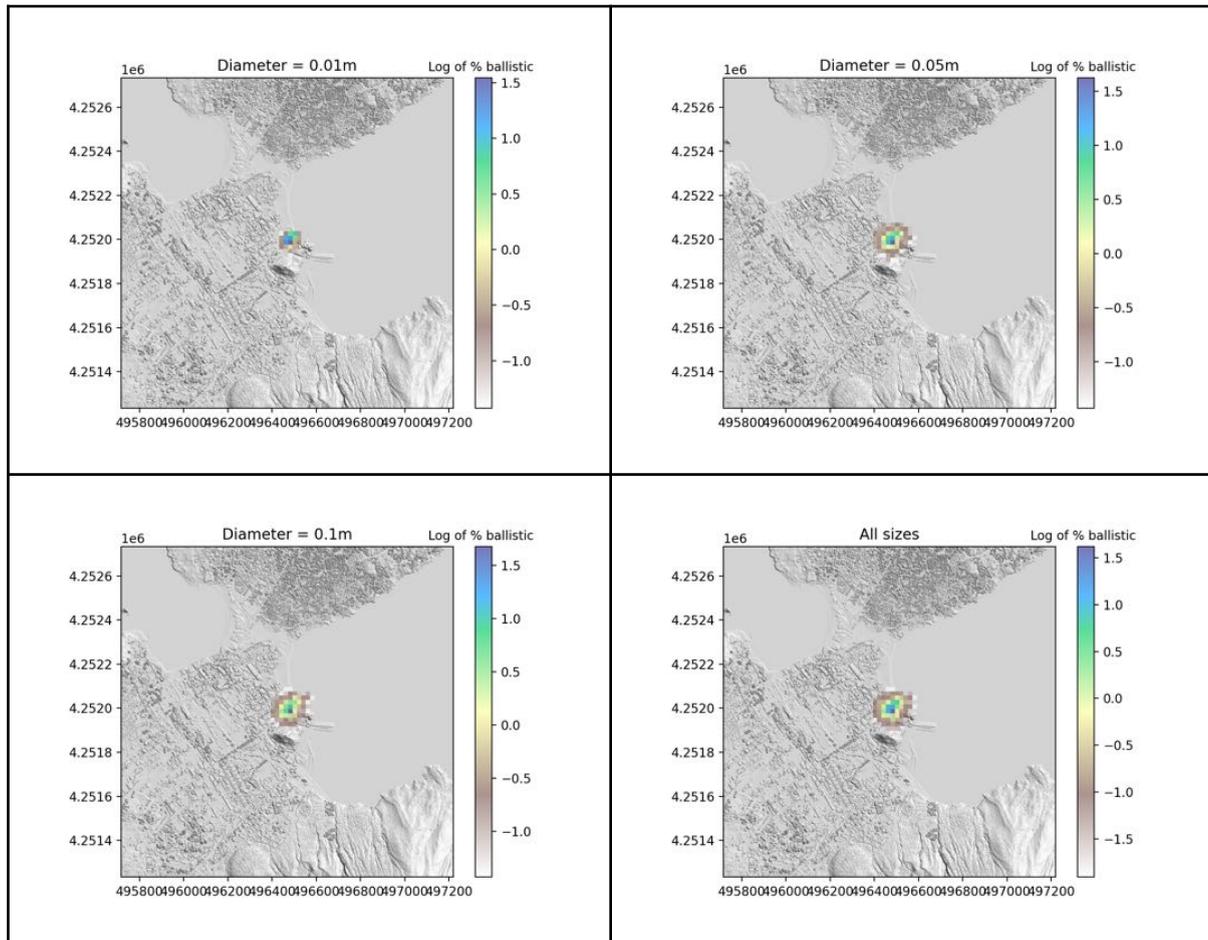


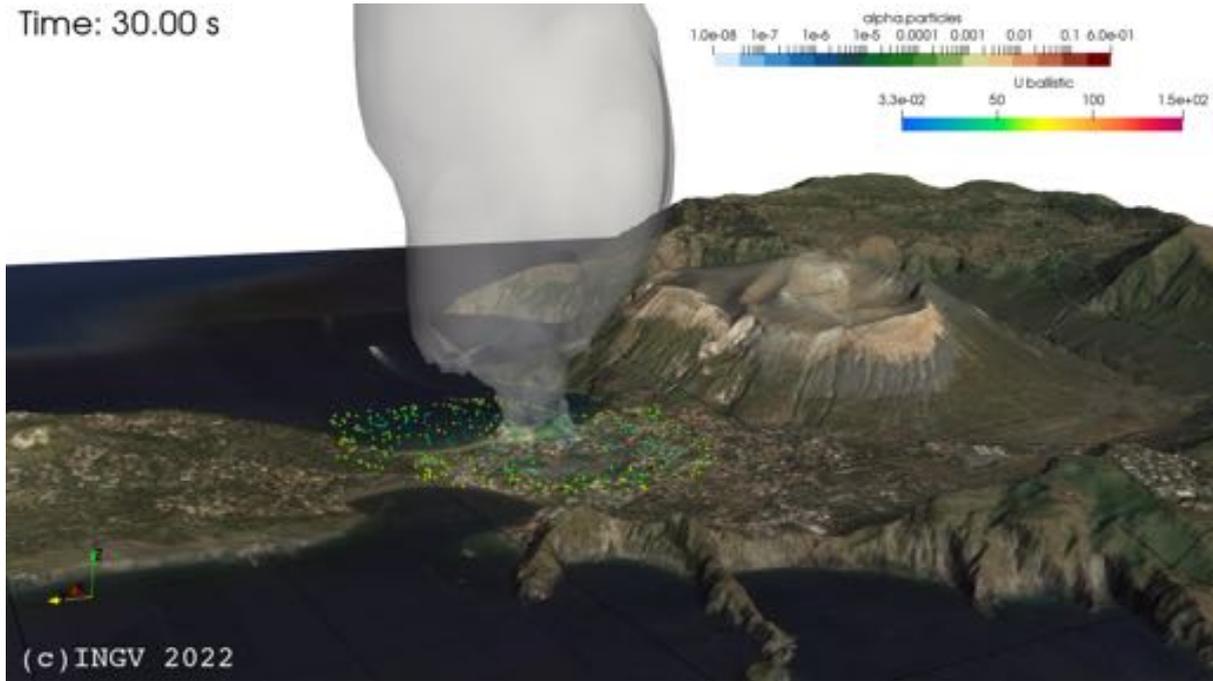
Figura 8B (ID8). Mappe di impatto a terra dei balistici per eruzione freatica di volume “piccolo” ($V=0.75 \times 10^3 \text{ m}^3$, DRE) con bocca localizzata nella spiaggia della Baia di Levante e temperatura di 360 °C (633 K, ID8 in Tabella 1) e pressione iniziale di 1.0MPa. La scala di colori rappresenta il logaritmo in base 10 della percentuale dei balistici ricaduti nelle celle della griglia di post-processing, con risoluzione di 20m. La mappa in alto a sinistra è relativa ai balistici di 1cm di diametro, quella in alto a destra ai balistici di 5cm di diametro, quella in basso a sinistra ai balistici di 10cm di diametro e quella in basso a destra a tutti i balistici.



Esplosione freatica di “medio volume” ($V = 2.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ DRE}$) e Alta Temperatura ($T=460^\circ\text{C}$)

ID 9: $\alpha_p = 0.3$; $P=5 \text{ MPa}$; $T=460^\circ\text{C}$

Time: 30.00 s



Time: 30.00 s

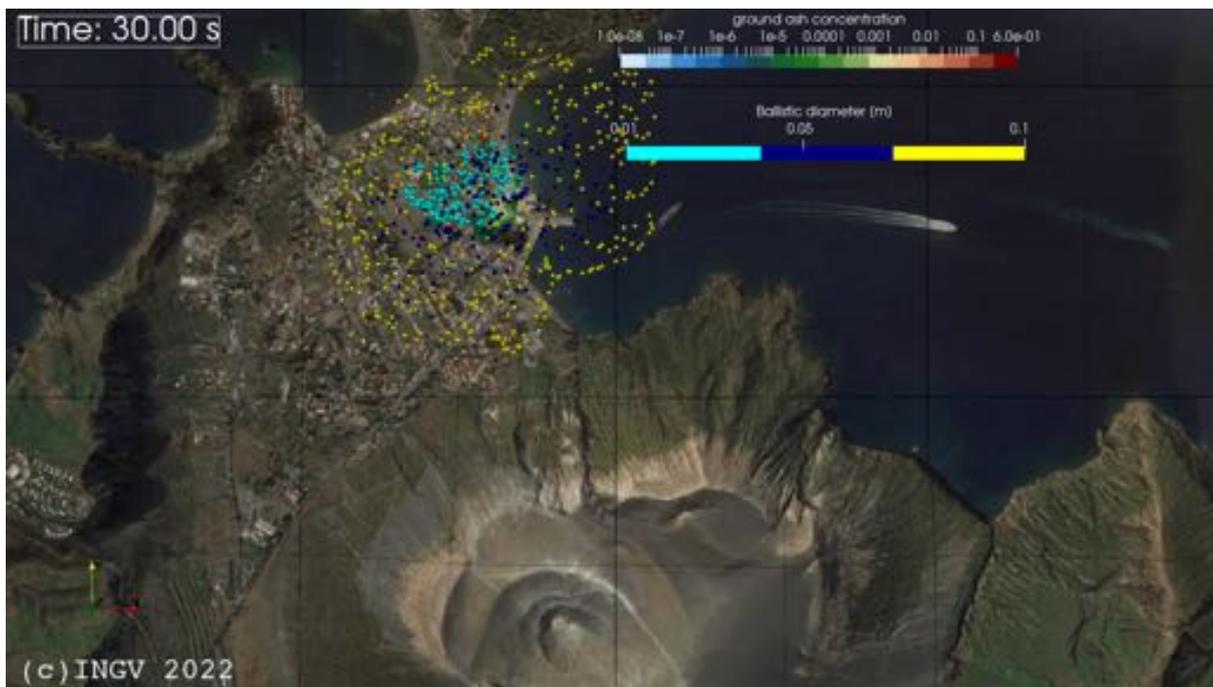


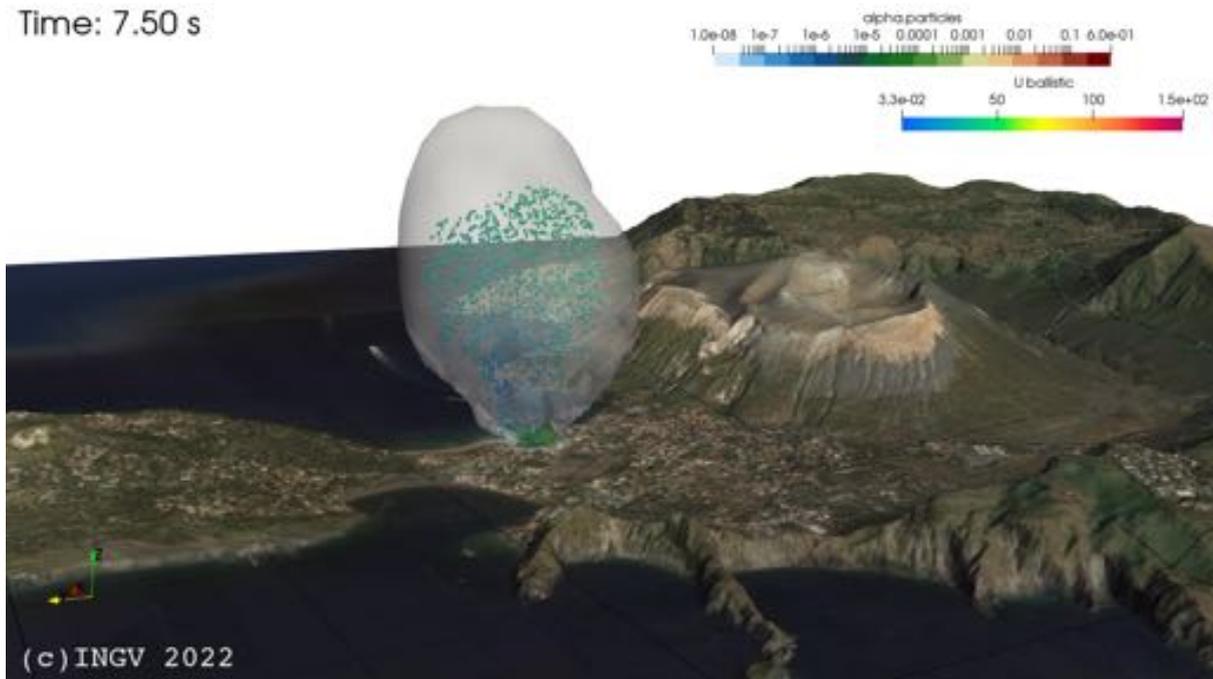
Figura 9. Simulazione 3D dello scenario di esplosione freatica di volume “medio” ($V=2.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ DRE}$) con bocca localizzata nella Spiaggia di Levante (ID 9 in Tabella 1) al tempo $t=30 \text{ s}$.



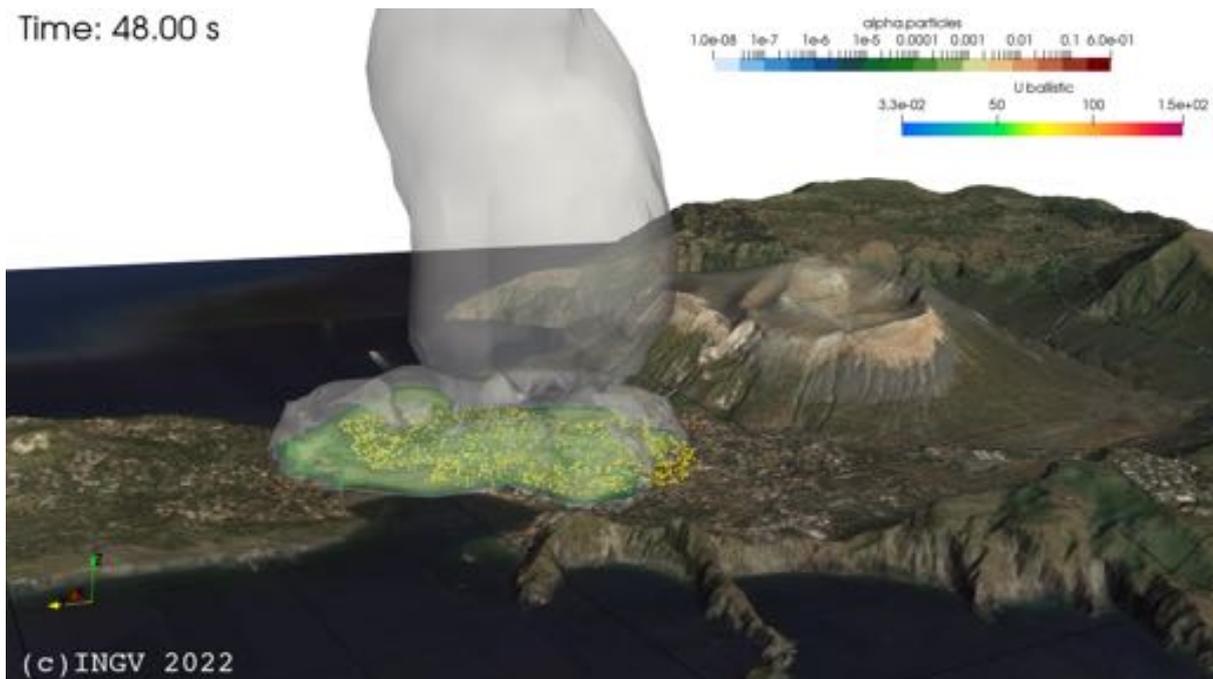
Esplosione freatica di volume “medio” ($V=10^4\text{-}10^5 \text{ m}^3$ DRE) e bassa temperatura ($T= 177^\circ\text{C}$)

ID10: $\alpha_p=0.3$; $P=5 \text{ MPa}$; $T=177^\circ\text{C}$

Time: 7.50 s

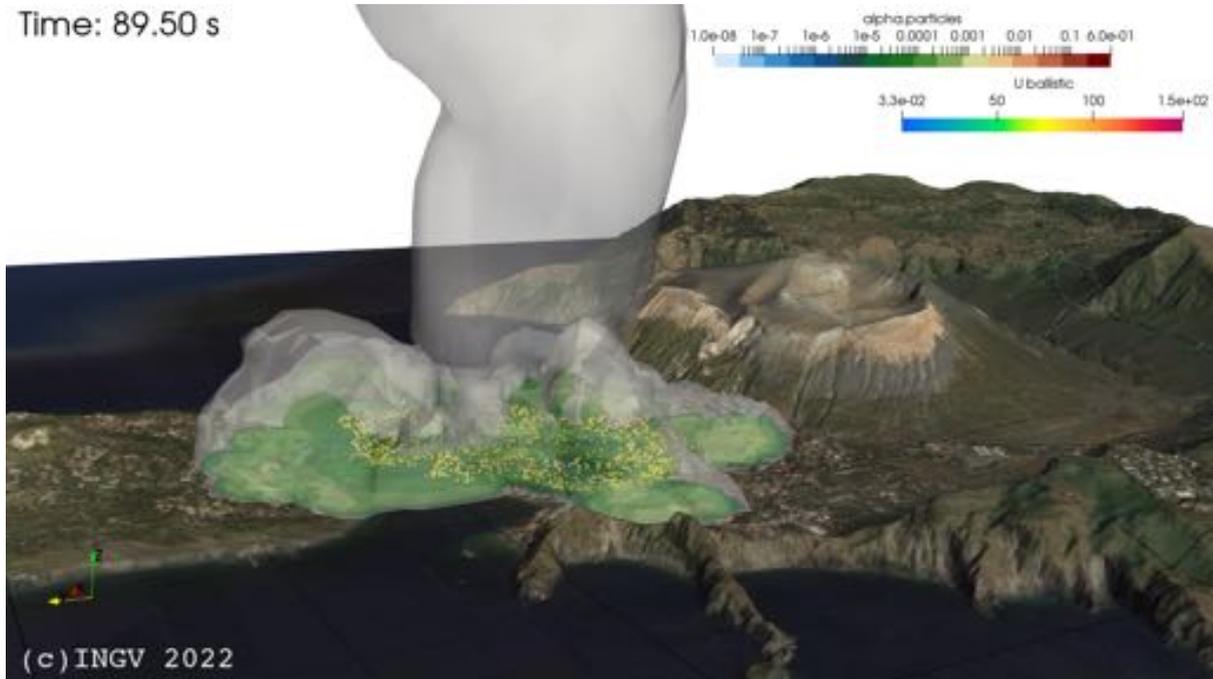


Time: 48.00 s





Time: 89.50 s



(c) INGV 2022

Time: 90.00 s



(c) INGV 2022

Figura 10. Simulazione 3D dello scenario di eruzione freatica di volume "medio" ($V=2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ DRE) con bocca localizzata nell'area della Spiaggia di Levante e temperatura di $177 \text{ }^\circ\text{C}$ (450 K, ID10 in Tabella 1) al tempo $t=7.5 \text{ s}$ (sopra), $t=48 \text{ s}$ (centro), $t=89.5 \text{ s}$ (sotto).



Discussione

Lo studio effettuato, insieme all'analisi dei casi analoghi per altri vulcani, permette di definire i parametri che controllano maggiormente la dinamica delle esplosioni freatiche.

Effetto della pressione e della quantità di vapore

Il volume coinvolto nell'esplosione influenza principalmente la dinamica di dispersione dei prodotti più fini (particelle di 100 microns, nelle simulazioni), caratterizzando la dinamica del plume. In generale, all'aumentare del volume è più probabile la generazione di correnti piroclastiche di maggiore intensità. La dinamica di ricaduta balistica sembra invece maggiormente correlata all'energia specifica dell'esplosione, quindi alla pressione e alla quantità di vapore.

Effetto della pressione e della quantità di vapore

Le eruzioni freatiche sono innescate dalla rapida espansione dei gas idrotermali (in particolare, del vapore acqueo), che causa la rottura degli strati superficiali rocciosi e la formazione di un pennacchio (plume) di materiale frammentato fine, la proiezione balistica di frammenti grossolani, e l'eventuale formazione di correnti di densità piroclastiche. L'energia rilasciata dall'esplosione dipende dalla pressione iniziale e dalla quantità di vapore (Eq. 1), che sono quindi i parametri più importanti nel controllo della dinamica esplosiva.

Nei range esplorati, pressioni superiori a 5 MPa associate a frazioni elevate di vapore d'acqua (frazione iniziale di volume >70%, frazione in massa > 3%) (runs ID1, ID5, ID9) producono plumes convettivi (assenza di correnti piroclastiche) e hanno la maggiore proiezione balistica (superiore a 500 m). La diminuzione di questi parametri produce condizioni del plume più instabili, con formazione di flussi piroclastici e minore gittata balistica.

Effetto della temperatura

La temperatura non è direttamente correlata all'energia dell'esplosione (Eq. 1), ma influenza la dinamica del plume e l'eventuale transizione ad un regime convettivo. Specialmente per i volumi "medi" ad alta temperatura non si osserva il collasso della miscela esplosiva e la formazione di flussi piroclastici.

Sommario dei risultati preliminari

Nelle condizioni della sorgente ipotizzate nel presente studio, è possibile evidenziare i seguenti risultati preliminari:

- esplosioni freatiche di piccola entità (volumi coinvolti "piccoli", ~1000 m³ DRE) possono generare un pennacchio convettivo e ricaduta di proiettili balistici di dimensioni fino a 10 cm fino a distanze di circa 500 m dalla bocca eruttiva nei casi più energetici.



- La formazione di flussi piroclastici dipende anch'essa dall'energia rilasciata dall'esplosione. I flussi piroclastici sono caratterizzati, in generale, da basse concentrazioni di cenere ed estensione radiale relativamente limitata, inferiore a 700 m nei casi di volume "piccolo".
- esplosioni freatiche di modesta entità (volumi coinvolti "medi" ~ 25,000 m³ DRE) possono generare un pennacchio convettivo e ricaduta di proiettili balistici di dimensioni fino a 10 cm fino a distanze di circa 600 m dalla bocca eruttiva. Anche in questo caso la formazione di flussi piroclastici con significativa estensione radiale non sembra favorita per pressioni maggiori o uguali a 5 MPa e temperature uguali o superiori a 460°C.
- Per esplosioni freatiche di volume "medio", temperature < 200°C favoriscono invece la formazione di flussi piroclastici. Tali flussi interesserebbero le aree attorno alla bocca fino a distanze di almeno 1 km, e potenzialmente l'intera area abitata e la parte meridionale del promontorio di Vulcanello.
- I parametri iniziali fondamentali che controllano la dinamica delle esplosioni freatiche sono: il volume e l'energia rilasciati, la geometria e la posizione della sorgente. Studi più approfonditi sono necessari per vincolare in maniera accurata l'energia dell'esplosione ai parametri fisico-chimici del sistema idrotermale superficiale, in particolare le condizioni di pressione-temperatura.

Bibliografia

de'Michieli Vitturi, M., Neri, A., Esposti Ongaro, T., Lo Savio, S., Boschi, E. (2010).

Lagrangian modeling of large volcanic particles: Application to Vulcanian explosions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B8).

Esposti Ongaro, T., Cavazzoni, C., Erbacci, G., Neri, A., Salvetti, M. V. (2007). A parallel multiphase flow code for the 3D simulation of explosive volcanic eruptions. *Parallel Computing*, 33(7-8), 541-560.

Esposti Ongaro, T., J.C. Komorowski, M. de' Michieli Vitturi and A. Neri (2022). Computer simulation of explosive eruption scenarios at La Soufrière de Guadeloupe (FR) : implications for volcanic hazard assessment. In: *Volcanism, seismicity and tectonics of the Greater and Lesser Antilles*; Scientific meetings OVSM-IPGP-PREST, 13-19 May 2022, Saint-Pierre, Martinique (FR) <http://www.ipgp.fr/fr/evenements/volcanisme-sismicite-tectonique-antilles>

Montanaro, C., Scheu, B., Cronin, S. J., Breard, E. C. P., Lube, G., & Dingwell, D. B. (2016). Experimental estimates of the energy budget of hydrothermal eruptions; application to 2012 Upper Te Maari eruption, New Zealand. *Earth and Planetary Science Letters*, 452(C), 281–294. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.07.052>

Neri, A., T. Esposti Ongaro, G. Macedonio, and D. Gidaspow (2003). Multiparticle simulation of collapsing volcanic columns and pyroclastic flow, *J. Geophys. Res.*, 108(B4), 2202, doi:10.1029/2001JB000508.



Rosi, M., Di Traglia, F., Pistolesi, M., Esposti Ongaro, T., Vitturi, M. D. M., & Bonadonna, C. (2018). Dynamics of shallow hydrothermal eruptions: new insights from Vulcano's Breccia di Commenda eruption, 1–28. <http://doi.org/10.1007/s00445-018-1252-y>

Selva, J., Bonadonna, C., Branca, S. et al. (2020). Multiple hazards and paths to eruptions: a review of the volcanic system of Vulcano (Aeolian Islands, Italy). *Earth-Science Reviews*, 207, 103186. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103186>

Wilson, L. (1980). Relationships between pressure, volatile content and ejecta velocity in three types of volcanic explosion. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8(2-4), 297–313. [http://doi.org/10.1016/0377-0273\(80\)90110-9](http://doi.org/10.1016/0377-0273(80)90110-9)

Responsabilità e proprietà dei dati.

L'INGV, in ottemperanza a quanto disposto dall'Art.2 del D.L. 381/1999, svolge funzioni di sorveglianza sismica e vulcanica del territorio nazionale, provvedendo alla organizzazione della rete sismica nazionale integrata e al coordinamento delle reti sismiche regionali e locali in regime di convenzione con il Dipartimento della Protezione Civile.

L'INGV concorre, nei limiti delle proprie competenze inerenti la valutazione della pericolosità sismica e vulcanica nel territorio nazionale e secondo le modalità concordate nella convenzione biennale attuativa per le attività di servizio in esecuzione dell'Accordo Quadro tra il Dipartimento della Protezione Civile e l'INGV (Periodo 2022-2025), alle attività previste nell'ambito del Sistema Nazionale di Protezione Civile. In particolare, questo documento, redatto in conformità all'Allegato Tecnico del suddetto Accordo Quadro, ha la finalità di informare il Dipartimento della Protezione Civile circa le osservazioni e i dati acquisiti dalle reti di monitoraggio gestite dall'INGV su fenomeni naturali di interesse per lo stesso Dipartimento.

L'INGV fornisce informazioni scientifiche utilizzando le migliori conoscenze scientifiche disponibili; tuttavia, in conseguenza della complessità dei fenomeni naturali in oggetto, nulla può essere imputato all'INGV circa l'eventuale incompletezza ed incertezza dei dati riportati e circa accadimenti futuri che differiscano da eventuali affermazioni a carattere previsionale presenti in questo documento. Tali affermazioni, infatti, sono per loro natura affette da intrinseca incertezza.

L'INGV non è responsabile dell'utilizzo, anche parziale, dei contenuti di questo documento da parte di terzi, e/o delle decisioni assunte dal Dipartimento della Protezione Civile, dagli organi di consulenza dello stesso Dipartimento, da altri Centri di Competenza, dai membri del Sistema Nazionale di Protezione Civile o da altre autorità preposte alla tutela del territorio e della popolazione, sulla base delle informazioni contenute in questo documento. L'INGV non è altresì responsabile di eventuali danni arrecati a terzi derivanti dalle stesse decisioni. La proprietà dei dati contenuti in questo documento è dell'INGV. La diffusione anche parziale dei contenuti è consentita solo per fini di protezione civile ed in conformità a quanto specificatamente previsto dall'Accordo Quadro sopra citato tra INGV e Dipartimento della Protezione Civile.