



Modelli fisici di eruzioni vulcaniche

Giovanni Macedonio

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Osservatorio Vesuviano, Napoli, Italy

Roma, 24 Settembre 2015

Sommario

- 1 Tipologia delle eruzioni vulcaniche
- 2 Caratteristiche e proprietà del magma
- 3 Funzionamento dei vulcani
 - Camera magmatica e condotto eruttivo
 - Eruzioni esplosive
 - Eruzioni effusive
- 4 Commenti finali

Tipologia delle eruzioni vulcaniche

Merapi, Indonesia, 2010 (ash fallout)



Merapi, 2010 (flusso piroclastico)



Etna, 2006 (colata di lava)



Etna, 2002 (colata di lava)



Caratteristiche e proprietà del magma

Struttura macroscopica

Struttura macroscopica del magma

- Il magma è una **roccia fusa** (in genere silicatica)
- Costituito tipicamente da:
 - ▶ Una fase liquida (roccia fusa + gas disciolti)
 - ▶ Una fase solida (cristalli)
 - ▶ Una fase gassosa (H_2O , CO_2 , ecc.)

Magma raffreddato



Ossidiana



Roccia con cristalli

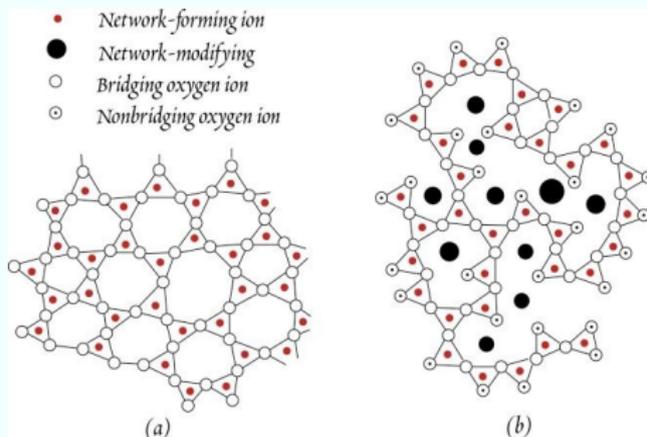


Pomice

Caratteristiche e proprietà del magma

Struttura microscopica

Struttura polimerica del silicio



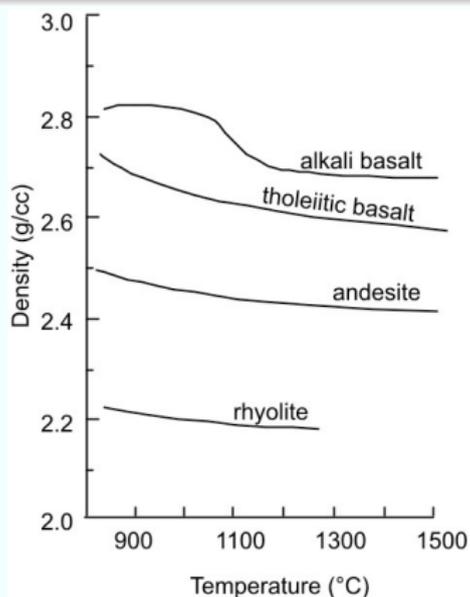
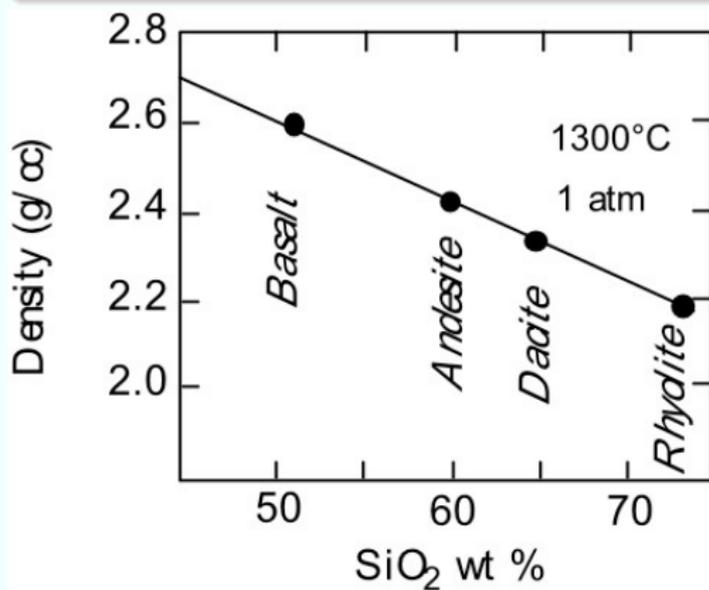
Struttura microscopica

- Un fuso silicatico (40-75% silicio) ad alta temperatura
- Struttura polimerica (Si^+ , Al^{3+} , Fe^{3-} , Ti^{4+})
- Presenza di modificatori di struttura (Mg^{2+} , Ca^{2-} , Na^+ , K^+ , H^+)
- Sulla base della percentuale in peso, H ha un grande effetto a causa della piccola massa

Proprietà fisiche del magma

Densità

- Dipende dal contenuto in silicio (SiO_2)
- Debole effetto della temperatura
- Debole effetto del contenuto di H_2O disciolta

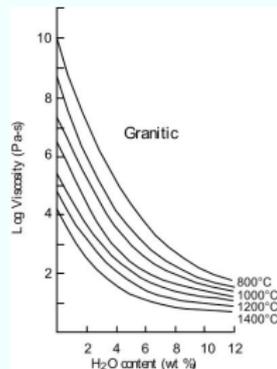
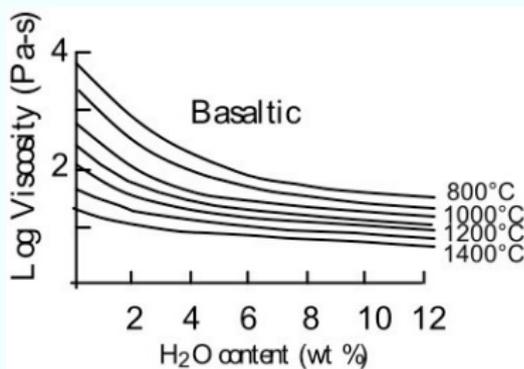
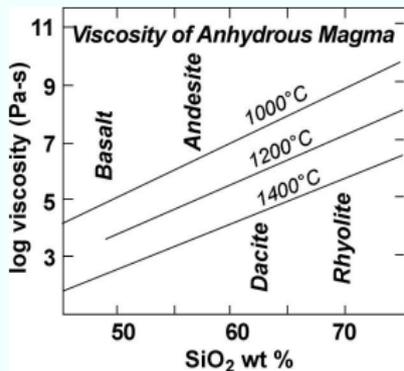


Proprietà fisiche del magma

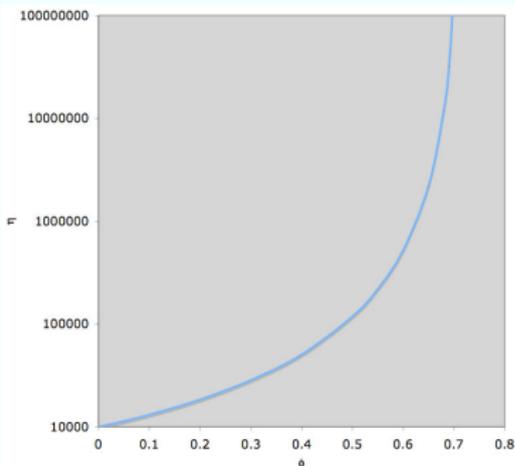
Viscosità della fase liquida

- A livello microscopico, dipende dalla struttura del fuso
- Importante effetto della **temperatura**
- Importante effetto del **contenuto di H₂O disciolta**
- Equazione di Vogel-Fulcher-Tamman (Misiti et al., Chem. Geol., 2011)

$$\log \mu = a + \frac{b}{(T - c)} + \frac{d}{(T - e)} \cdot \exp\left(g \cdot \frac{w}{T}\right)$$



Effetto dei cristalli e delle bolle sulla viscosità



(calcolata con l'equazione di Einstein-Roscoe)

Equazione di Einstein-Roscoe

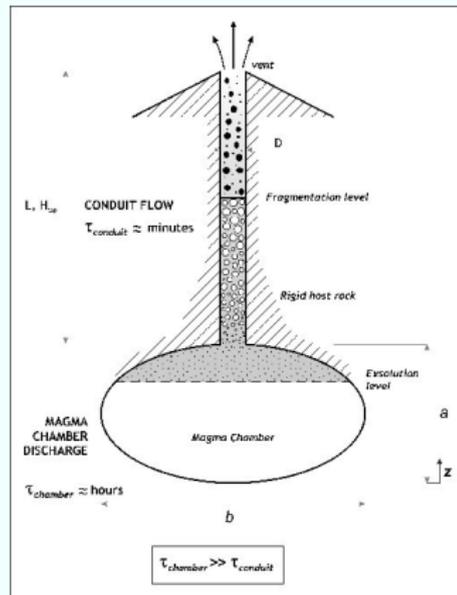
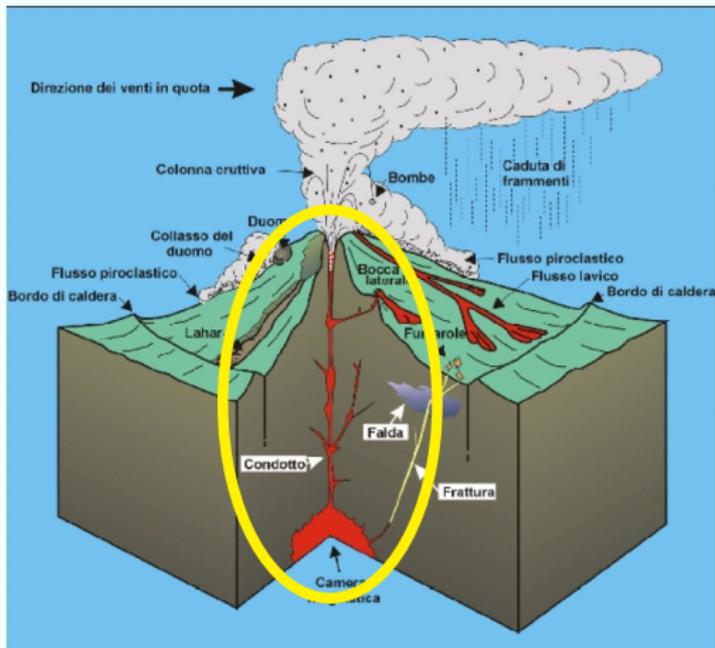
$$\mu = \frac{\mu_0}{(1 - \phi/\phi_0)^{2.5}}$$

- μ_0 viscosità senza cristalli/bolle
- ϕ frazione in volume di cristalli/bolle
- ϕ_0 frazione volumetrica "critica" (≈ 0.7)

Ad alti contenuti di cristalli il fluido non è più Newtoniano (es: diventa Binghamiano)

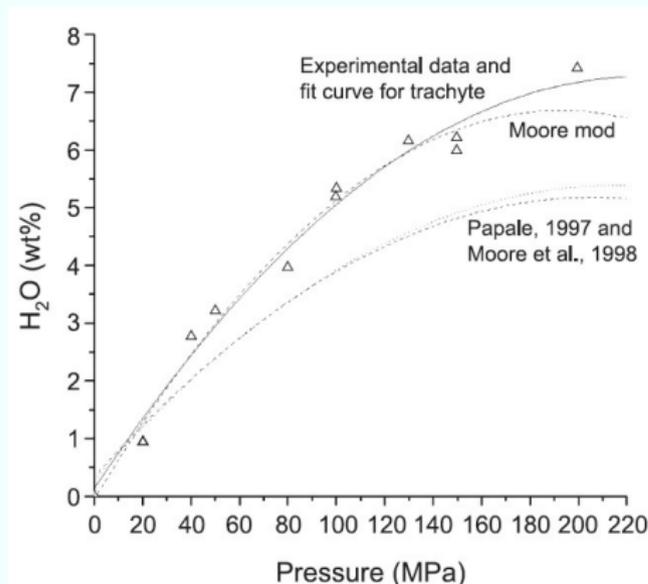
Il sistema camera-condotto

Camera magmatica e condotto



Solubilità dell'acqua nel magma

Dati sperimentali (trachite dei Campi Flegrei)



(da Di Matteo et al., JVGR, 2004)

Solubilità dell'acqua

- Massimo contenuto di acqua disciolta nel magma
- Dipende dalla pressione

Modello empirico

$$\text{Solub}(\text{H}_2\text{O}) \approx k \sqrt{P}$$

- Esistono modelli termodinamici per H₂O e CO₂ (es: Papale et al., Chem. Geol., 2006)

Frammentazione del magma

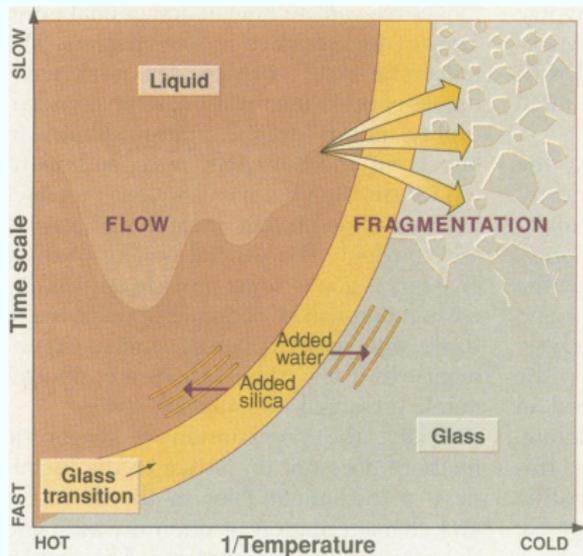
Modello empirico

- Il magma frammenta quando il volume delle bolle raggiunge un valore critico ($\phi \approx 70\%$)

Modello di transizione vetrosa

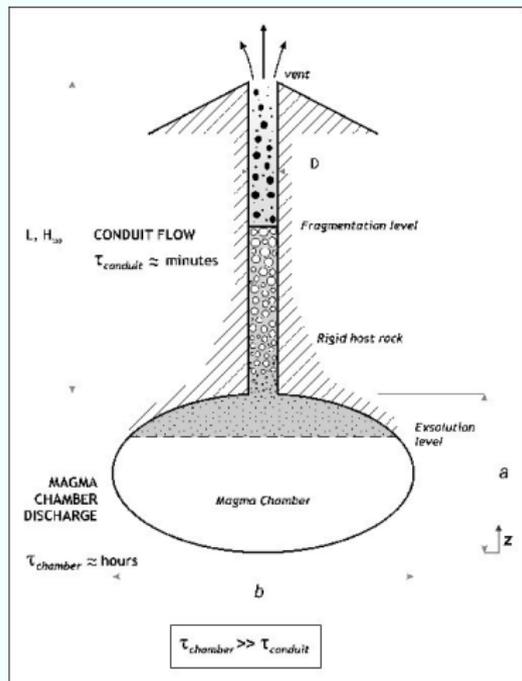
- Il magma frammenta quando presenta un comportamento fragile ed è soggetto a rapida decompressione

Transizione vetrosa



(Dingwell, Science, 1996)

Il sistema camera-condotto



(Macedonio et al., JVGR, 2005)

Camera magmatica

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g$$

Condotto (flusso multifase)

$$\frac{d}{dz}(\rho v) = 0 \quad (\text{mass balance})$$

$$\rho v \frac{dv}{dz} = -\frac{dP}{dz} - \rho g - \frac{4f}{D} \rho \frac{v^2}{2} \quad (\text{momentum balance})$$

Equazioni costitutive

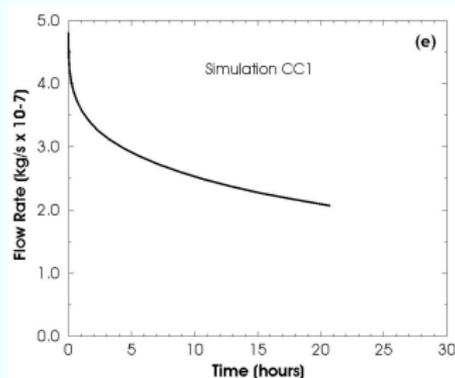
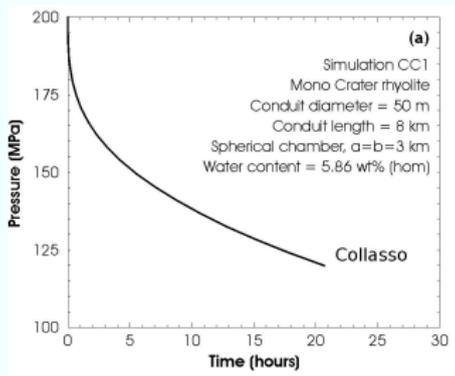
$$\text{Solub (H}_2\text{O)} = k\sqrt{P} \quad ; \quad \rho = \rho(P)$$

$$f = \frac{16}{Re} \quad \text{non frammentato}$$

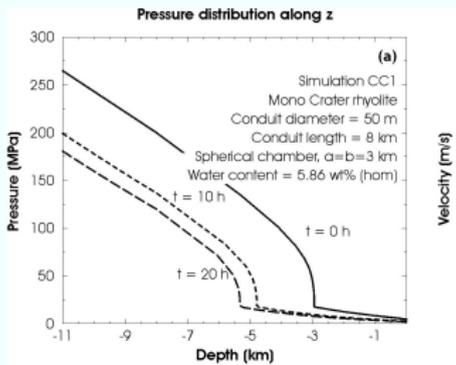
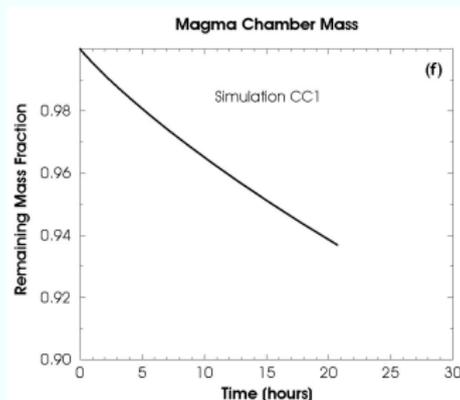
$$f = 0 \quad \text{magma frammentato}$$

$$\text{Frammentazione per } \varepsilon_{\text{gas}} \geq 0.75$$

Il sistema camera-condotto

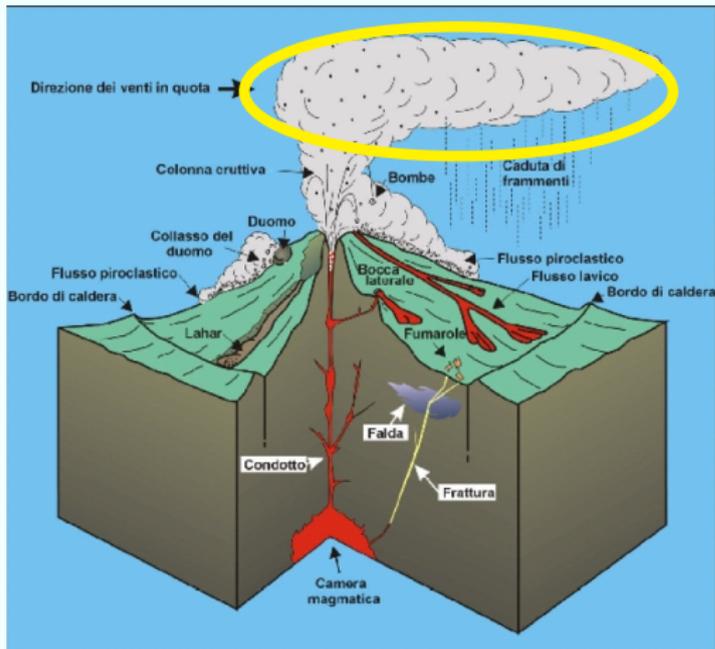


(Macedonio et al., JVGR, 2005)

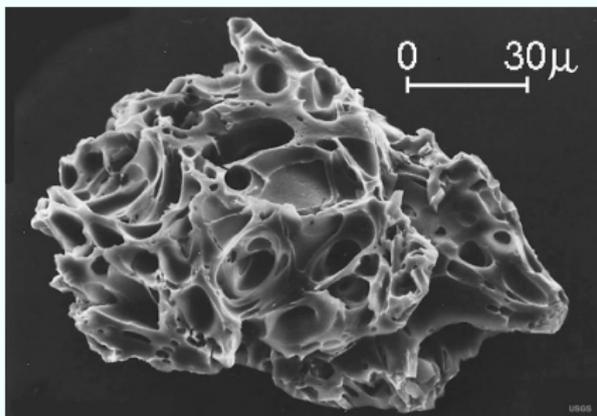


Eruzioni esplosive

Trasporto e caduta di cenere

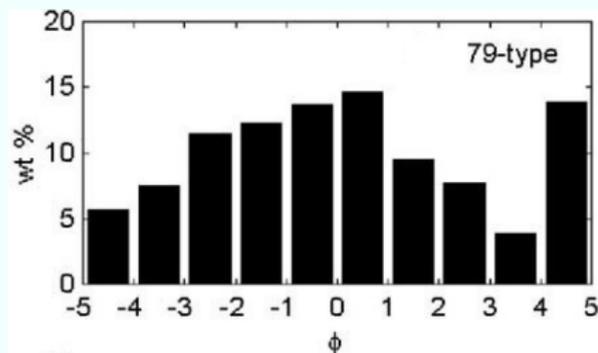


Genere e pomici vulcaniche



Dimensioni e velocità di caduta delle ceneri

Distribuzione diametro particelle

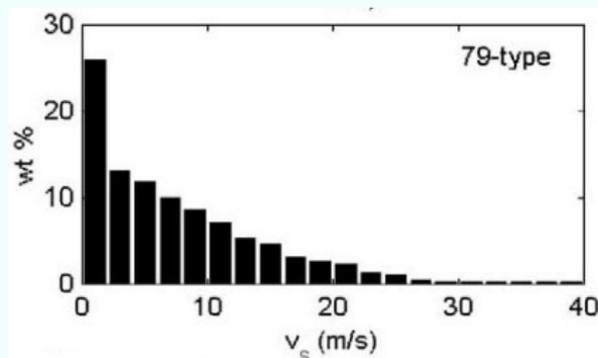


Eruzione del 79 DC

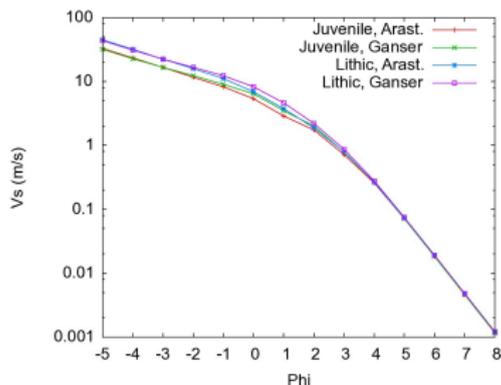
Diametro delle particelle

$$d \text{ (mm)} = 2^{-\phi}$$

Distribuzione velocità di caduta



Relazione diametro-velocità



Modello di dispersione di cenere

Equazione di avvezione-diffusione

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla(\mathbf{U}C_i) - \frac{\partial(V_s C_i)}{\partial z} = \nabla(K\nabla C_i)$$

- C_i = Concentrazione di cenere, t = tempo
- \mathbf{U} = Vento
- V_s = Velocità di caduta cenere
- K = Coefficienti di diffusione atmosferica (vortici, turbolenza)

Modello di dispersione di cenere

Equazione di avvezione-diffusione

$$\boxed{\frac{\partial C_i}{\partial t}} + \nabla(\mathbf{U}C_i) - \frac{\partial(V_s C_i)}{\partial z} = \nabla(K\nabla C_i)$$

Tempo

- C_i = Concentrazione di cenere, t = tempo
- \mathbf{U} = Vento
- V_s = Velocità di caduta cenere
- K = Coefficienti di diffusione atmosferica (vortici, turbolenza)

Modello di dispersione di cenere

Equazione di avvezione-diffusione

$$\boxed{\frac{\partial C_i}{\partial t}} + \boxed{\nabla(\mathbf{U}C_i)} - \frac{\partial(V_s C_i)}{\partial z} = \nabla(K\nabla C_i)$$

Tempo Vento

- C_i = Concentrazione di cenere, t = tempo
- \mathbf{U} = Vento
- V_s = Velocità di caduta cenere
- K = Coefficienti di diffusione atmosferica (vortici, turbolenza)

Modello di dispersione di cenere

Equazione di avvezione-diffusione

$$\boxed{\frac{\partial C_i}{\partial t}} + \boxed{\nabla(\mathbf{U}C_i)} - \boxed{\frac{\partial(V_s C_i)}{\partial z}} = \nabla(K\nabla C_i)$$

Tempo Vento Caduta

- C_i = Concentrazione di cenere, t = tempo
- \mathbf{U} = Vento
- V_s = Velocità di caduta cenere
- K = Coefficienti di diffusione atmosferica (vortici, turbolenza)

Modello di dispersione di cenere

Equazione di avvezione-diffusione

$$\boxed{\frac{\partial C_i}{\partial t}} + \boxed{\nabla(\mathbf{U}C_i)} - \boxed{\frac{\partial(V_s C_i)}{\partial z}} = \boxed{\nabla(K\nabla C_i)}$$

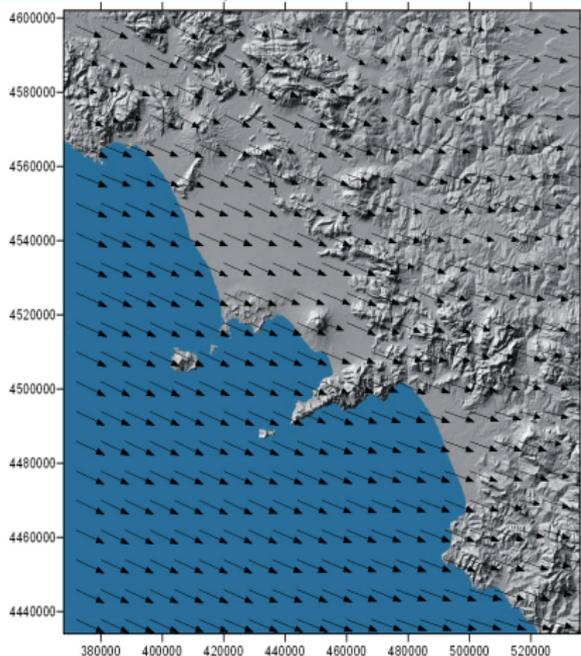
Tempo Vento Caduta Diffusione

- C_i = Concentrazione di cenere, t = tempo
- \mathbf{U} = Vento
- V_s = Velocità di caduta cenere
- K = Coefficienti di diffusione atmosferica (vortici, turbolenza)

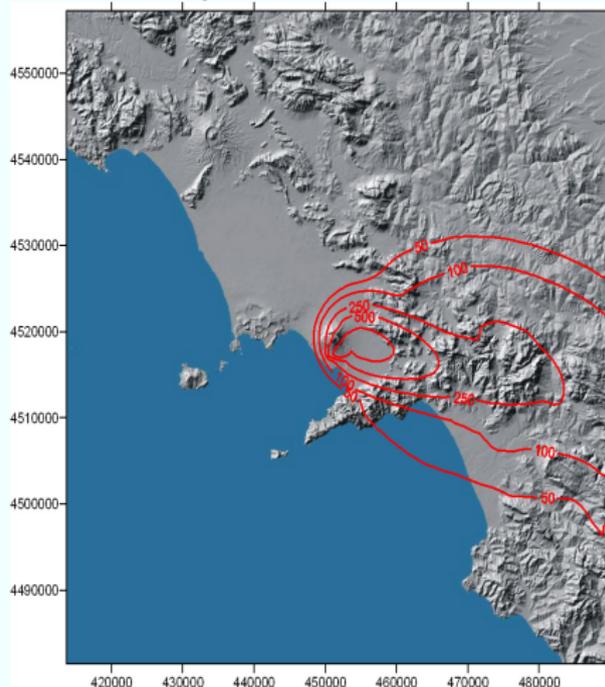
Modello di dispersione di cenere

Esempio di simulazione

Campo dei venti

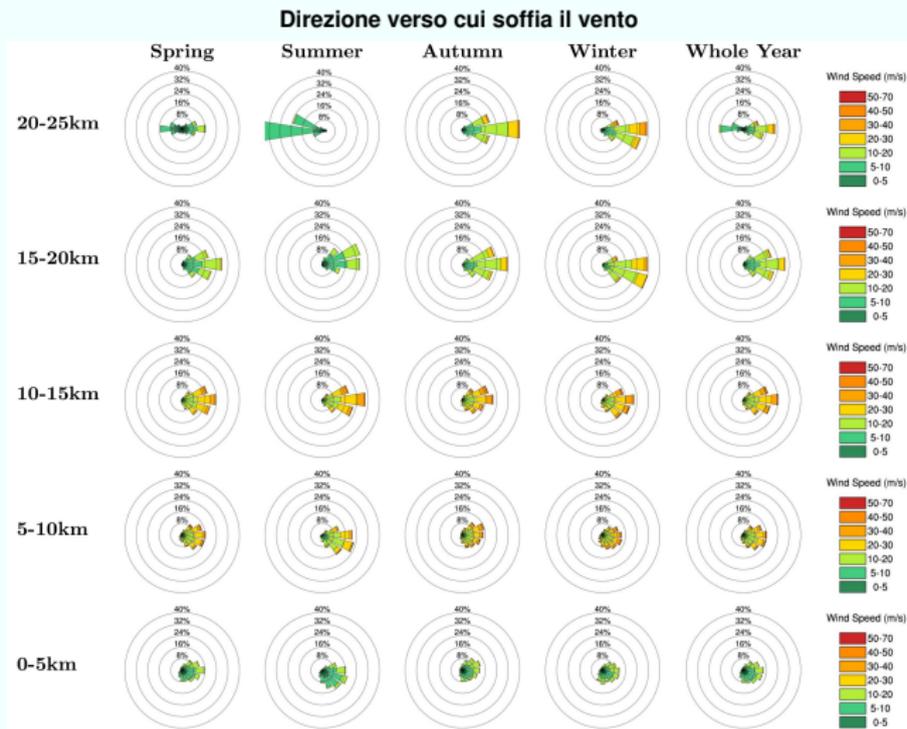


Deposito simulato



Studio statistico sulla dispersione di ceneri al Vesuvio

- Alla nostra latitudine il vento soffia prevalentemente verso Est
- Dati e modelli meteorologici ECMWF - ERA Interim (statistica di 20 anni)



Le ceneri dell'Etna

L'aeroporto di Catania viene chiuso a più riprese



Foto La Sicilia

Cenere sull'aeroporto (Etna, 2002)



Foto La Sicilia

Modelli di dispersione delle ceneri in uso a Catania

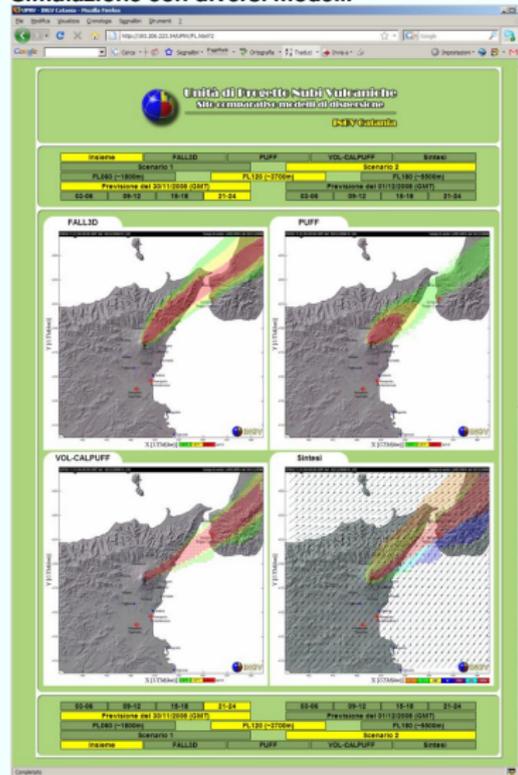
Modelli sviluppati all'INGV

- FALL3D (INGV, Napoli)
- HAZMAP (INGV, Napoli)
- PUFF (INGV, Catania)
- VOL-CALPUFF (INGV, Pisa)

Cluster linux INGV Catania



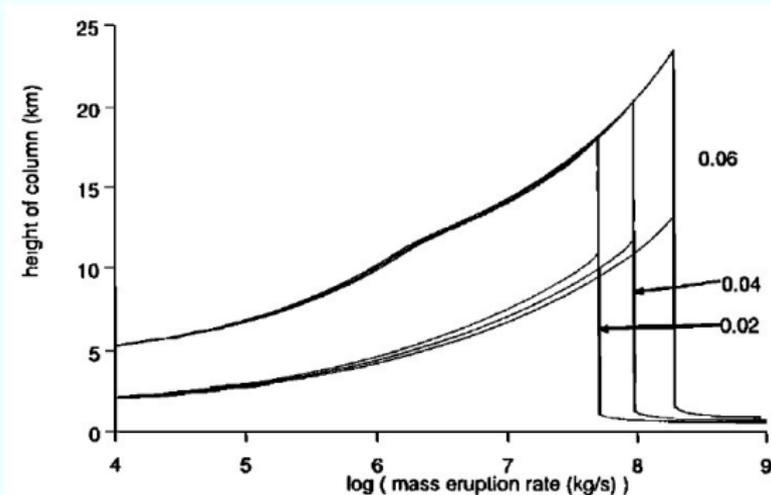
Simulazione con diversi modelli



Eruzioni esplosive (pliniane)

Collasso della colonna eruttiva

- Per alti tassi eruttivi
- Per bassi contenuti in gas



Curve superiori: Altezza della colonna eruttiva per diversi contenuti in H₂O
Curve inferiori: Altezza della linea di saturazione dell'H₂O nell'atmosfera

(da Woods, JGR, 1993)

Flussi piroclastici

Eruzione del Pinatubo, Philippines (15 Giugno 1991)



Flusso piroclastico al Pinatubo (Philippines, 1991)

Flussi piroclastici

Flusso piroclastico (Montserrat 2001)



Flussi piroclastici (sistemi multifase)

Equazioni del modello fisico-matematico

(Esposti Ongaro et al., 2007, 2008, 2011; Neri et al., 2003, 2007)

Conservazione della Massa

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_g \rho_g + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g) = 0$$

Gas:

Particelle:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_k \rho_k + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \mathbf{v}_k) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, N \quad \varepsilon_g + \sum_{k=1}^N \varepsilon_k = 1$$

Conservazione della Quantità di Moto

Gas:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -\varepsilon_g \nabla P_g + \nabla \mathbf{T}_g + \varepsilon_g \rho_g \mathbf{g} + \sum_{k=1}^N D_{g,k} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_g)$$

Particelle:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_k \rho_k \mathbf{v}_k + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k) = -\varepsilon_k \nabla P_g + \nabla \mathbf{T}_k + \varepsilon_k \rho_k \mathbf{g} - D_{g,k} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_g) + \sum_{k=1}^N D_{k,j} (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_k)$$

$$k, j = 1, 2, \dots, N$$

Conservazione dell'Energia

Gas:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_g \rho_g h_g + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g h_g \mathbf{v}_g) = \varepsilon_g \left(\frac{\partial P_g}{\partial t} + \mathbf{v}_g \cdot \nabla P_g \right) + \nabla \cdot (k_{gc} \varepsilon_g \nabla T_g) + \sum_{k=1}^N Q_k (T_k - T_g)$$

Particelle:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_k \rho_k h_k + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k h_k \mathbf{v}_k) = \nabla \cdot (k_{kc} \varepsilon_k \nabla T_k) - Q_k (T_k - T_g); k = 1, 2, \dots, N$$

Flussi piroclastici (sistemi multifase)

Equazioni del modello fisico-matematico

(Esposti Ongaro et al., 2007, 2008, 2011; Neri et al., 2003, 2007)

Conservazione della Massa

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_g \rho_g + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g) = 0$$

Gas:

Particelle:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_k \rho_k + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \mathbf{v}_k) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, N \quad \varepsilon_g + \sum_{k=1}^N \varepsilon_k = 1$$

Conservazione della Quantità di Moto

Gas:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -\varepsilon_g \nabla P_g + \nabla \mathbf{T}_g + \varepsilon_g \rho_g \mathbf{g} + \sum_{k=1}^N D_{g,k} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_g)$$

Particelle:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_k \rho_k \mathbf{v}_k + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k) = -\varepsilon_k \nabla P_g + \nabla \mathbf{T}_k + \varepsilon_k \rho_k \mathbf{g} - D_{g,k} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_g) + \sum_{k=1}^N D_{k,j} (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_k)$$

$$k, j = 1, 2, \dots, N$$

Conservazione dell'Energia

Gas:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_g \rho_g h_g + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g h_g \mathbf{v}_g) = \varepsilon_g \left(\frac{\partial P_g}{\partial t} + \mathbf{v}_g \cdot \nabla P_g \right) + \nabla \cdot (k_{gc} \varepsilon_g \nabla T_g) + \sum_{k=1}^N Q_k (T_k - T_g)$$

Particelle:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_k \rho_k h_k + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k h_k \mathbf{v}_k) = \nabla \cdot (k_{kc} \varepsilon_k \nabla T_k) - Q_k (T_k - T_g); k = 1, 2, \dots, N$$

Flussi piroclastici (sistemi multifase)

Equazioni del modello fisico-matematico

(Esposti Ongaro et al., 2007, 2008, 2011; Neri et al., 2003, 2007)

Conservazione della Massa

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_g \rho_g + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g) = 0$$

Gas:

Particelle:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_k \rho_k + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \mathbf{v}_k) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, N \quad \varepsilon_g + \sum_{k=1}^N \varepsilon_k = 1$$

Conservazione della Quantità di Moto

Gas:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -\varepsilon_g \nabla P_g + \nabla \mathbf{T}_g + \varepsilon_g \rho_g \mathbf{g} + \sum_{k=1}^N D_{g,k} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_g)$$

Particelle:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_k \rho_k \mathbf{v}_k + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k) = -\varepsilon_k \nabla P_g + \nabla \mathbf{T}_k + \varepsilon_k \rho_k \mathbf{g} - D_{g,k} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_g) + \sum_{k=1}^N D_{k,j} (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_k)$$

$$k, j = 1, 2, \dots, N$$

Conservazione dell'Energia

Gas:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_g \rho_g h_g + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g h_g \mathbf{v}_g) = \varepsilon_g \left(\frac{\partial P_g}{\partial t} + \mathbf{v}_g \cdot \nabla P_g \right) + \nabla \cdot (k_{gc} \varepsilon_g \nabla T_g) + \sum_{k=1}^N Q_k (T_k - T_g)$$

Particelle:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_k \rho_k h_k + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k h_k \mathbf{v}_k) = \nabla \cdot (k_{kc} \varepsilon_k \nabla T_k) - Q_k (T_k - T_g); k = 1, 2, \dots, N$$

Flussi piroclastici (sistemi multifase)

Equazioni del modello fisico-matematico

(Esposti Ongaro et al., 2007, 2008, 2011; Neri et al., 2003, 2007)

Conservazione della Massa

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_g \rho_g + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g) = 0$$

Gas:

Particelle:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_k \rho_k + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \mathbf{v}_k) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, N \quad \varepsilon_g + \sum_{k=1}^N \varepsilon_k = 1$$

Conservazione della Quantità di Moto

Gas:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -\varepsilon_g \nabla P_g + \nabla \mathbf{T}_g + \varepsilon_g \rho_g \mathbf{g} + \sum_{k=1}^N D_{g,k} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_g)$$

Particelle:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_k \rho_k \mathbf{v}_k + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k) = -\varepsilon_k \nabla P_g + \nabla \mathbf{T}_k + \varepsilon_k \rho_k \mathbf{g} - D_{g,k} (\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_g) + \sum_{k=1}^N D_{k,j} (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_k)$$

Conservazione dell'Energia

$k, j = 1, 2, \dots, N$

Gas:

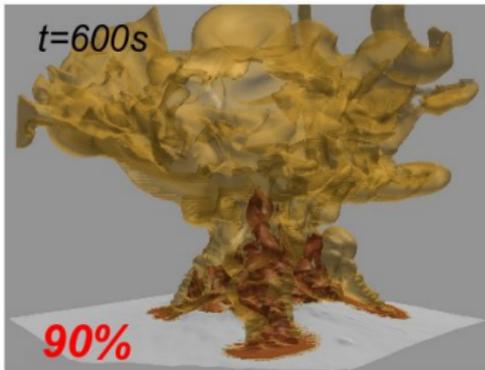
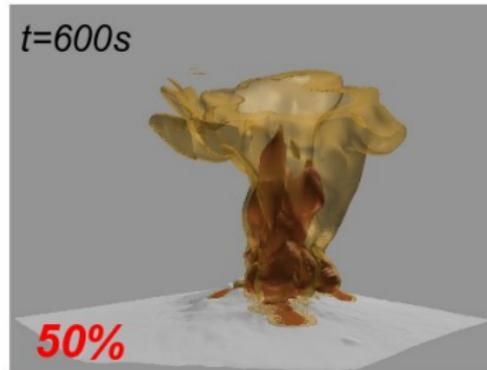
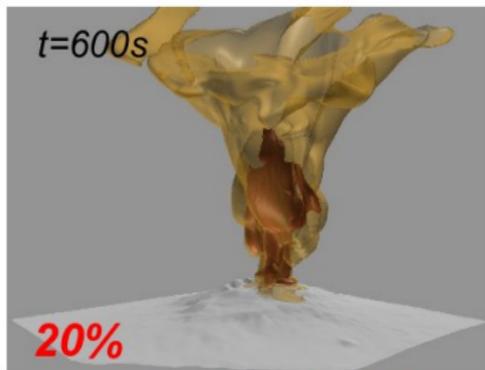
$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_g \rho_g h_g + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g h_g \mathbf{v}_g) = \varepsilon_g \left(\frac{\partial P_g}{\partial t} + \mathbf{v}_g \cdot \nabla P_g \right) + \nabla \cdot (k_{gc} \varepsilon_g \nabla T_g) + \sum_{k=1}^N Q_k (T_k - T_g)$$

Particelle:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_k \rho_k h_k + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k h_k \mathbf{v}_k) = \nabla \cdot (k_{kc} \varepsilon_k \nabla T_k) - Q_k (T_k - T_g); k = 1, 2, \dots, N$$

I Flussi piroclastici (esempio di simulazione 3D)

Evento Sub-Pliniano (5×10^7 kg/s): wt% di massa collassata

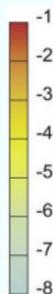
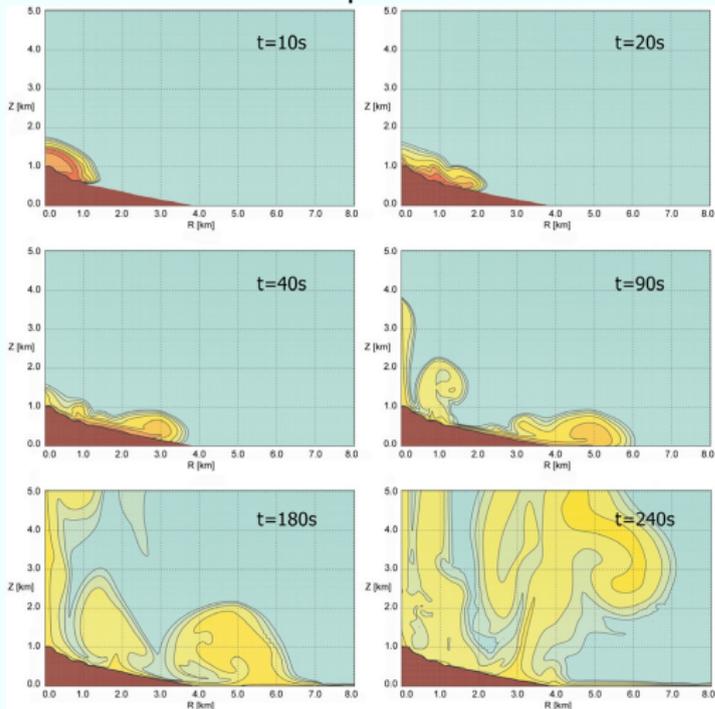


(da Esposti Ongaro et al., 2008)

Esempio di simulazione di flussi piroclastici

Eruzione del Monserrat, Caraibi, 1997

Concentrazione delle particelle nell'atmosfera

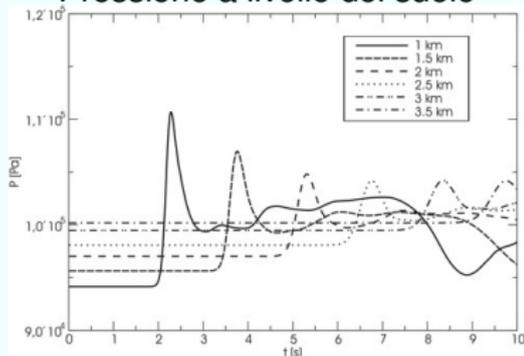


\log_{10} frazione di volume delle particelle

$d = 50$ (35%) + 500 (40%) + 5000 (25%) μm

Massa = 60×10^9 kg

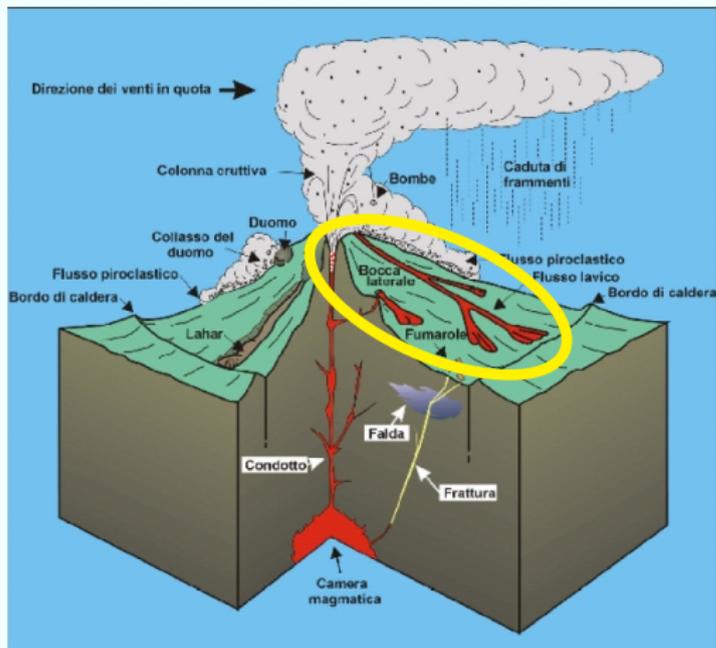
Pressione a livello del suolo



(simulazione C-2D, da Esposti Ongaro et al., JGR, 2008)

Eruzioni effusive

Colate di lava



Le colate di lava

Etna, 1985



Principali parametri

- Topografia
- Reologia del magma
- Tasso eruttivo

Caratteristiche dei flussi di lava

- Superficie libera
- Capacità di sormontare barriere
- Raffreddamento
- Formazione di canali e tunnel

Modello generale (deterministico)

3D, time-dependent

Le equazioni di Navier-Stokes e di continuità

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

dove:

\mathbf{u} = velocità

ρ = densità

μ = viscosità (dipende dalla temperatura)

p = pressione

\mathbf{g} = costante di gravità

Depth averaged equations

2D, time-dependent

Assunzioni semplificatrici

- Il fluido è approssimato come uno strato sottile
- La componente verticale della velocità viene trascurata
- Le equazioni di Navier-Stokes e di continuità sono integrate in z (diventano equazioni 2D)

Depth averaged equations

Continuity equation

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0$$

Depth averaged equations

Continuity equation

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0$$

Momentum balance equations

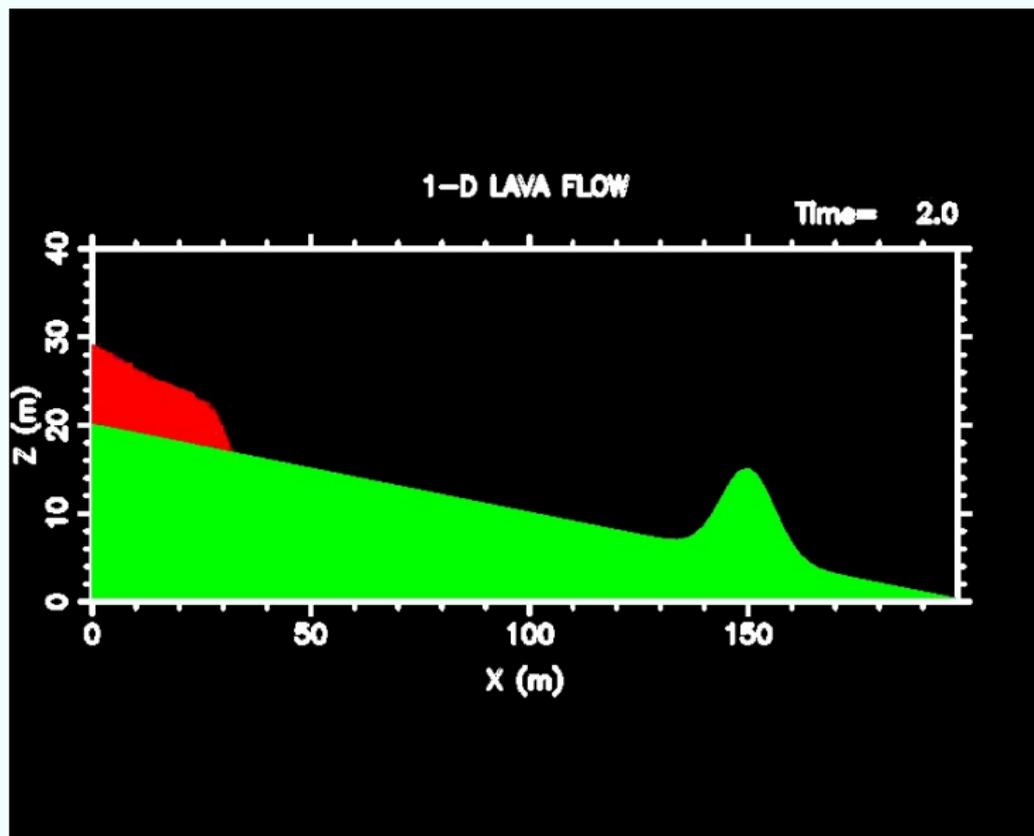
$$\frac{\partial(Uh)}{\partial t} + \frac{\partial(U^2h + gh^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(UVh)}{\partial y} = -gh\frac{\partial H}{\partial x} - \gamma U$$

$$\frac{\partial(Vh)}{\partial t} + \frac{\partial(UVh)}{\partial x} + \frac{\partial(V^2h + gh^2/2)}{\partial y} = -gh\frac{\partial H}{\partial y} - \gamma V$$

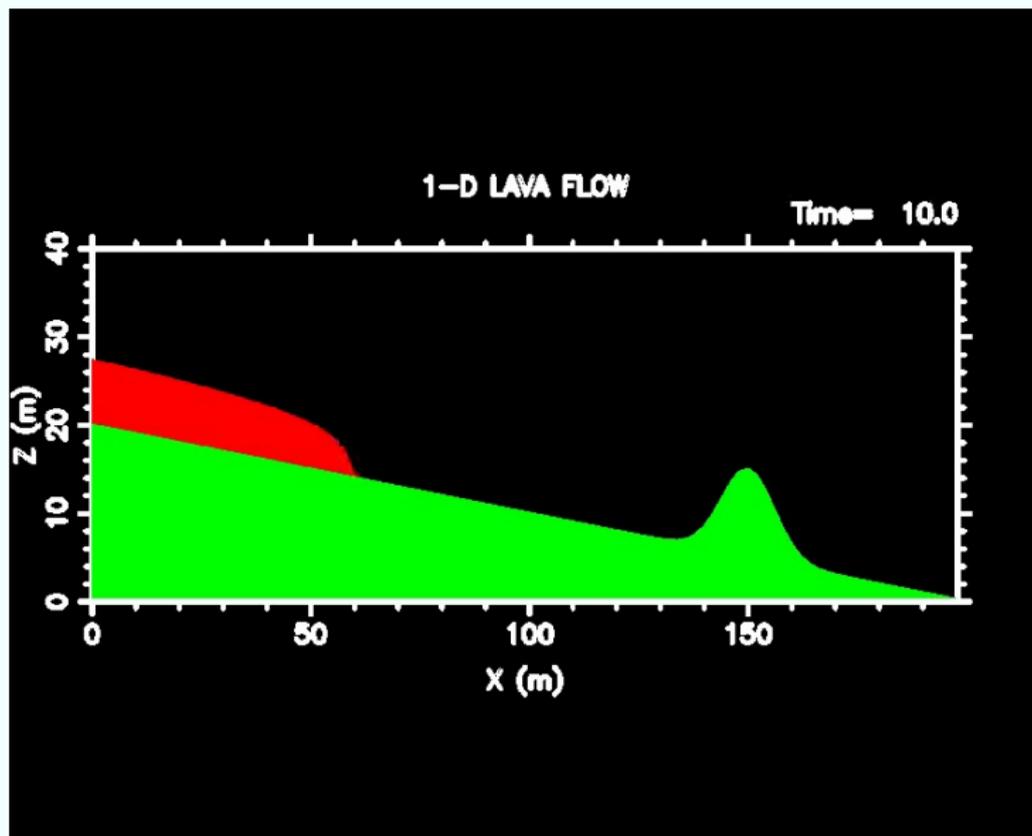
h = fluid thickness; H = topography; U, V = x, y components of the velocity; γ = friction coefficient (viscous effects)

NOTE: Topography and viscous effects are “source terms”

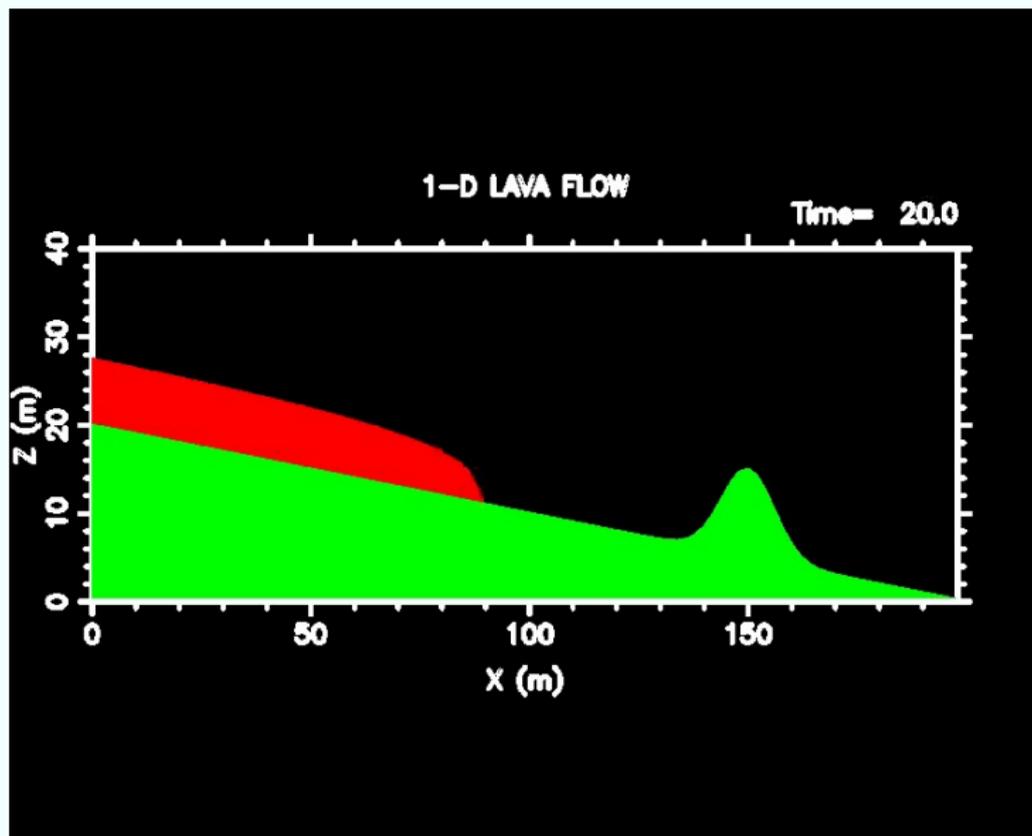
Simulazione 1D



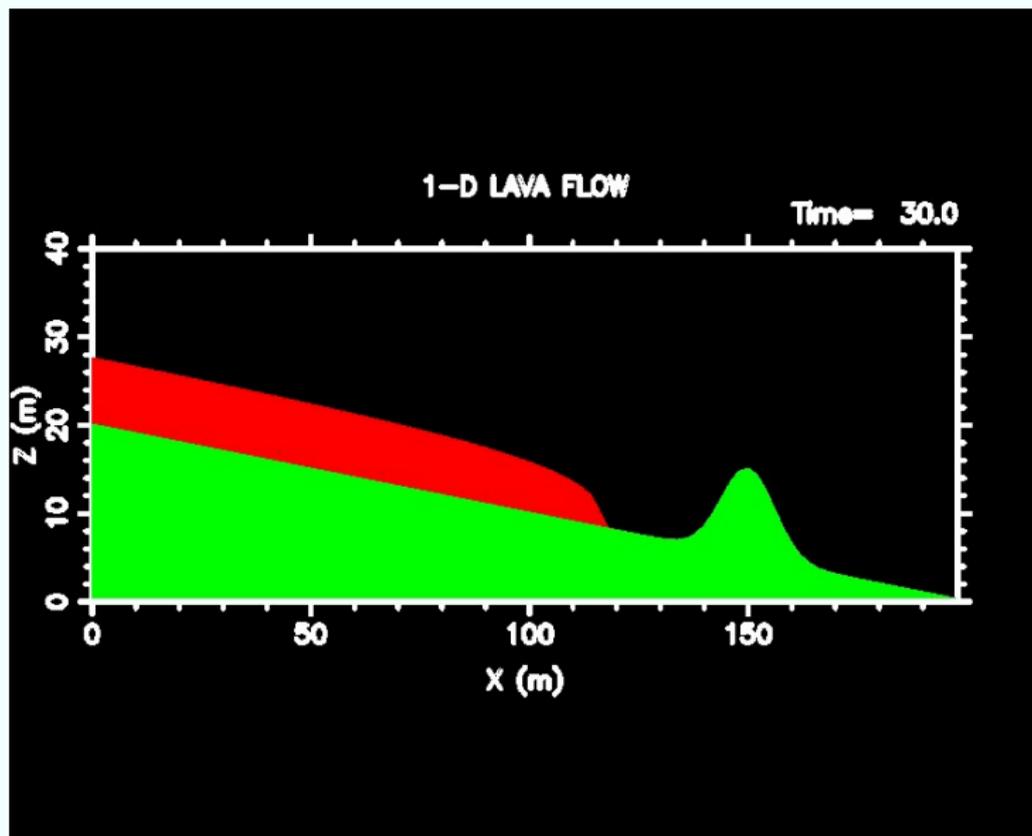
Simulazione 1D



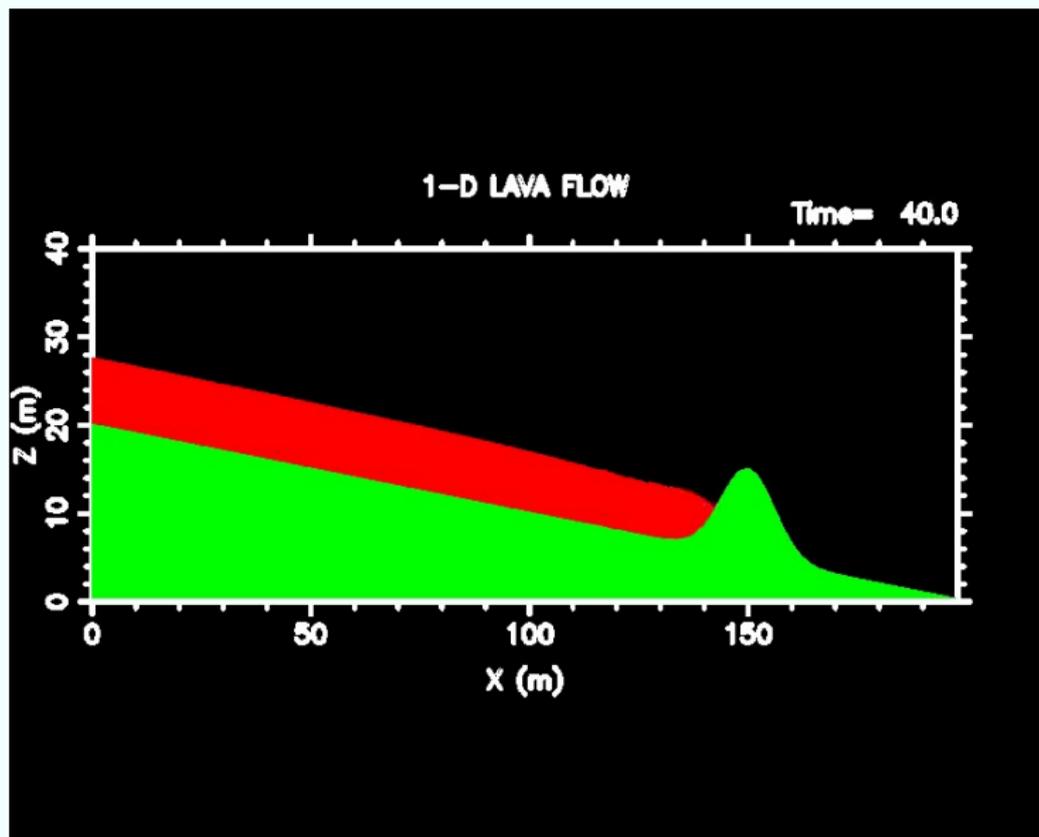
Simulazione 1D



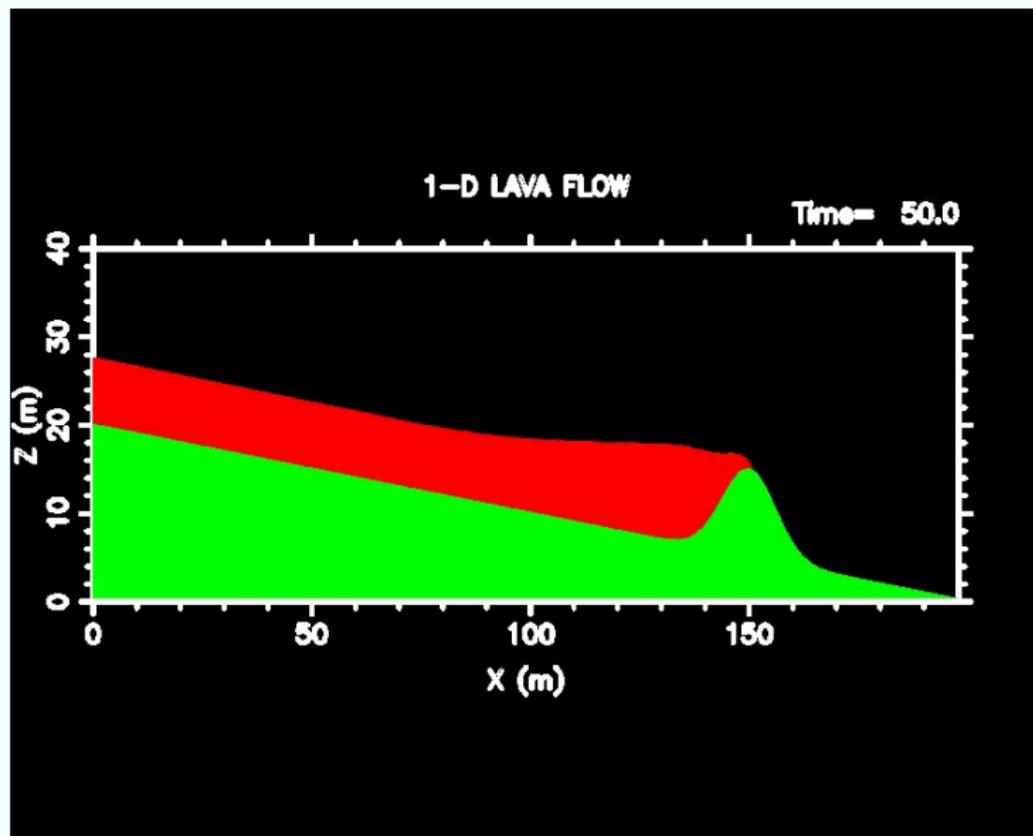
Simulazione 1D



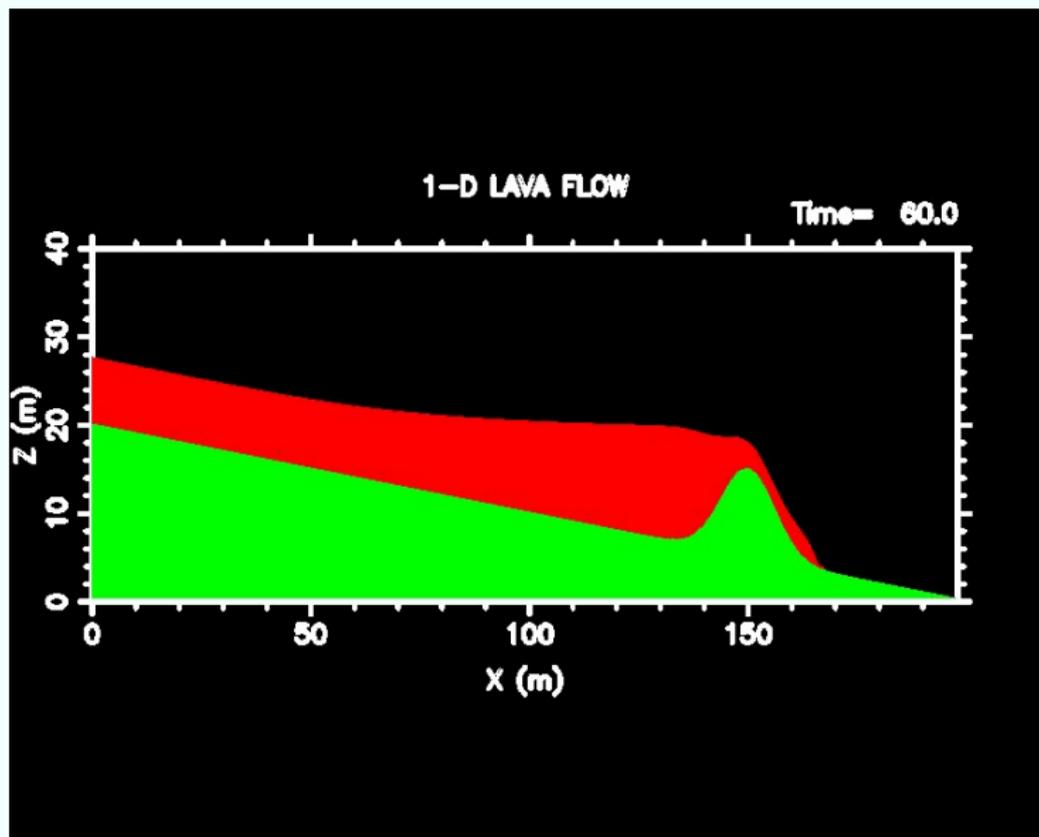
Simulazione 1D



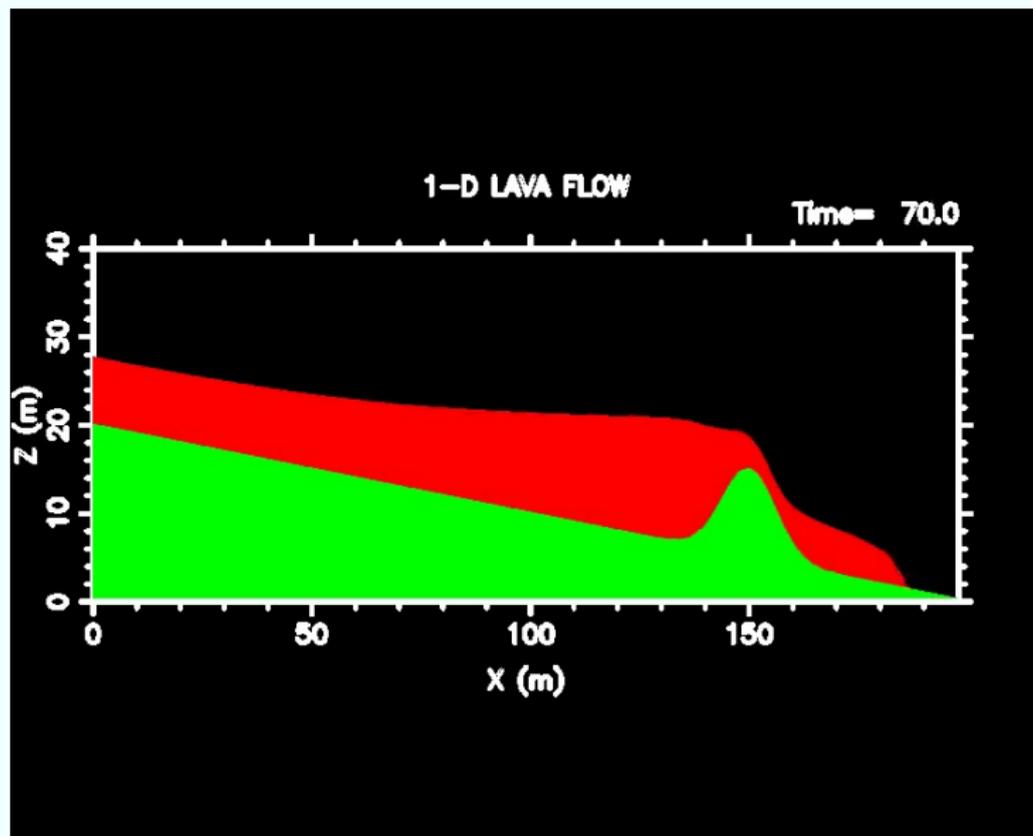
Simulazione 1D



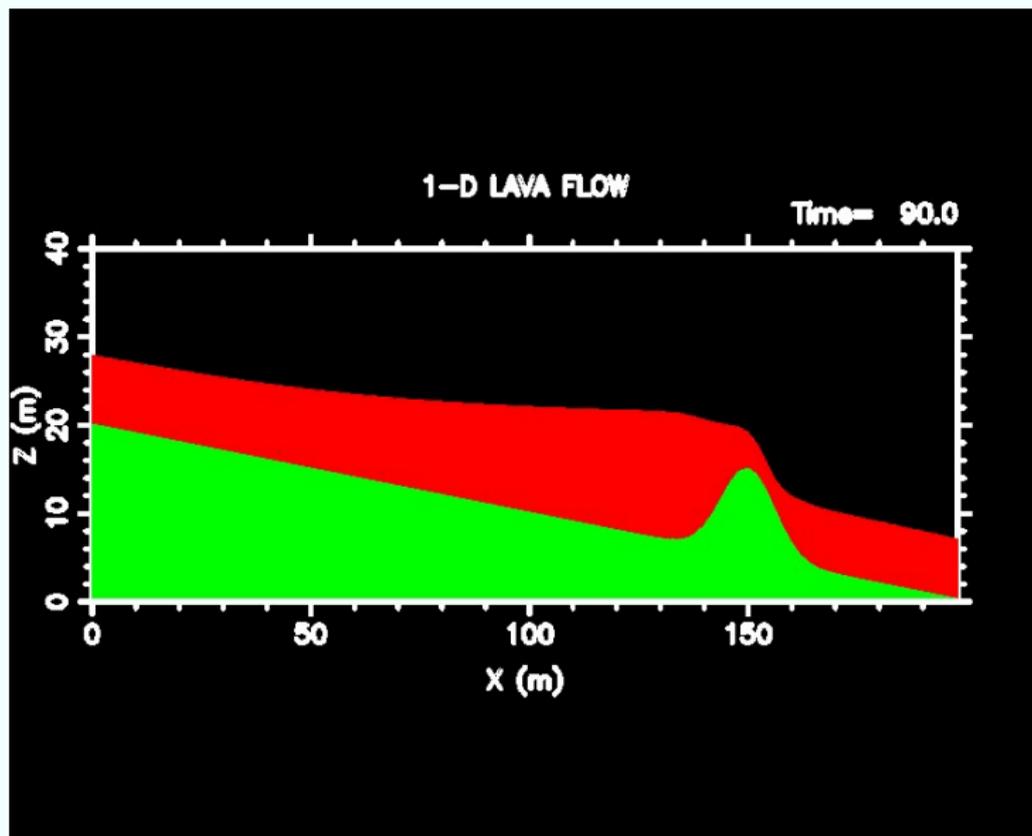
Simulazione 1D



Simulazione 1D

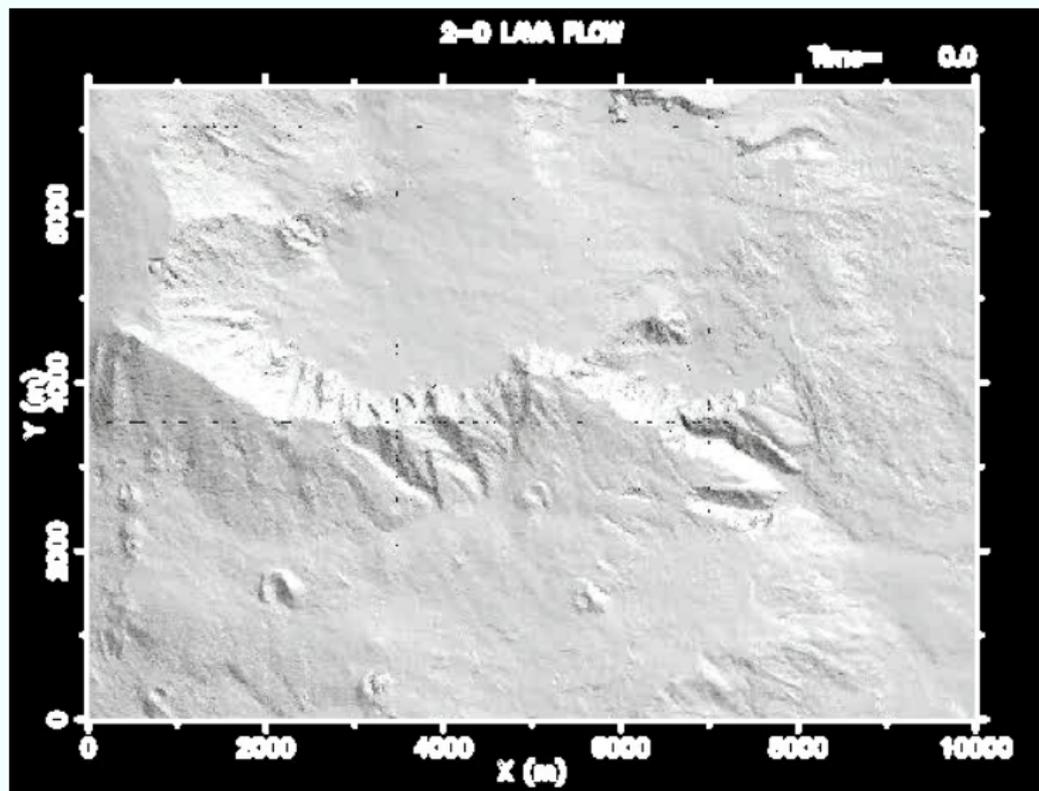


Simulazione 1D



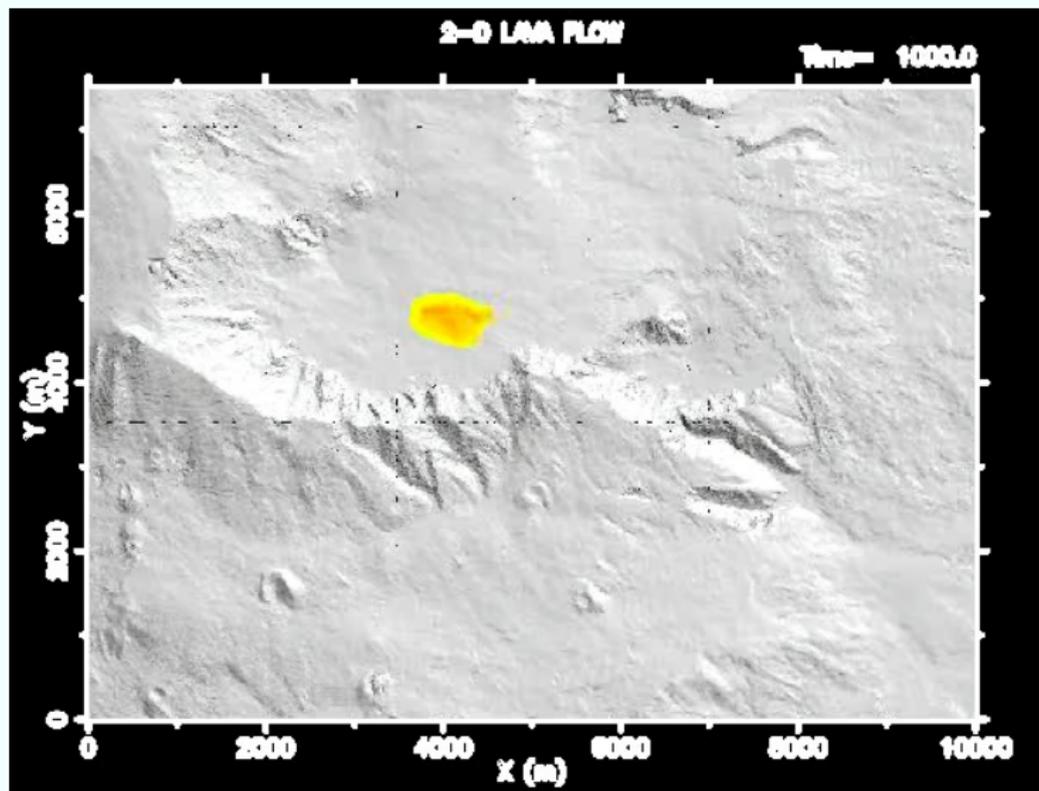
Simulazione 2D (Etna 1991)

Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



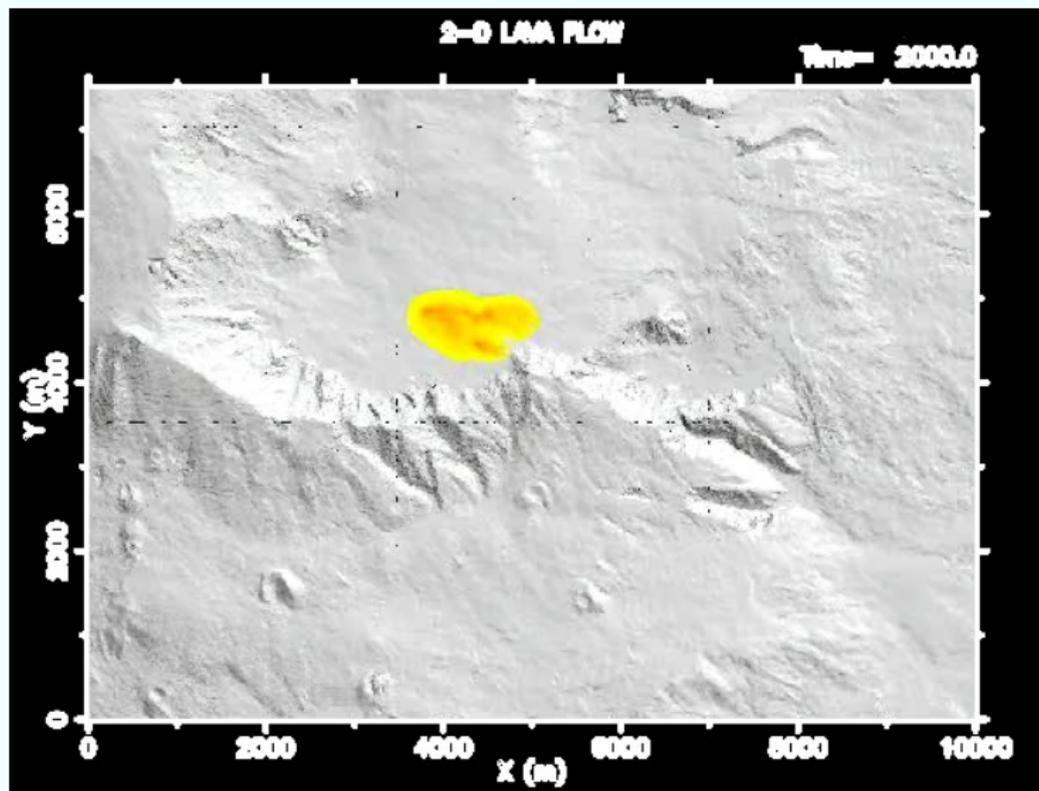
Simulazione 2D (Etna 1991)

Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



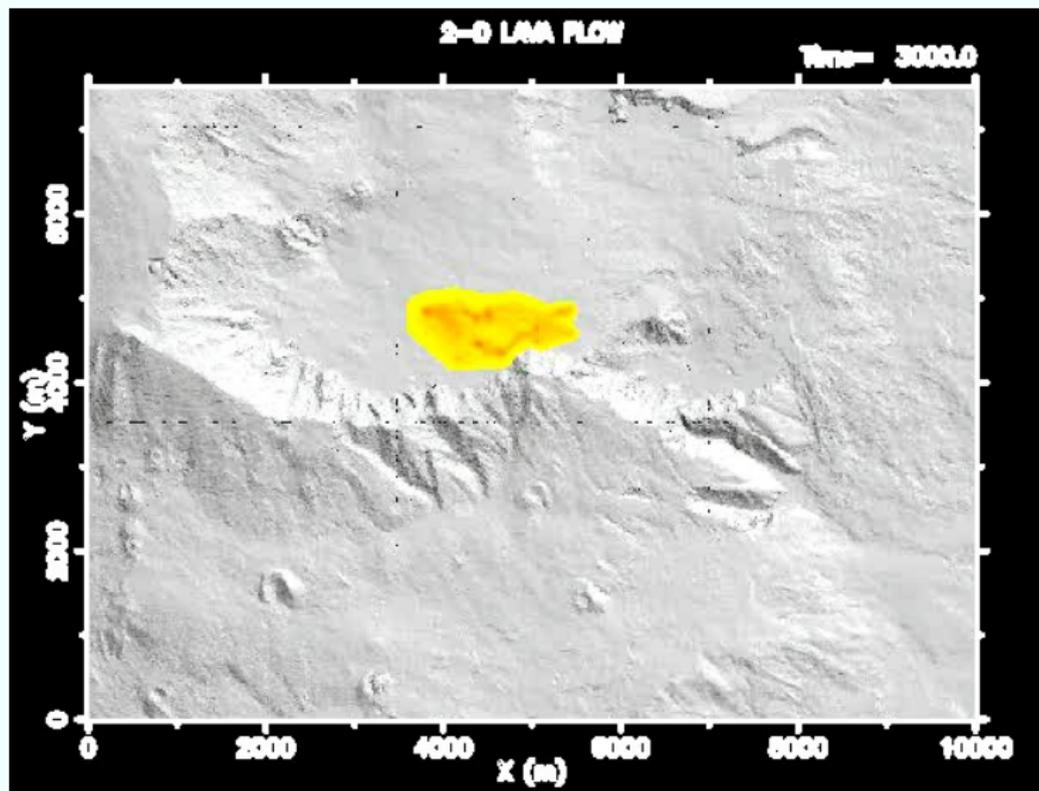
Simulazione 2D (Etna 1991)

Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



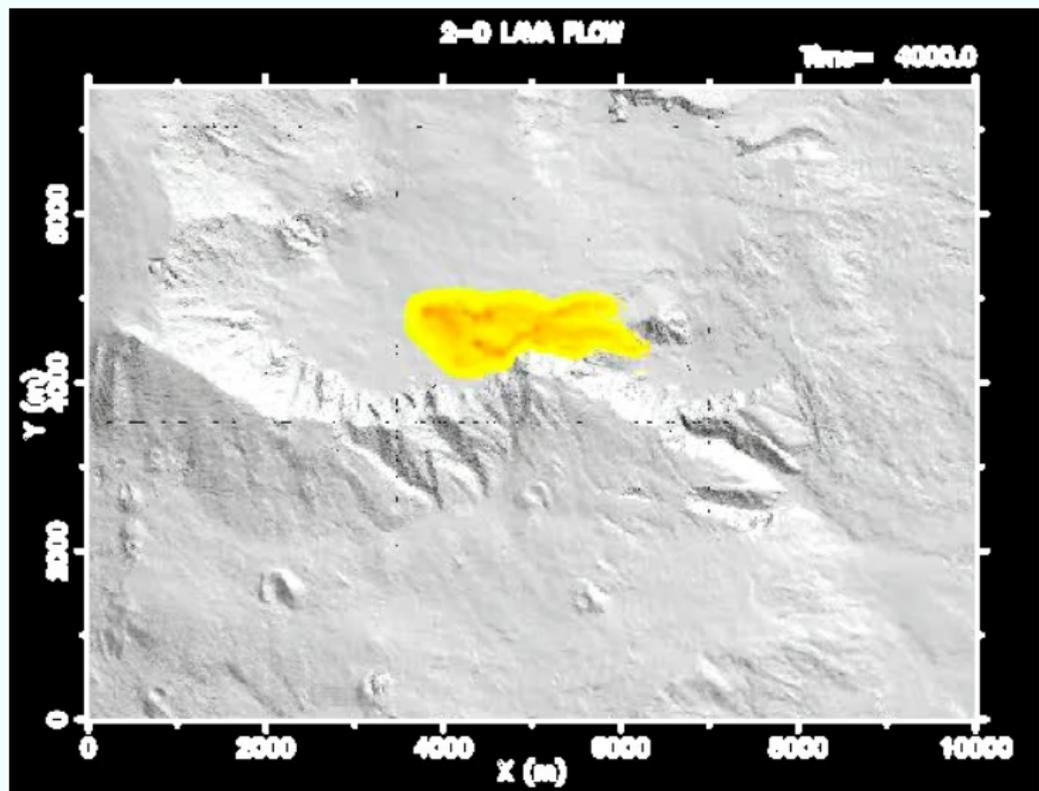
Simulazione 2D (Etna 1991)

Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



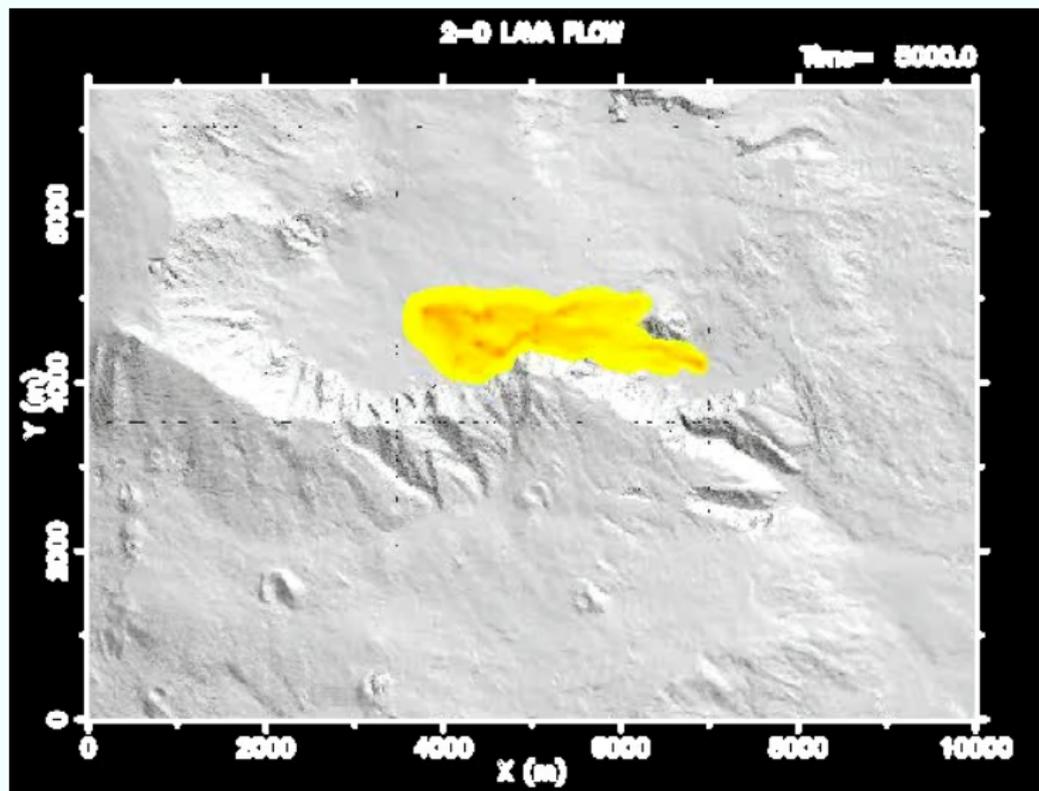
Simulazione 2D (Etna 1991)

Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



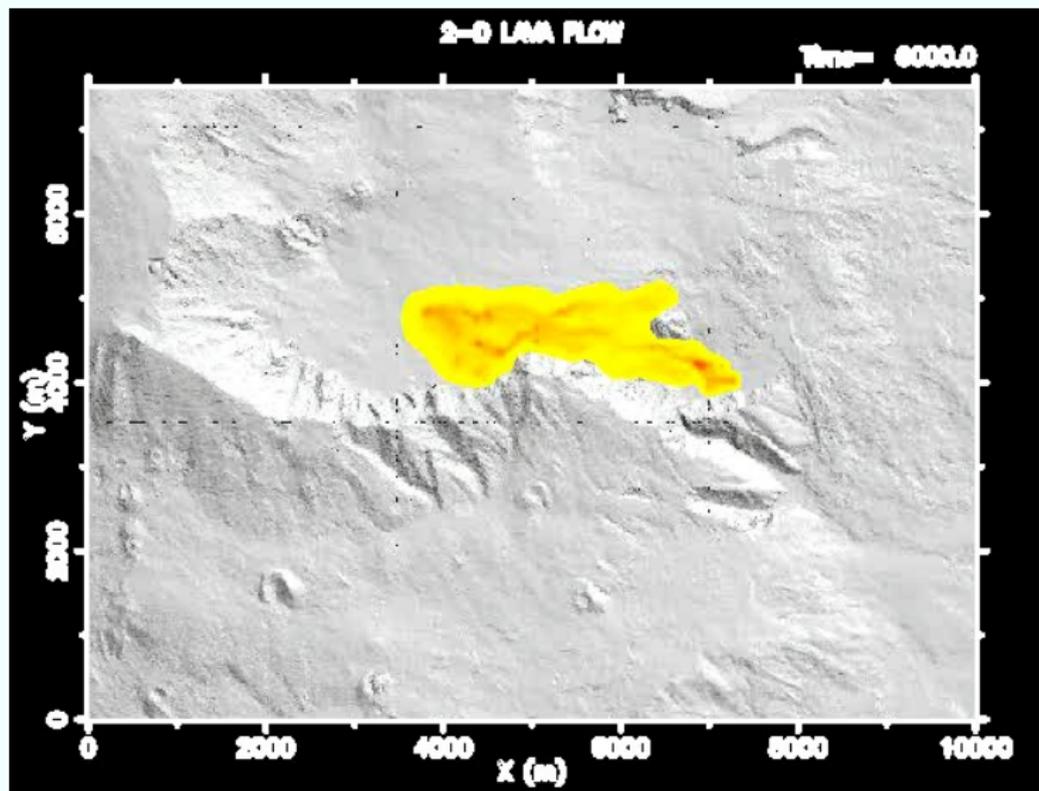
Simulazione 2D (Etna 1991)

Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



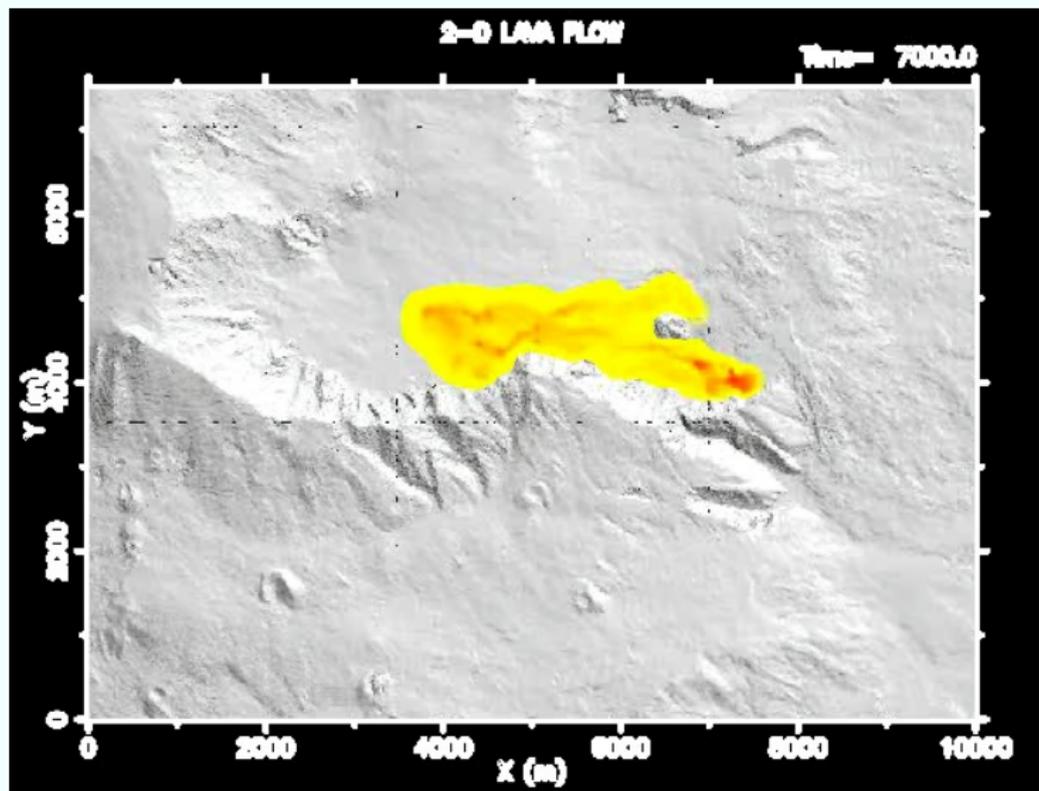
Simulazione 2D (Etna 1991)

Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



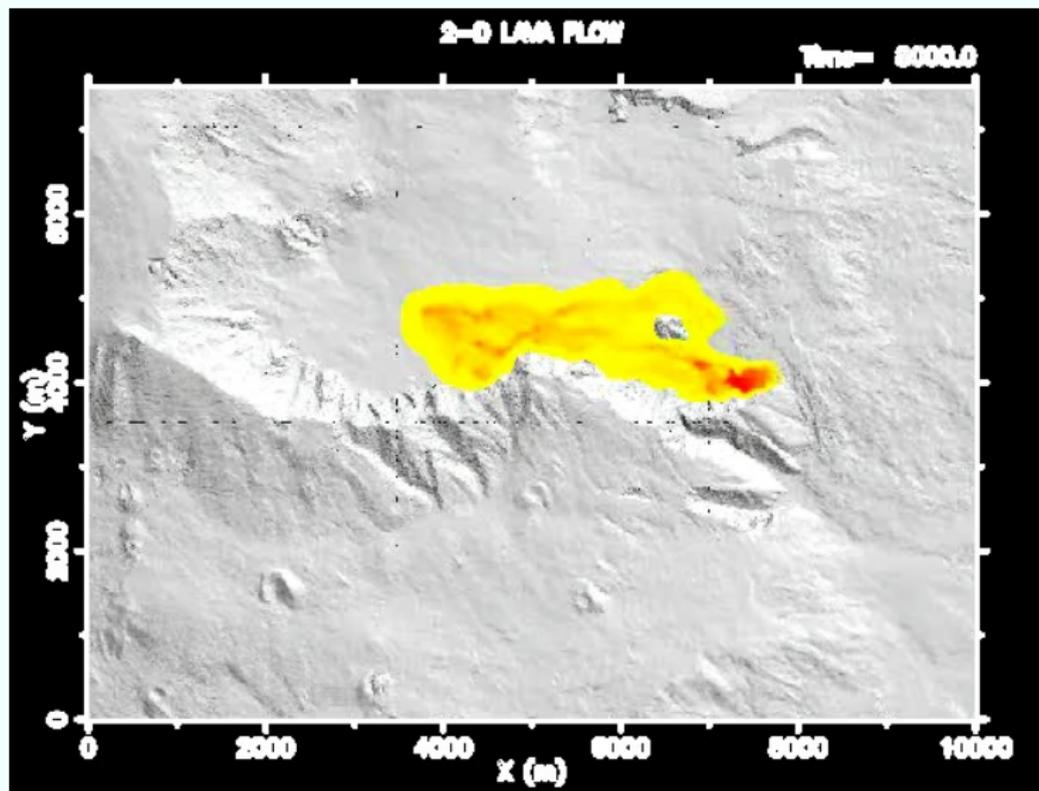
Simulazione 2D (Etna 1991)

Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



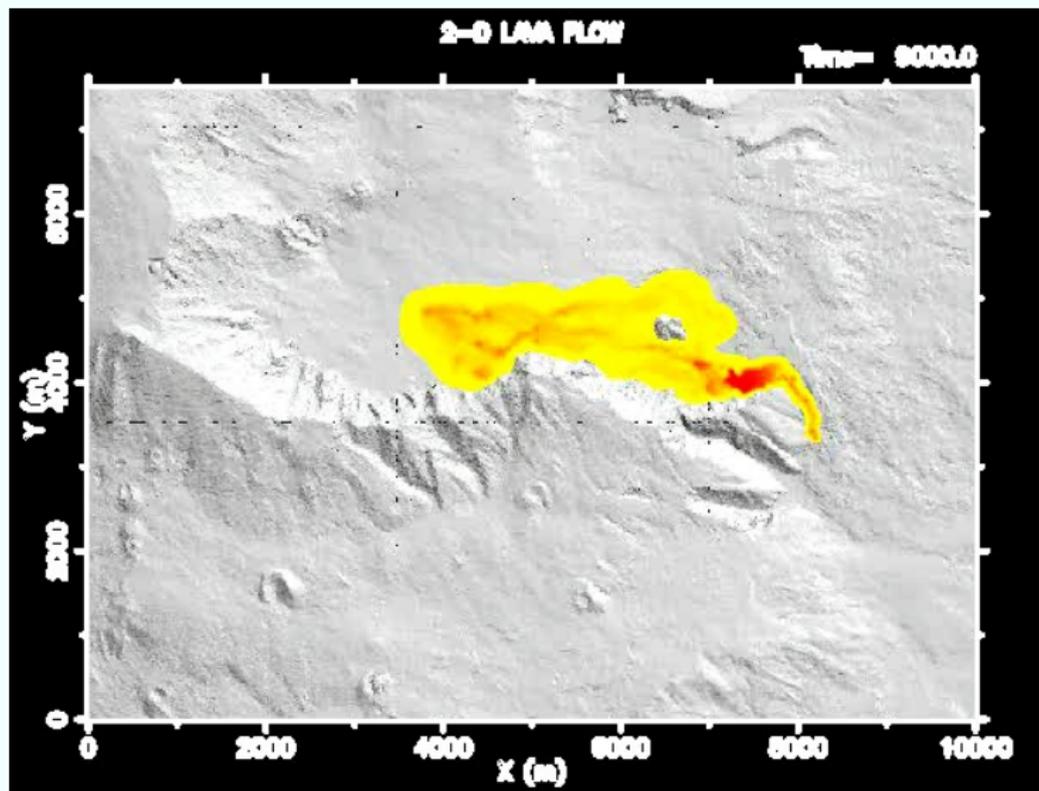
Simulazione 2D (Etna 1991)

Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



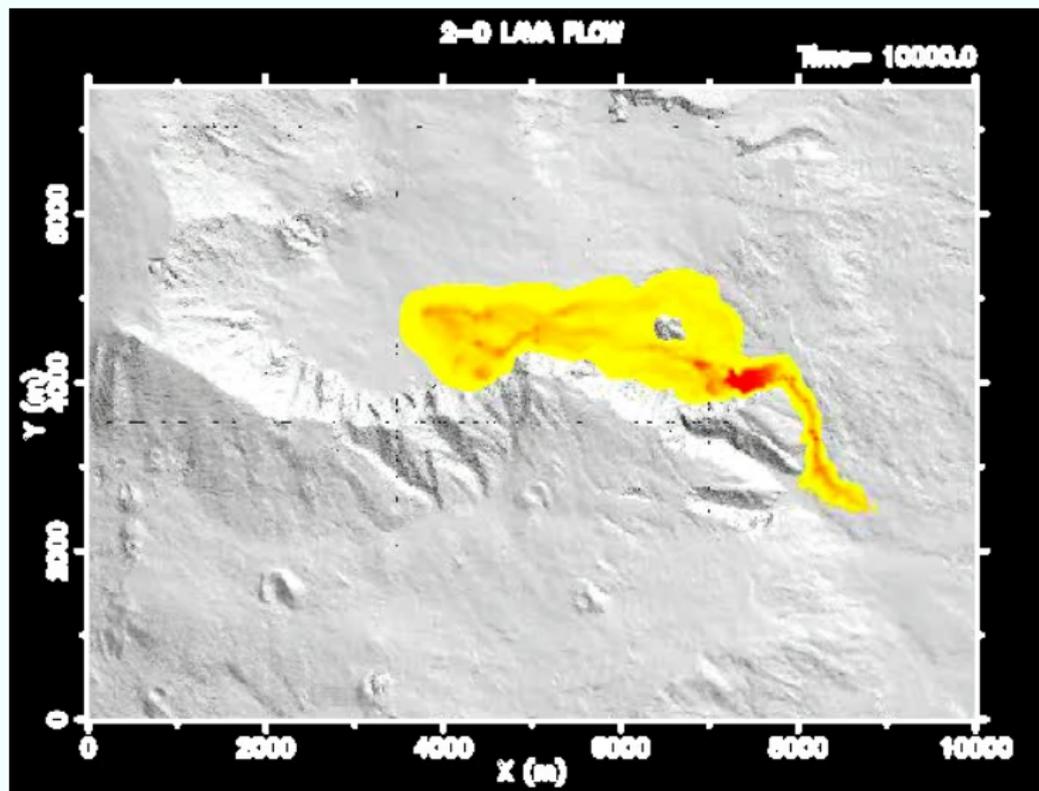
Simulazione 2D (Etna 1991)

Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



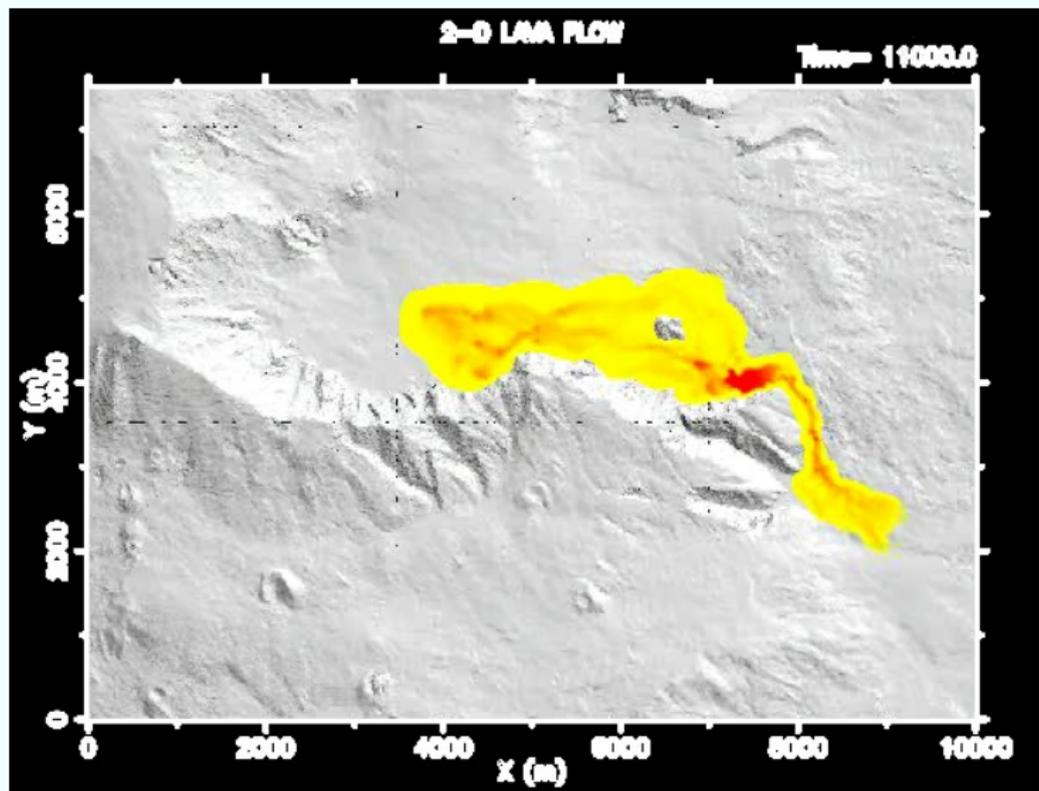
Simulazione 2D (Etna 1991)

Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



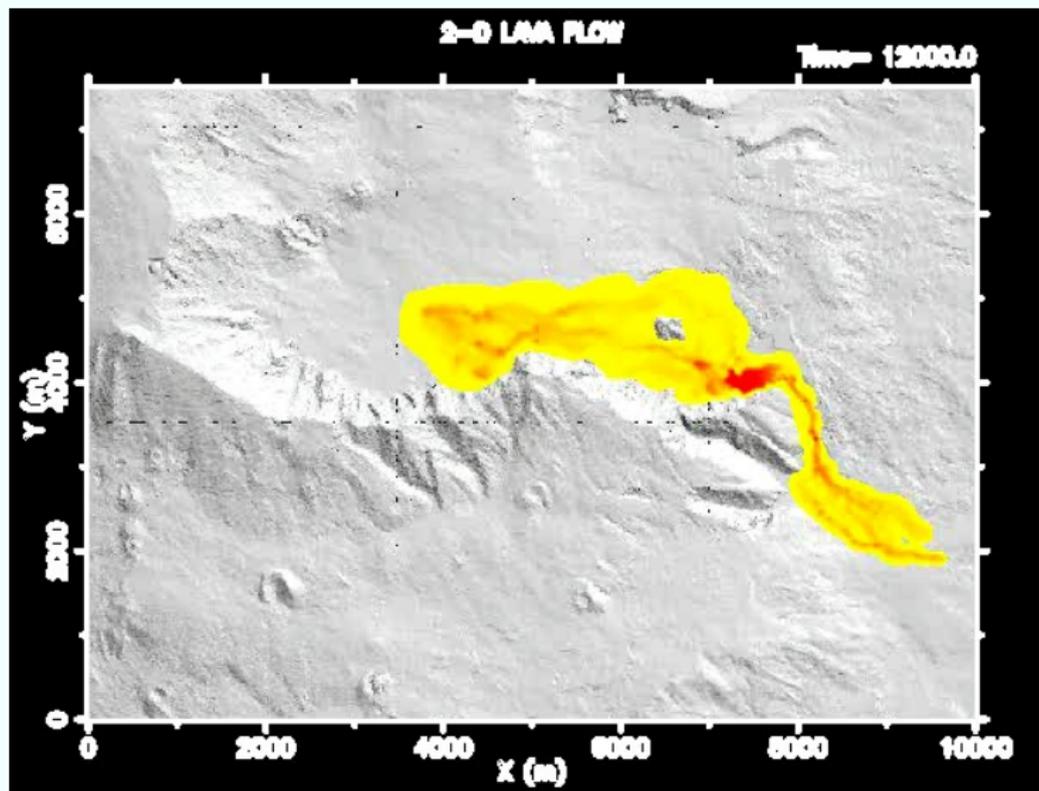
Simulazione 2D (Etna 1991)

Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



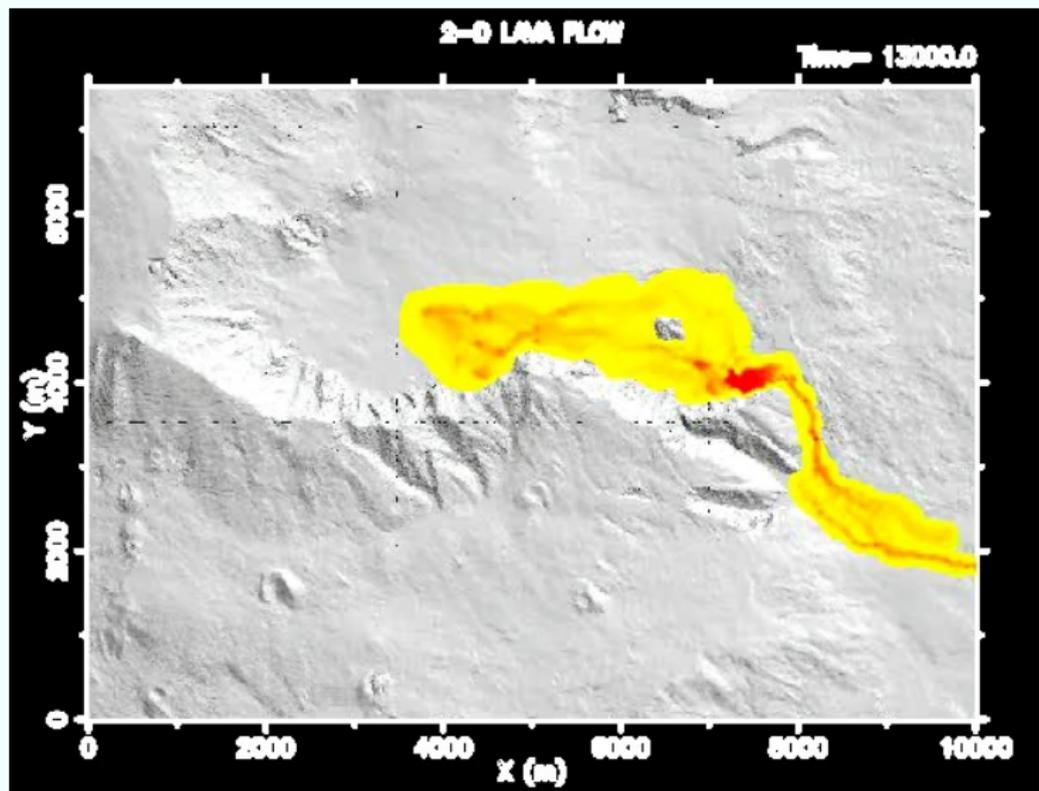
Simulazione 2D (Etna 1991)

Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



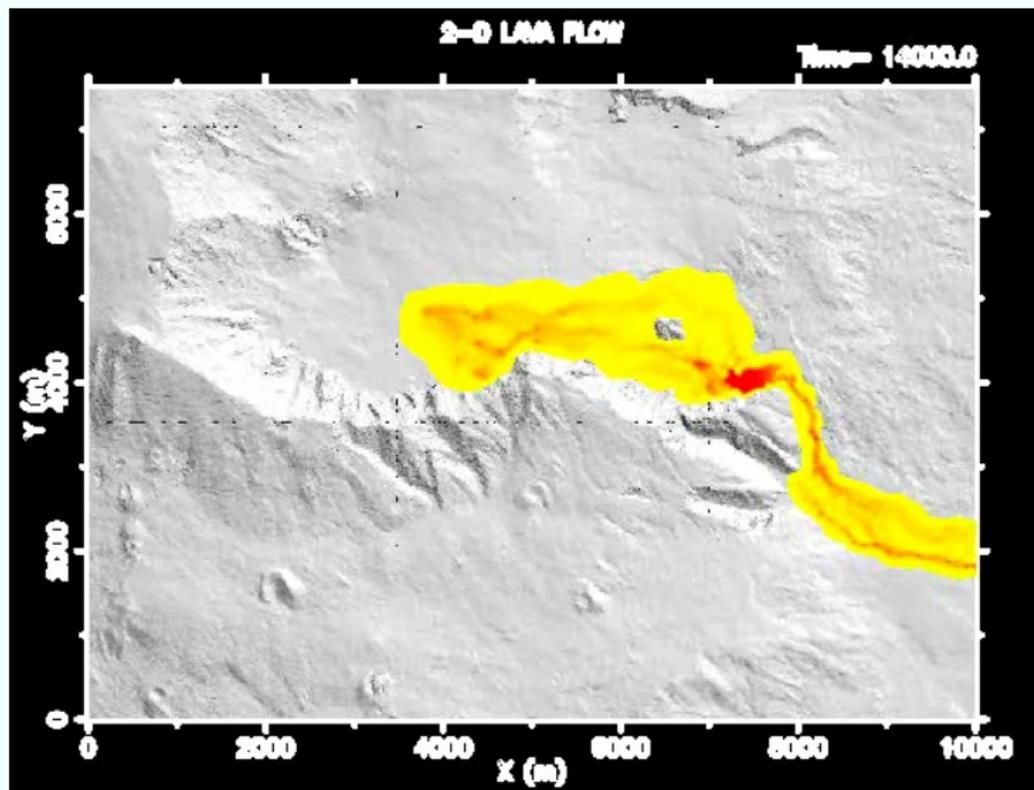
Simulazione 2D (Etna 1991)

Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



Simulazione 2D (Etna 1991)

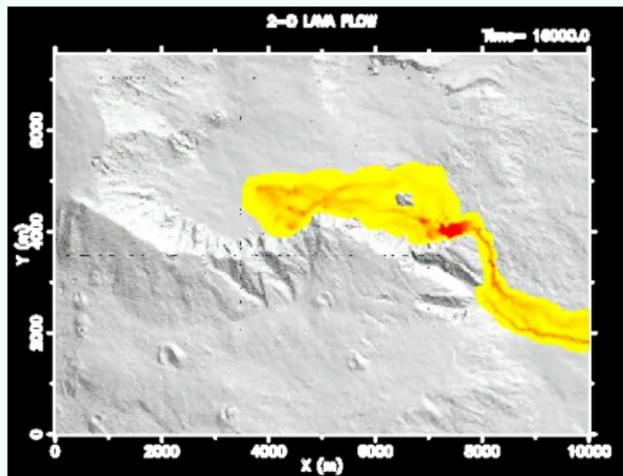
Modello SWELAVA, INGV Napoli (Costa e Macedonio, GRL, 2005)



Etna 1991

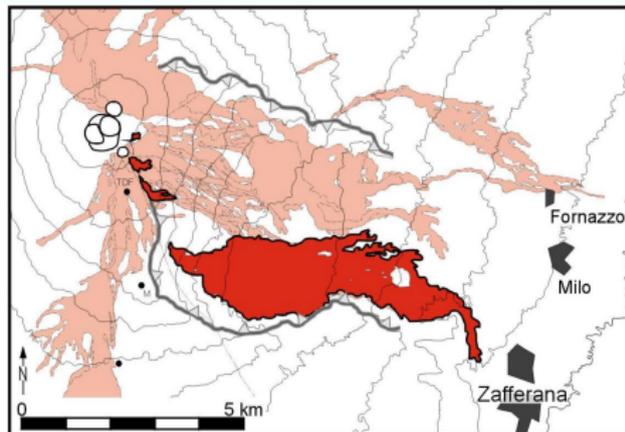
Confronto dei risultati

Simulazione



Durata: alcuni minuti di CPU

Osservazione

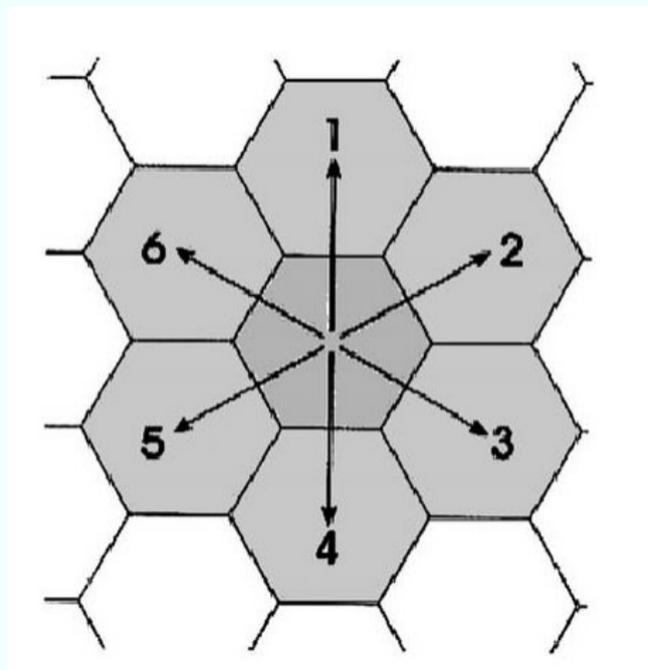


Durata: alcuni mesi

Modello basato su automi cellulari

(Barca et al., 1987; Crisci et al., 2004)

Schema a celle esagonali

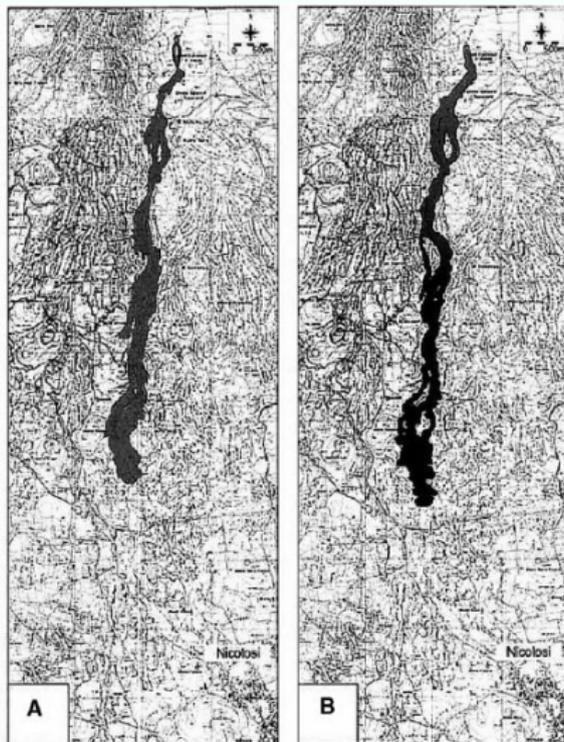


(Crisci et al., JVGR, 2004)

- Ad ogni cella è associato un automa
- L'automata cellulare è caratterizzato da un insieme di parametri che ne determinano lo stato (quota topografica, spessore della lava, temperatura, flussi verso le celle adiacenti, ecc.)
- Il passaggio da uno stato ad un altro viene definito sulla base di alcune regole predeterminate

Modello basato su automi cellulari

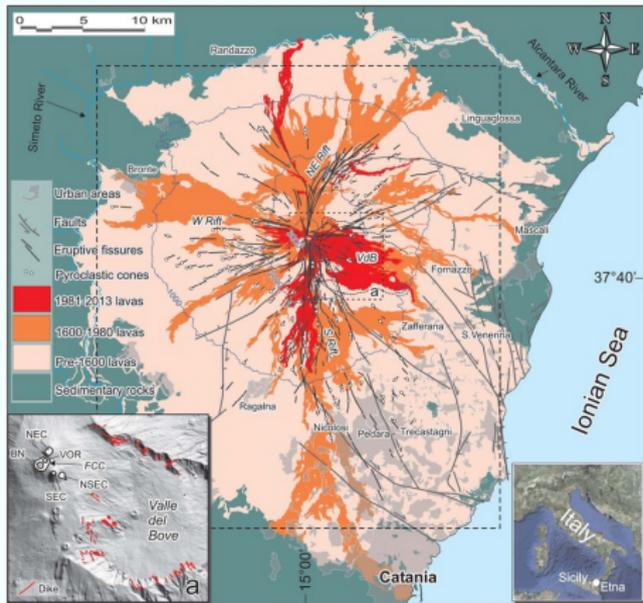
Confronto dei risultati: Etna 1991



A=osservata; B=simulata (Crisci et al., JVGR, 2004)

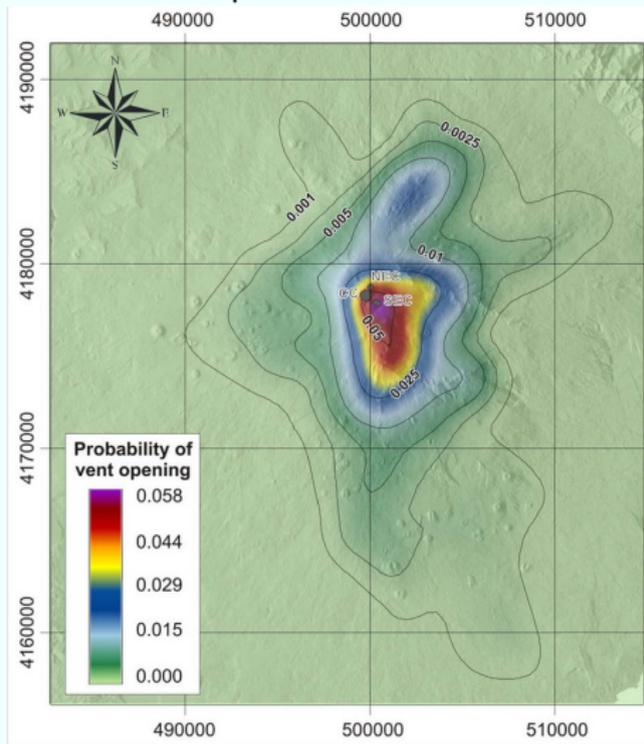
Colate di lava all'Etna

Colate di lava dell'Etna



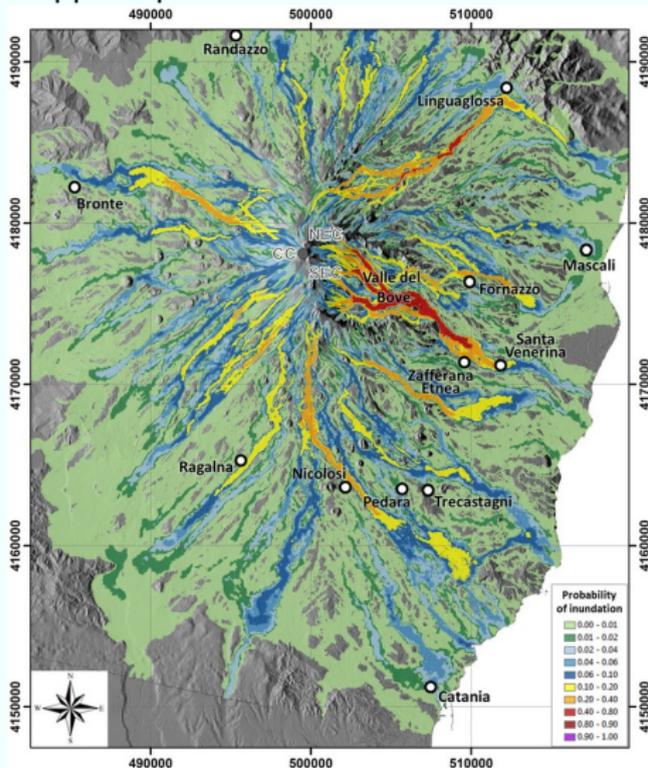
(Del Negro et al., Sci. Rep., 2013)

Probabilità di apertura delle bocche



Simulazione delle colate di lava all'Etna

Mapa di probabilità di invasione lavica



(Del Negro et al., Sci. Rep., 2013)

Modello MAGFLOW (INGV, Catania)

- Basato su Automi Cellulari (5 par.)
 - ▶ Quota topografica
 - ▶ Spessore lava
 - ▶ Energia interna (termica)
 - ▶ Temperatura
 - ▶ Quantità lava solidificata
- Approssimazioni analitiche dell'eq. di Navier-Stokes

Commenti finali

- Sono stati sviluppati diversi modelli per la descrizione delle eruzioni vulcaniche
- Per scopi applicativi, la maggior parte di essi utilizza approssimazioni al fine di velocizzare i tempi di calcolo