

Simulazione numerica in strutture HPC dei terremoti storici
relativi alla Città dell'Aquila ed alle sue zone limitrofe.

GSSI-INGV-UNIVAQ

Resilienza ai Disastri e Sviluppo Sostenibile
Napoli 1-2 Febbraio 2024

Relatore: Donato Pera
Università degli studi dell'Aquila

Napoli 1 Febbraio 2024

Il lavoro riportato in questa presentazione é stato svolto dal **Sismo Group AQ** (<https://www.seismo.aq.it>) un gruppo di lavoro **interdisciplinare** costituito tramite un accordo tra il **Gran Sasso Science Institute (GSSI)**, **l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)** e **l'Università degli studi dell'Aquila (UNIVAQ)**.

I membri del gruppo sono:

- **Prof. Pierangelo Marcati (GSSI), Prof. Roberto Aloisio (GSSI-INFN), Dott. Enrico Stagnini (GSSI)**
- **Dott.ssa Federica Di Michele (INGV sezione di Milano)**
- **Prof. Bruno Rubino, Dott. Donato Pera (UNIVAQ).**

Il Sismo Group AQ si occupa principalmente di problemi di : **modellistica matematica** per equazioni alle derivate parziali, applicazioni di **High Performance Computing (HPC)** ed applicazioni di **Intelligenza Artificiale (IA)** per problemi relativi alla **simulazione numerica dei terremoti**.

- Il Sismo Group AQ ha partecipato al progetto finanziato dal **Centre for Urban Informatics and Modelling CUIM (GSSI)** per la realizzazione di **Open Data L'Aquila** (<https://www.opendatalaquila.it>).
- Il Sismo Group AQ collabora attualmente con il **Politecnico di Milano** (Prof. I. Mazzieri, Prof.ssa C. Smerizini, Prof. P. Antonietti e Prof. A. Quarteroni) , per i temi di simulazione numerica dei terremoti.
- Il Sismo Group AQ collabora inoltre con la **sezione INGV della Città dell' Aquila** (Dott. M. Carafa, Dott.ssa V. Kastelic, Dott. J.B. May.)
- Le simulazioni numeriche vengono eseguite presso il laboratorio **HPC-BigData del DISIM presso l'Università degli studi dell'Aquila e presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso.**
- Il Sismo Group AQ partecipa alle attività del: **Centro Nazionale per HPC, Big Data e Quantum Computing (Spoke 5) sul tema dei Disastri Naturali** e del **progetto HPC4DR.**



Pera D., Di Michele F., Stagnini E., Rubino B., Aloisio R., Marcati, P. . Numerical Simulations of 1461 and 1762 San Pio delle Camere (LAquila) Earthquakes Using 3D Physics-Based Mode. . Computational Science and Its Applications ICCSA 2023 Workshops. ICCSA 2023. Lecture Notes in Computer Science, vol 14111. Springer, Cham



Di Michele F., Styahar A., Pera D., May J., Aloisio R., Rubino B. Marcati P. Fault shape effect on SH waves using finite element method. Journal of Seismology, (2022) 1-21.



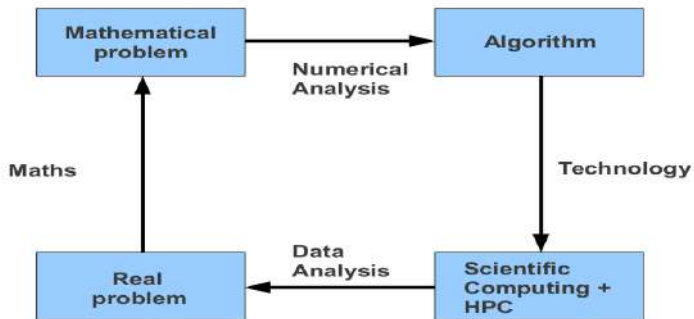
Di Michele F., May J. , Pera D., Kastelic V. , Carafa M. , Smerzini C. , Mazzieri I. , Rubino B. , Antonietti P. F., Quarteroni A., Marcati P., Spectral element numerical simulation of the 2009 LAquila earthquake on a detailed reconstructed domain. Geophysical Journal International, vol. 230, n.1 , 29-49, 2022, Oxford University Press.



May J. , Pera D. , Di Michele F. , Rubino B. , Aloisio R. , Marcati P. Fast CUBIT-Python tool for highly accurate topography generation and layered domain reconstruction, 29th international meshing roundtable, 2021.



Comparison of machine learning tools for damage classification: the case of LAquila 2009 earthquake F Di Michele, E Stagnini, D. Pera, B. Rubino, R. Aloisio, A. Askan, P. Marcati, Natural Hazards, 1-26.



Nelle nostre simulazioni consideriamo la seguente equazione (momentum equation):

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}_i}{\partial t^2} = \partial_j \tau_{ij} + f_j \quad (1)$$

Al fine di risolvere questa equazione é necessario definire una relazione tra stress e strain che può essere espressa come di seguito:

$$\tau_{ij} = \lambda \delta_{ij} \partial_k \mathbf{u}_k + \mu (\partial_i \mathbf{u}_j + \partial_j \mathbf{u}_i) \quad (2)$$

utilizzando questa relazione nella precedente equazione e la notazione vettoriale possiamo definire l'equazione generale per le onde sismiche nel caso omogeneo:

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \nabla \lambda (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \nabla \mu \cdot [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] + (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} - \mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{u} \quad (3)$$

Considerando costanti i parametri di Lamé λ e μ possiamo studiare l'equazione generale per le onde sismiche in forma semplificata.

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} - \mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{u} \quad (4)$$

dove λ e μ sono i parametri di Lamé , ρ é la densità e la funzione $u(x,y,z,t)$ definisce lo spostamento al suolo.

- Le tecniche di simulazione numerica sono basate su metodi agli elementi finiti di tipo Galerkin discontinuo implementati nel software SPEED (<http://speed.mox.polimi.it/>).
- Per tutte le simulazioni numeriche oggetto delle nostre ricerche utilizziamo tecniche di supercalcolo, tramite le strutture di High Performance Computing dell'Università degli studi dell'Aquila.
- Tutte le simulazione numeriche riportate in questo lavoro sono state eseguite utilizzando il cluster di calcolo Caliban presso il Dipartimento di Ingegneria e Scienze dell'Informazione e Matematica dell'Università degli studi dell'Aquila.

STEP 1: *Surface Reconstruction*

Surface.py reads geolocated points and range definitions from input files to reconstruct a real surface



STEP 2: *Cake layered model*

Layers.py reads user defined layer depths, or existing Cubit file names, in order to add subsurface layers and create a 3D model



STEP 3: *Fault Reconstruction*

Faults.py reads information related to each fault and generates a representative plane



STEP 4: *Combine model elements*

Complete.py combine the three previous steps and create a single Cubit file ready to be meshed



Ricostruzione del dominio computazionale della Città dell'Aquila

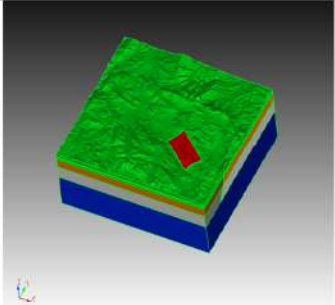
Fault	Mesh Features	Domain Image
L=16.2 Km W=10.5 Km Strike=127° Dip=50° Rake=270°	Size=(67.2,59.7,20.1Km) N. Elements=1660440 Spectral Degree=3 N. Mesh Nodes=1838615 $\Delta t=0.0003s$ Duration=30s	




Figure 1: Nella prima colonna riportiamo le caratteristiche principali della faglia localizzata nelle vicinanze di San Pio delle Camere (AQ) . Nell'ultima colonna viene riportata una immagine del dominio computazionale 3D ricostruito a partire dalla topografia della zone oggetto di studio, la proiezione della faglia sulla superficie esterna del dominio é riportata in rosso.

Table 1: Propriet meccaniche del dominio considerato [1]

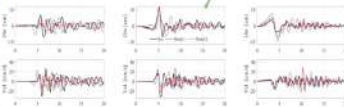
<i>Layer</i>	<i>Depth</i> (km)	V_S (m/s)	V_P (m/s)	ρ (g/cm ³)	Q_S
1	0–1	1700	3160	2.5	100
2	1–2	2600	4380	2.5	200
3	2–5	3100	5760	2.84	200
4	5–20	3500	6510	3.18	200

Validazione del dominio computazionale della Città dell'Aquila

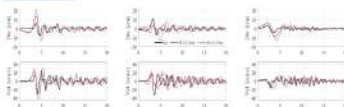
6 Aprile 2009 (6.1 Mw) Terremoto dell'Aquila

Model	Fault Solution	Mw	Slip distribution	Mesh Features	Domain image
Model 1	L = 28 km W = 20.5 km Strike = 133° Dip = 54° Rake = -322°	6.1	1	Size = 85.8, 57.8, 29.8 km No. Elements = 776426 Spectral Degree = 3 No. mesh nodes = 803222 $\Delta t = 0.0005$ s Duration = 30s	
Model 2	L = 20 km W = 14 km Strike = 133.5° Dip = 41° Rake = -203.5°	6.3	1	Size = 85.8, 57.8, 29.8 km No. Elements = 3762771 Spectral Degree = 3 No. mesh nodes = 4088038 $\Delta t = 0.00025$ s Duration = 30s	
Pagerica Prediction	L = 14 km W = 9.5 km Strike = 127° Dip = 50° Rake = -277°	6.1	3 (hypothetical)	Size = 85.8, 57.8, 29.8 km No. Elements = 1725476 Spectral Degree = 3 No. mesh nodes = 1865398 $\Delta t = 0.00025$ s Duration = 30s	

Inverted Sources



Scenarios



All numerical simulations have been realized using SPEED (<http://speed.mcg.pitt.edu/>) and ran on CALIBAN (<https://caliband.sirm.univaq.it/>)

(1) M1 10

(2) M2 70

(3) M1P 70

Perché utilizzare strutture HPC nella simulazione dei terremoti

- I domini computazionali considerati per la simulazione dei terremoti hanno normalmente geometrie complesse che richiederebbero lunghi tempi calcolo per essere elaborate nei normali computer.
- La soluzione delle equazioni dell'elastodinamica nei domini considerati tramite le tecniche agli elementi finiti discontinui richiede lunghi tempi di calcolo.
- La post elaborazione dei risultati prodotti dalle simulazioni richiederebbe lunghi tempi di calcolo se eseguita su un normale computer.

Simulazione di terremoti storici San Pio delle Camere (AQ) 1762 e 1461

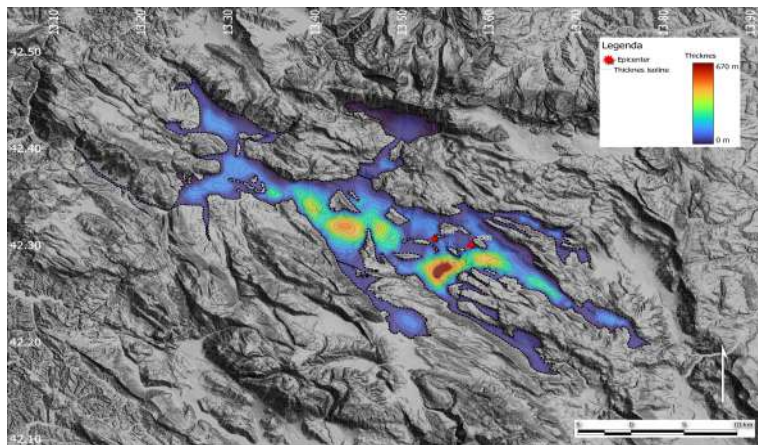


Figure 2: Mappa del bacino alluvionale di San Demetrio-L'Aquila (modello geologico disponibile in [2]). In rosso sono riportati gli epicentri di due terremoti storici (1762 e 1461) relativi alla faglia di San Pio delle Camere.

Simulazione di terremoti storici potenziale distribuzione di slip

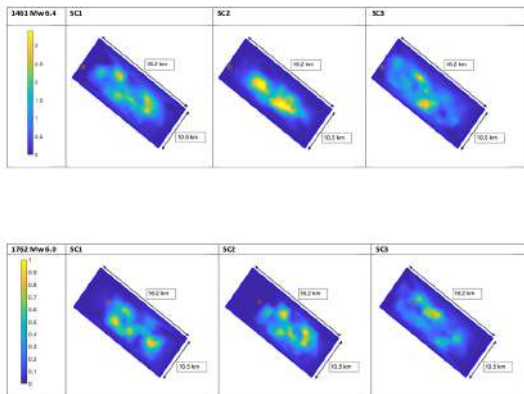


Figure 3: Per i terremoti di epoca pre-strumentale la distribuzione dello slip sulla faglia può essere solo stimata con dei generatori software, nel caso riportato in figura si osservano due scenari di simulazione ottenuti tramite il pre-processing tool del software SPEED. La figura in alto relativa al terremoto del 1461 Mw 6.4 mentre la figura in basso relativa al terremoto del 1762 Mw 6.0.

PGV map San Pio delle Camere 1461

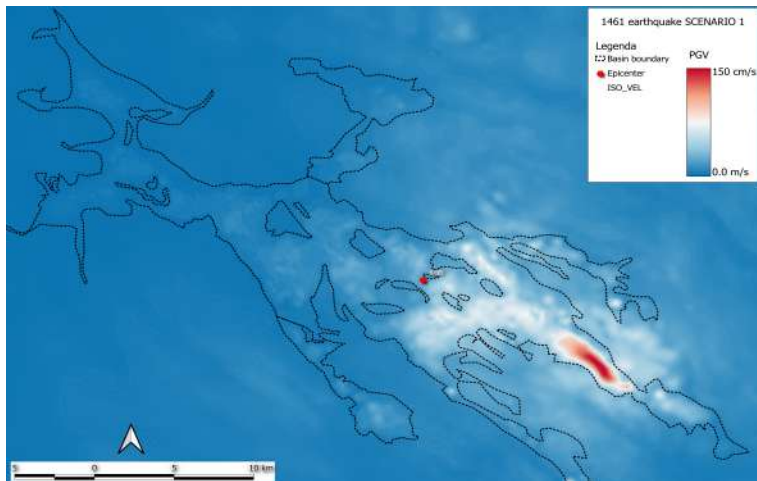


Figure 4: **PGV maps**: peak ground calculated on a calculation scenario (SC1) of the 1461. The maximum values of PGV are obtained in the south-east region of the considered alluvial basin.

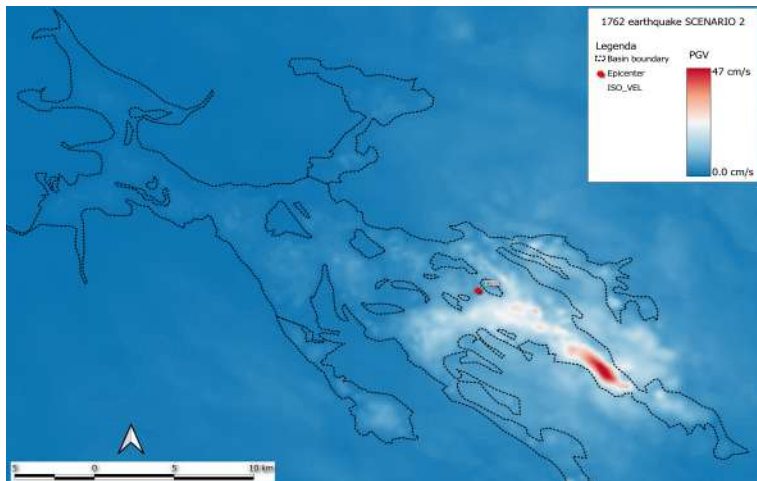


Figure 5: **PGV maps**: peak ground calculated su uno scenario di calcolo (SC2) del terremoto del 1762. I valori massimi di PGV si ottengono nella regione sud-est del bacino alluvionale considerato.

Table 2: Dopo la simulazione é necessario creare un collegamento tra i parametri sismici e le intensità macrosismiche, un valido metodo é quello riportato nel seguente articolo [4].

Model	PGV
Oliveti et al. (2022) [4]	$I_{MCS} = 4.31 + 1.99 * \log_{10} PGV + 0.58 + (\log_{10} PGV)^2$

Mappa delle intensità macrosismiche terremoto del 1461

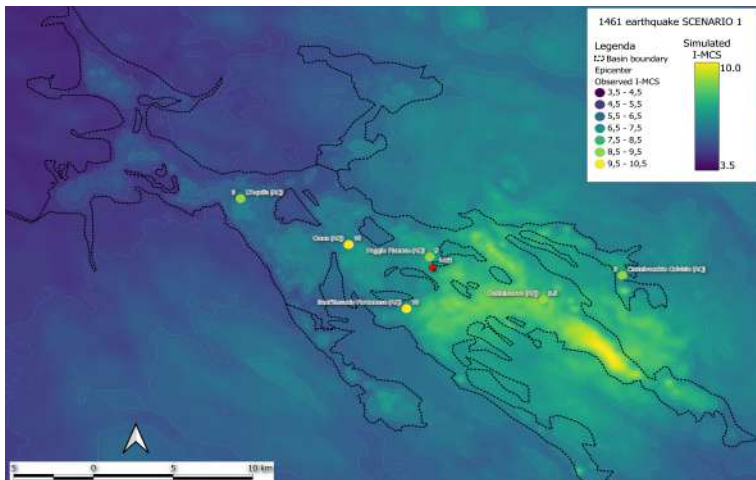


Figure 6: **Mappa delle intensità macrosismiche** : I_{MCS} ottenuta per uno scenario di calcolo (SC1) del terremoto del 1461

Mappa delle intensità macrosismiche terremoto del 1762

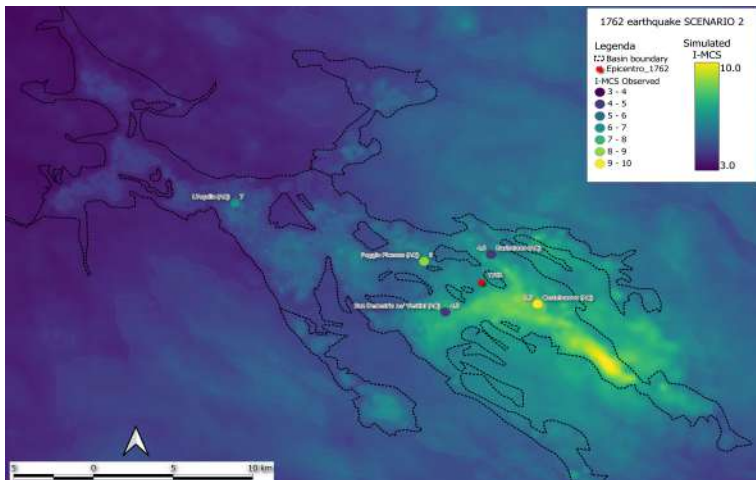


Figure 7: **Mappa delle intensità macrosismiche** : I_{MCS} ottenuta per uno scenario di calcolo (SC2) del terremoto del 1762.

Table 3: Intensità macrosismiche nella scala Mercalli-Cancani-Sieberg per il terremoto del 1461 per 6 centri abitati contenuti nel dominio computazionale ricostruito. Nelle ultime due colonne vengono riportate le coordinate geografiche dei singoli centri e la distanza dall'epicentro stimato.

I_{MCS}	Name	Lat-Lon	Epicentral Distance (km)
X	Onna(AQ)	42.328-13.479	5.5
X	San'Eusanio Forconese (AQ)	42.288-13.524	3.3
IX-X	Castelnuovo (AQ)	42.295-13.628	7.3
IX	Castelvecchio Calvisio (AQ)	42.311-13.688	11.9
IX	L'Aquila (AQ)	42.356-13.396	13.0
IX	Poggio Picenze (AQ)	42.321-13.541	0.8

Table 4: Comparazione tra i voltri delle intensità macrosismiche valutabili tramite le fonti storiche ed i dati ottenuti tramite le simulazioni numeriche per i 6 centri abitati sopra definiti per il terremoto del 1461

Name	I_{MCS}	I_{MCS} SC1	I_{MCS} SC2	I_{MCS} SC3	ErrSC1	ErrSC2	ErrSC3
Onna	10	8.60	7.65	8.68	-1.39	-2.35	-1.32
Sant'Eusanio Forconese	10	8.85	8.3	8.61	-1.14	-1.69	-1.39
Castelnuovo	9.5	11.10	10.02	11.46	1.60	0.52	1.96
Castelvecchio Calvisio	9	10.53	8.56	8.86	1.53	-0.43	-0.14
L'Aquila	9	7.28	6.34	6.82	-1.72	-2.66	-2.17
Poggio Picenze	9	9.77	8.51	8.92	0.77	-0.48	-0.08

Table 5: Intensità macrosismiche nella scala Mercalli-Cancani-Sieberg per il terremoto del 1762 per 5 centri abitati contenuti nel dominio computazionale ricostruito. Nelle ultime due colonne vengono riportate le coordinate geografiche dei singoli centri e la distanza dall'epicentro stimato.

I_{MCS}	Name	Lat-Lon	Epicentral Distance (km)
IX-X	Castenuovo (AQ)	42.295-13.628	3.8
IX	Poggio Picenze (AQ)	42.321-13.541	3.9
VII	L'Aquila (AQ)	42.356-13.396	16.4
IV-V	Barisciano (AQ)	42.326-13.592	2.1
IV-V	San Demetrio ne' Vestini (AQ)	42.289-13.558	3.1

Table 6: Comparazione tra i voltri delle intensità macrosismiche valutabili tramite le fonti storiche ed i dati ottenuti tramite le simulazioni numeriche per i 5 centri abitati sopra definiti per il terremoto del 1762.

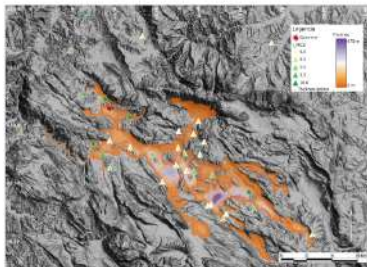
Name	I_{MCS}	I_{MCS} SC1	I_{MCS} SC2	I_{MCS} SC3	ErrSC1	ErrSC2	ErrSC3
Castenuovo	9.5	7.81	8.84	8.03	-1.69	-0.66	-1.47
Poggio Picenze	9.0	5.78	6.55	6.98	-3.22	-2.45	-2.02
L'Aquila	7	4.82	5.65	5.57	-2.18	-1.35	-1.43
Barisciano	4.5	6.20	7.46	6.54	1.7	2.96	2.04
San Demetrio ne' Vestini	4.5	7.65	8.68	8.47	3.15	4.18	3.97

	$E_{max} SC1$	$E_{mean} SC1$	$E_{max} SC2$	$E_{mean} SC2$	$E_{max} SC3$	$E_{mean} SC3$
1461	1.72	1.36	2.66	1.35	2.17	1.18
1762	3.22	2.39	2.96	2.32	3.97	2.19

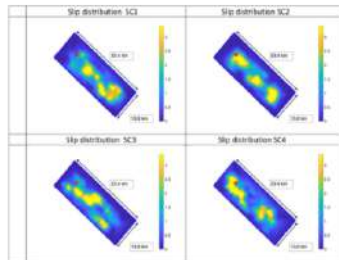
Table 7: Errore massimo ed errore medio relativi alla valutazione delle intensità macrosismiche tramite modelli di stima basati sulla PGV per i migliori scenari di calcolo relativi ai terremoti del 1461 e del 1762

2 Febbraio 1703 Montereale il Grande Terremoto

F. Di Michele, D.Pera et al. Insights on the 1703 L'Aquila earthquake using 3D physics-based numerical simulations. To be submitted



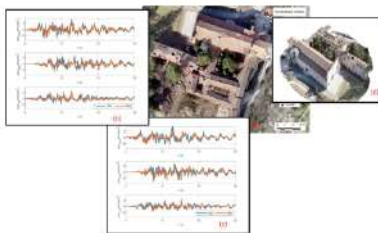
Distribuzione delle intensità massime di sforzo nel bacino aquilano [EP15Med]



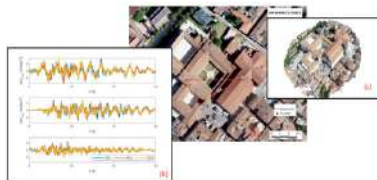
Fault Solution	Mesh Features	Domain Image
L=23.4 Km W=13.6 Km Strike=132° Dip=50° Rake=270°	Size=(65,9,57,8,19,8) Km N. Elements=1639420 Spectral Degree=3 N. Mesh Nodes=1781480 $\Delta t=0.00025s$ Duration=30s	

2 Febbraio 1703 Montereale il Grande Terremoto

"Rovinò buona parte della città e fu veduto in piu' luoghi aprirsi la terra [...] la terra continuamente esalava puzzolenti vapori, l'acqua nei pozzi cresceva e gorgogliava, gli acquedotti della città rimasero infranti, e per 22 ore la terra si senti muovere."
Nikolaus Ludwig Antonelli Avasio



Basilica di Collemaggio: edificata nel XII sec per volere di Papa Celestino non fu completamente distrutta dal sisma. I danni si concentrarono nell'area del presbiterio.



Chiesa di San Domenico: completamente crollata a causa del sisma durante una celebrazione, morirono 800 persone

Valutazione del danno agli edifici con tecniche di AI

2536 edifici – 21 features

- D0: no damage (73)
- D1: light damage (473)
- D2: moderate damage (511)
- D3: medium damage (539)
- D4: serious damage (429)
- D5: heavy damage or collapse (507)



- D0-D1 light damage (546)
- D2-D3 moderate damage (1050)
- D4-D5 heavy damage (936)



Comparison of machine learning tools for damage classification: the case of L'Aquila 2009 earthquake F Di Michele, E Stagnini, D Pera, B Rubino, R Aloisio, A Askan, P Marcati Natural Hazards, 1-26 (2023)

Grazie per l'attenzione !



Evangelista, L. and Del Gaudio, S. and Smerzini, C. and dOnofrio, A. and Festa, G. and Iervolino, I. and Landolfi, L. and Paolucci, R. and Santo, A. and Silvestri, F.. Physics-based seismic input for engineering applications: a case study in the Aterno river valley, Central Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017 vol. 15, n.7, 2645-2671, Springer.



Di Michele, Federica and May, Jon and Pera, Donato and Kastelic, Vanja and Carafa, Michele and Smerzini, Chiara and Mazzieri, Ilario and Rubino, Bruno and Antonietti, Paola Francesca, Quarteroni, Alfio, Marcati Pierangelo. Spectral element numerical simulation of the 2009 LAquila earthquake on a detailed reconstructed domain. *Geophysical Journal International*, vol. 230, n.1 , 29-49, 2022, Oxford University Press.



May, J and Pera, D and Di Michele, F and Rubino, B and Aloisio, R and Marcati, P Fast CUBIT-Python tool for highly accurate topography generation and layered domain reconstruction, 29th international meshing roundtable, 2021.



Oliveti, Ilaria and Faenza, Lucia and Michelini, Alberto. New reversible relationships between ground motion parameters and macrosismic intensity for Italy and their application in ShakeMap, *Geophysical Journal International*, vol. 231, n.2, 1117-1137, 2002, GJI Seismology.



Boncio, Paolo and Lavecchia, Giusy and Pace, Bruno. A model of 3D seismogenic sources for Seismic Hazard Assessment applications: The case of central Apennines (Italy), *Journal of Seismology*, vol. 8, 407-425, 2004, Springer.