

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale,
Università di Napoli Federico II*



*Rete dei Laboratori Universitari di
Ingegneria Sismica - ReLUIS*



IL TERREMOTO DEL 6 APRILE IN ABRUZZO: L'EVENTO E GLI EFFETTI SULL'AMBIENTE FISICO – PRIME ANALISI ED EVIDENZE

(rivisto post 8/05/2009)

Iunio Iervolino
iunio.iervolino@unina.it



Ordine degli Ingegneri della Provincia di Avellino

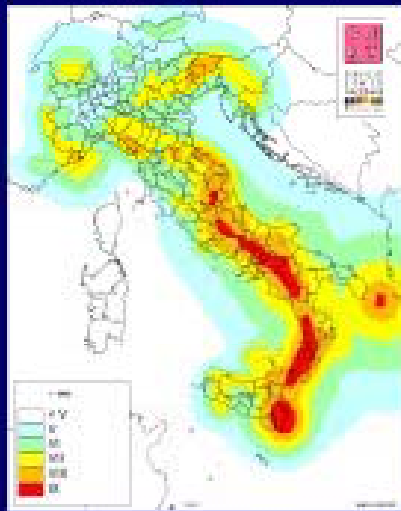
Avellino,
08/05/2008

Natura

Ingegneri

Pianificatori

Hazard



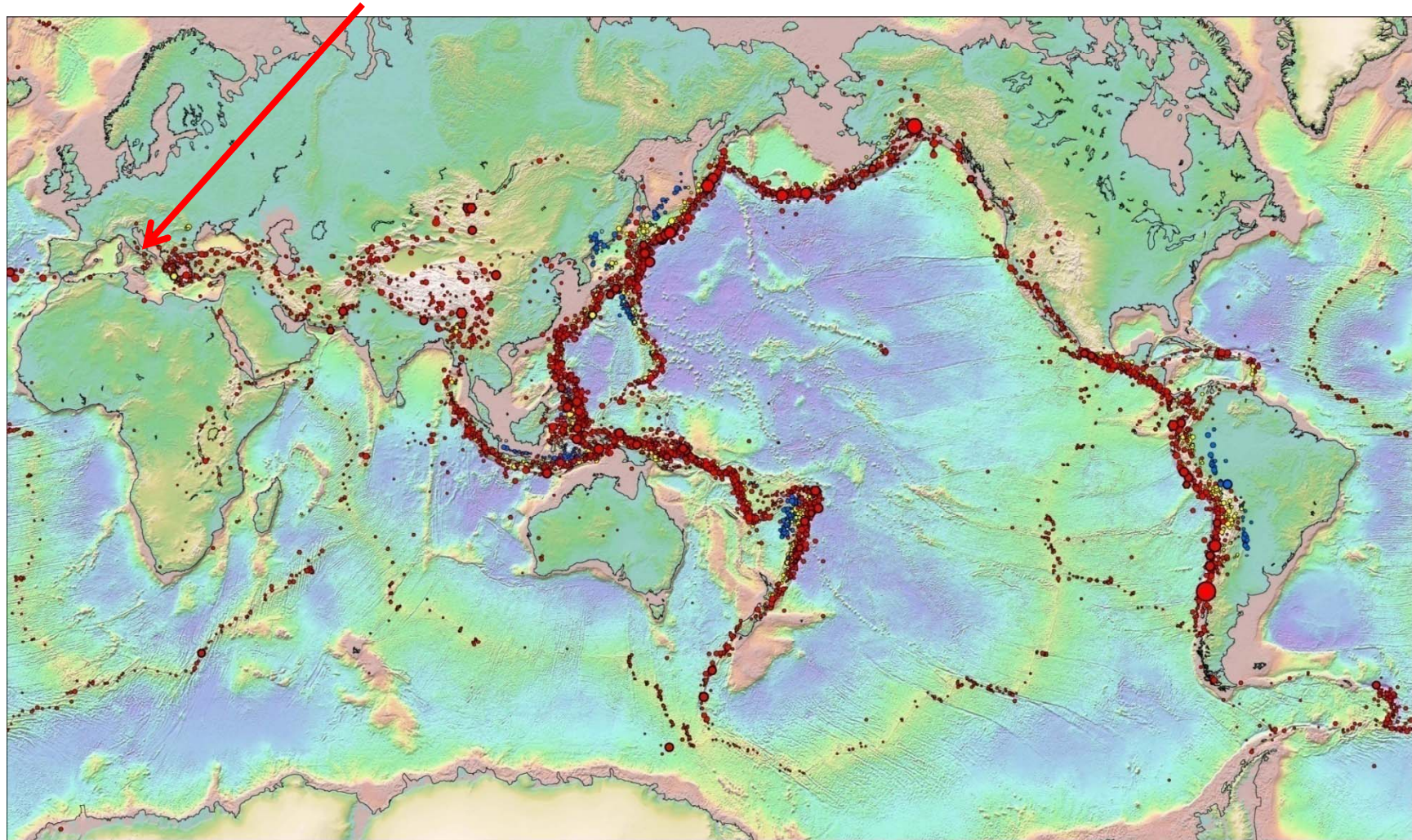
Vulnerability



Exposure



I terremoti non sono localizzati a caso sul pianeta





Introduzione



L'Evento



La prevedibilità

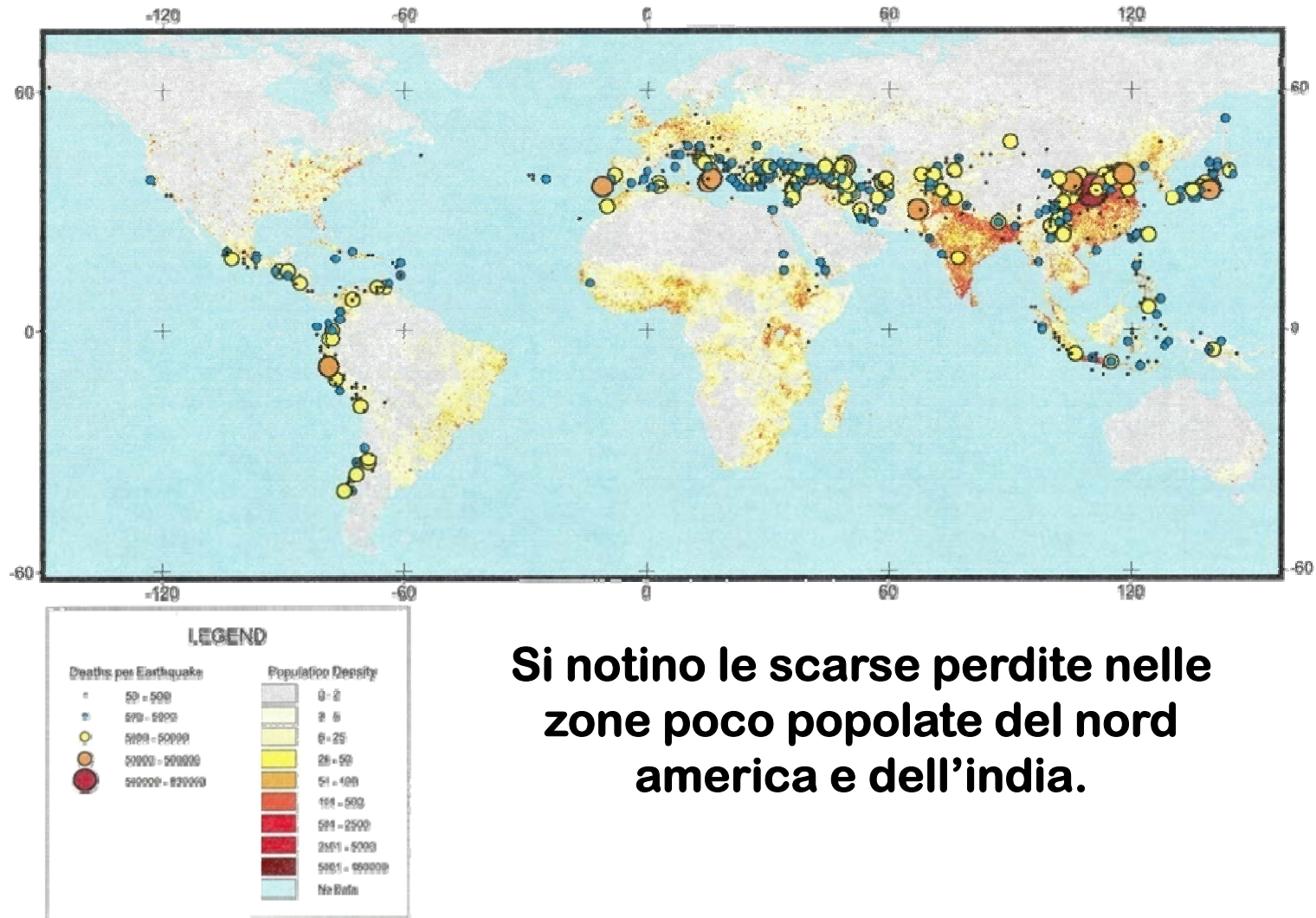


Effetti geotecnici



Effetti strutturali

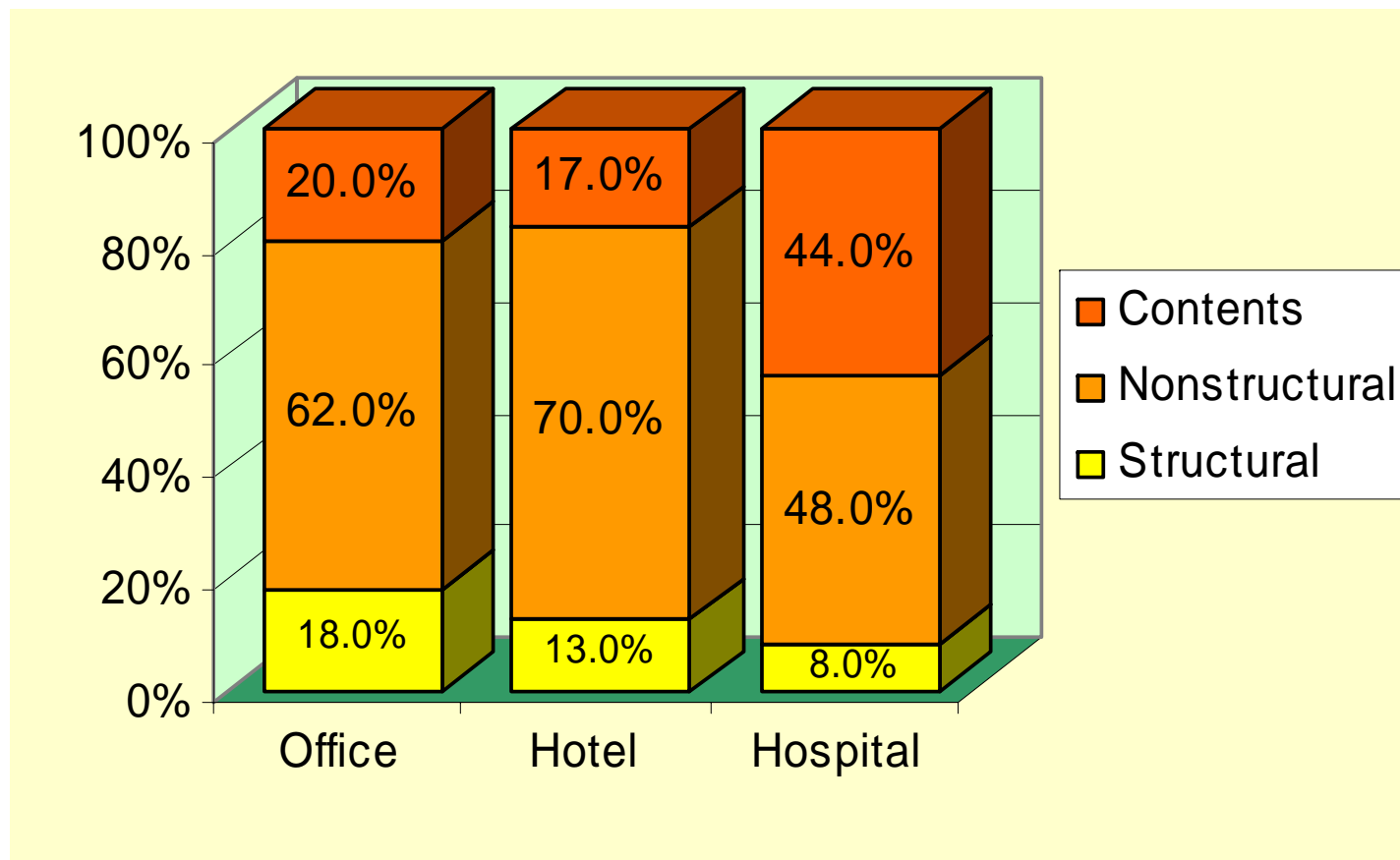
Terremoti * costruzioni vulnerabili * densità abitativa = perdite

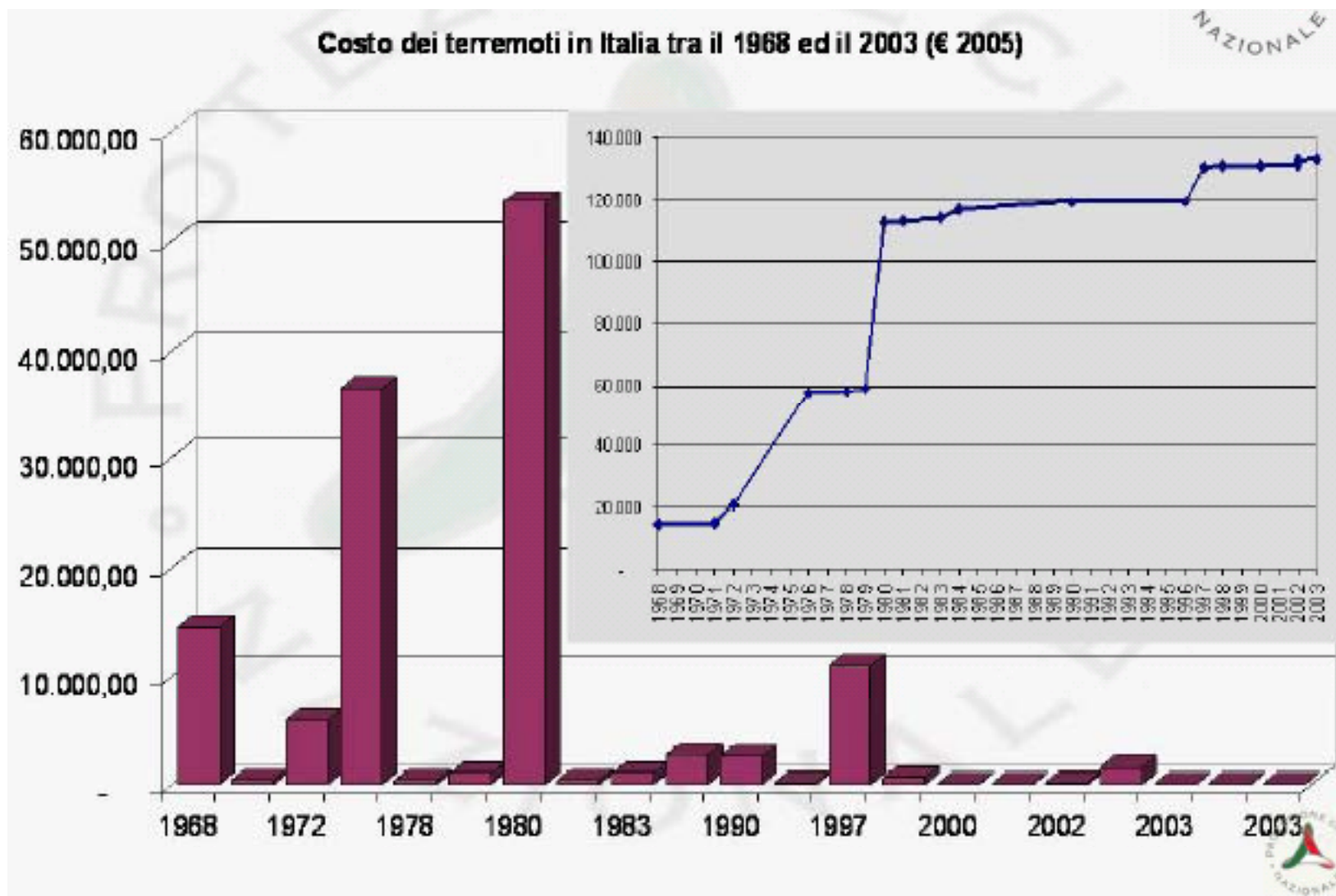


Si notino le scarse perdite nelle zone poco popolate del nord america e dell'india.



Le perdite da terremoti





SEISMIC RISK XXI CENTURY PROJECTIONS

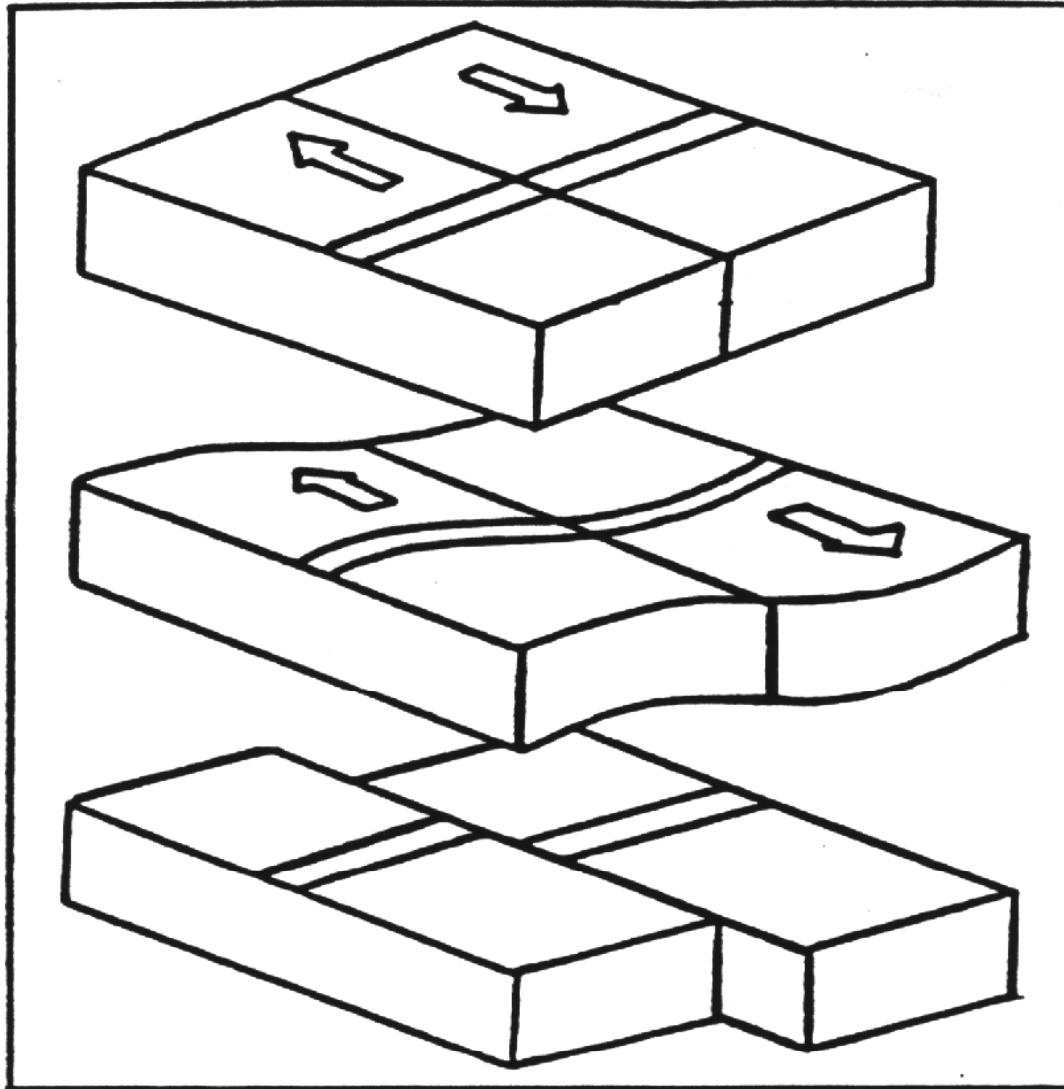


Based on last two century history, the following numbers can be expected:

500 - 2000 dead or injured people / year
→ 50000-200000 in the XXI century

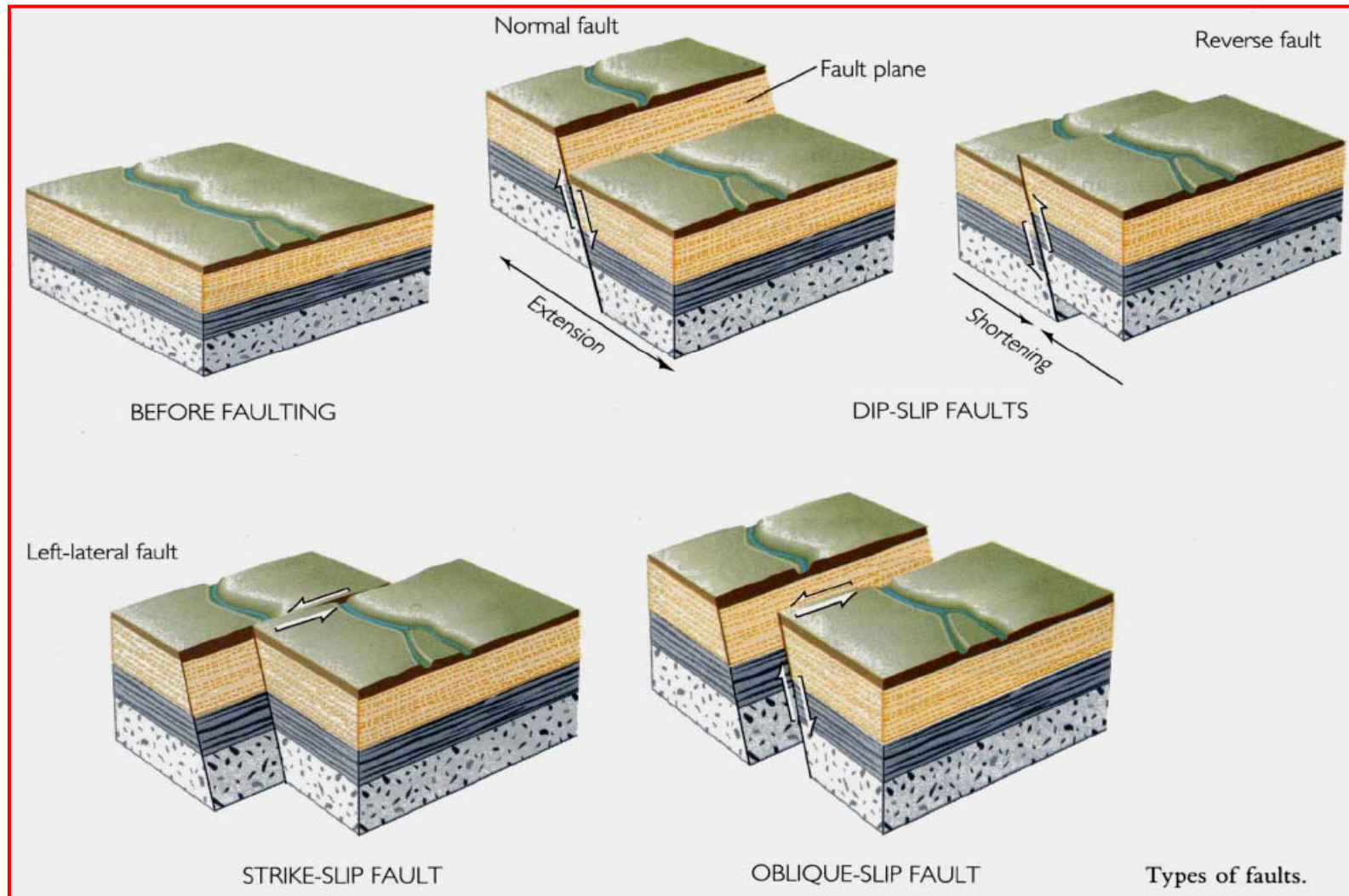
€ 1 - 2 billions / year
→ € 100-200 billions in the XXI century

N.B.: The cost estimation is relevant to houses only. Overall costs should include also public and office buildings, monumental buildings, factories and infrastructure. Possible increases are of the order of 50-100%

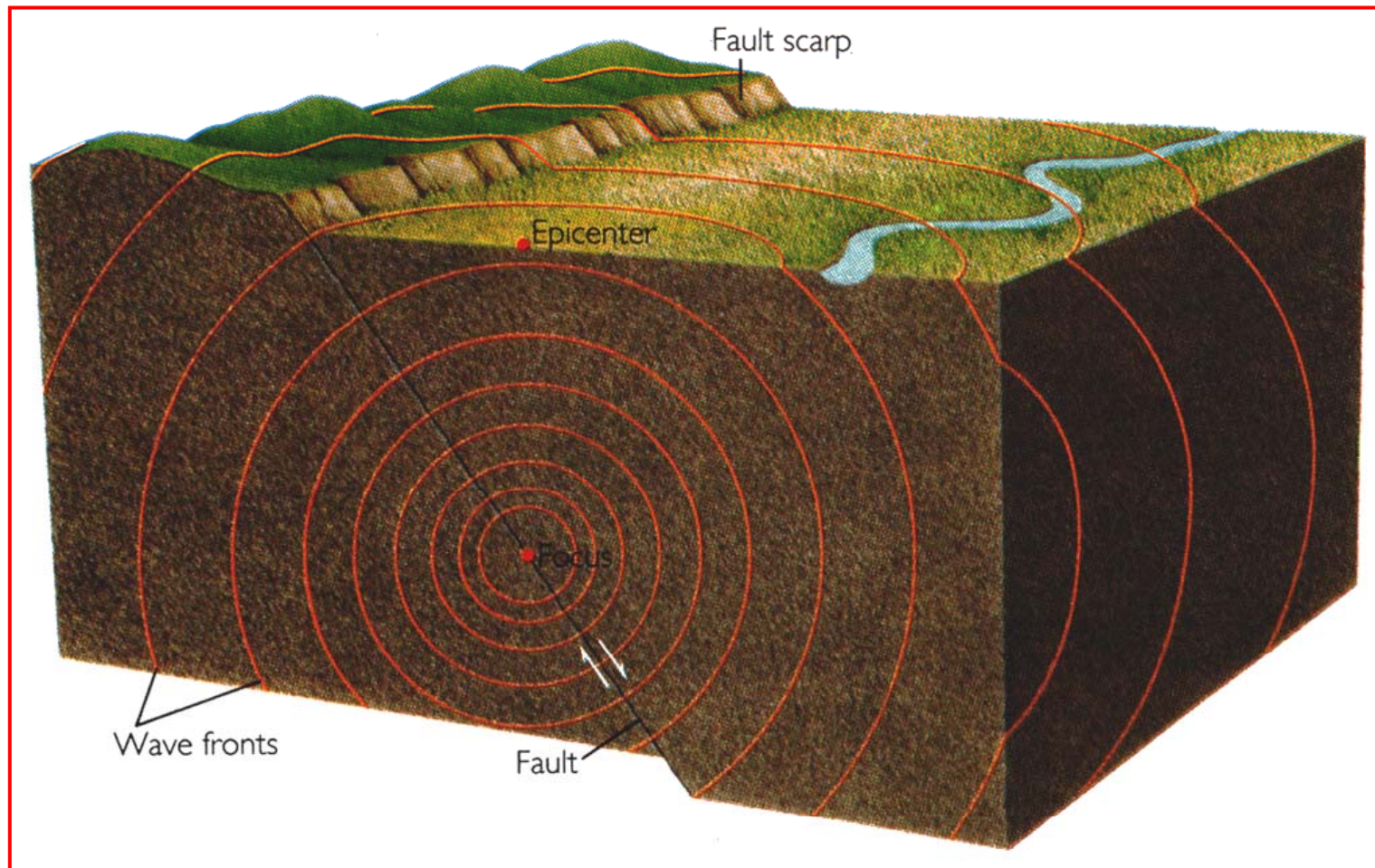


**I terremoti
sono dovuti
all'accumulo
di energia
elastica
dovuta alla
deformazione
e della crosta
terrestre**

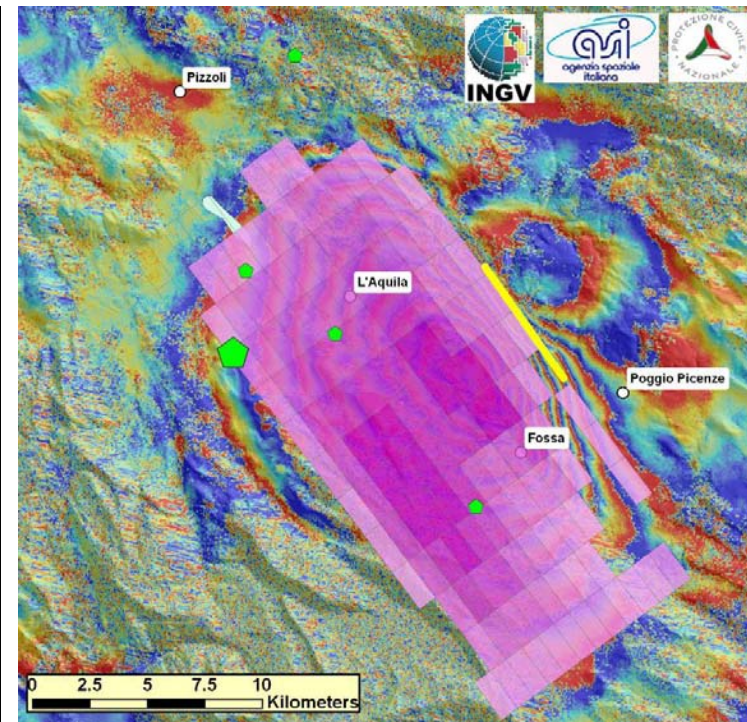
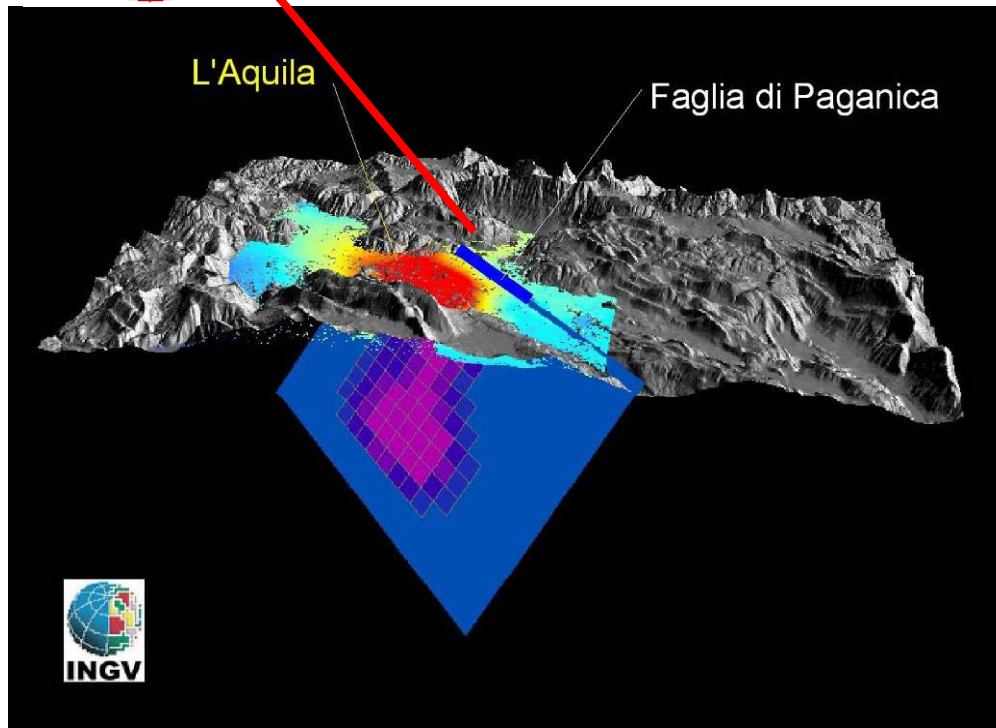
Possibili tipi di rottura



La faglia normale (quella del terremoto di L'Aquila 06/04/09 1.32 UTC)



Il terremoto sembra essere avvenuto sulla faglia di Paganica (dati INGV)



Terremoto di L'Aquila 06/04/09 1.32 UTC

Il meccanismo focale

Date 04/06/09 Region CENTRAL ITALY MI 6.2 Mw 6.3
 Centroid Location:
 Or. Time 1:32:47.2 Lat. 42.32 N Long. 13.32 E Dep 12. fixed

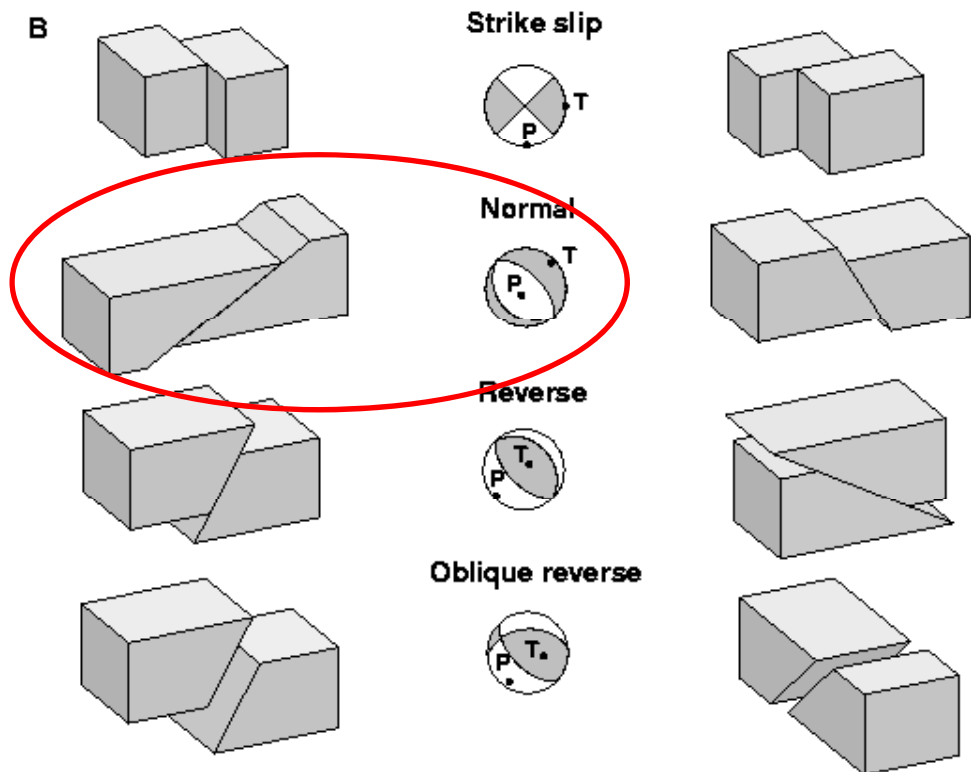
Best Double Couple $M_0: 3.7 \cdot 10^{25}$
 P1 str: 147 dlp: 43 sllp: -88
 P2 324 47 -92

Moment Tensor (10^{25} dyn-cm)
 mrr: -3.75 mti: 1.22 mff: 2.53
 mrt: 0.23 mrf: -0.16 mtf: -1.71

Principal Axes
 T val: 3.72 plg: 2 az: 55
 N 0.05 1 325
 P -3.76 88 200

DATA USED: MEDNET
 AUTHOR: INGVO

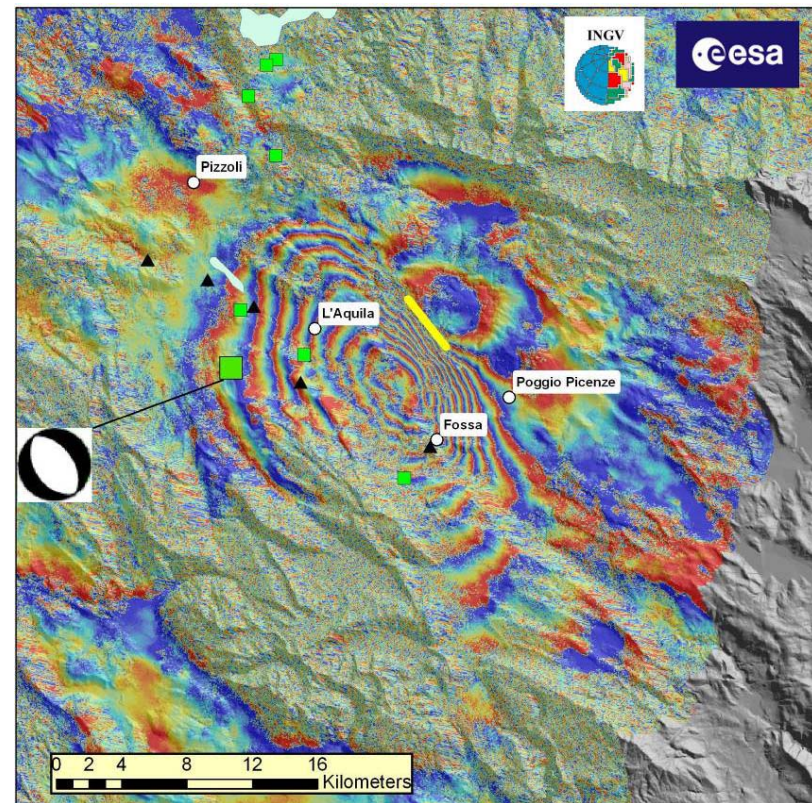
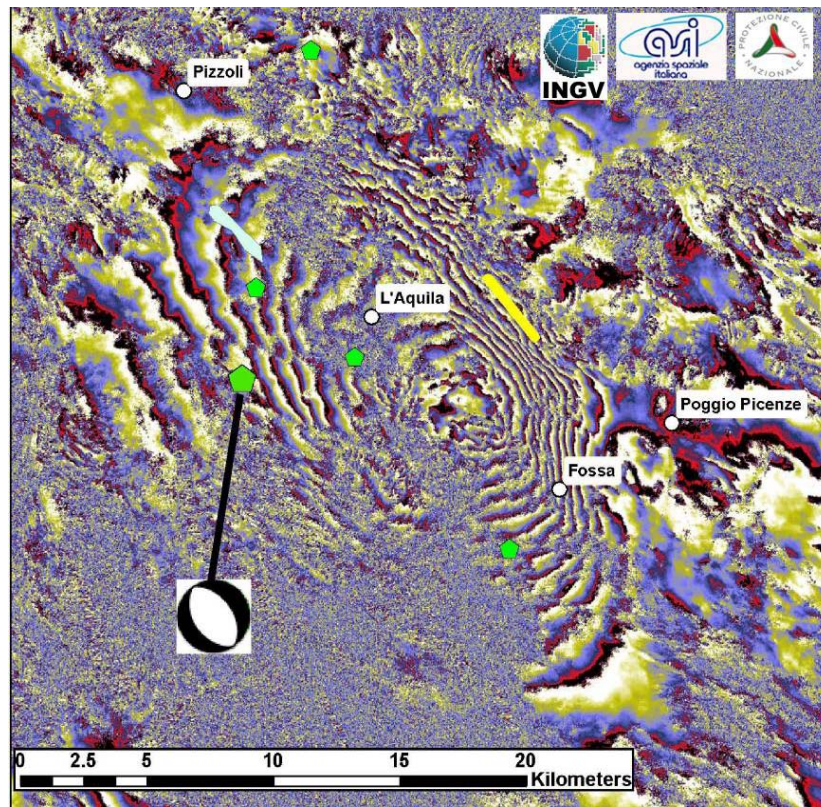
040609A



USGS, 1996

Terremoto di L'Aquila 06/04/09 1.32 UTC

L'interferogramma del terremoto (dati INGV)



Terremoto di L'Aquila 06/04/09 1.32 UTC

Ma di che magnitudo è stato questo terremoto?

La magnitudo della scossa principale è stata valutata sia come **magnitudo Richter (MI) 5.8 (INGV)** che come **magnitudo momento (Mw) 6.3 (USGS)**.

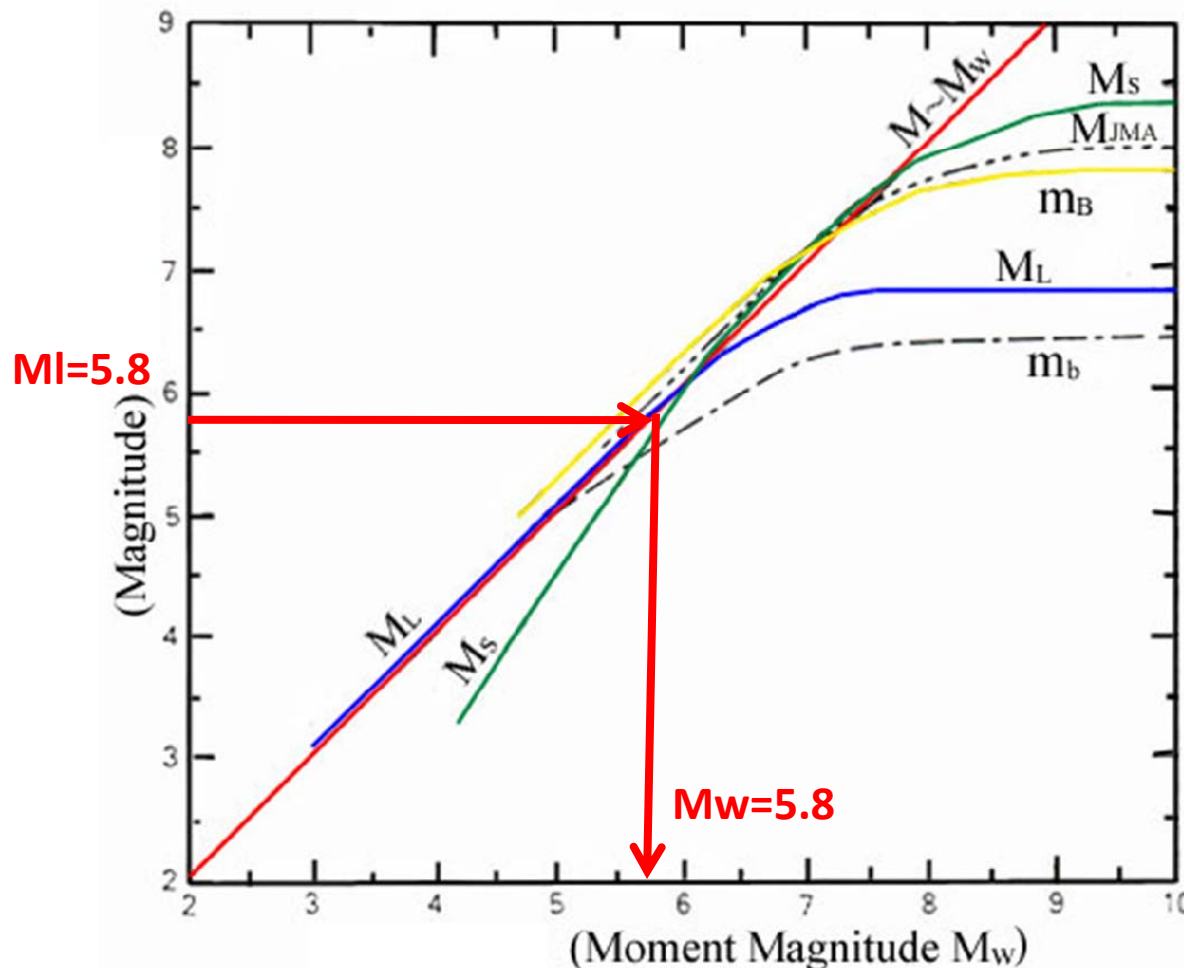
La magnitudo Richter o locale (MI) si riferisce al concetto per cui si può stimare la grandezza di un terremoto direttamente dall'ampiezza di un sismogramma registrato da un sismografo standard chiamato Wood-Anderson. Richter calibrò quindi una relazione che per ogni aumento di ampiezza di 10 volte delle onde sismiche di frequenza pari a circa 1 Hz, equivaleva un aumento di un grado di magnitudo.

La magnitudo Richter quindi è una misura della grandezza relativa tra terremoti e non una stima della reale grandezza dei terremoti.

Negli anni '70 Kanamori introdusse la magnitudo momento (Mw) derivata dal parametro sismologico momento sismico che equivale al prodotto tra area di faglia, dislocazione e la resistenza delle rocce. Il momento sismico e la magnitudo momento rappresentano quindi la migliore stima della reale grandezza del terremoto.

Terremoto di L'Aquila 06/04/09 1.32 UTC

Ma di che magnitudo è stato questo terremoto?

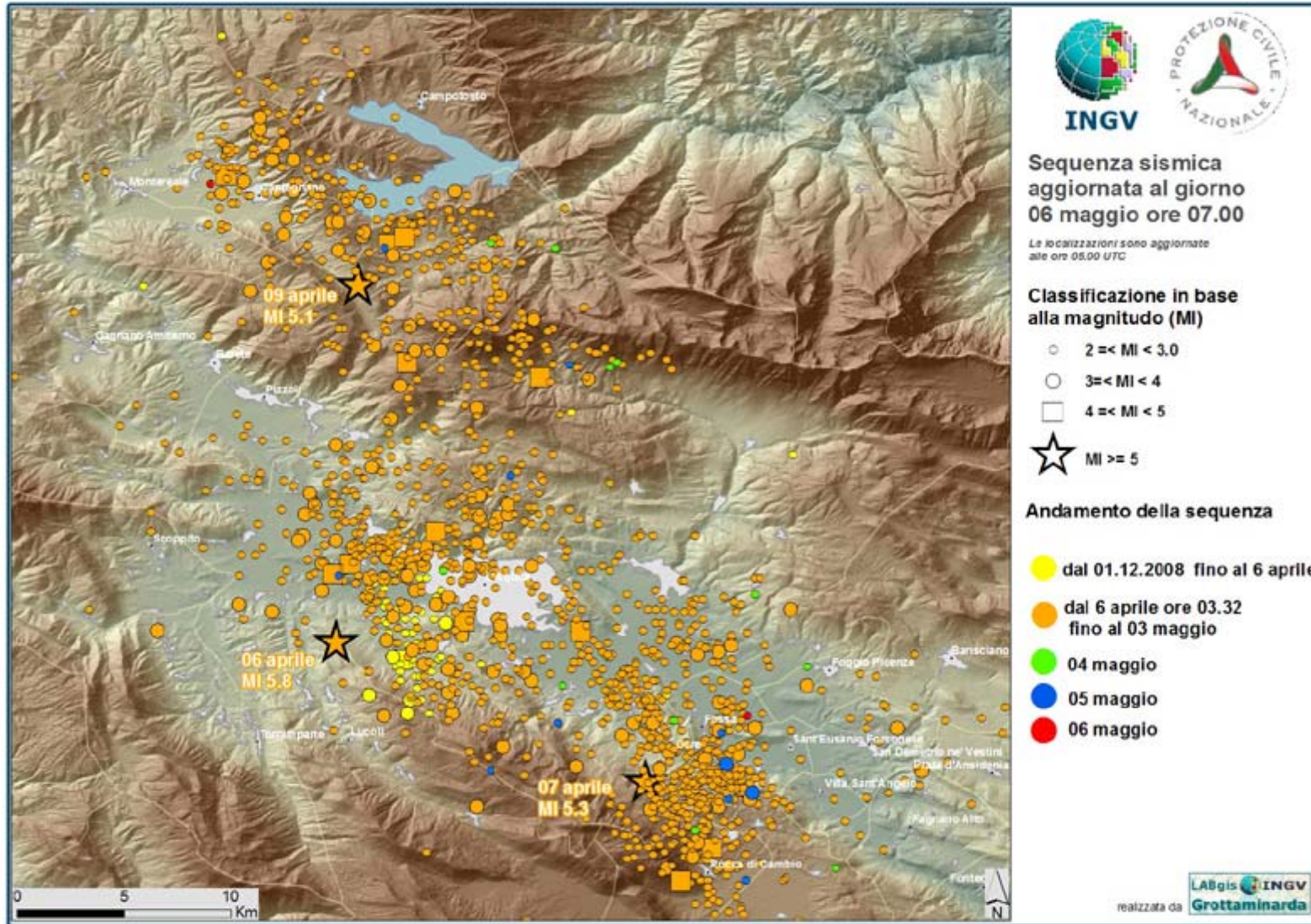


L'intervallo di magnitudo considerato sembrerebbe far pensare ad una minore discrepanza tra le due stime, ma non è così.

La sequenza sismica del terremoto de L'Aquila (prima dell'evento del 6 aprile, dati AMRA)

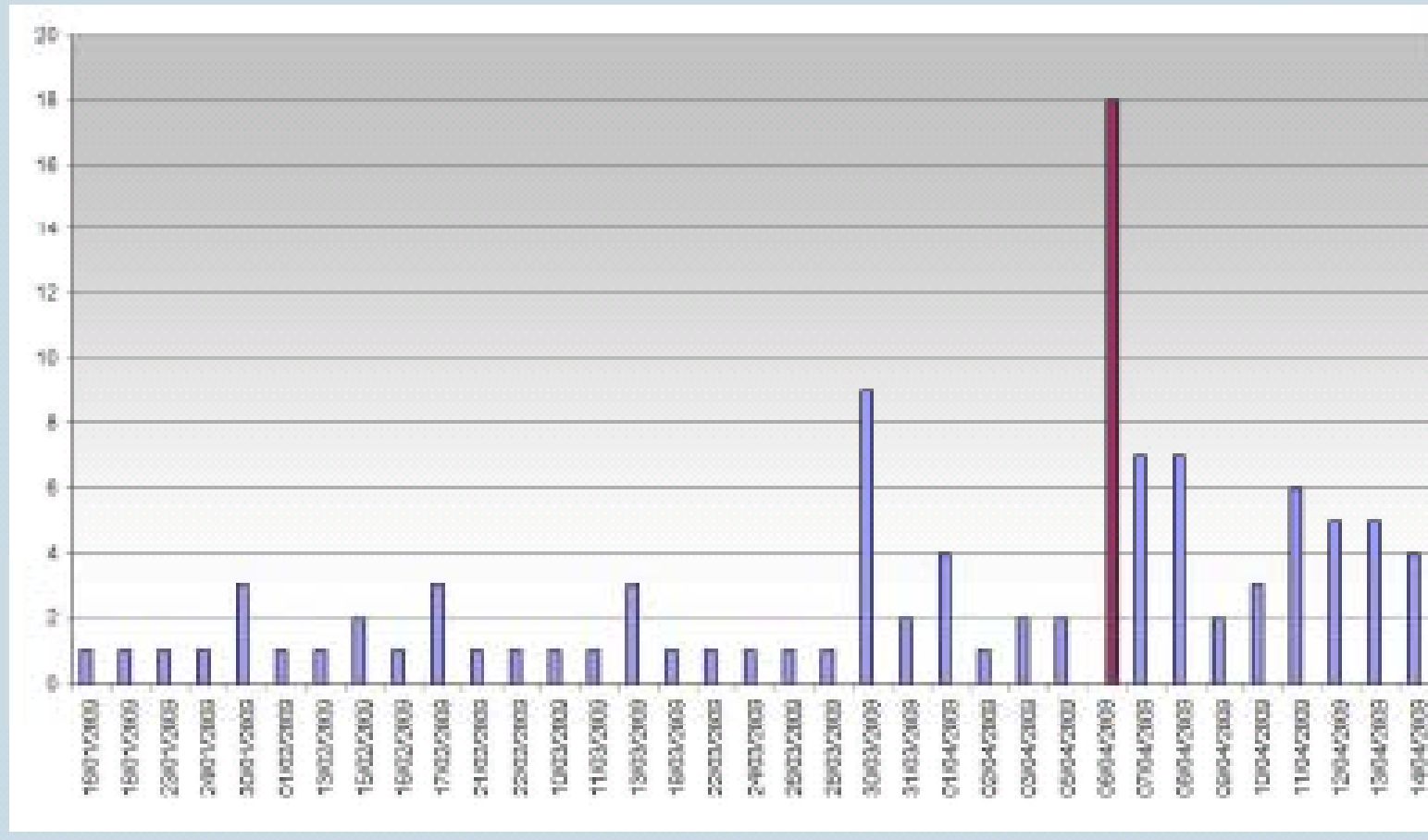


La sequenza sismica del terremoto de L'Aquila



La sequenza sismica del terremoto de L'Aquila

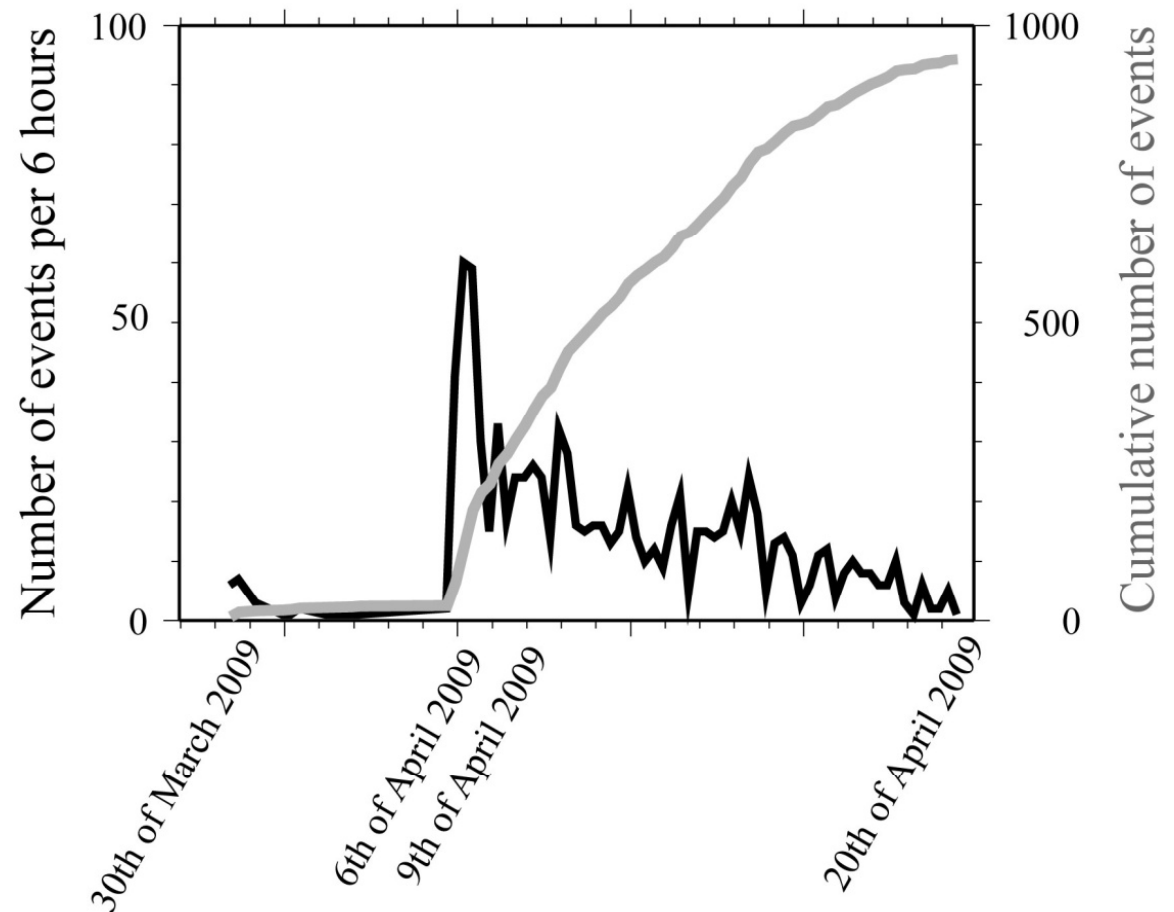
**NUMERO DI TERREMOTI PER GIORNO M>2
(CATALOGO INGV)**



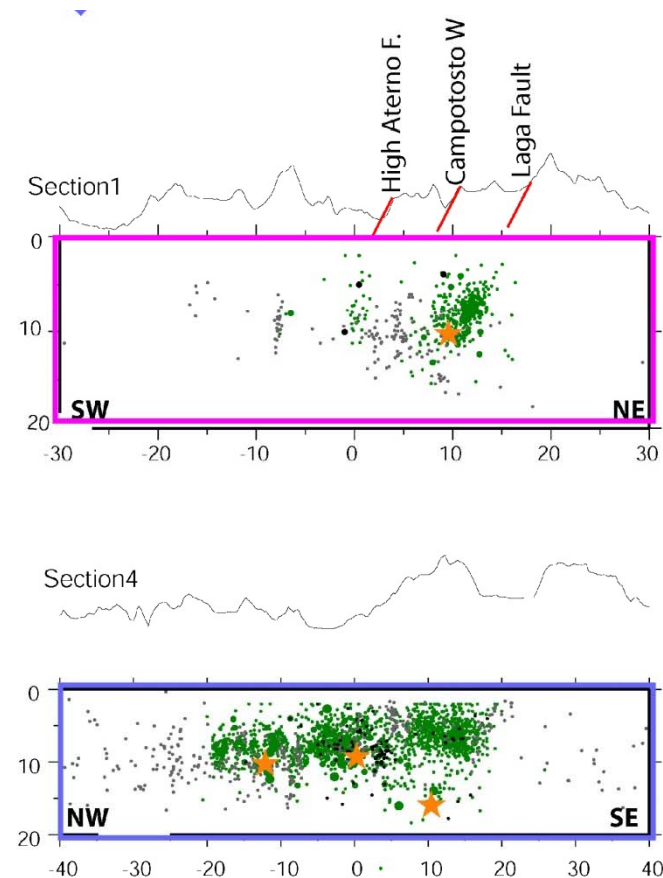
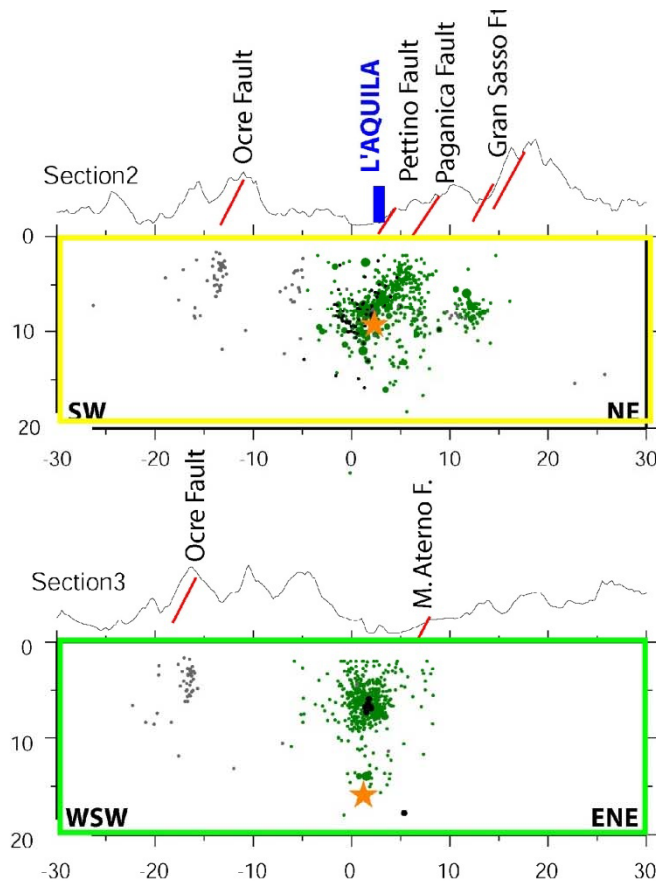
La sequenza sismica del terremoto de L'Aquila

Tre eventi di $M > 5$ sono avvenuti il 6 aprile ($M_L = 5.8$), il 7 aprile ($M_L = 5.3$) e il 9 aprile ($M_L = 5.1$). I terremoti di M_L compresa tra $M = 3.5$ e 5 sono stati in totale 31.

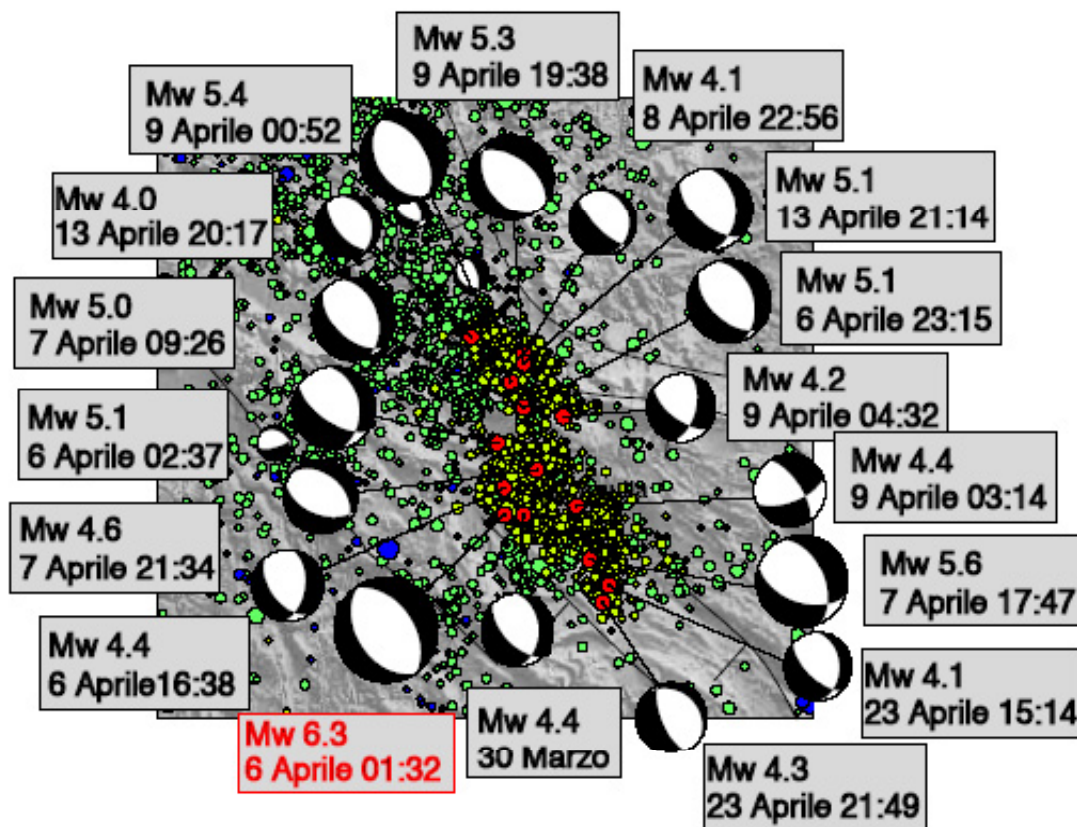
L'Aquila 2009 Seismic Sequence
(Data of the RSNC with $M_L > 2.1$)




I terremoti della sequenza sono avvenuti principalmente nella crosta superiore, entro 10-12 km di profondità.




Tutta la sequenza rispetta il meccanismo degli Appennini

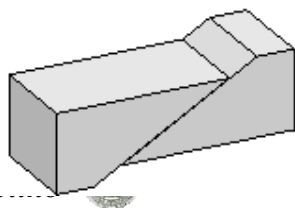


DATI della SEQUENZA ATTUALE

-  meccanismi focali dei terremoti di questi giorni con magnitudo maggiore di 4.5
- epicentri dei terremoti di questi giorni con magnitudo maggiore di 4.5
- epicentri dei terremoti di questi giorni con magnitudo minore

DATI dei TERREMOTI PRECEDENTI

-  meccanismi focali dei terremoti degli ultimi 30 anni con magnitudo maggiore di 4.5
- epicentri dei terremoti degli ultimi 20 anni con profondità inferiore a 30 km
- epicentri dei terremoti degli ultimi 20 anni con profondità superiore a 30 km



Normal

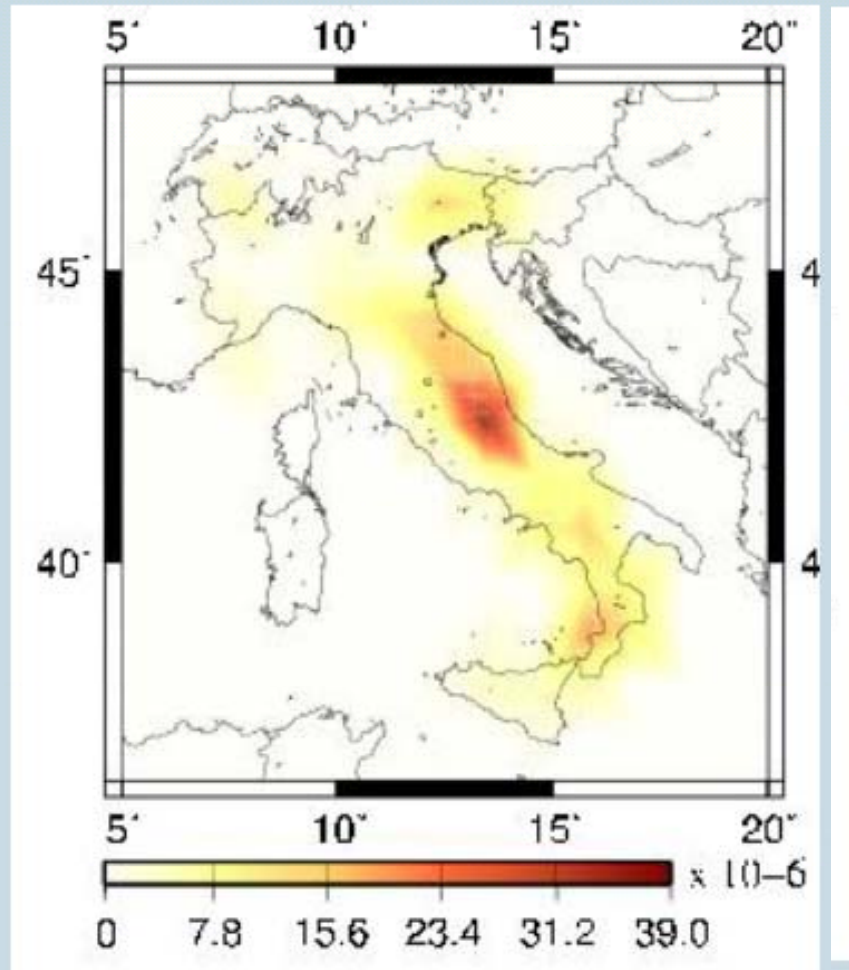


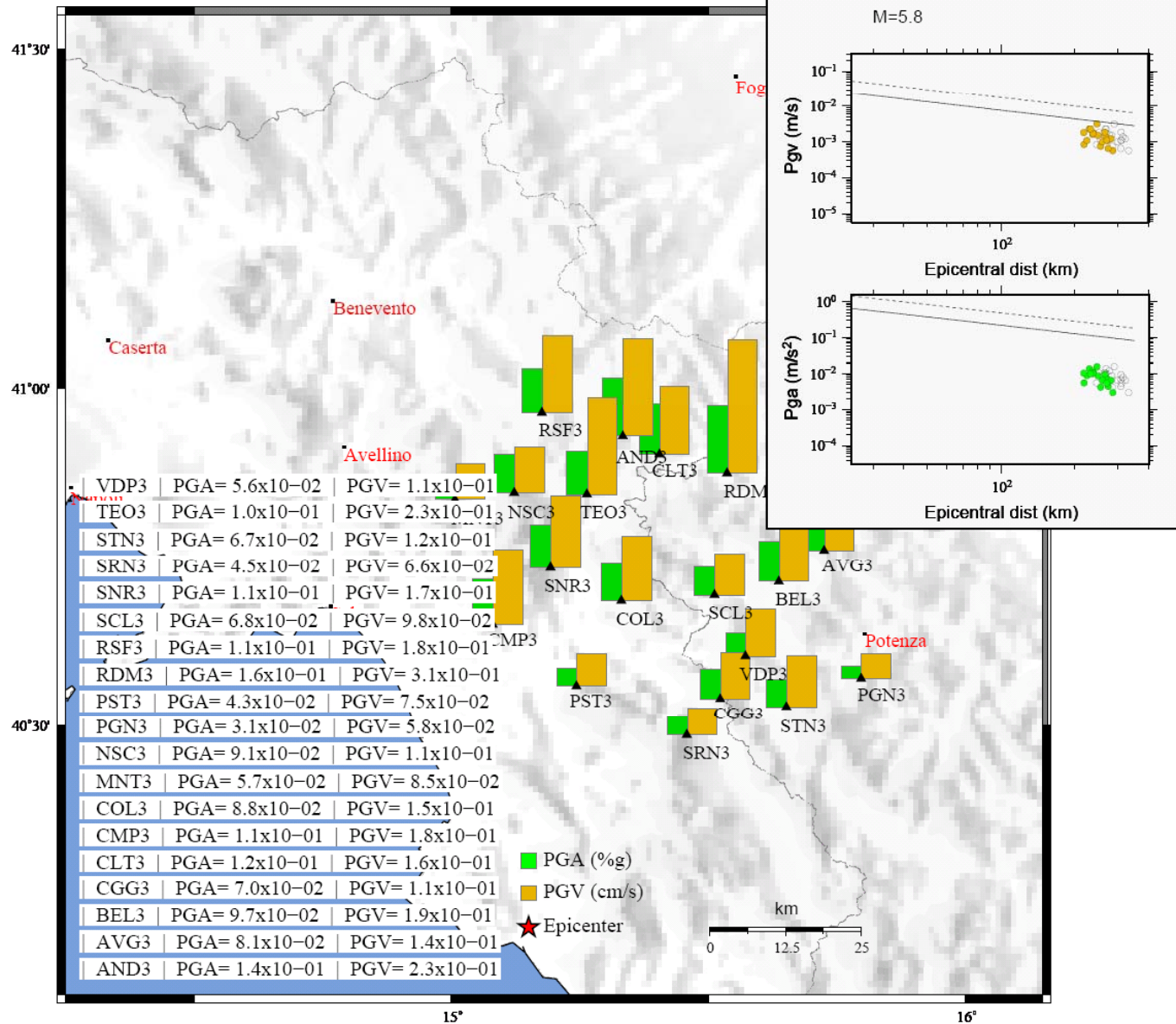
Prevedibilità e Radon (Dati P. Gasparini - Amra)

Località	Terremoto	Magnitudo	Distanza	Anticipo	Autori
Tashkent	1966	5.3	7 km	Mesi-giorni	<i>Ulomov, Mavashev (1971)</i>
Ise-Osima	14.1.1978	7.0	25 km	5 giorni	<i>Wakita et al. (1980)</i>
Giappone	5/11.1992	4.6 - 6.9	100-630 km	0-10 g.	<i>Igarashi et al. (1993)</i>
Giappone	2/4.1987	> 5.0	< 200 km	- 2 mesi	<i>Igarashi et al. (1973)</i>
Kobe	17.1.1995	7.2	100 km	0	<i>Yasuoka et al (2000)</i>
Taiwan	2000/01	>4.0	30-100 km	0.5-7 g	<i>Chyi et al. (2001)</i>
Grecia	8.6.08	6.8	?	3 mesi	<i>Nikolopoulos (2009)</i>
Mar Morto	1995/2002	0 - 4.6	?	3 giorni	<i>Steinitz et al (2002)</i>
Taiwan	2003	6.8	20 km	65 g	<i>Tom Kuo et al, (2006)</i>
Friuli	1995/2003	3.7 - 7.5	8-1600 km	ore-anni	<i>Raggio et al. (2005)</i>
Vulcano	1979	2.2	< 1 km	ore	<i>Del Pezzo et al. (1981)</i>
L'Aquila	1998-99	3.1 - 4.7	80-90 km	giorni	<i>Bella, Plastino (1999)</i>

Prevedibilità basata sui modelli di ricorrenza (Dati P.Gasparini - Amra)

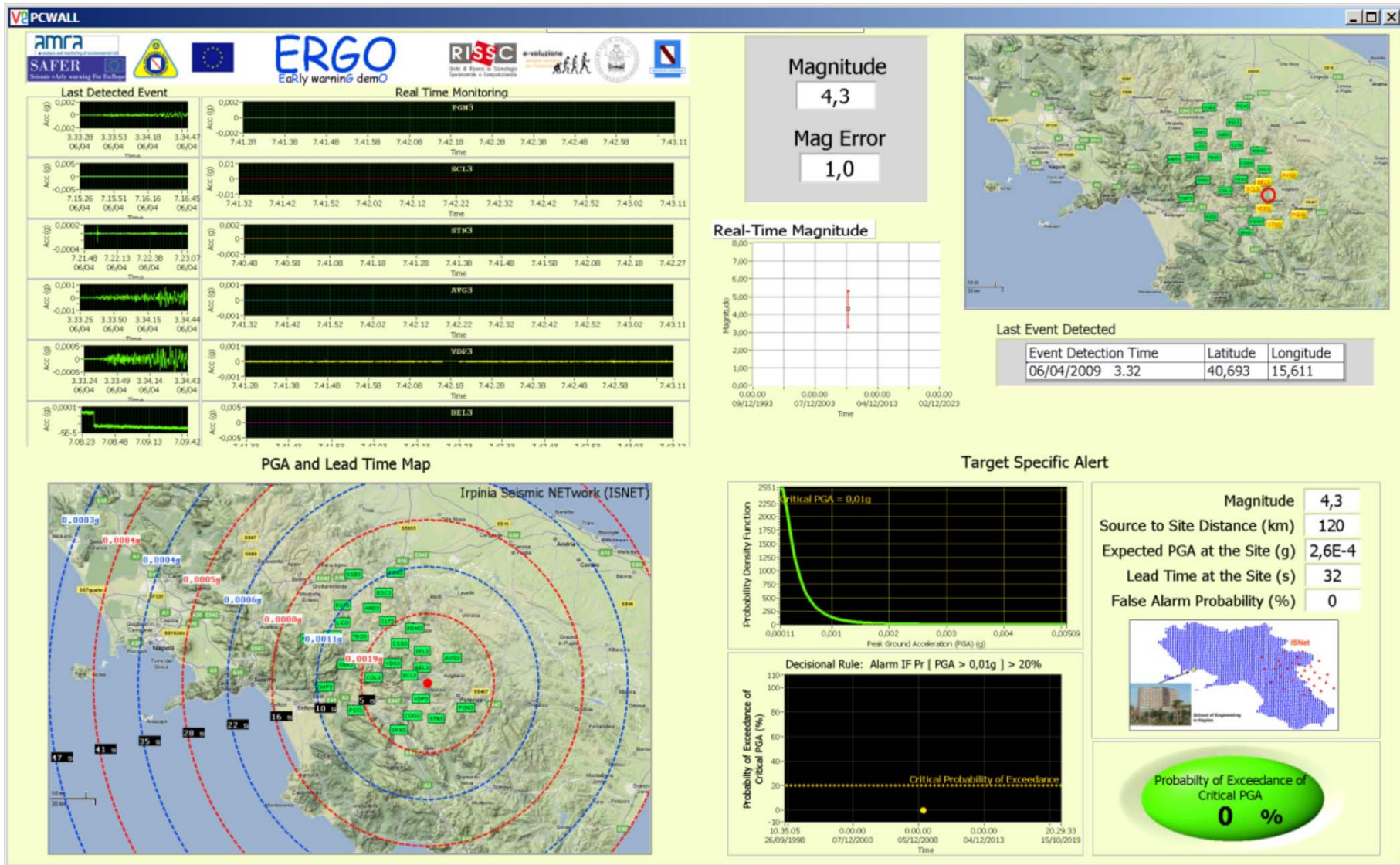
Probabilità che si verifichi un evento di $M > 5.5$ in 10 anni



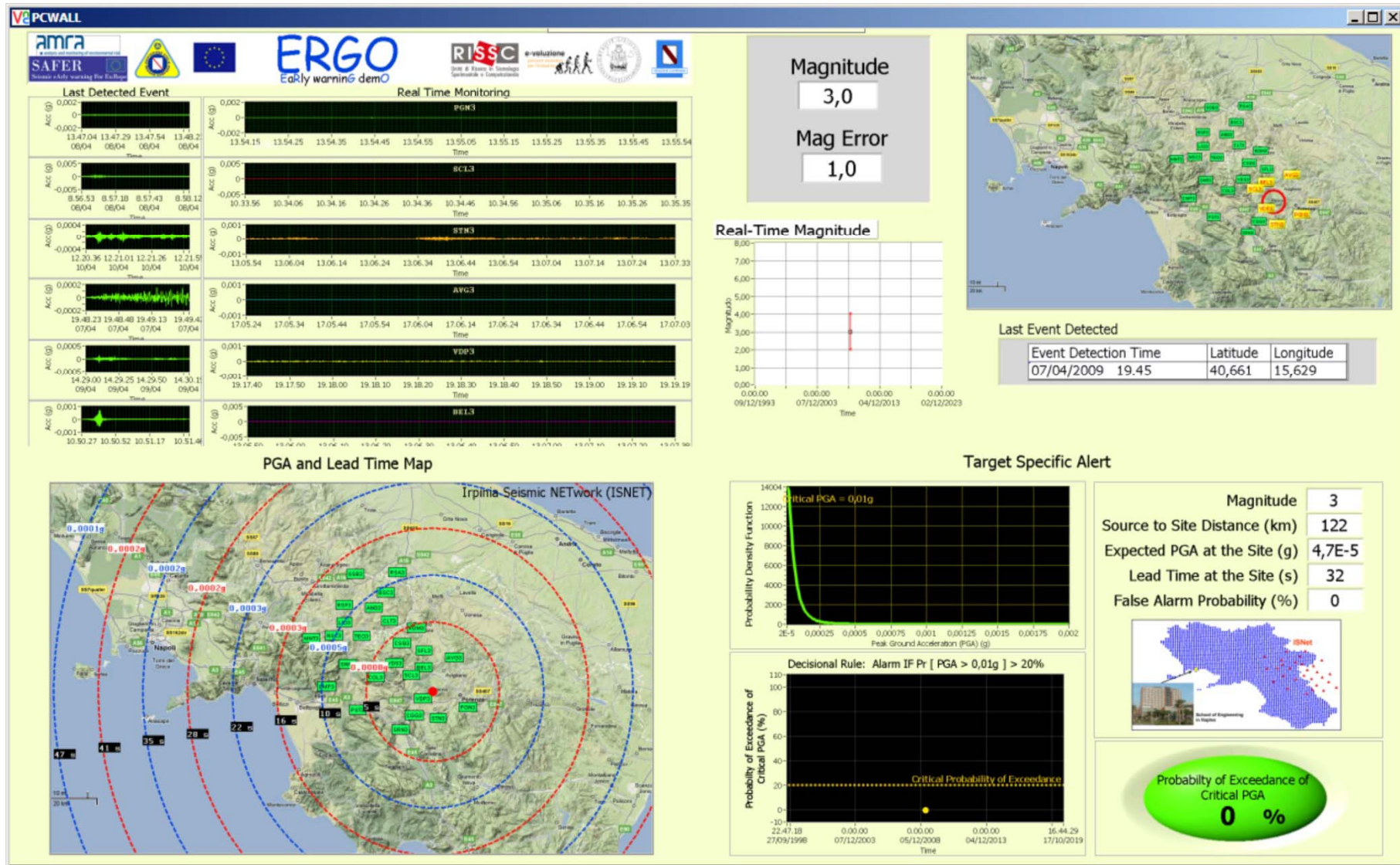


Il terremoto secondo la rete ISNet

Prevedibilità basata sull'early warning: ERGO (1)



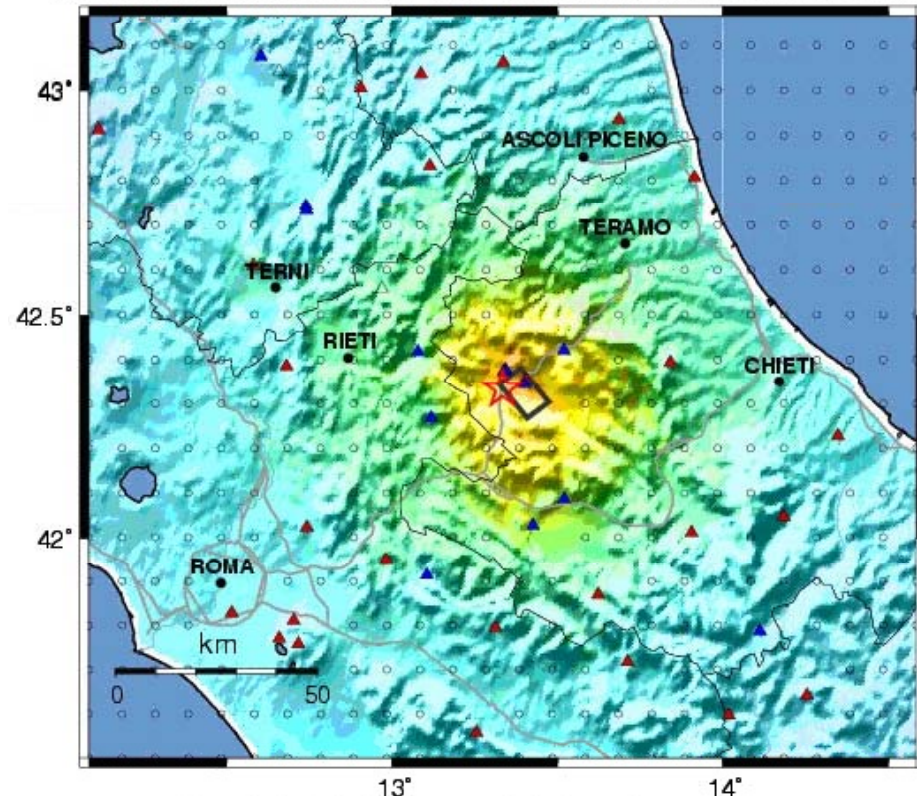
Prevedibilità basata sull'early warning: ERGO (2)



Mappe di intensità macrosismica prevista

INGV ShakeMap : CENTRAL ITALY - AQUILANO

Mon Apr 6, 2009 03:32:39 AM MDST M 5.8 N42.33 E13.33 Depth: 8.8km ID:2206496920

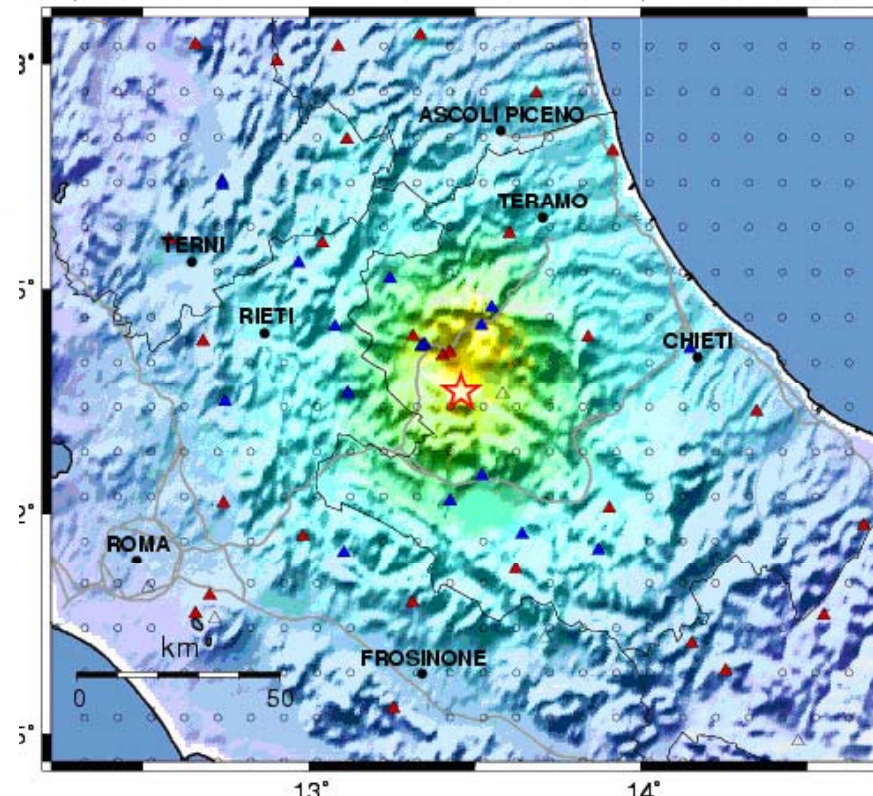


Map Version 20 Processed Sat Apr 11, 2009 12:18:36 AM MDST, - NOT REVIEWED BY HUMAN

PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

INGV ShakeMap : Valle dell'Aterno

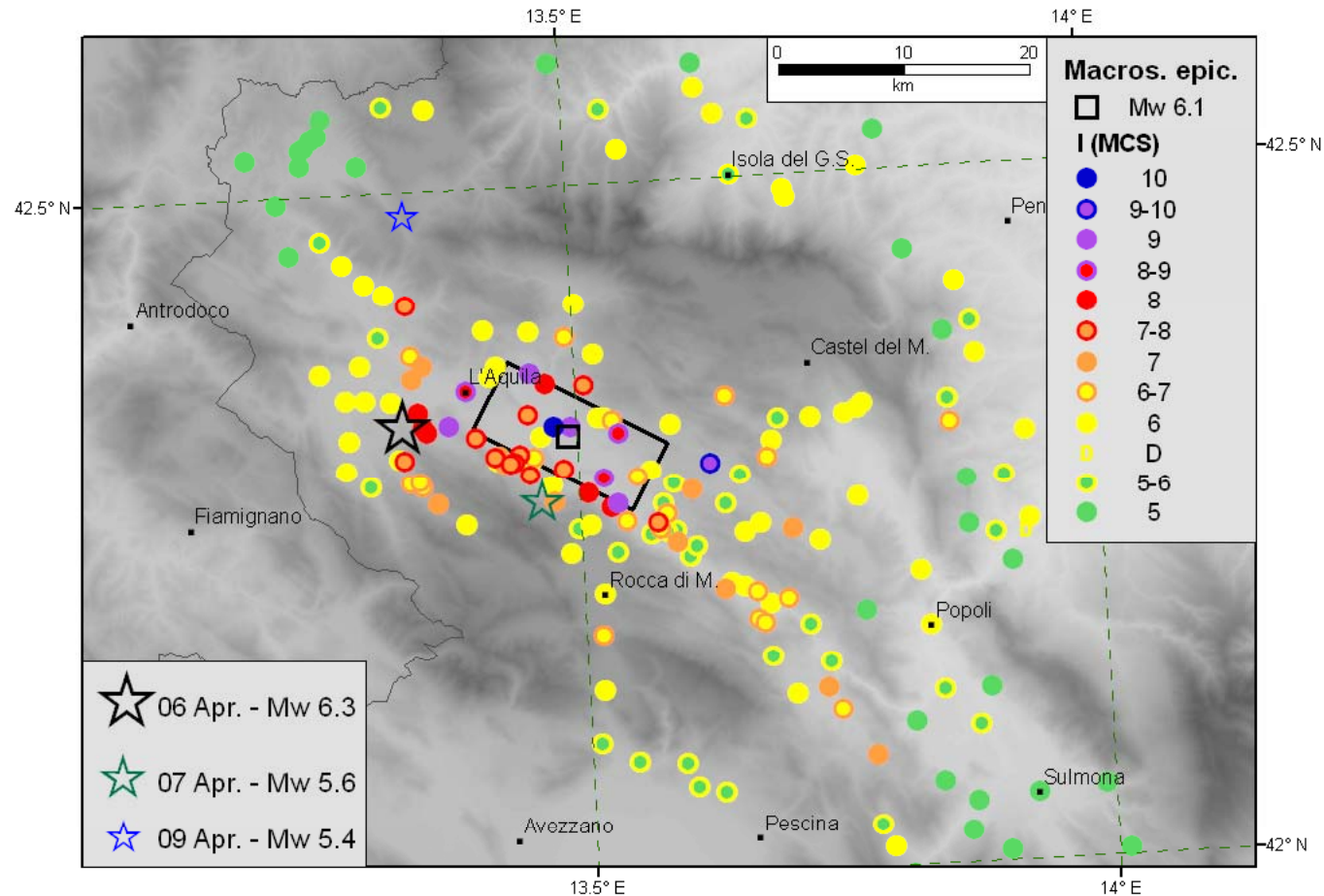
Tue Apr 7, 2009 07:47:37 PM MDST M 5.3 N42.27 E13.46 Depth: 15.1km ID:1206521070



Map Version 12 Processed Thu Apr 9, 2009 07:05:28 AM MDST, - NOT REVIEWED BY HUMAN

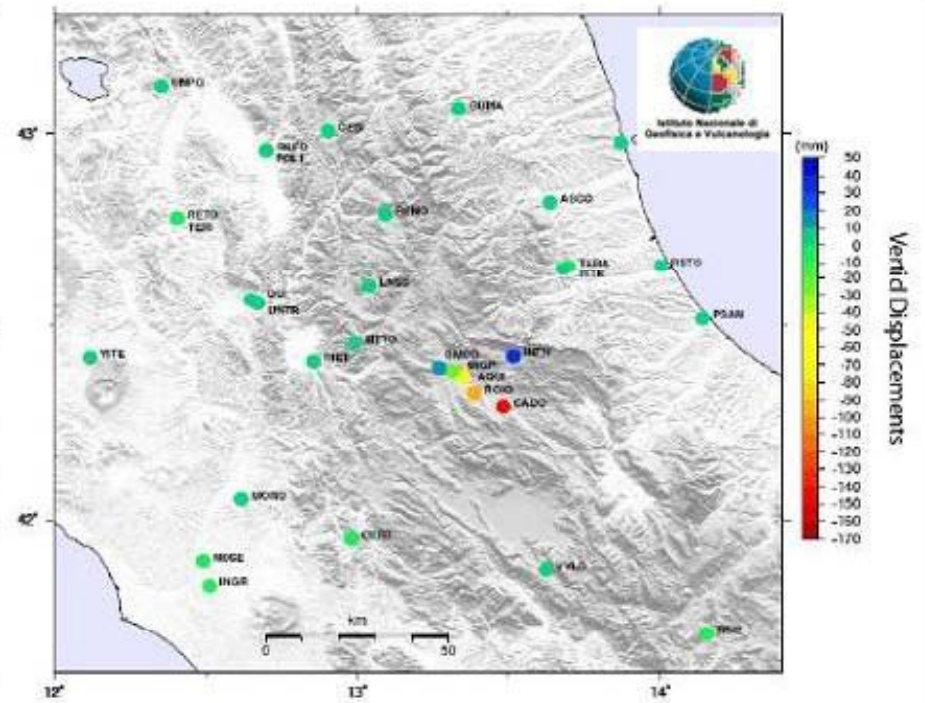
PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Mappe di intensità macrosismica osservata



Grado 10 - distruzioni e gravi danni a circa il 75% degli edifici, gran parte dei quali diroccano; distruzioni di alcuni ponti e dighe; lieve spostamento delle rotaie; condutture d'acqua spezzate; rotture e ondulazioni nel cemento e nell'asfalto; fratture di alcuni decimetri nel suolo umido, frane.

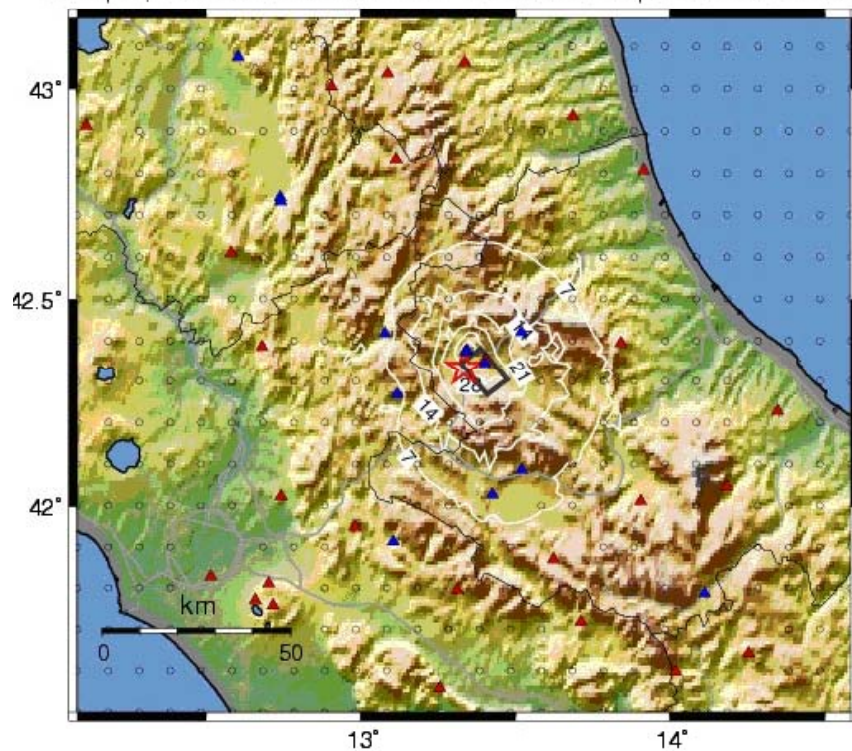
Mappe di spostamento (tra 5 e i 15 cm)



Mappe di scuotimento

INGV Peak Accel. Map (in %) : CENTRAL ITALY - AQUILANO

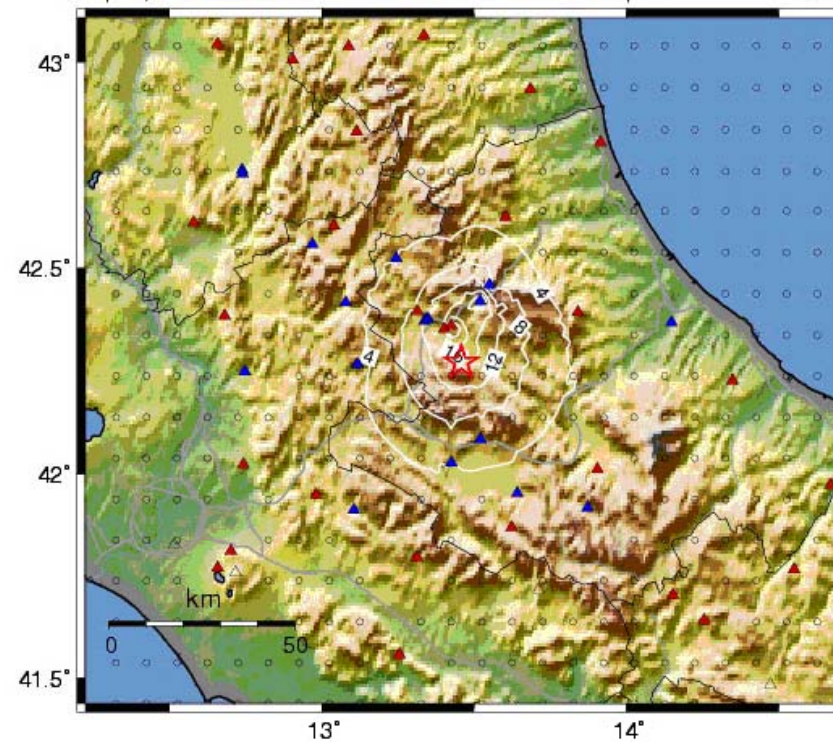
Mon Apr 6, 2009 03:32:39 AM MDST M 5.8 N42.33 E13.33 Depth: 8.8km ID:2206496920



Map Version 20 Processed Sat Apr 11, 2009 12:18:36 AM MDST, - NOT REVIEWED BY HUMAN

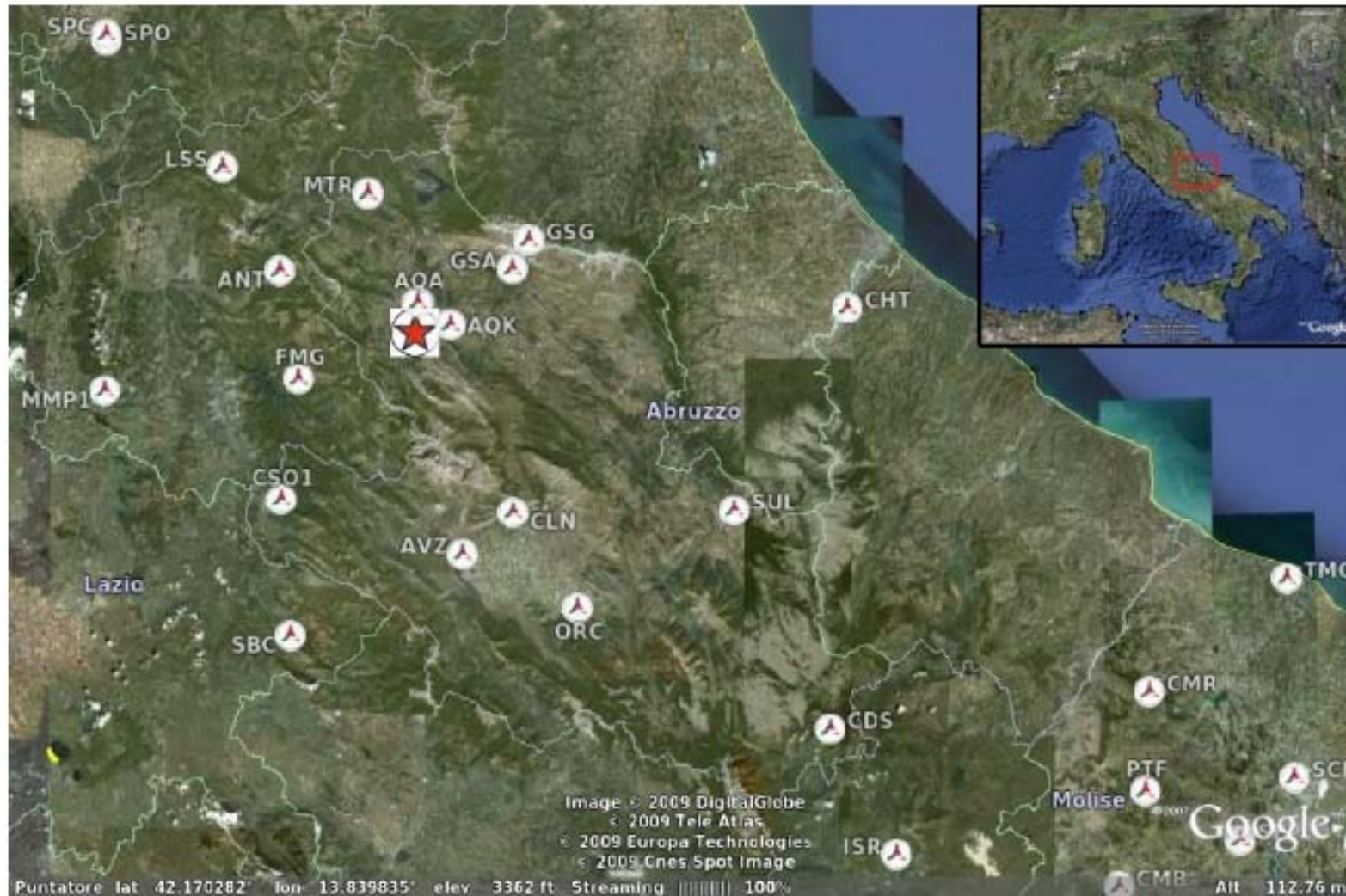
INGV Peak Accel. Map (in %) : Valle dell'Aterno

Tue Apr 7, 2009 07:47:37 PM MDST M 5.3 N42.27 E13.46 Depth: 15.1km ID:1206521070

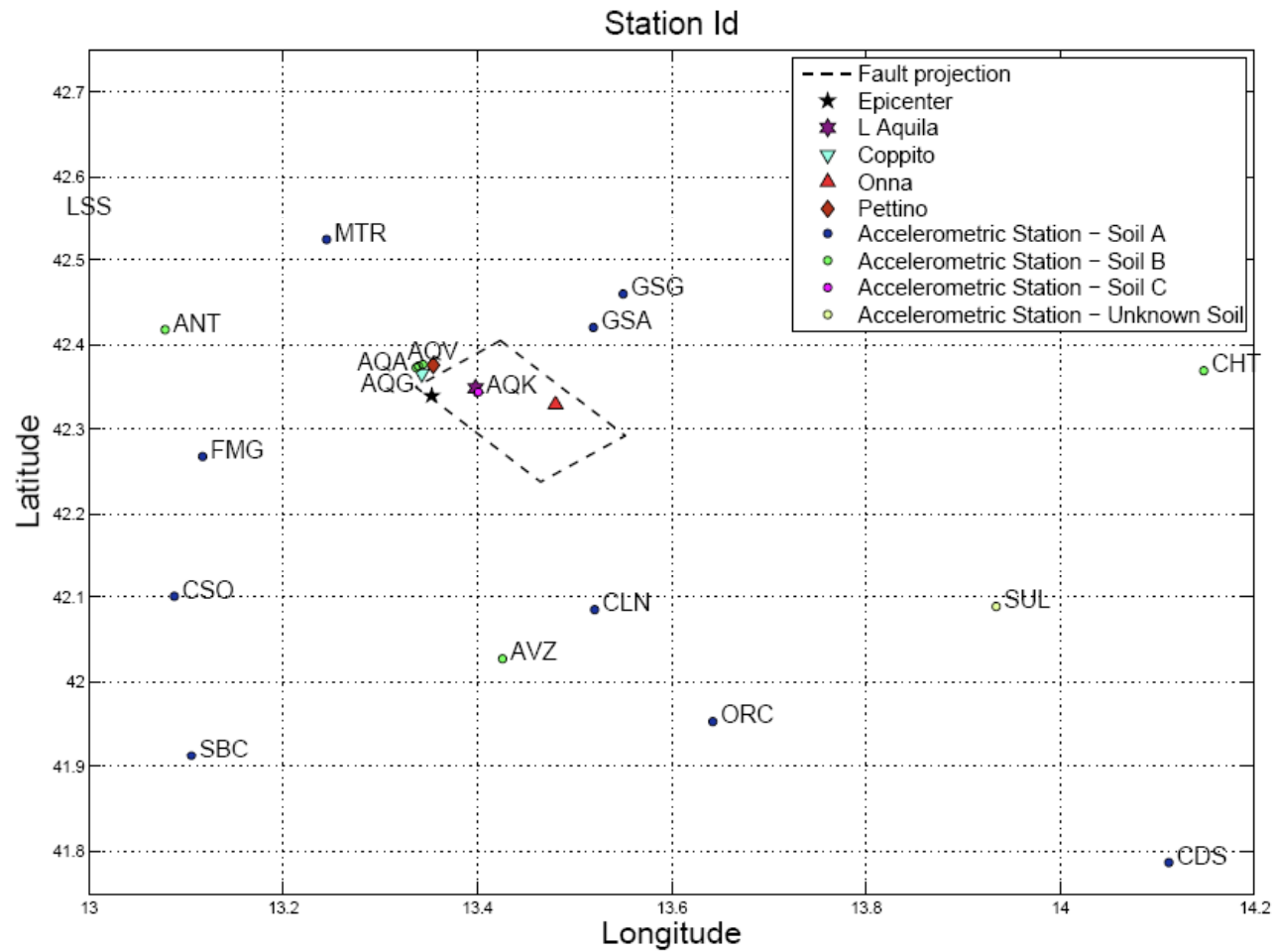


Map Version 12 Processed Thu Apr 9, 2009 07:05:28 AM MDST, - NOT REVIEWED BY HUMAN

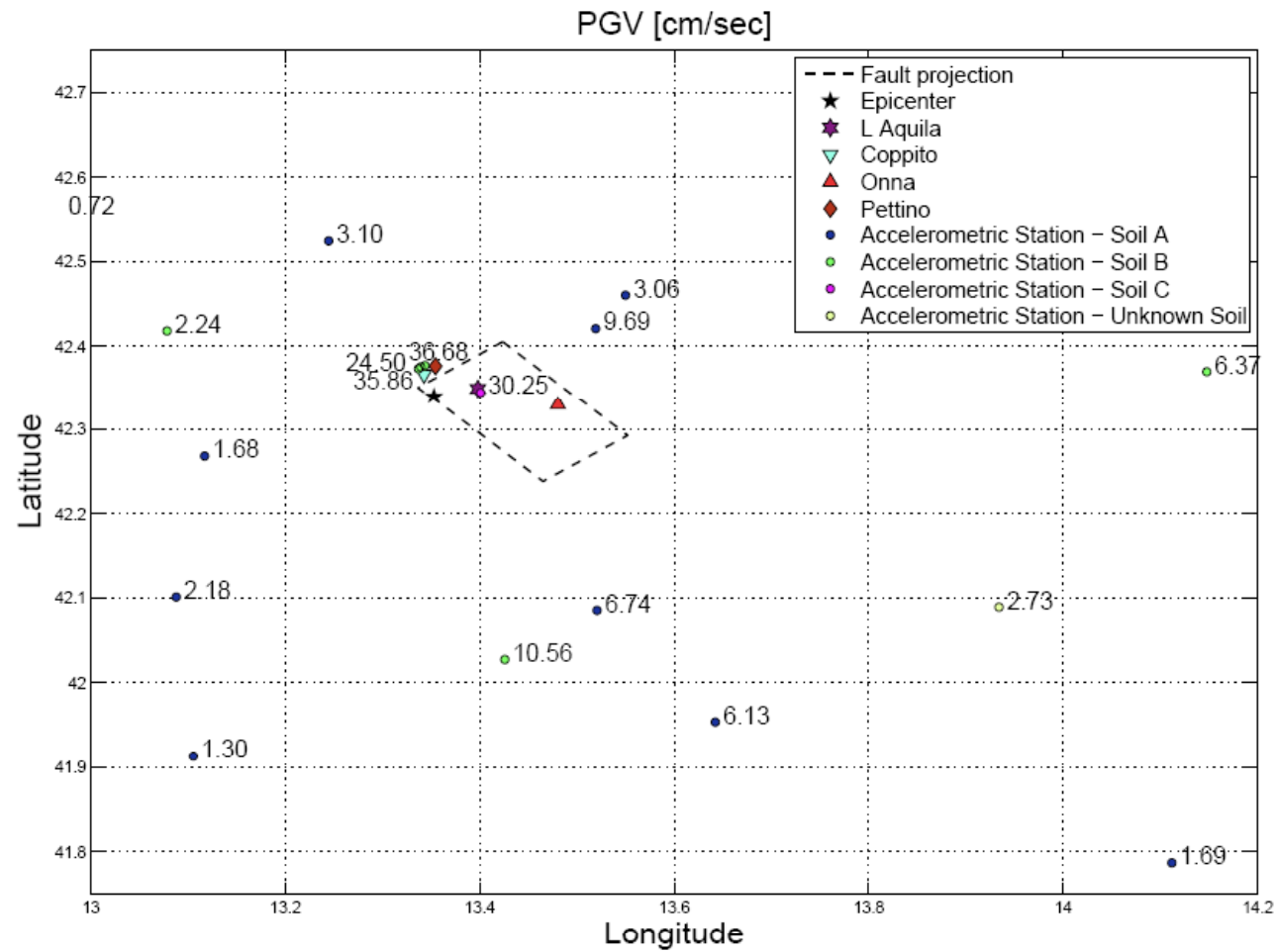
La rete accelerometrica nazionale RAN del DPC



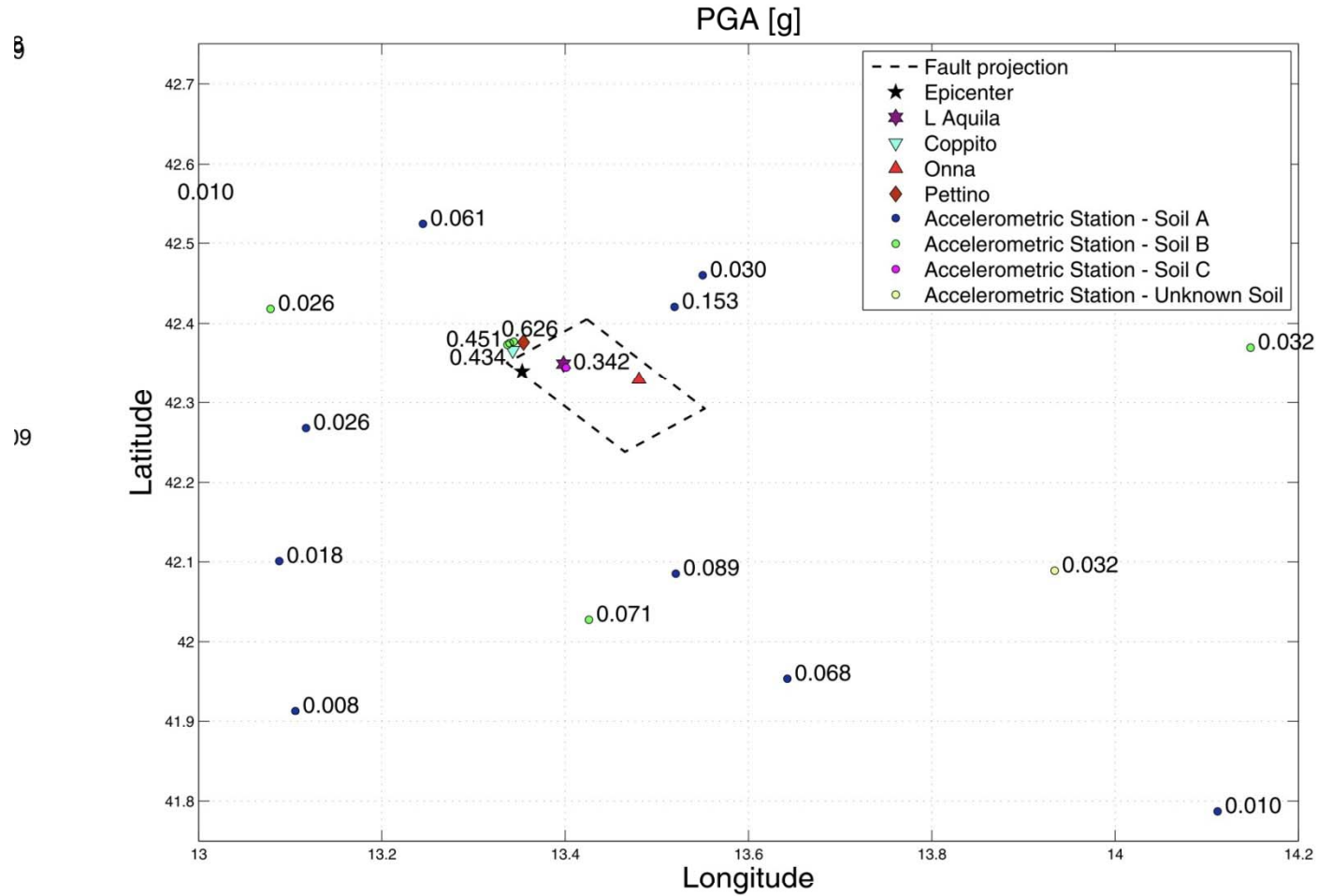
La rete accelerometrica nazionale RAN del DPC



Scuotimento osservato - PGV

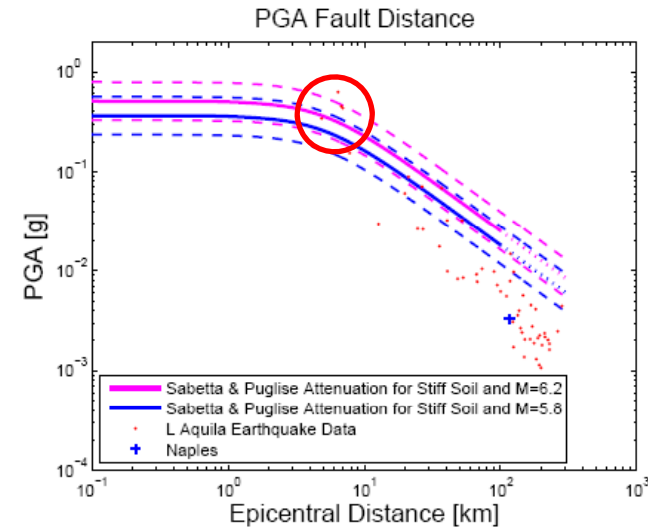
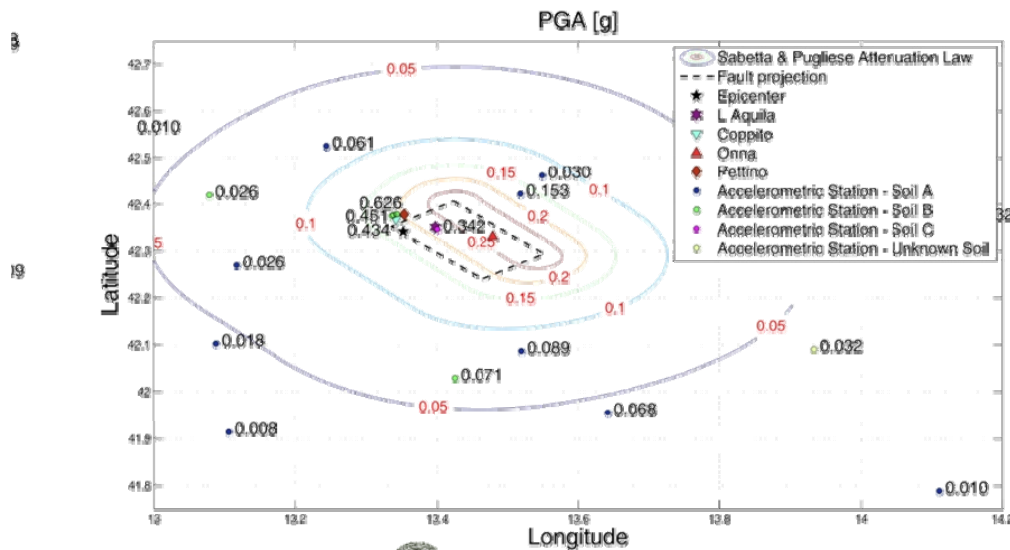
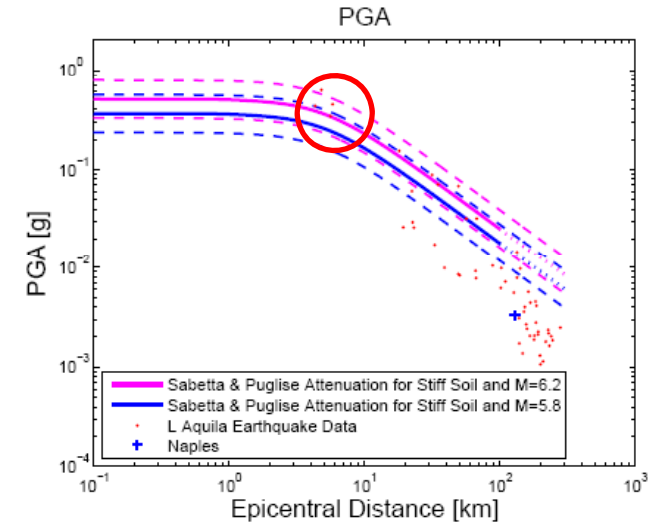
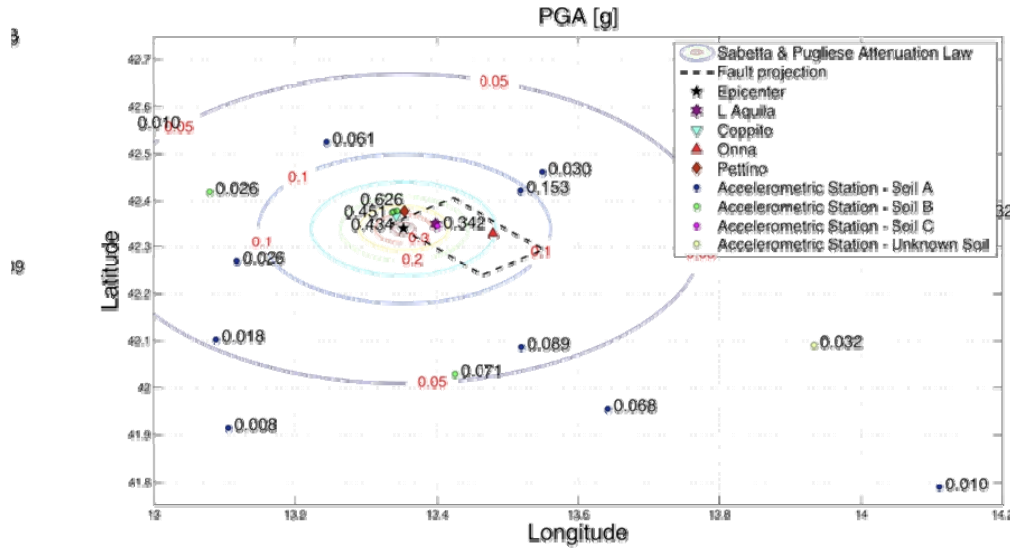


Scuotimento osservato - PGA

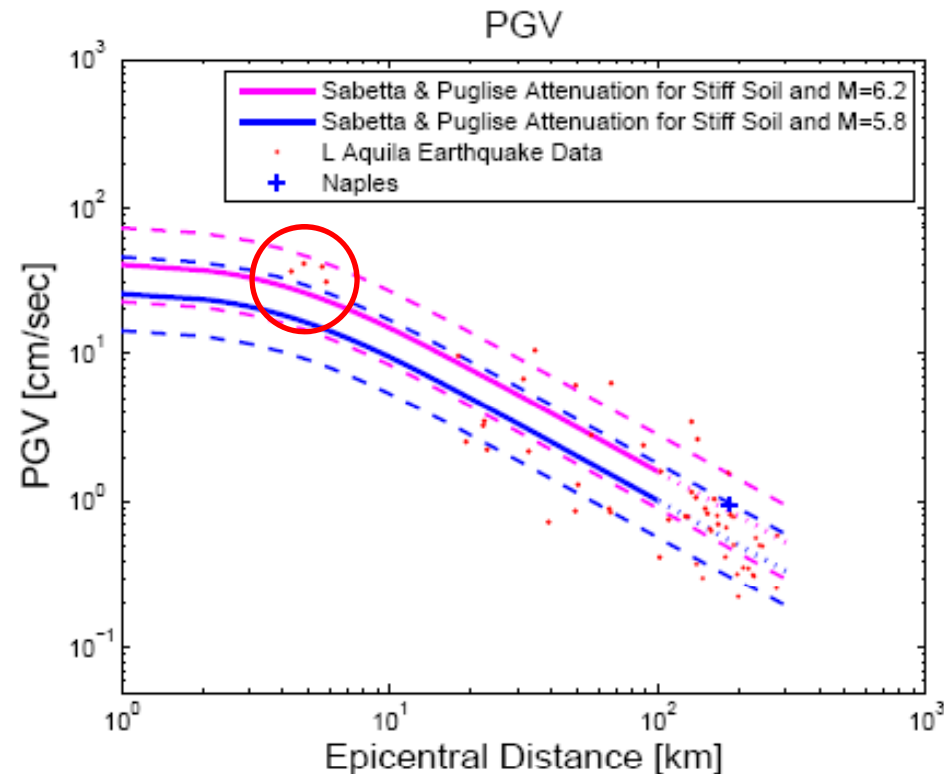


0 007

Confronto con le leggi di attenuazione (Sabetta e Pugliese, 1996)

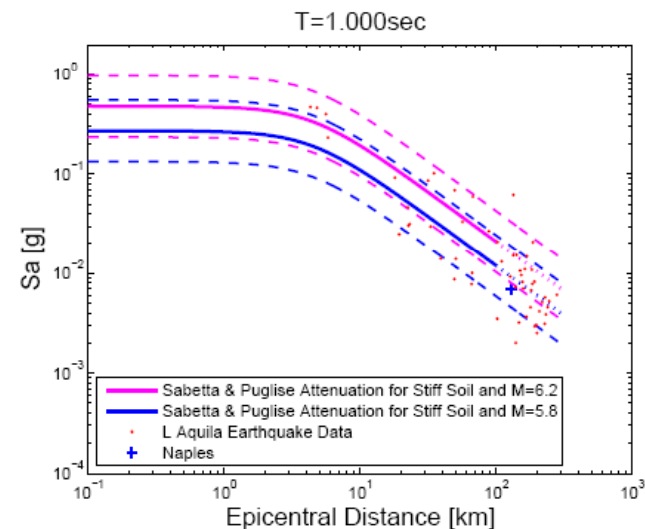
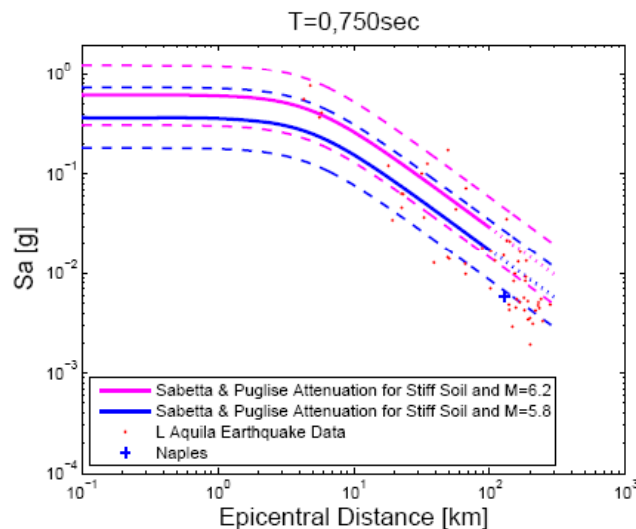
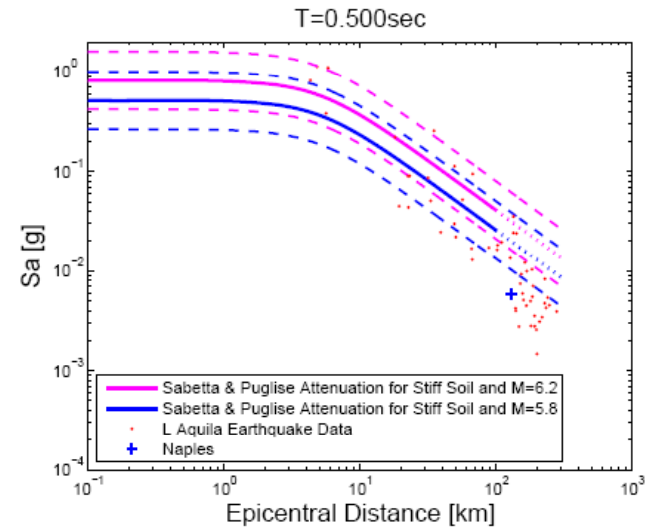
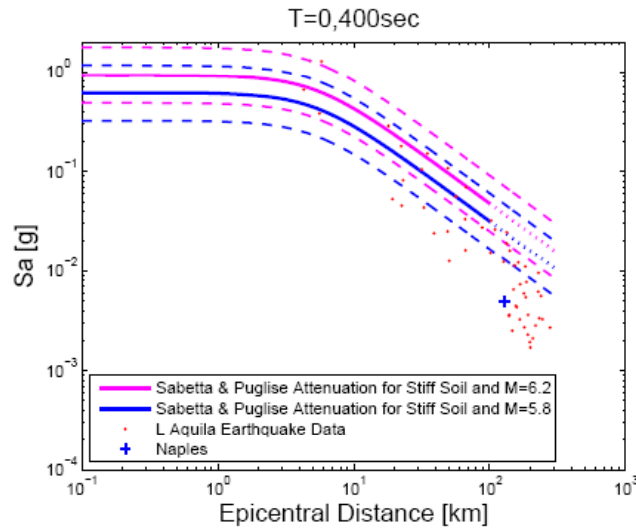


Confronto con le leggi di attenuazione (Sabetta e Pugliese, 1996)

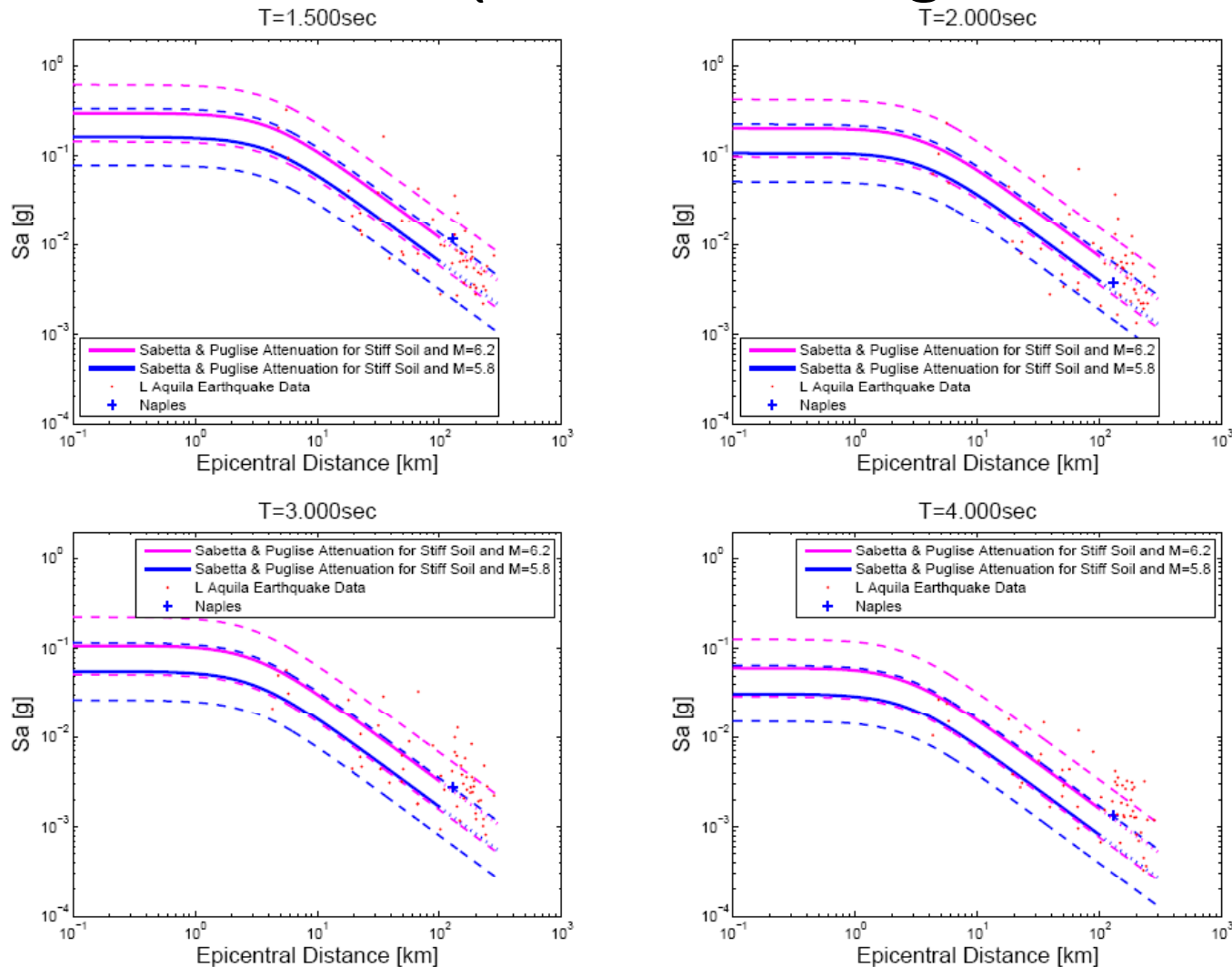


L'accelerazione orizzontale e la PGV in campo vicino sono sopra la media ma comunque entro una deviazione standard

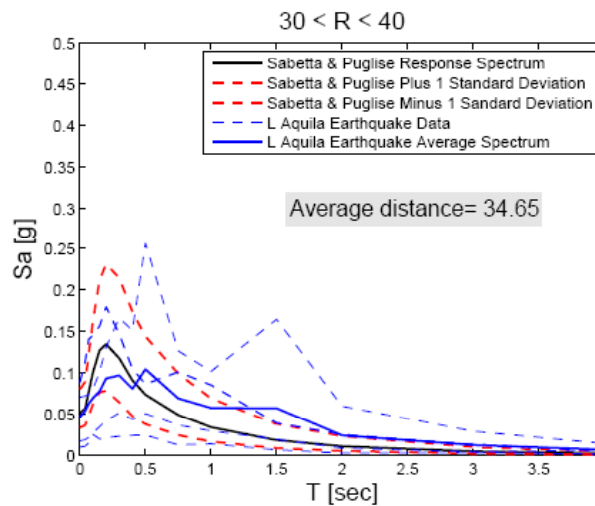
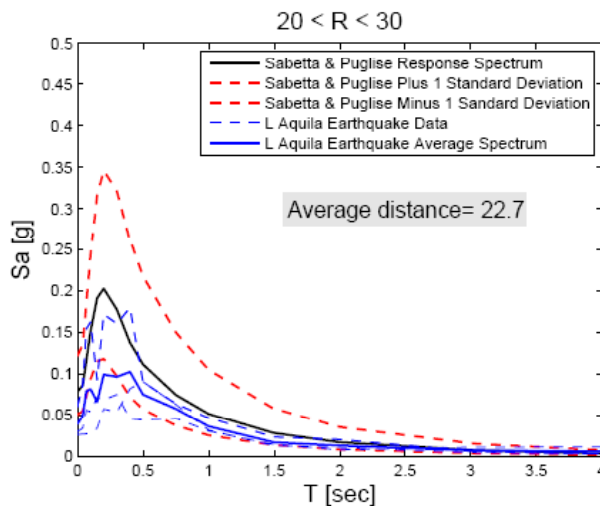
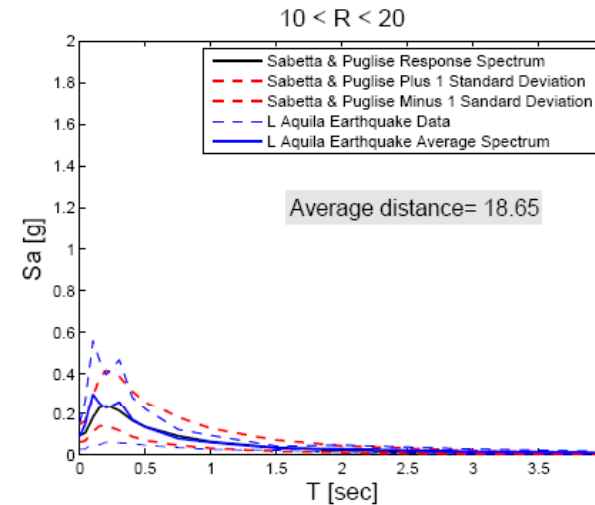
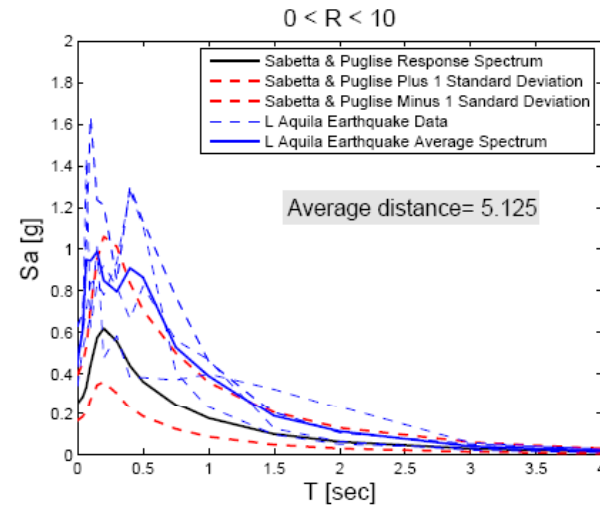
Confronto con le leggi di attenuazione (Sabetta e Pugliese, 1996)



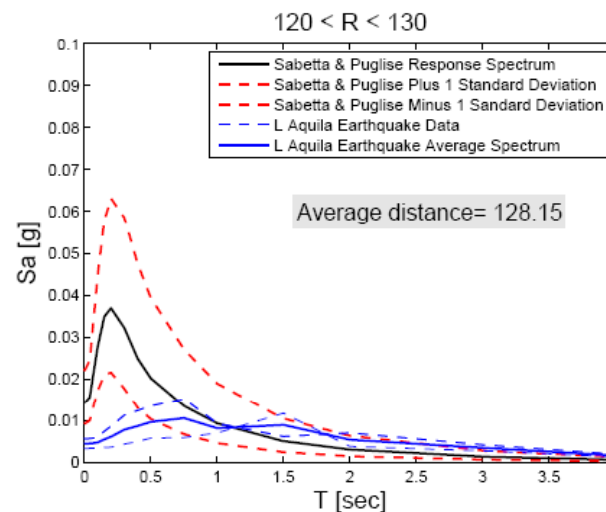
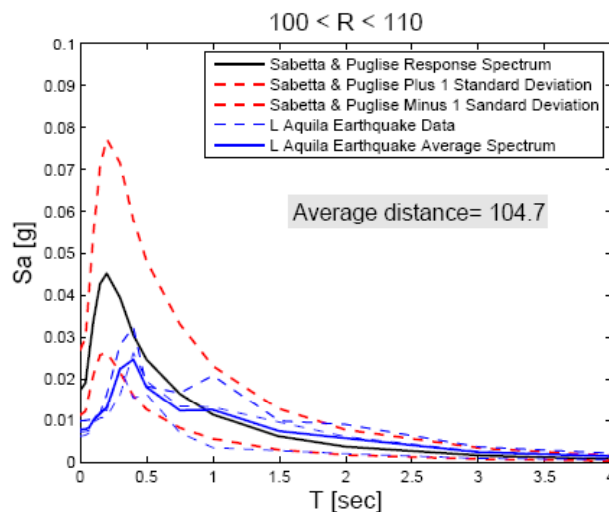
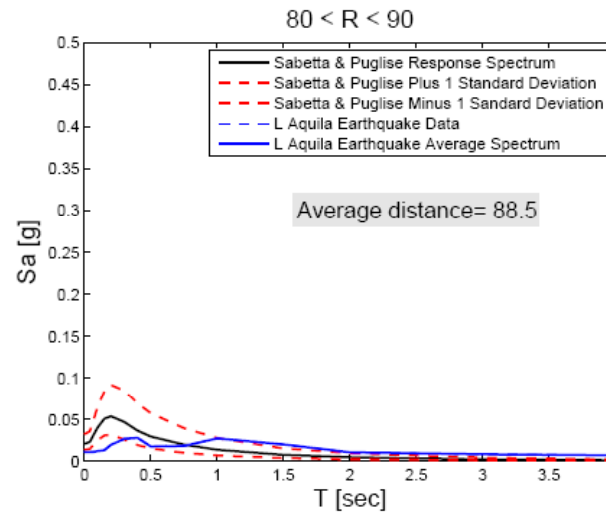
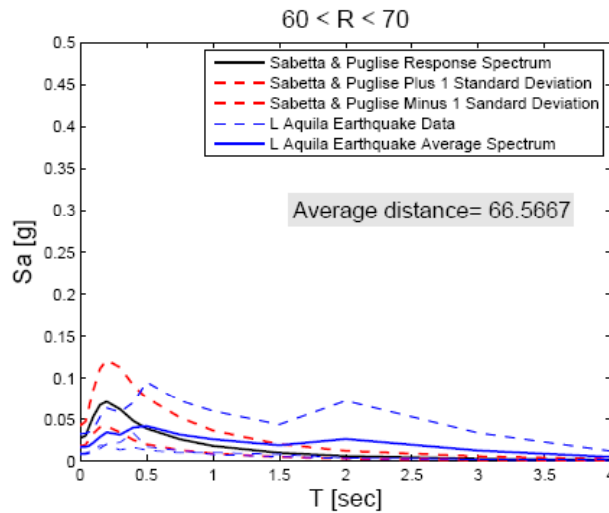
Orizzontale - Confronto con le leggi di attenuazione (Sabetta e Pugliese, 1996)



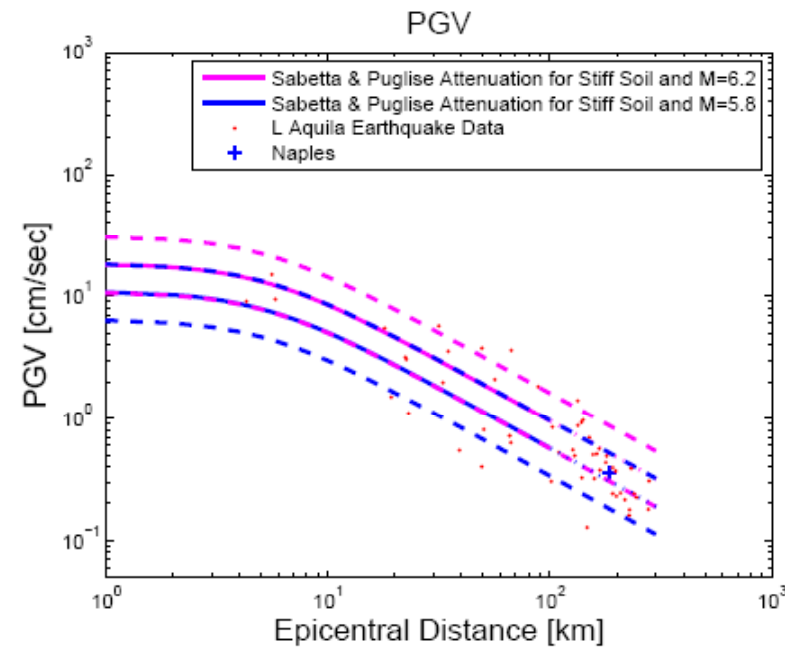
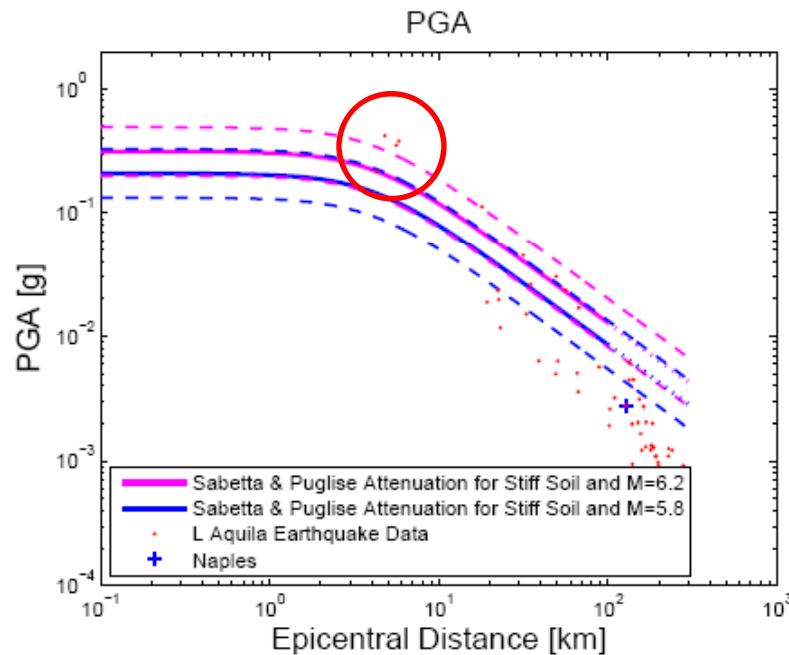
Orizzontale - Spettri in accelerazione raggruppati per distanza



Orizzontale - Spettri in accelerazione raggruppati per distanza

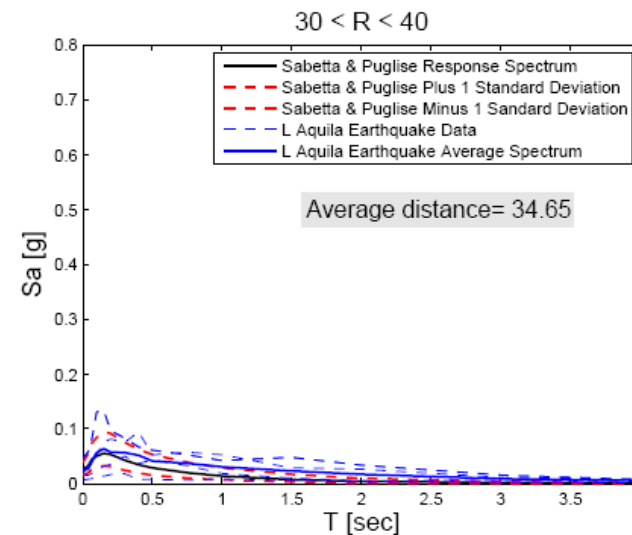
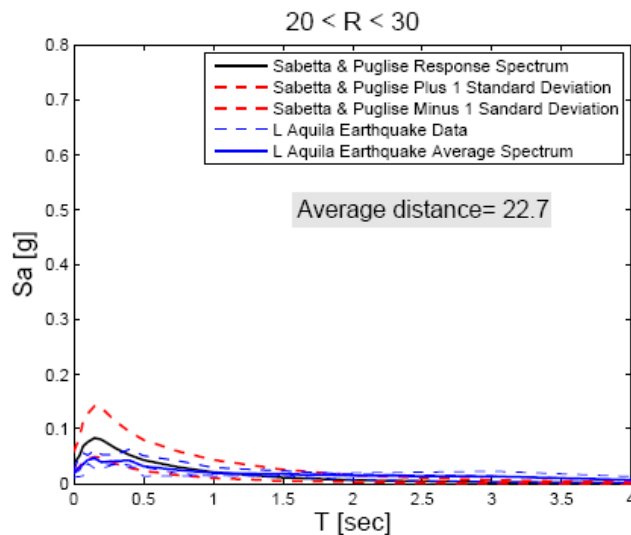
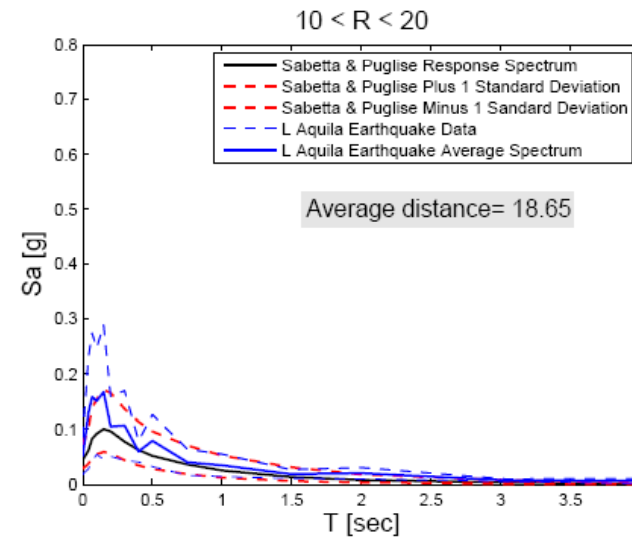
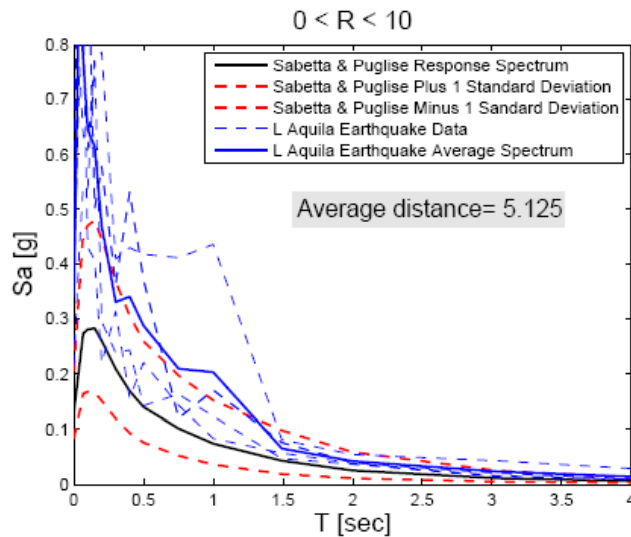


Verticale - Confronto con le leggi di attenuazione (Sabetta e Pugliese, 1996)

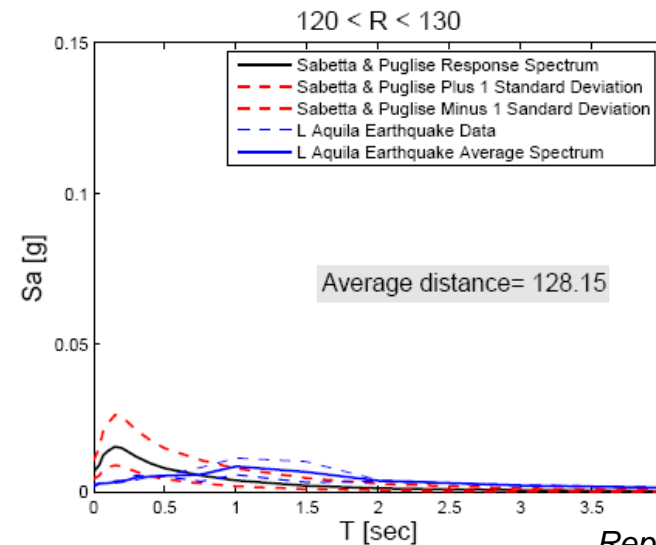
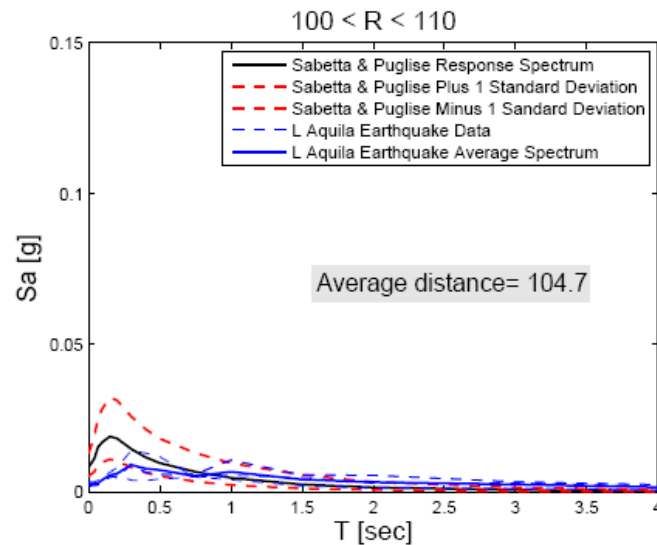
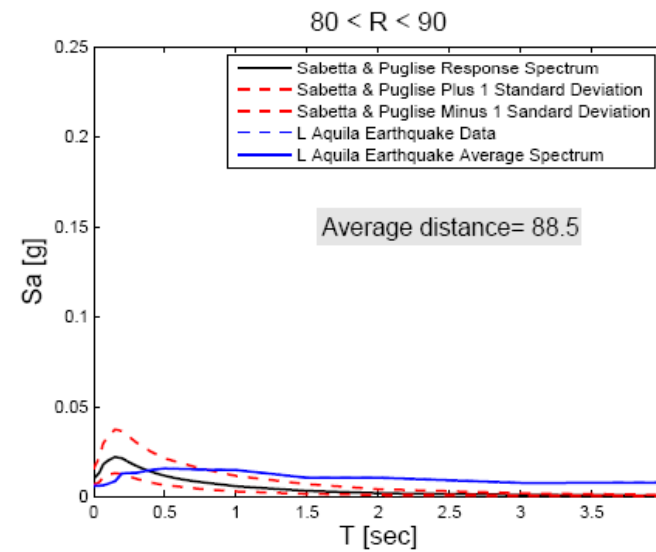
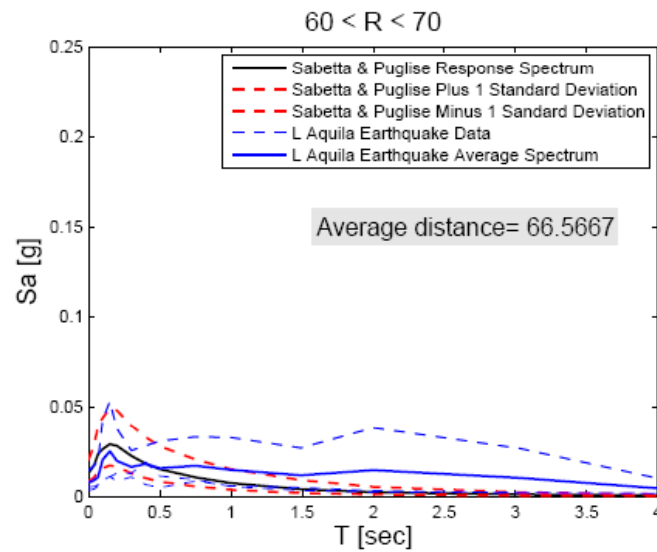


L'accelerazione verticale è più anomala di quella orizzontale

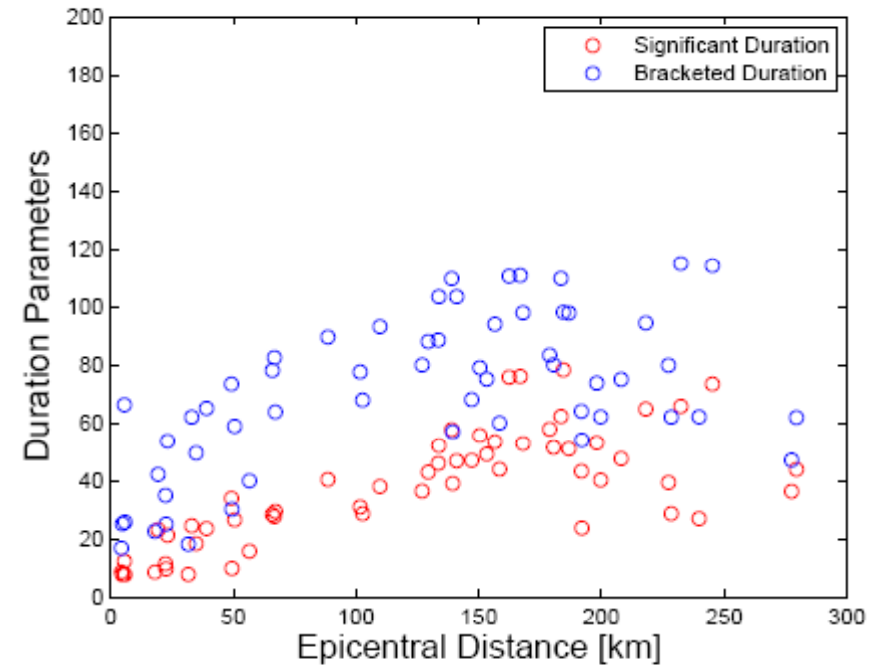
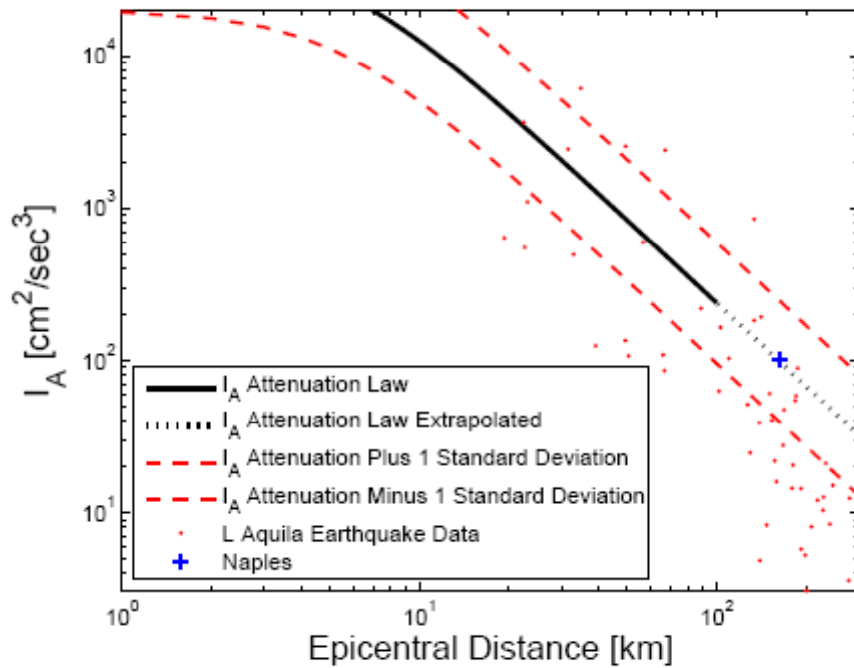
Verticale - Spettri in accelerazione raggruppati per distanza



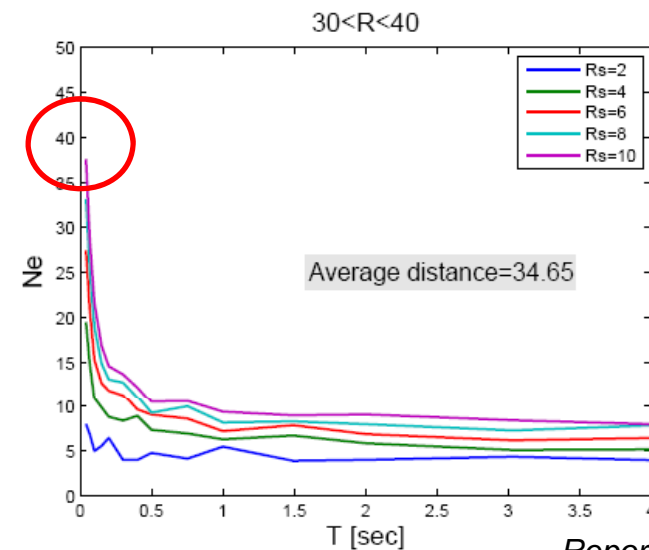
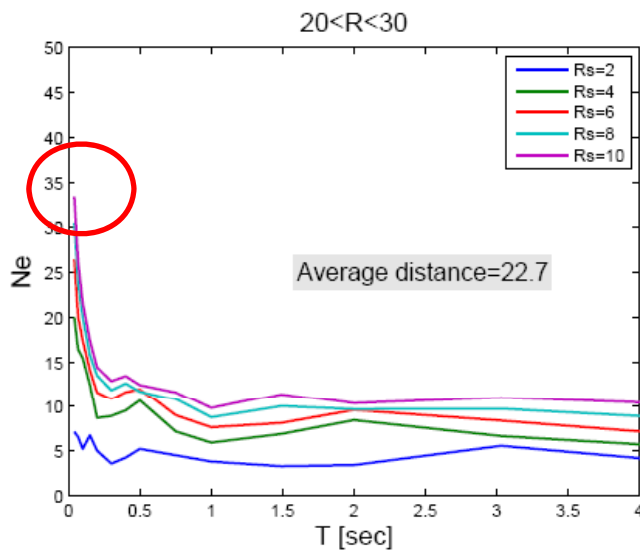
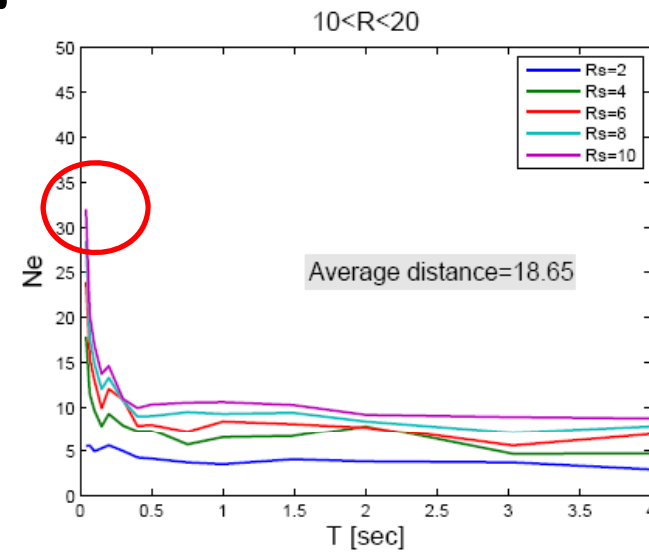
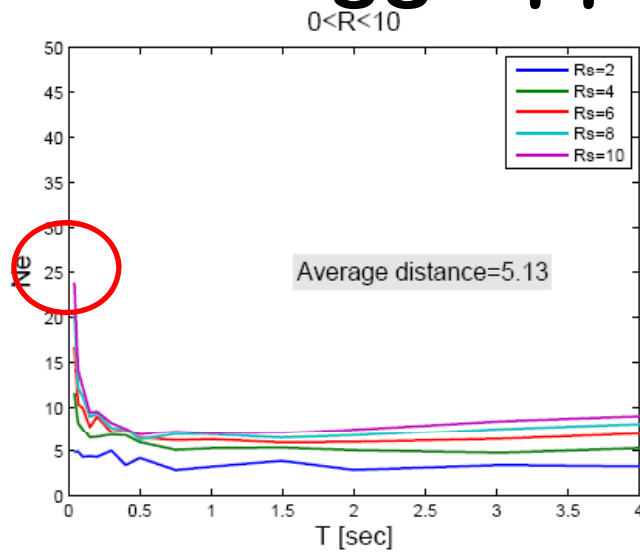
Verticale - Spettri in accelerazione raggruppati per distanza



Orizzontale – Intensità di Arias e durata



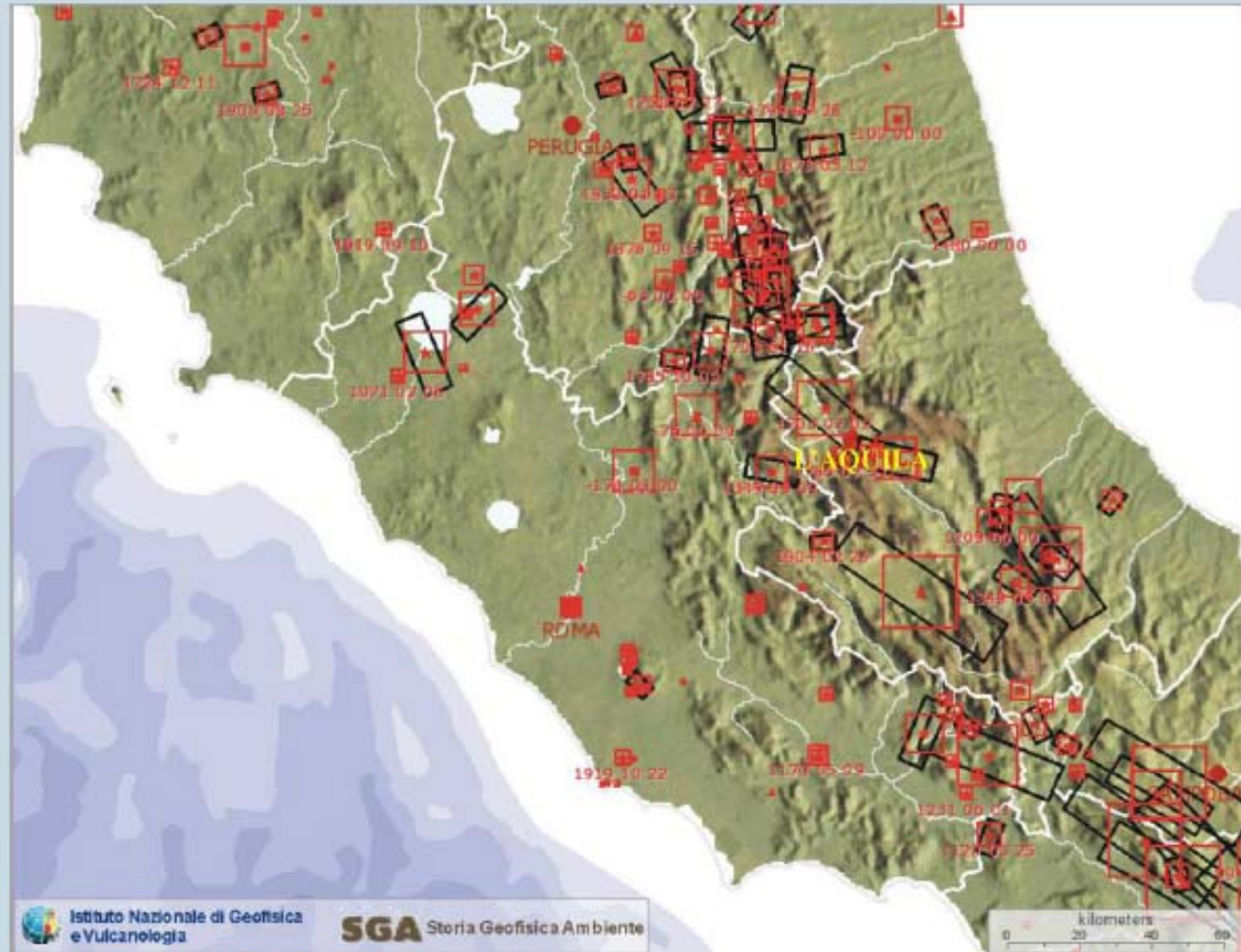
Orizzontale - Numero di cicli equivalenti raggruppati per distanza



Sismicità storica

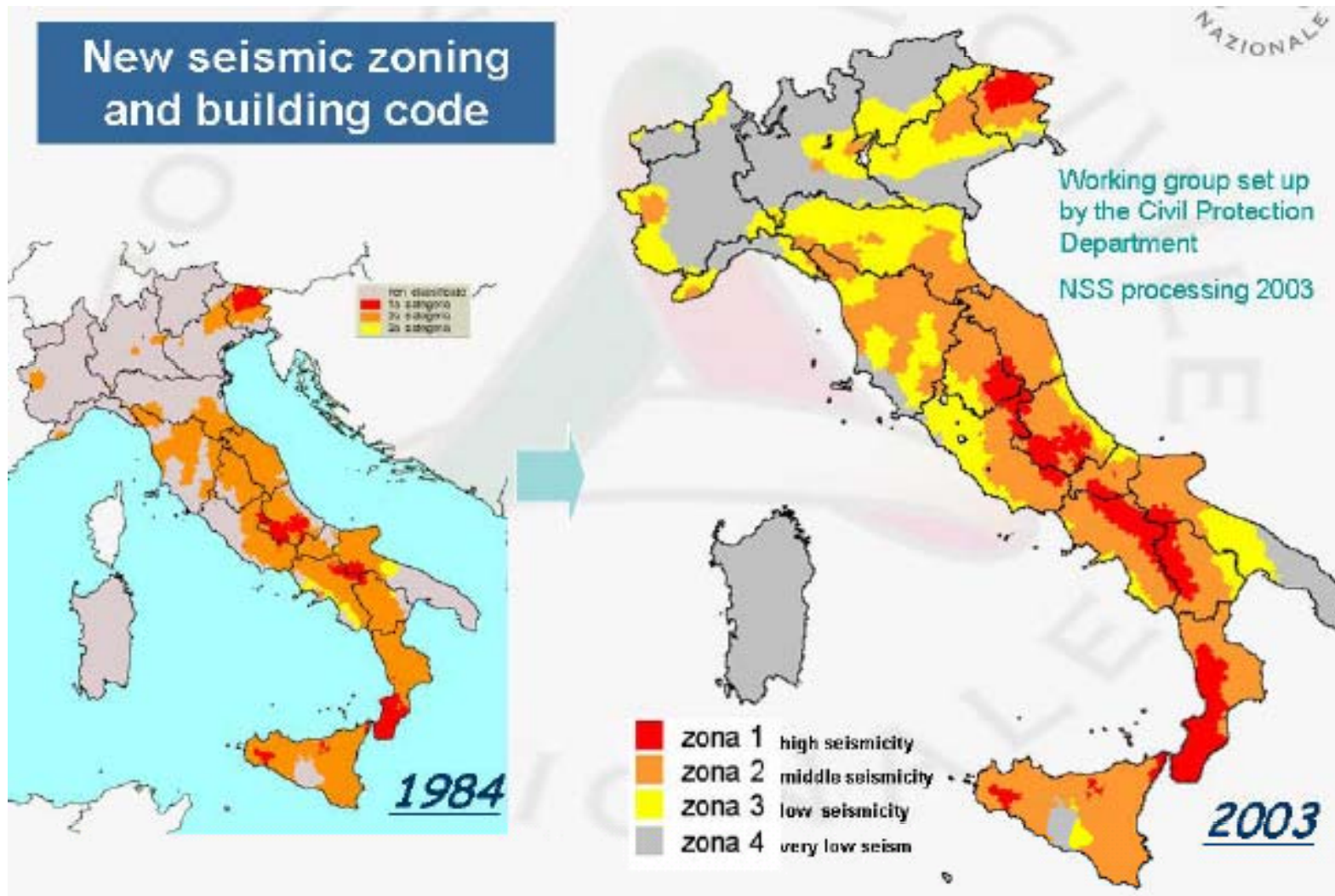
TERREMOTI ABRUZZESI CON INTENSITA' >IX

- Sulmona del 1315
(Sulmona, I = IX)
- Abruzzo 1349
(I = IX-X)
- L'Aquila del 1461
(L'Aquila, I = X)
- Amatrice 1639
(Amatrice, I = X)
- Norcia/Aquila del 1703
(Norcia-L'Aquila, I = XI)
- Maiella del 1706
(Maiella, I = IX-X)
- Avezzano del 1915
(Avezzano, I = XI)



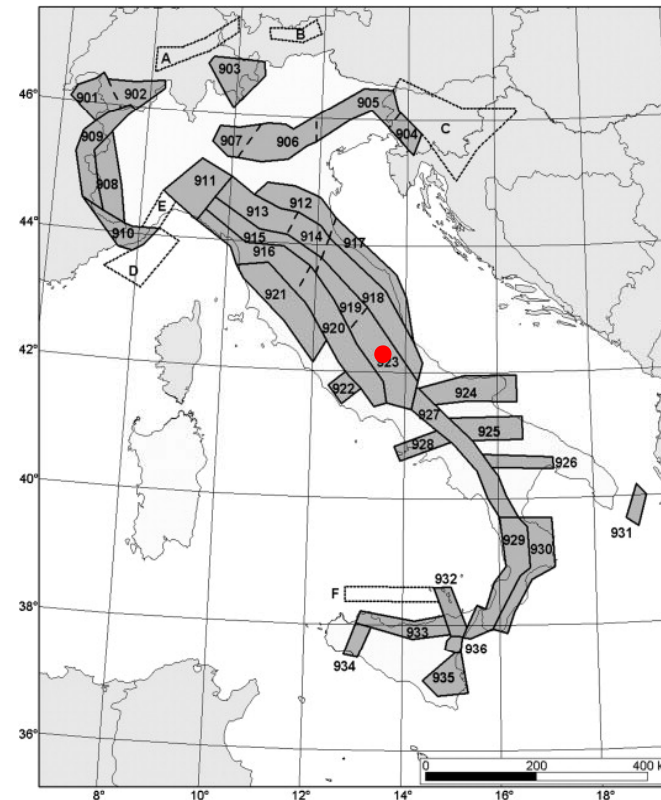
□ Zone sismogenetiche □ Magnitudo ★ Epicentro calcolato

Classificazione sismica del territorio



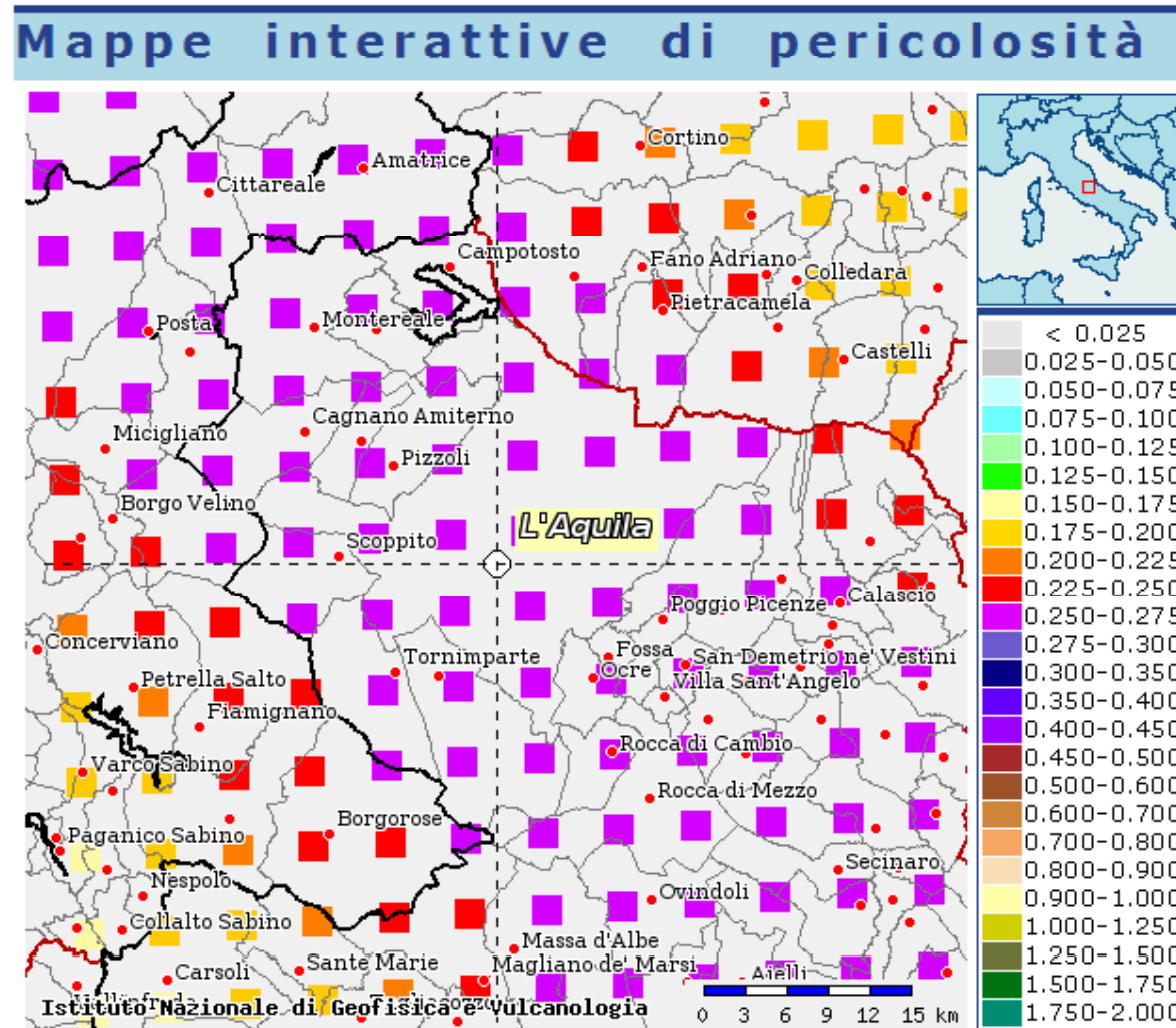
Zonazione sismica del territorio

Seismic source zone	Effective depth (km)	Max observed magnitude (M_w)	Predominant focal mechanism
901	8	5.79	Undetermined
902	10	6.10	Undetermined
903	9	5.79	Undetermined
904	7*	5.71	Strike-slip
905	8*	6.66	Reverse
906	8*	6.49	Reverse
907	8*	5.67	Reverse
908	10	5.67	Strike-slip
909	10	5.54	Normal
910	10	6.29	Reverse
911	8	5.67	Strike-slip
912	7	5.88	Reverse
913	13	5.85	Undetermined
914	13	5.97	Undetermined
915	8	6.49	Normal
916	6*	5.52	Normal
917	7	5.94	Reverse
918	13	6.23	Undetermined
919	8	6.33	Normal
920	6*	5.57	Normal
921	4#	5.91	Normal
922	4#	5.53	Normal
923	9	6.99	Normal
924	13	6.73	Strike-slip
925	13	6.72	Strike-slip
926	13	5.84	Strike-slip
927	10	6.96	Normal
928	3#	5.78	Normal
929	10	7.24	Normal
930	10	6.60	Undetermined
931	10*	6.90	Strike-slip
932	13	6.06	Strike-slip
933	10	5.89	Reverse
934	10	6.12	Reverse
935	13	7.41	Strike-slip
936	3#	5.30	Undetermined

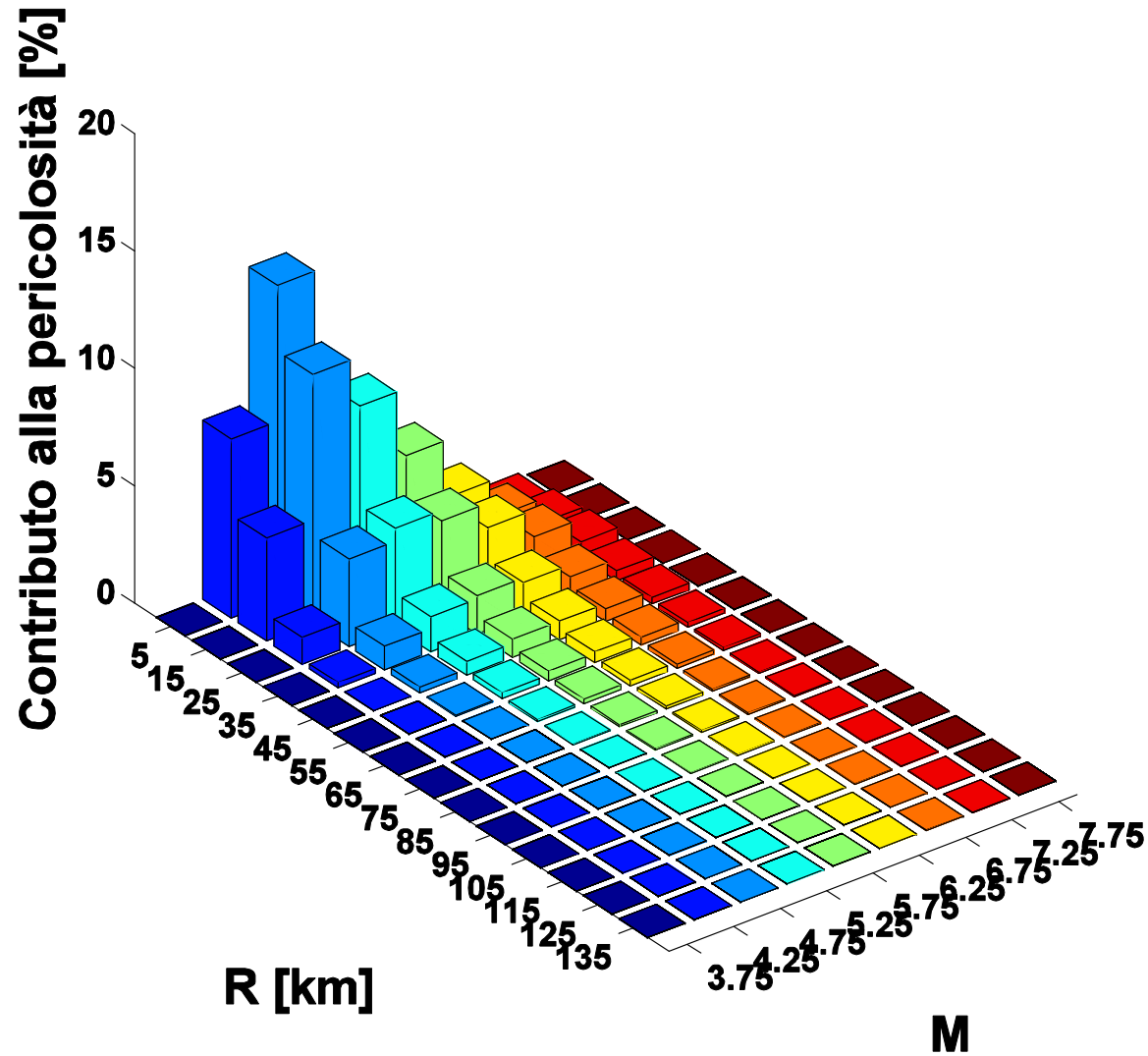


Il corridoio degli Apennini tra la Lunigiana e gli Abruzzi–Molise (915, 919 and 923) includeono la zona a più alta sismicità dell'Italia centrale, sia in termini di magnitudo che frequenza di occorrenza.

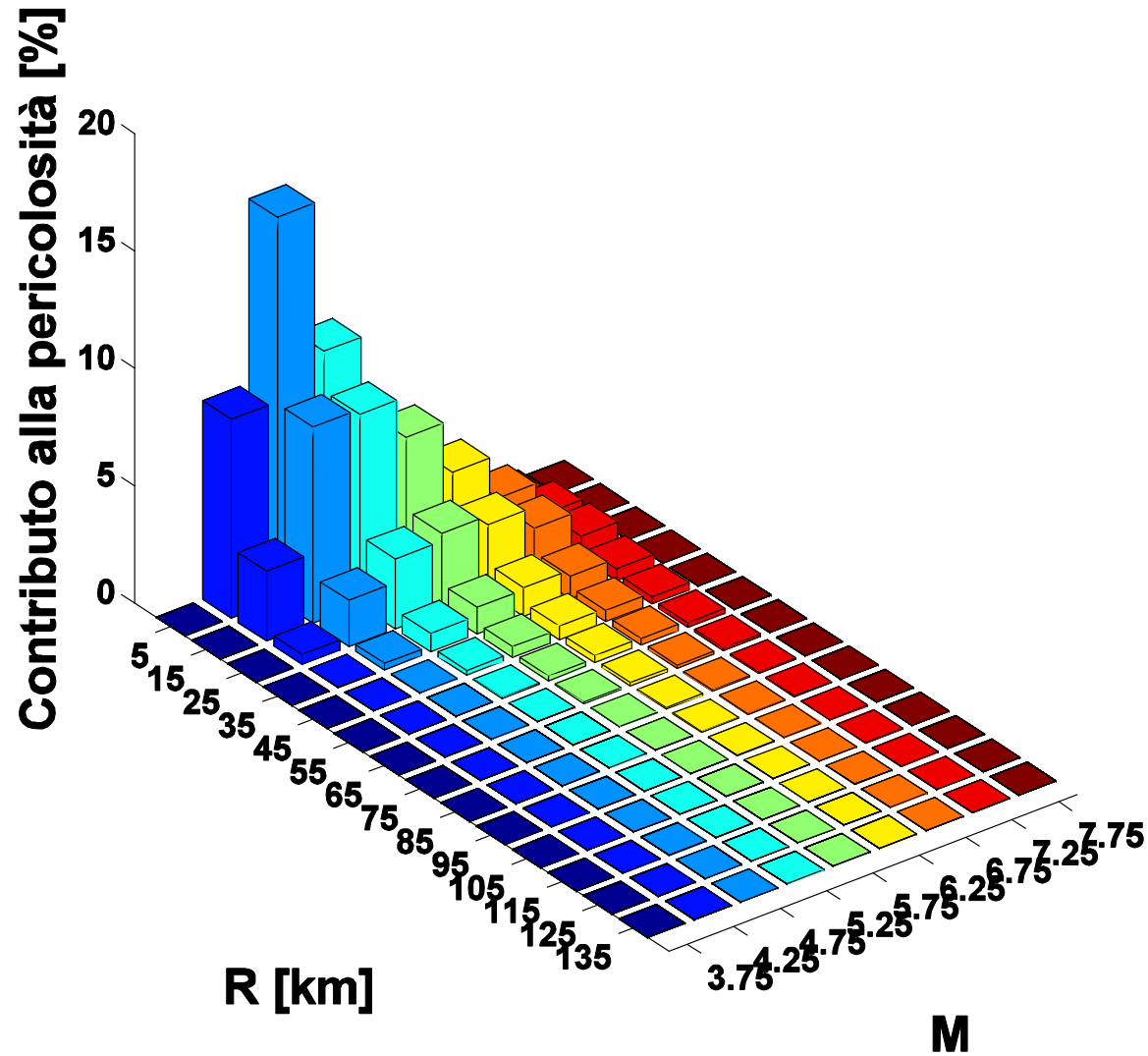
PGA con periodo di ritorno 475 su roccia dal sito INGV (<http://esse1.ingv.it/>) e recepita dalle NTC '08



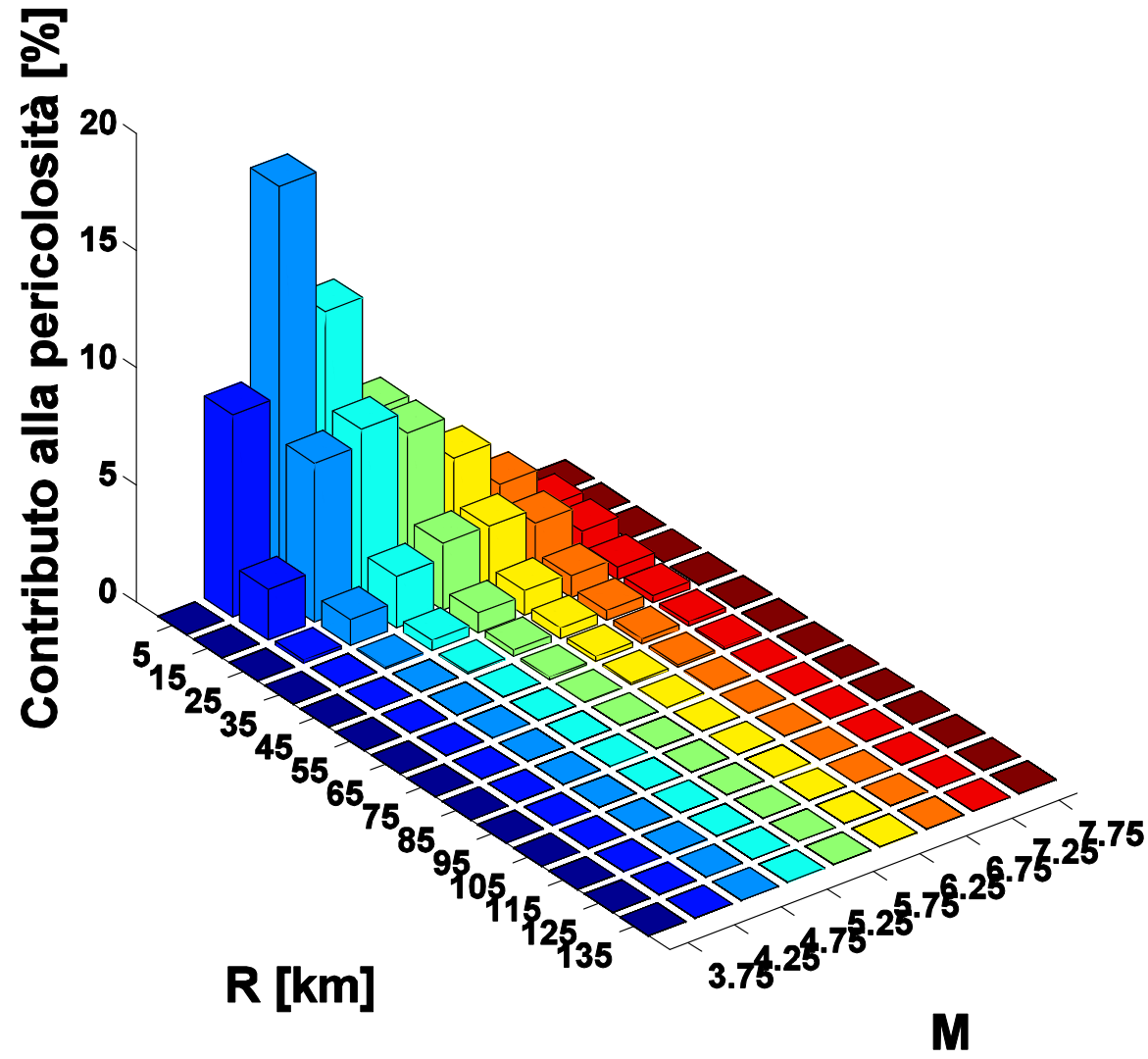
$$T_R = 30 \text{ anni}, a_g = 0.0789g$$



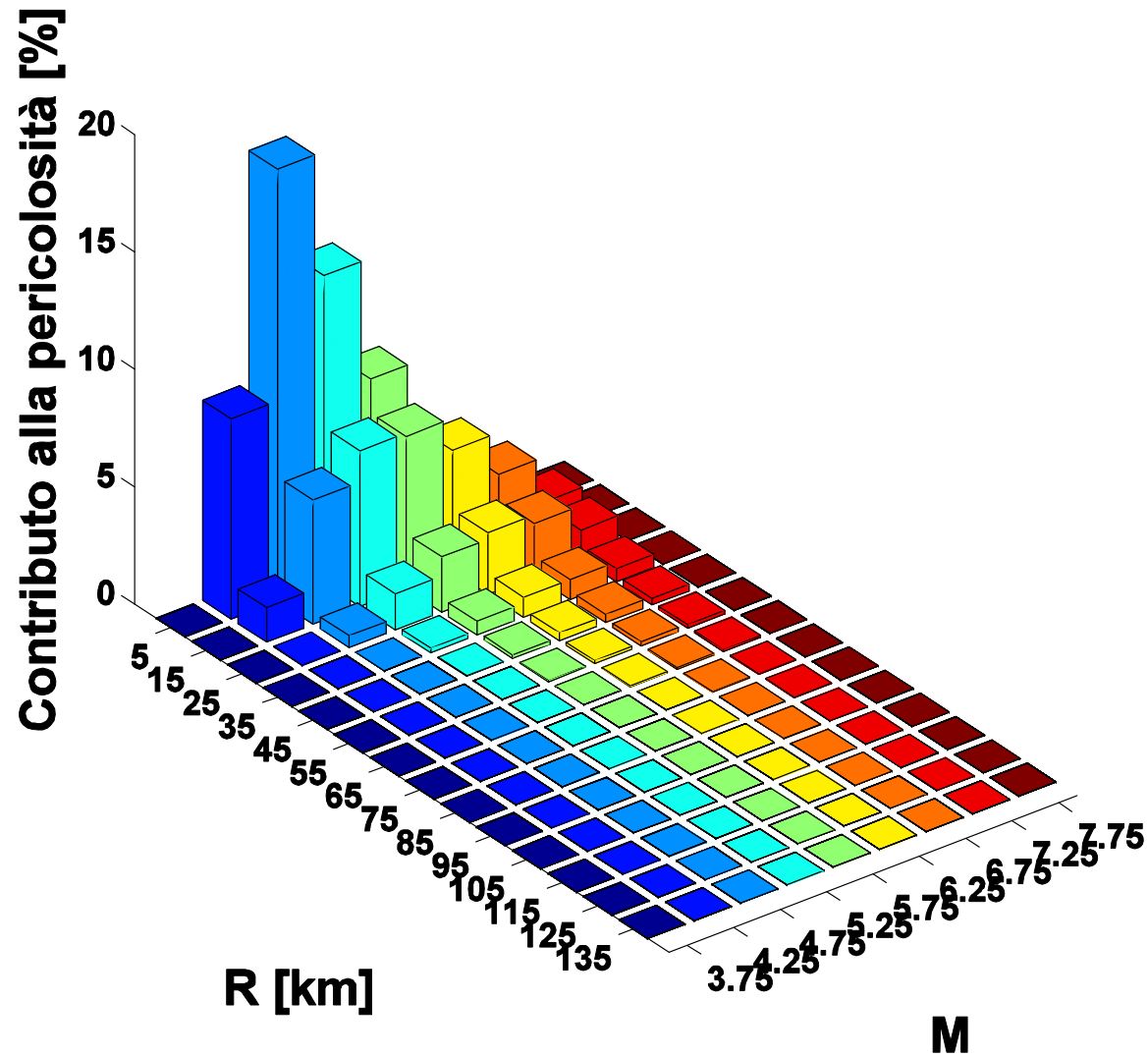
$$T_R = 50 \text{ anni}, a_g = 0.1041g$$



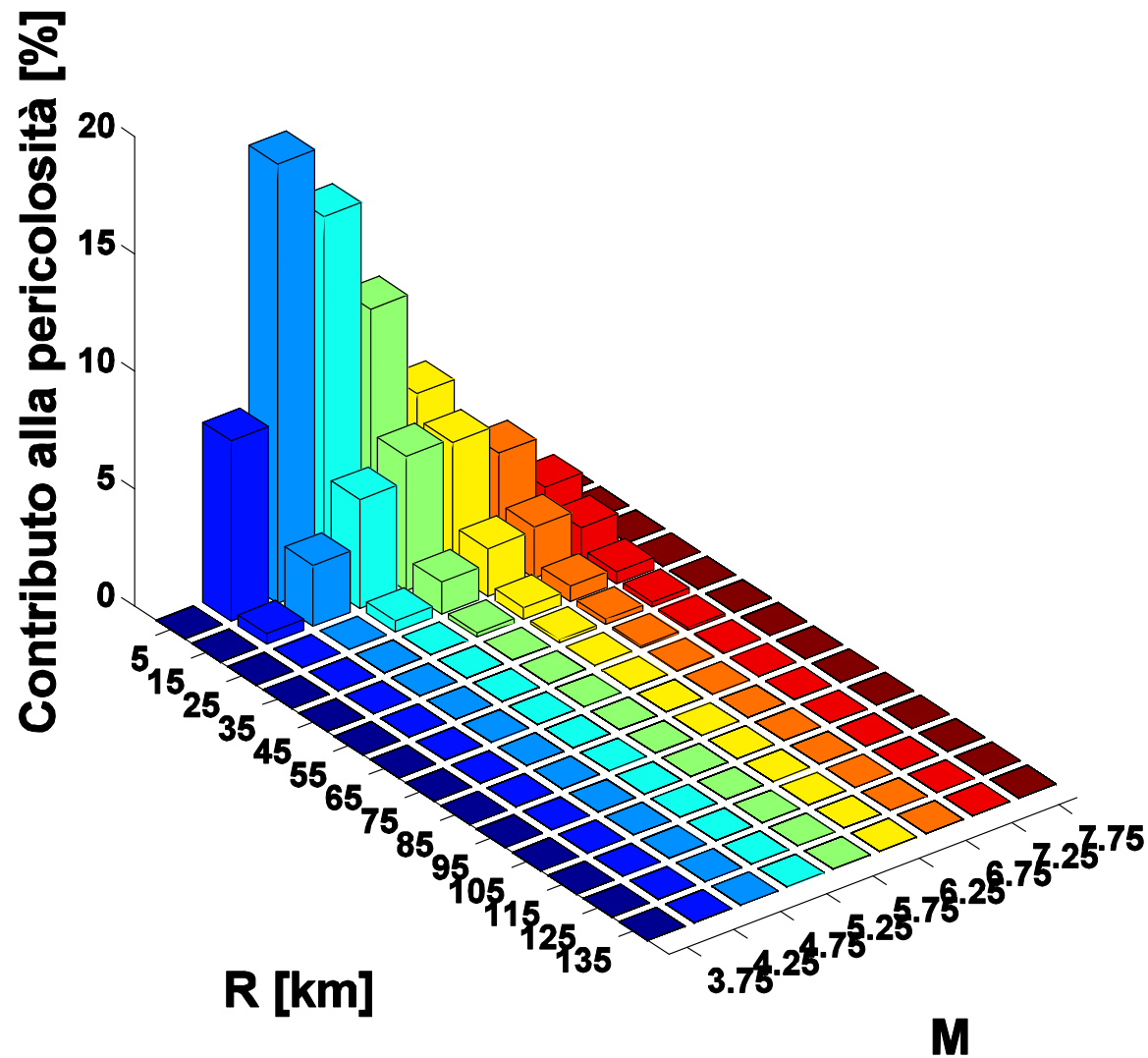
$$T_R = 72 \text{ anni}, a_g = 0.1226g$$



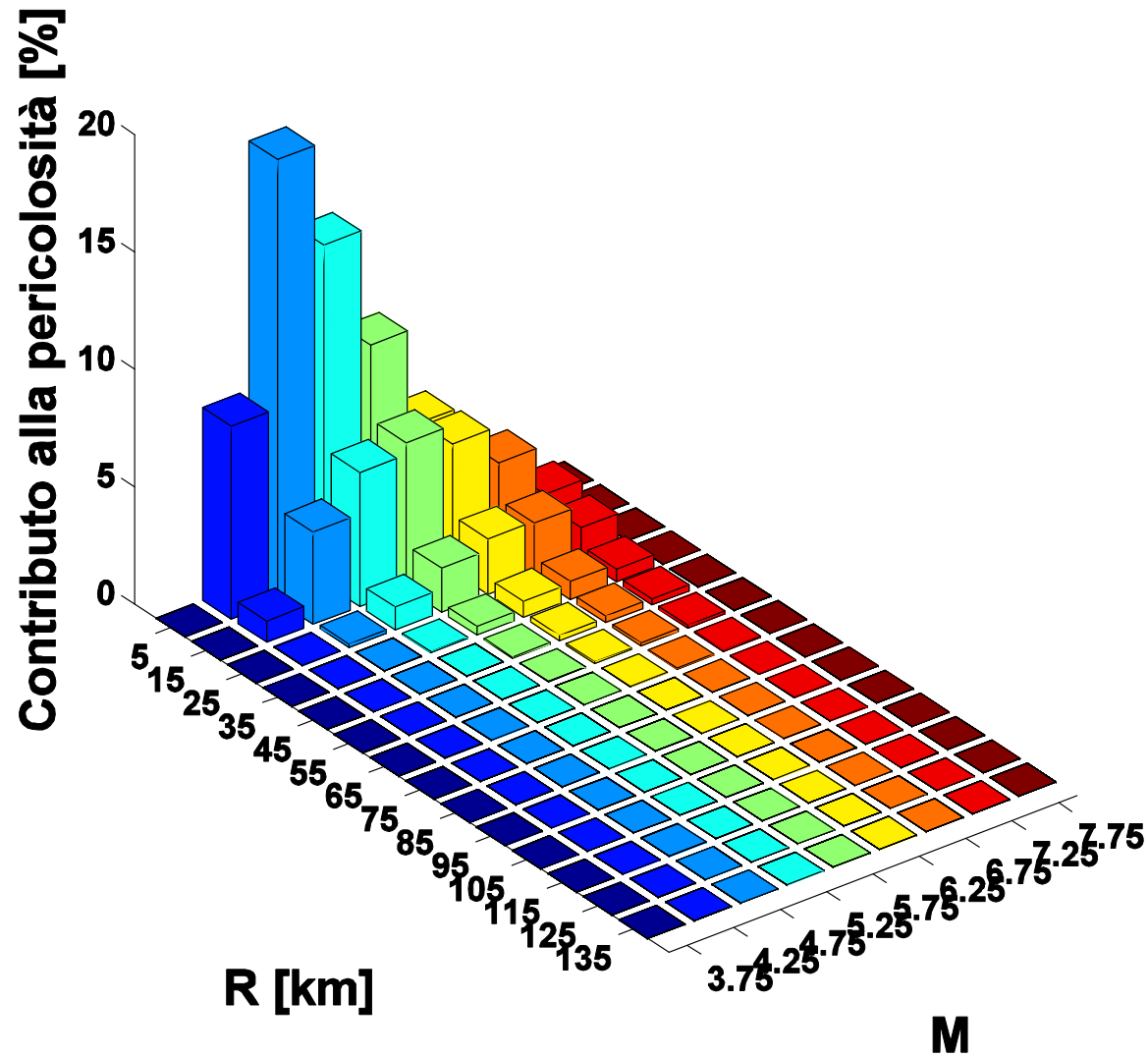
$$T_R = 101 \text{ anni}, a_g = 0.1424g$$



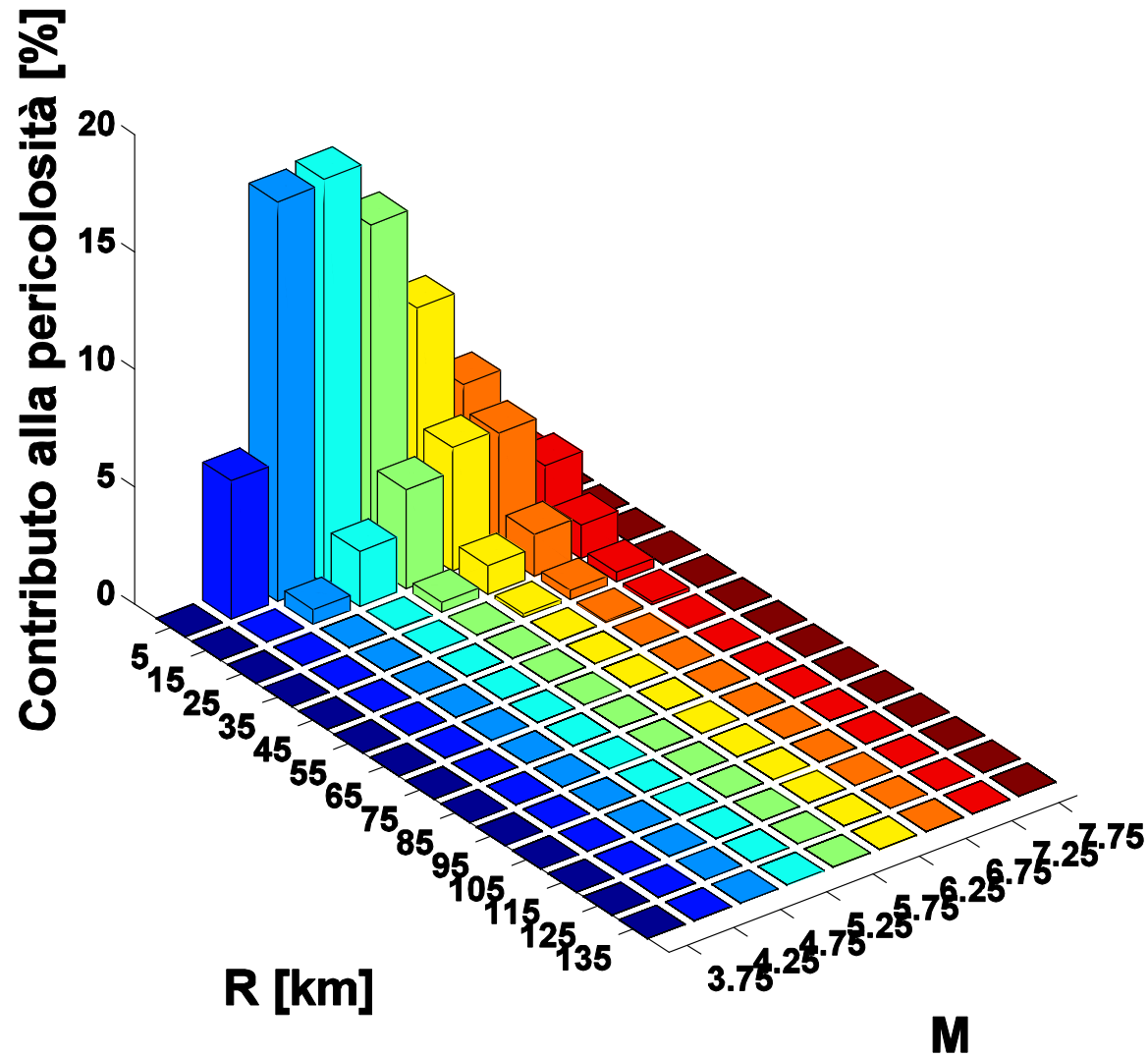
$$T_R = 201 \text{ anni}, a_g = 0.1906g$$



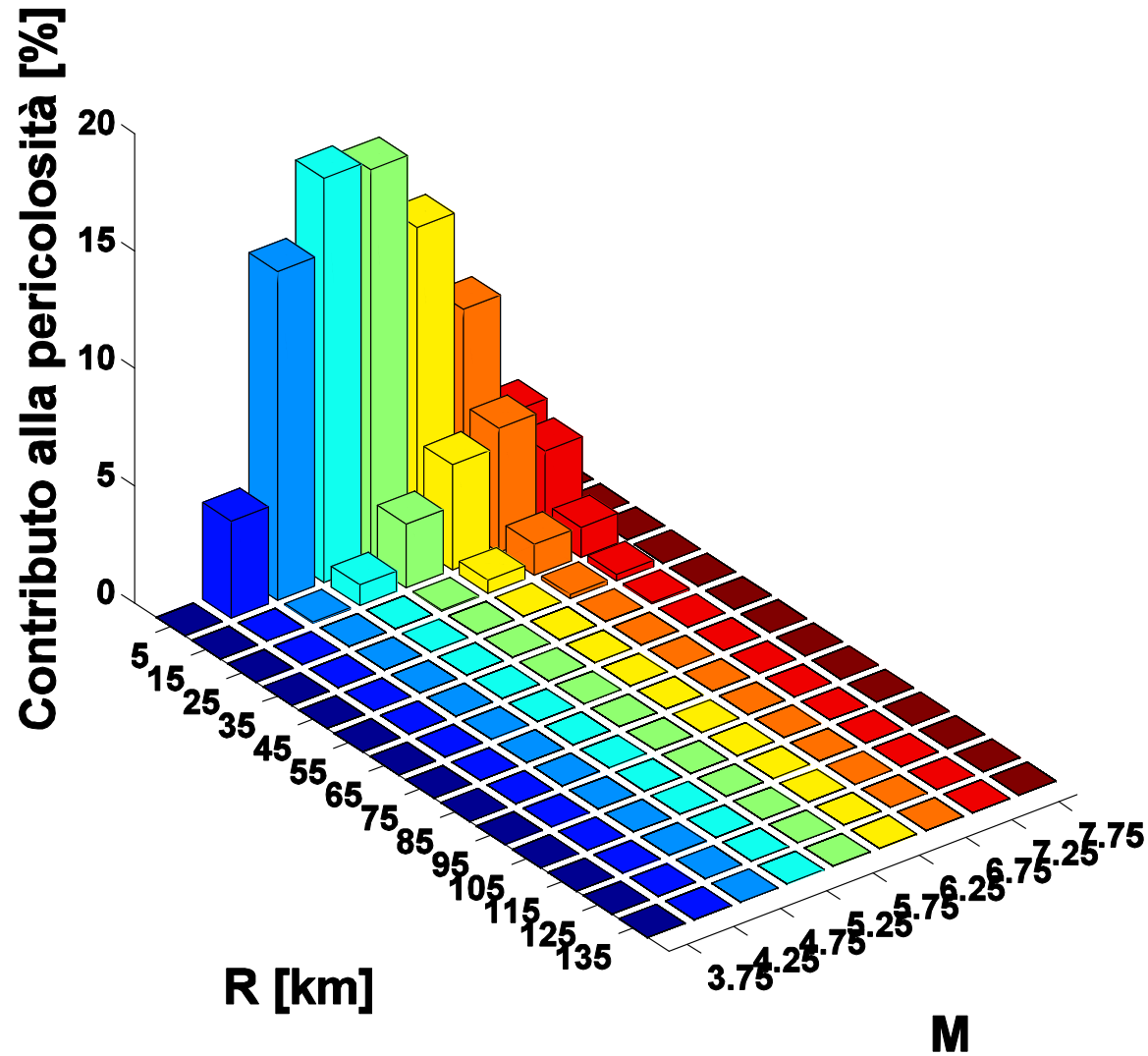
$$T_R = 140 \text{ anni}, a_g = 0.1640g$$



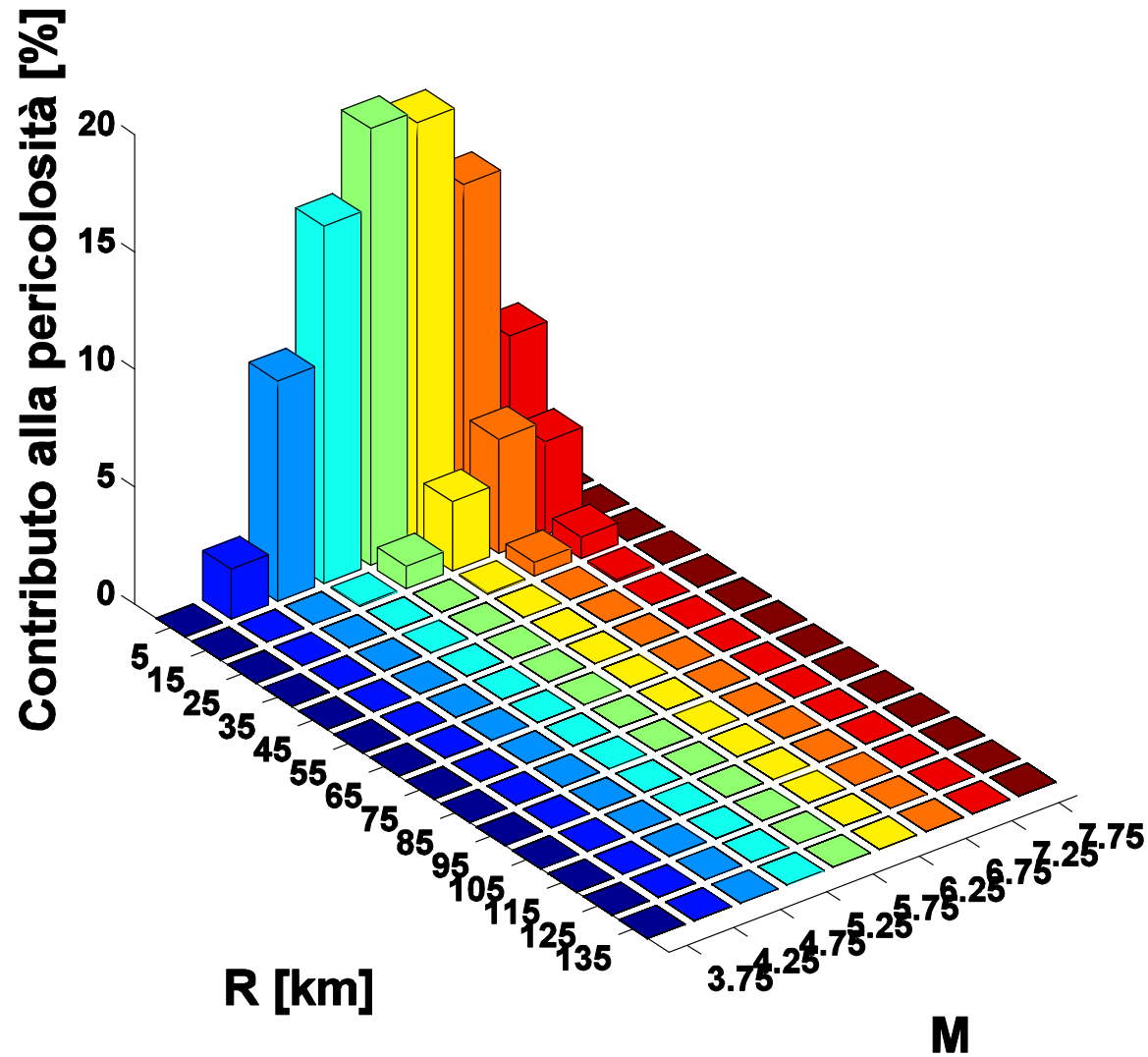
$$T_R = 475 \text{ anni}, a_g = 0.2608g$$



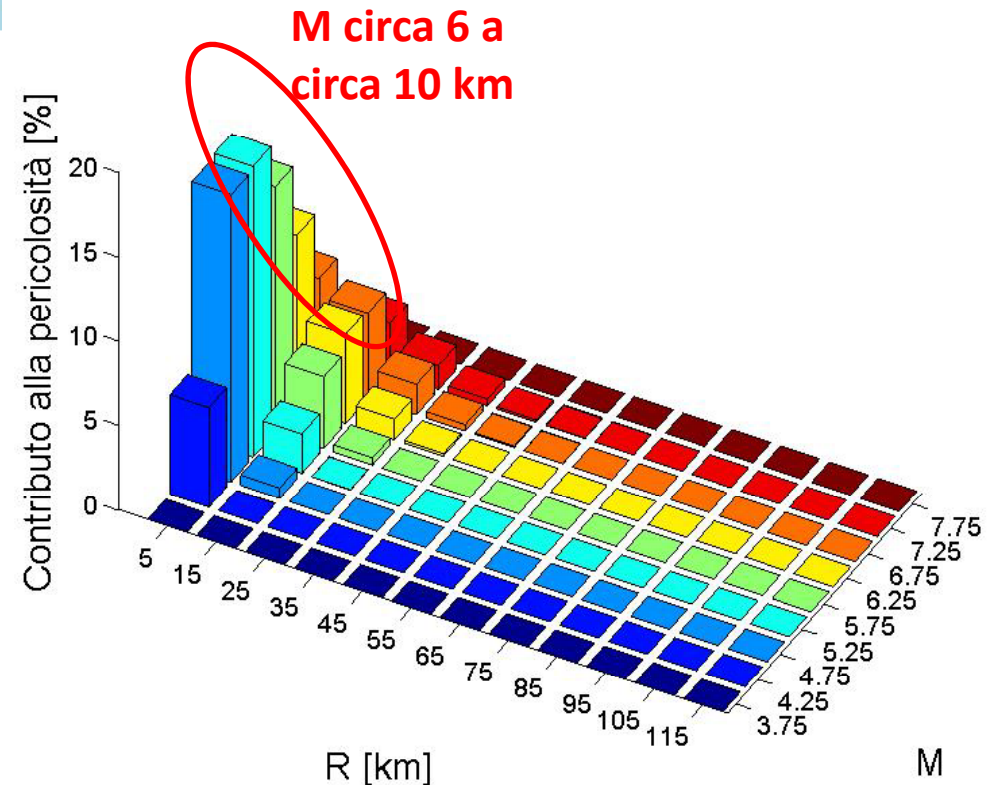
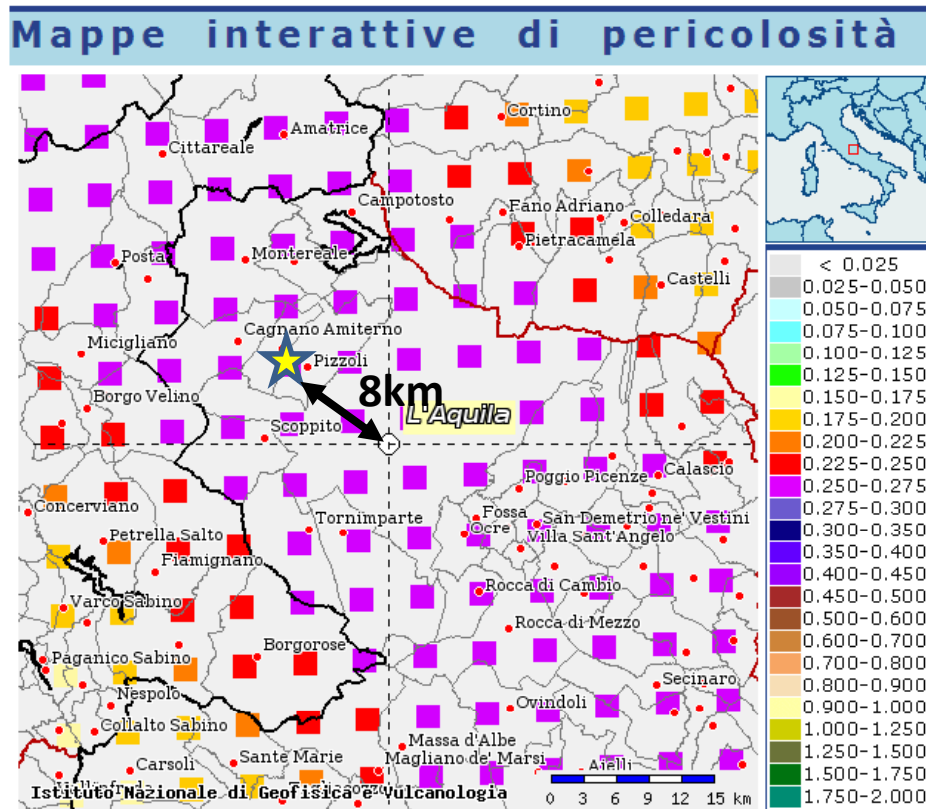
$$T_R = 975 \text{ anni}, a_g = 0.3341g$$



$$T_R = 2475 \text{ anni}, a_g = 0.4522g$$

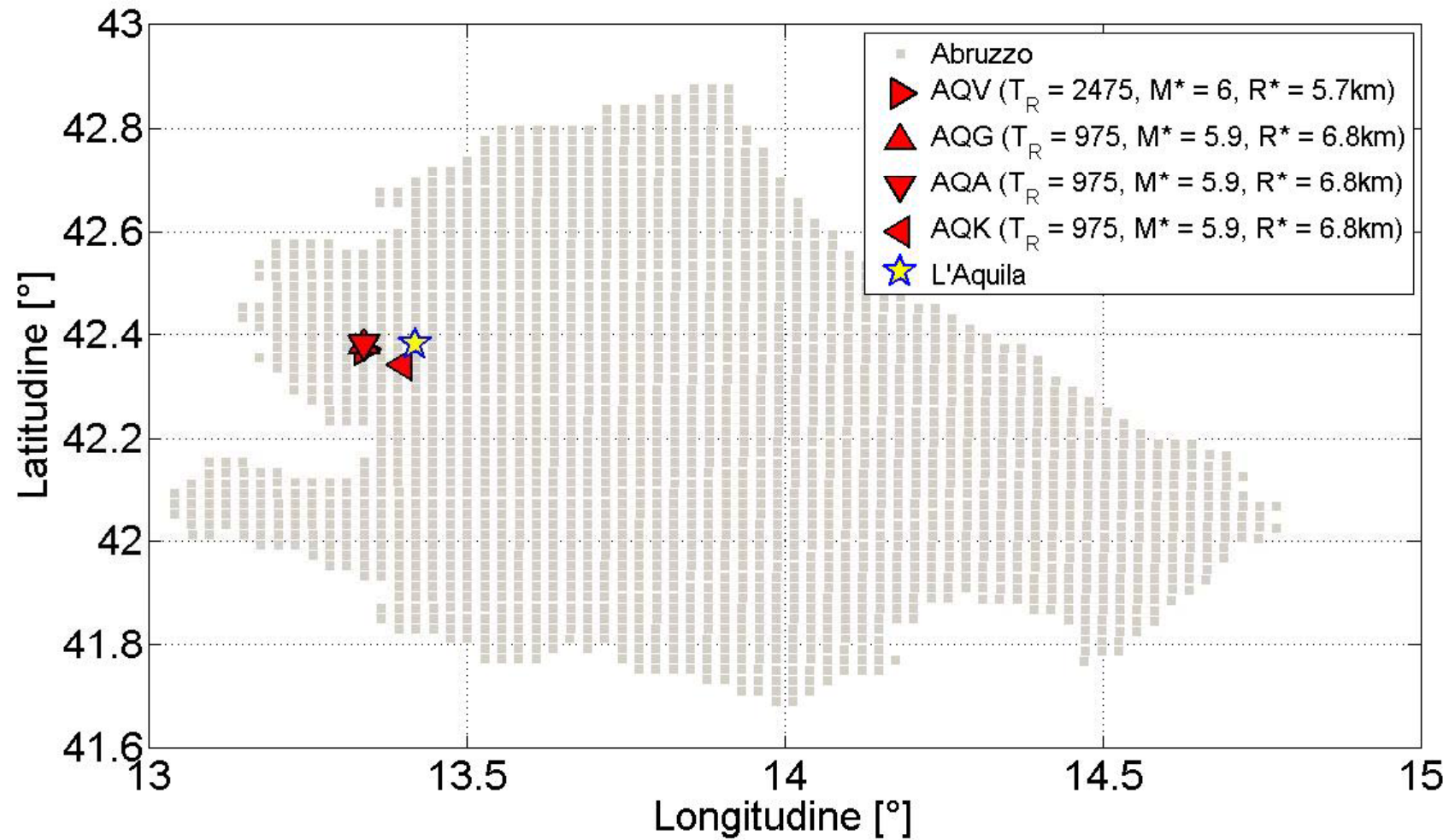


Disaggregazione della pericolosità per L'Aquila

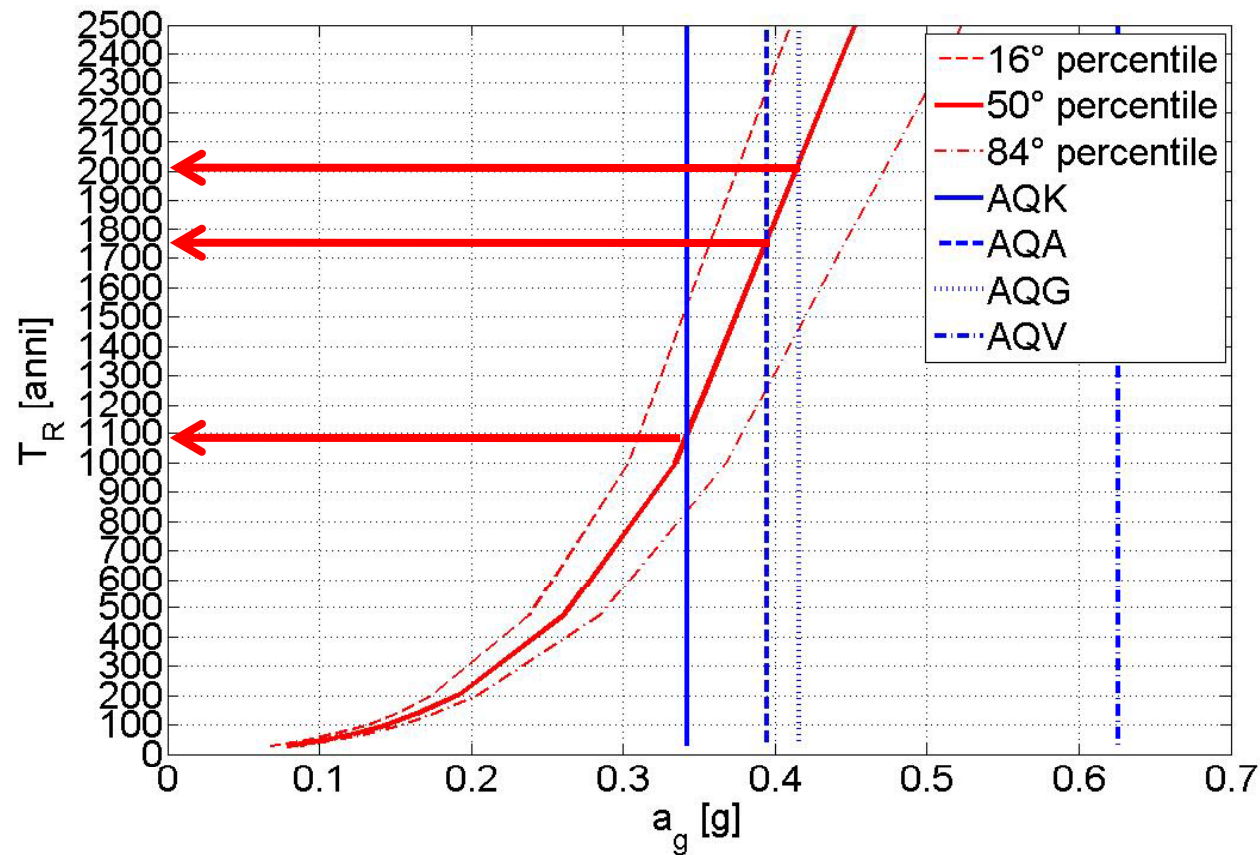


Il terremoto di progetto è compatibile con quello occorso

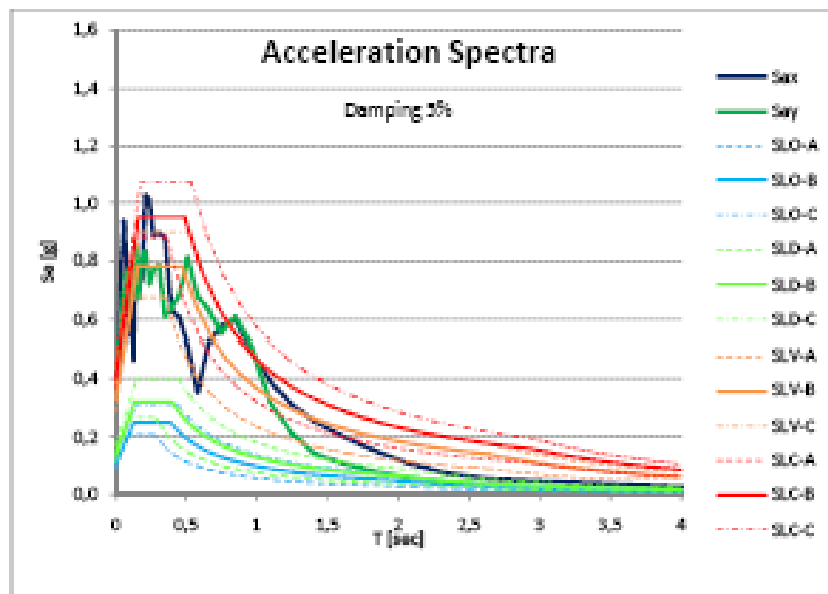
A che periodi di ritorno su roccia corrispondono le accelerazioni registrate?



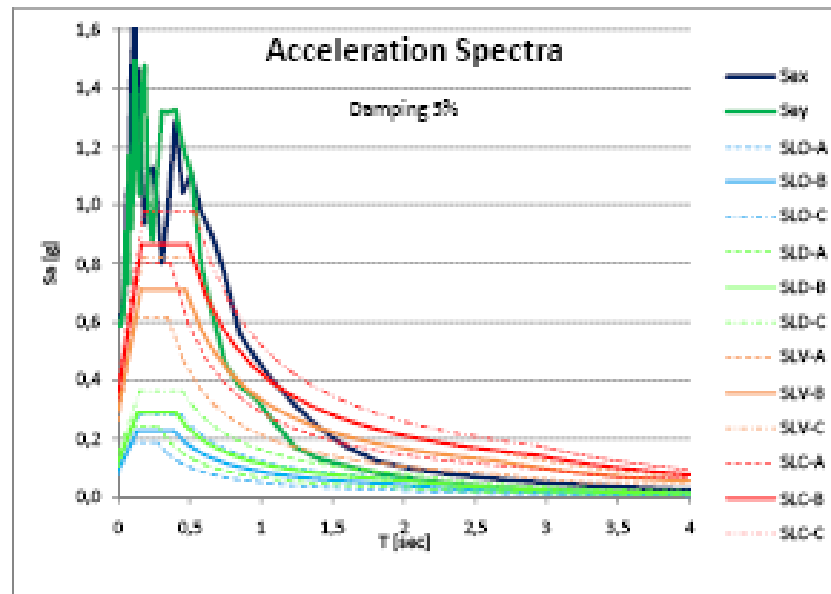
A che periodi di ritorno su roccia corrispondono le accelerazioni registrate?



Spettri elastici registrati e spettri di progetto per L'Aquila (stazioni a 5km di distanza epicentrale)

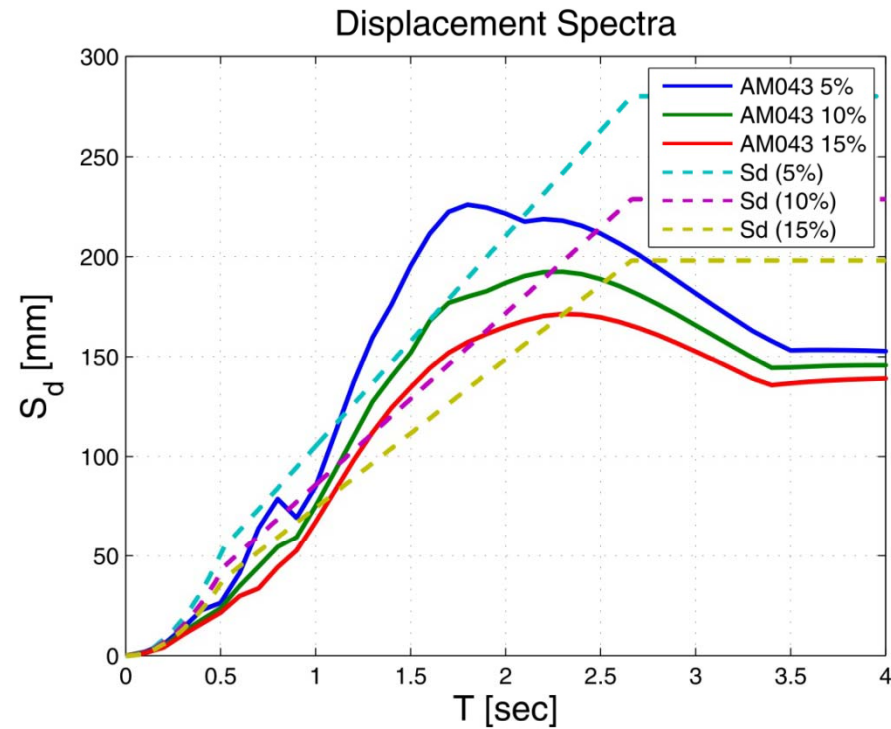
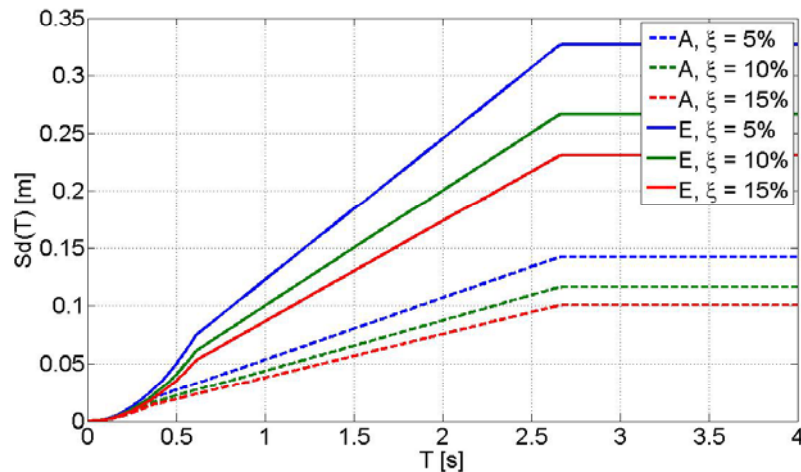


Record FA030 – Earthquake Spectra Response vs. NTC2008 Elastic Spectra for Civil Buildings



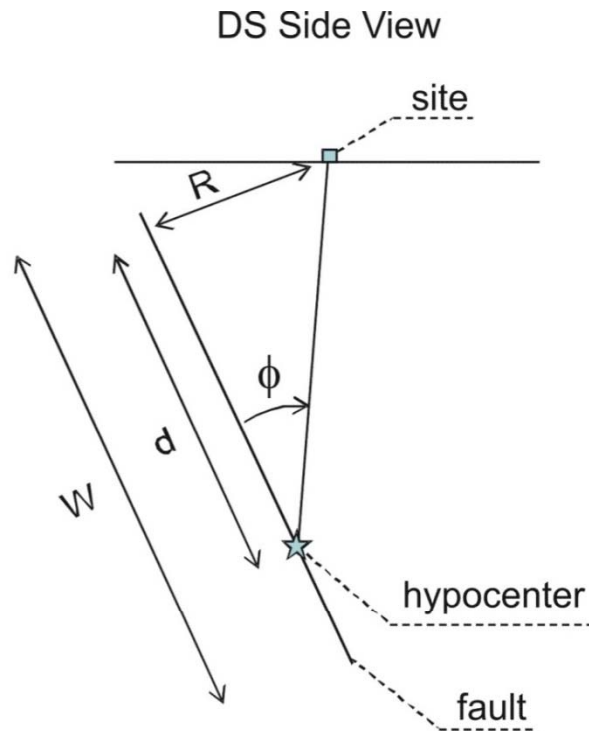
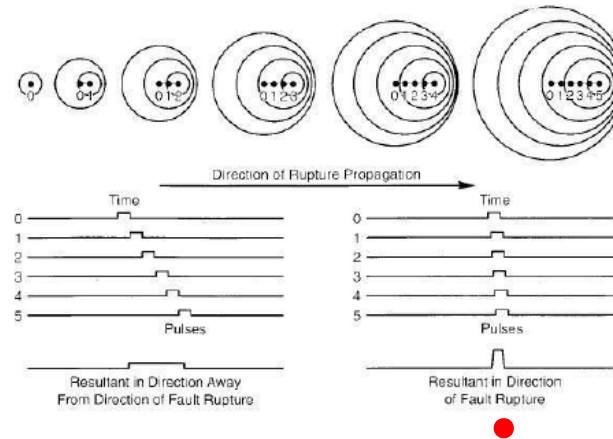
Record GX056 – Earthquake Spectra Response vs. NTC2008 Elastic Spectra for Civil Buildings

Spettri elastici registrati e spettri di progetto per L'Aquila (stazioni a 5km di distanza epicentrale)

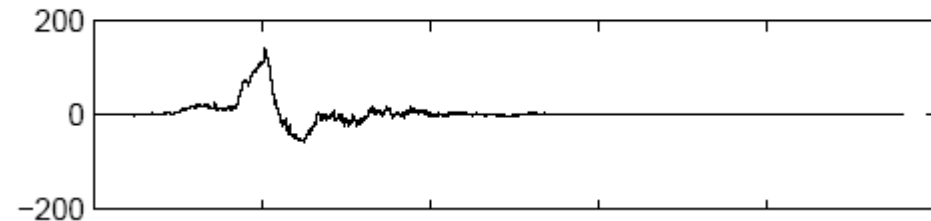


Direttività – Il fenomeno

Nel caso del terremoto dell'Aquila, la rottura associata all'evento del 6 aprile si è propagata dal basso verso l'alto (quindi verso la città dell'Aquila) e da nordovest a sudest, verso la Valle dell'Aterno.

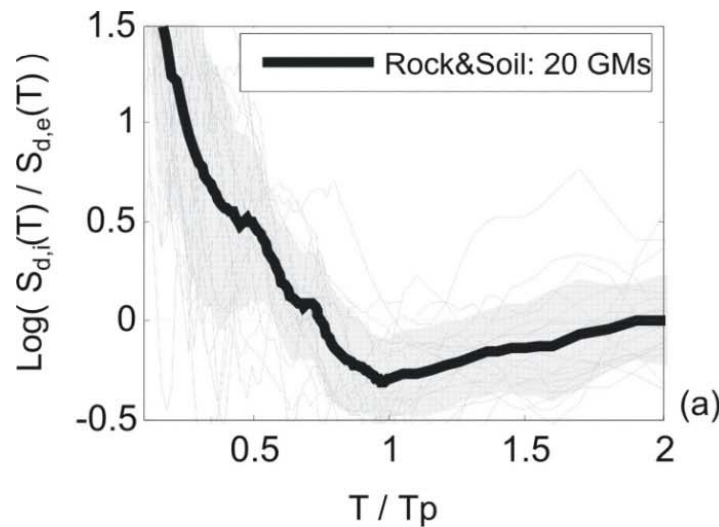


Lucerne (landers, 1992)

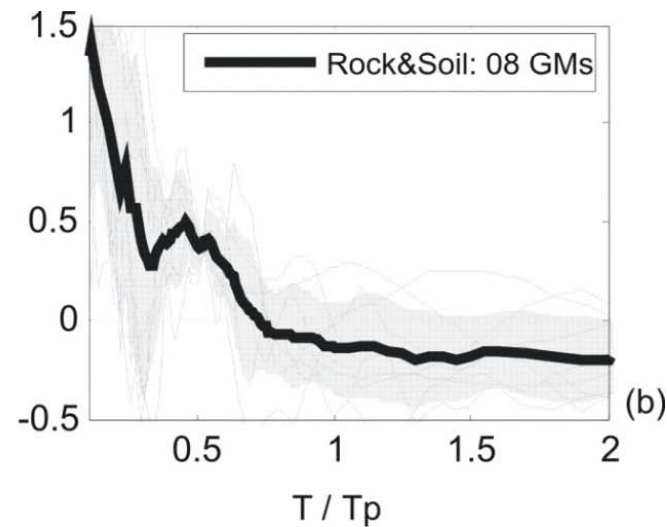


Da: Iervolino I., Cornell C.A. (2008). Probability of occurrence of velocity pulses in near-source ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(5): 2262-2277.

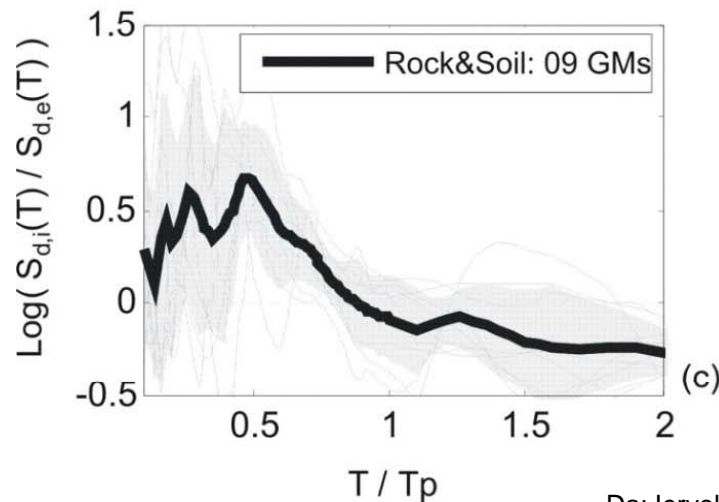
Direttività – gli effetti sulle strutture



(a)



(b)



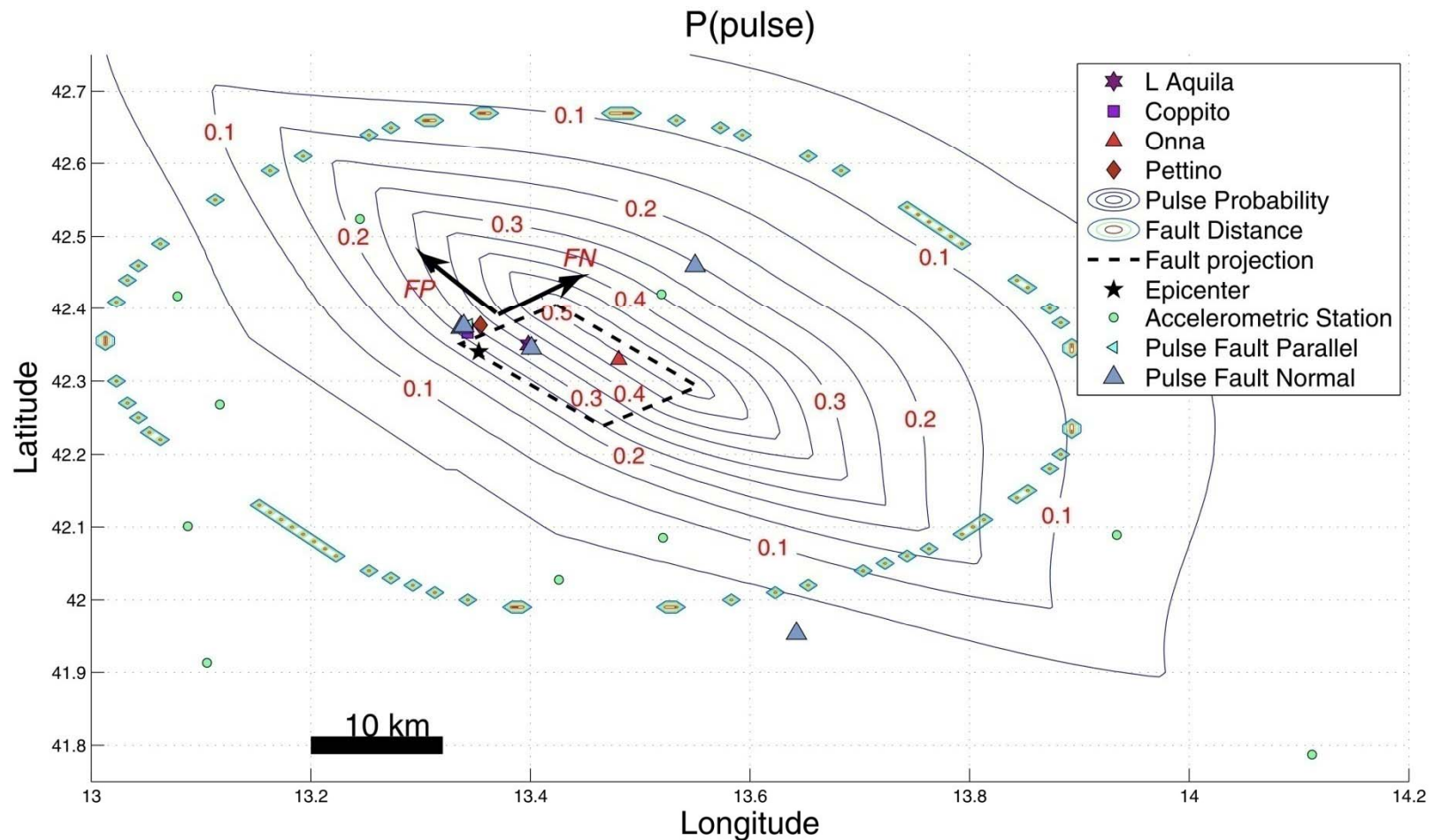
(c)

(a) $R = 4$; mean $T_p = 1.0$

(b) $R = 4$; mean $T_p = 1.9$

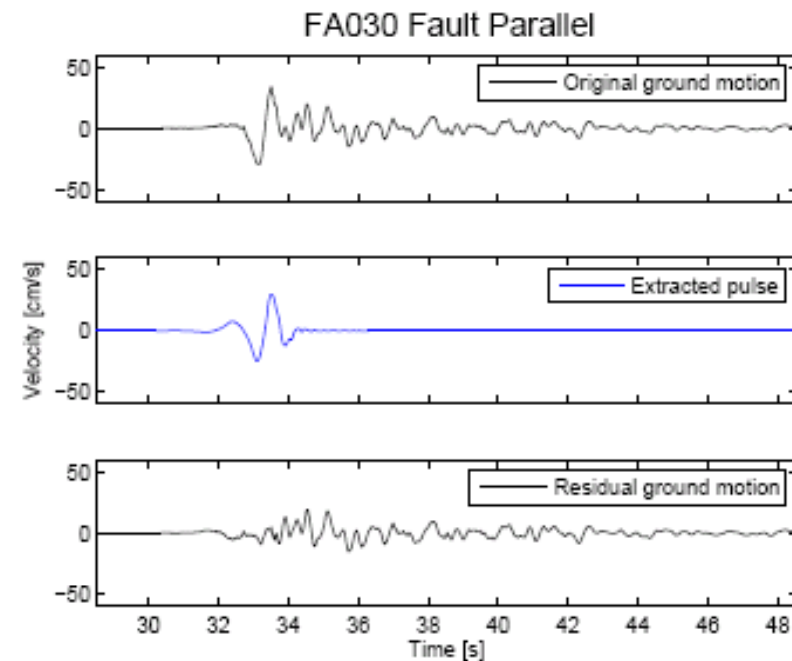
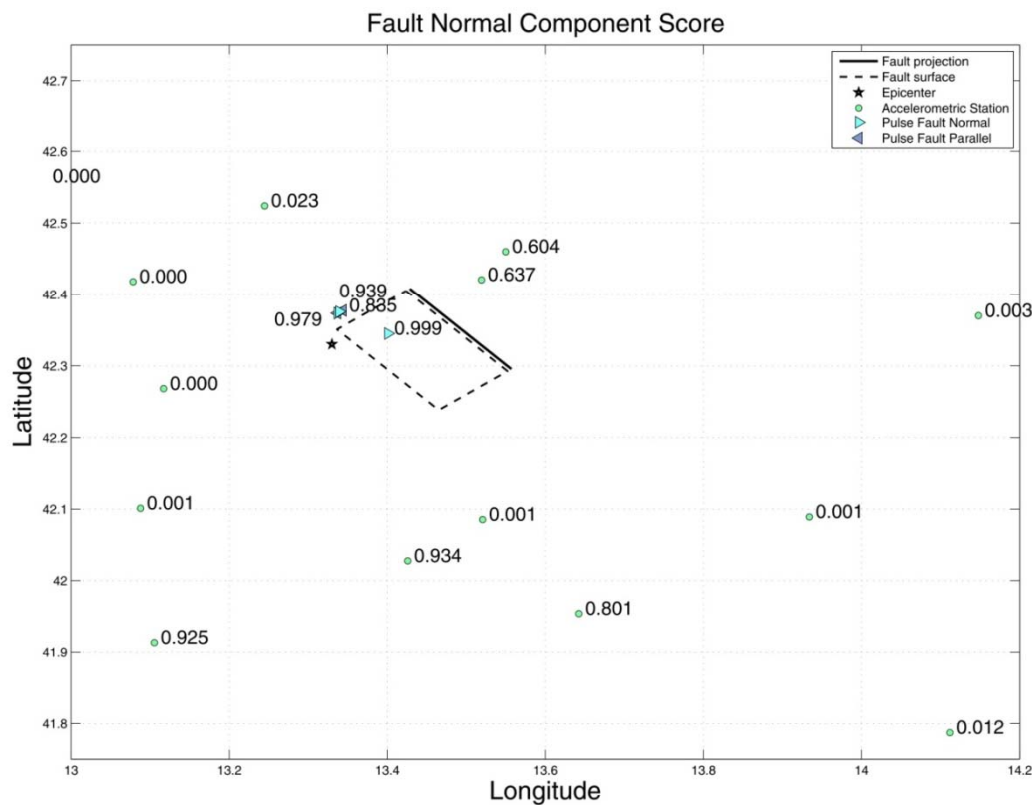
(c) $R = 4$; mean $T_p = 4.0$

Direttività – Probabilità di impulsi di velocità per il terremoto di L'Aquila (**PRELIMINARE E SOGGETTA A REVISIONE**)

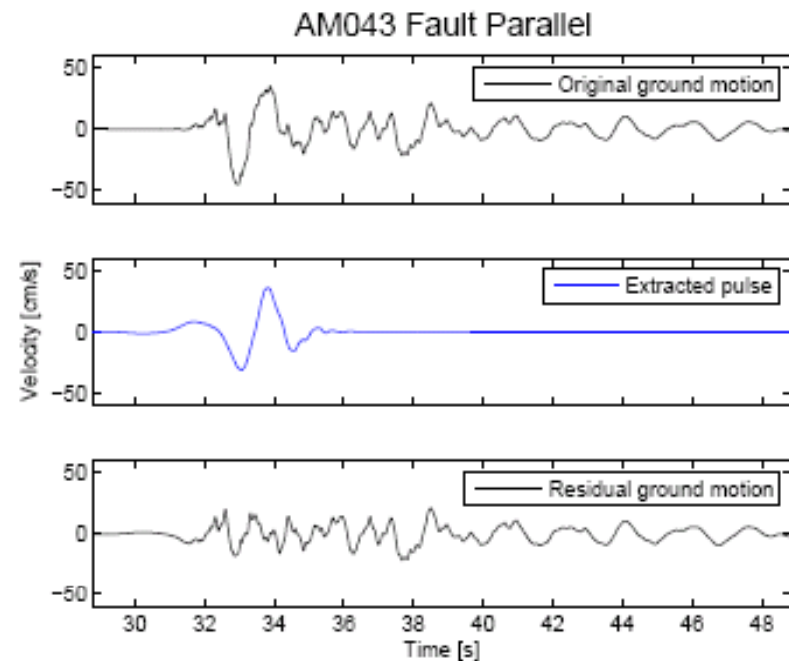
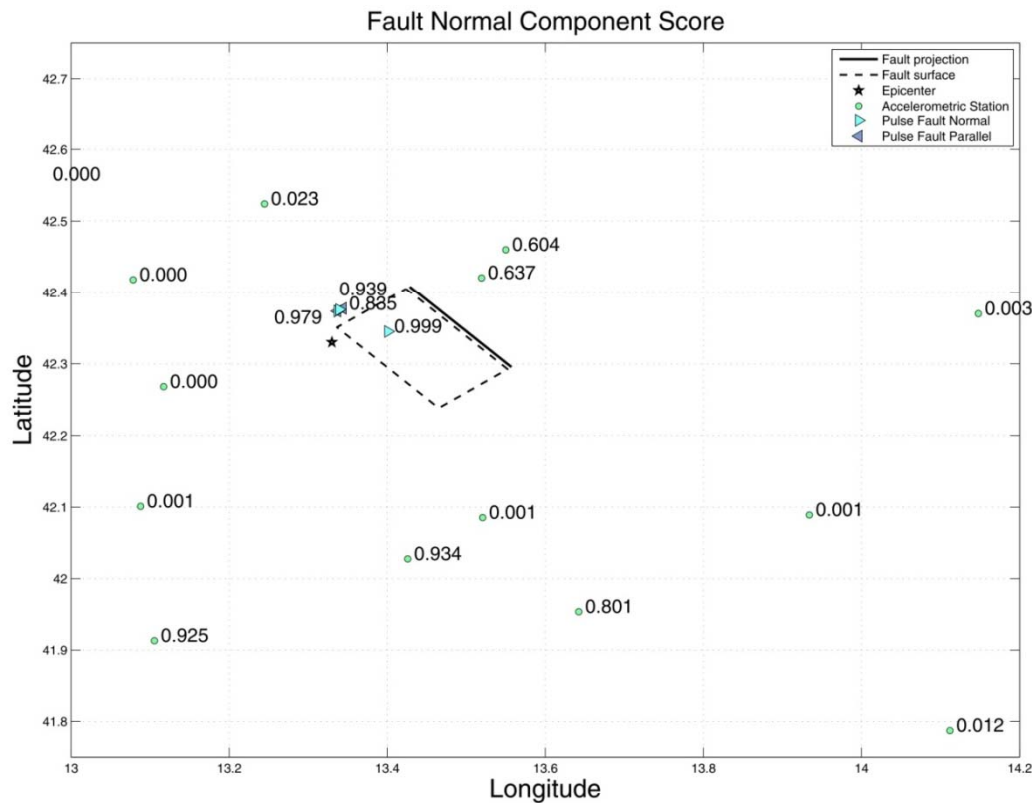


Da: Iervolino I., Cornell C.A. (2008). Probability of occurrence of velocity pulses in near-source ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(5): 2262-2277.

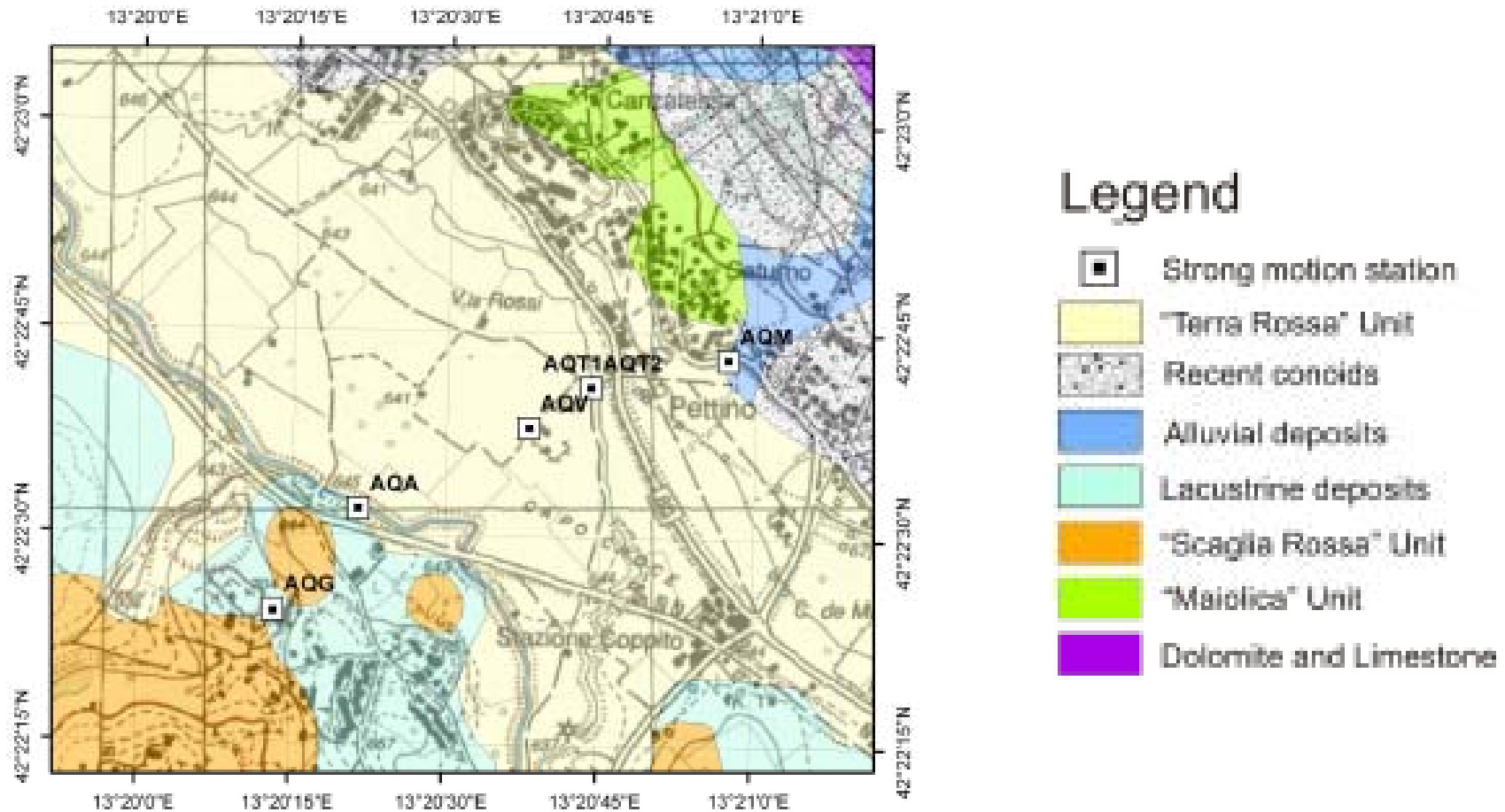
Direttività – Analisi dati terremoto di L'Aquila (PRELIMINARE E SOGGETTA A REVISIONE)



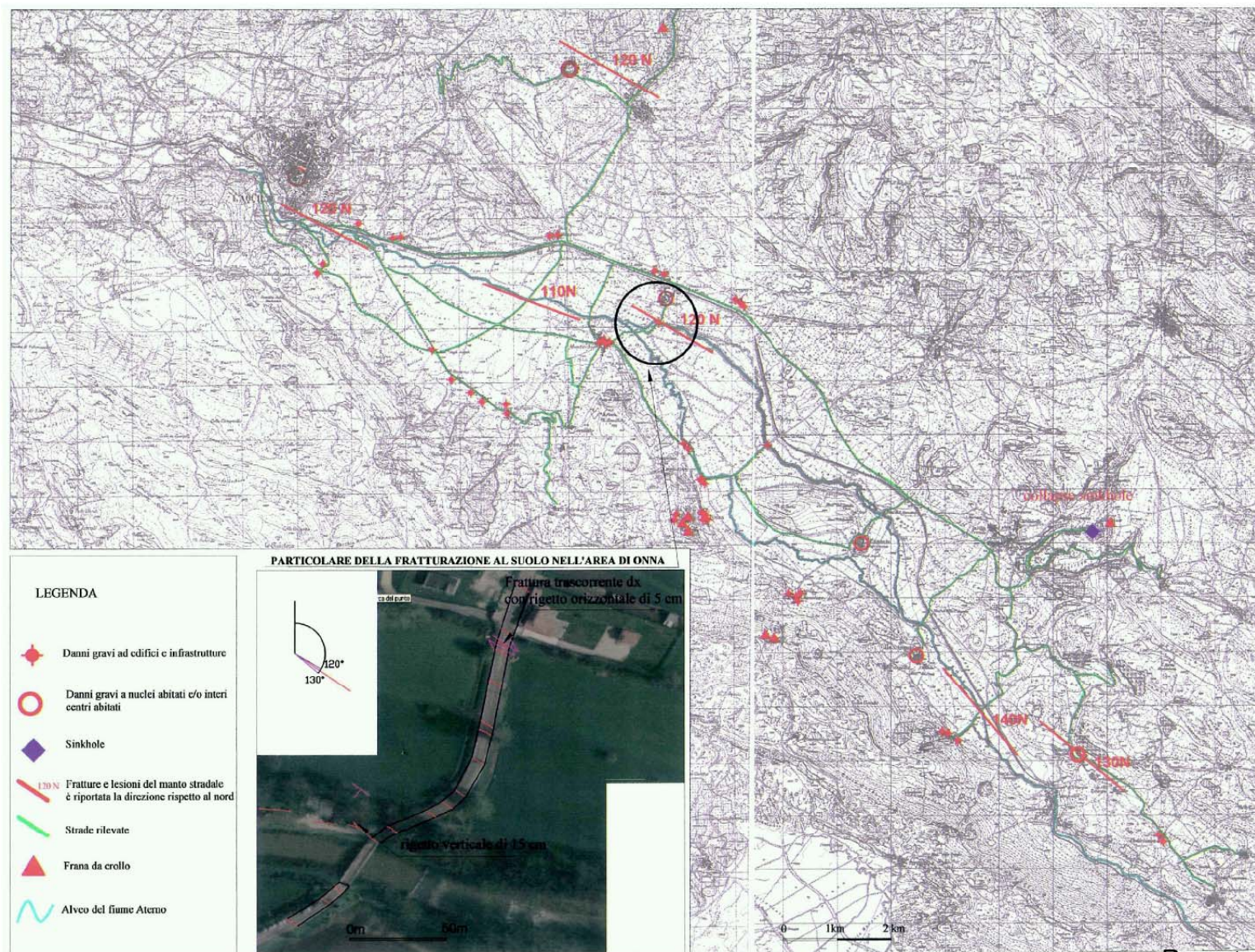
Direttività – Analisi dati terremoto di L'Aquila (PRELIMINARE E SOGGETTA A REVISIONE)



La mappa geologica

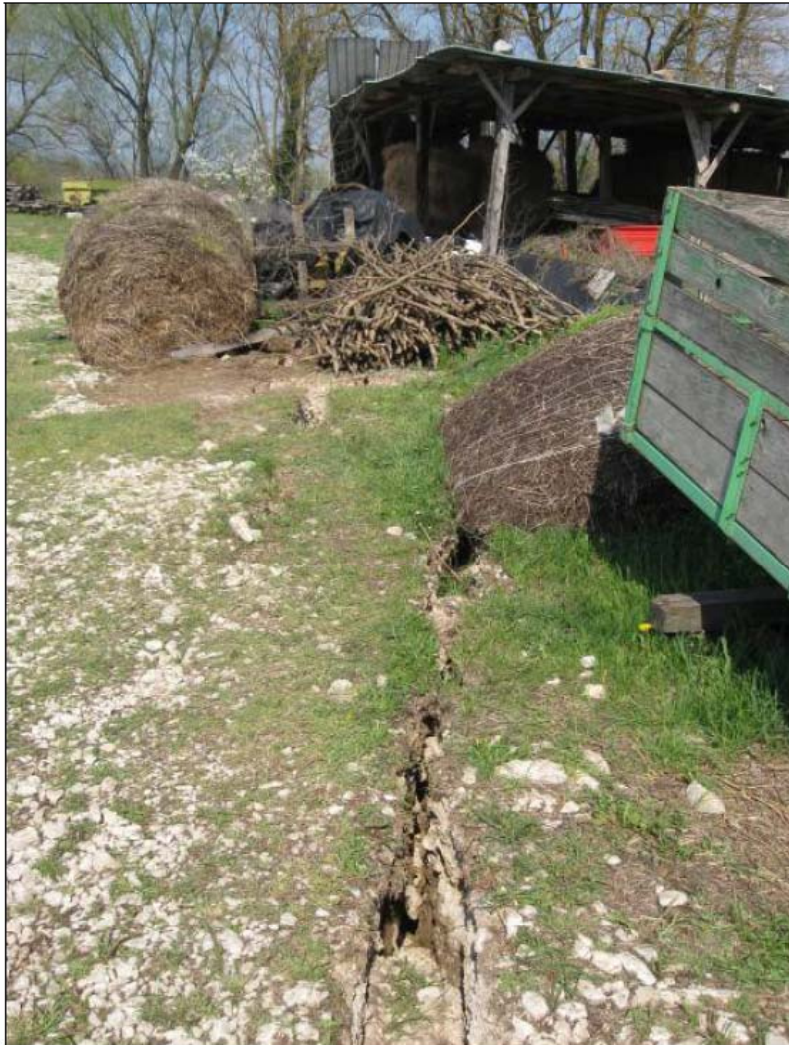


Carta degli effetti al suolo



TAV 1 - CARTA DEGLI EFFETTI AL SUOLO

Effetti geotecnici: Onna



Effetti geotecnici: Onna



Effetti geotecnici: Onna



Effetti geotecnici: Paganica



Fig. I.8 Paganica: Danni ai tubi dell'acquedotto del Gran Sasso e lesioni in un'abitazione posta in prossimità (42°21'52.42''N 13°28'07.68''E)

Effetti geotecnici: Lago di Sinizzo



*Fig. I.10: fenomeni deformativi sulle sponde del lago Sinizzo
(42°17'25.23''N - 13°34'34.73''E)*

Effetti geotecnici: Lago di Sinizzo



Effetti geotecnici: Fossa



Effetti geotecnici: Fossa



Effetti strutturali: L'Aquila



Effetti strutturali: L'Aquila



Effetti strutturali: L'Aquila



Effetti strutturali: L'Aquila



Effetti strutturali: L'Aquila



Effetti strutturali: L'Aquila



Effetti strutturali: L'Aquila



Effetti strutturali: L'Aquila



Effetti strutturali: L'Aquila



Effetti strutturali: L'Aquila



Effetti strutturali: Onna



Effetti strutturali: Onna



Effetti strutturali: Onna



Effetti strutturali: Onna



Effetti strutturali: Onna



Effetti strutturali: Onna



Effetti strutturali: Onna



Effetti strutturali: Onna



La muratura nel terremoto de L'Aquila

- **Gli edifici in aggregato si sono comportati meglio di quelli isolati**
- **Gli edifici in muratura con pareti bene ammorsate e catene sono risultati molto meno danneggiati**
- **Tutto questo conferma che tutti i metodi per ridurre il rischio di meccanismi fuori dal piano sono i più efficaci**

Effetti strutturali: Onna



Effetti strutturali: L'Aquila



Effetti strutturali: L'Aquila



Effetti strutturali: CA a Pettino



Effetti strutturali: L'Aquila

