

IL TERREMOTO AQUILANO DEL 6 APRILE 2009: RILIEVO MACROSISMICO, EFFETTI DI SUPERFICIE ED IMPLICAZIONI SISMOTETTONICHE

Paolo Galli¹, Romano Camassi², Raffaele Azzaro³, Filippo Bernardini², Sergio Castenetto¹, Diego Molin¹, Edoardo Peronace¹, Antonio Rossi⁴, Maurizio Vecchi⁴ & Andrea Tertulliani⁴

¹DPC, Dipartimento Protezione Civile Nazionale, Roma (email: paolo.galli@protezionecivile.it)

²INGV Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia, Bologna

³INGV Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia, Catania

⁴INGV Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia, Roma

Al rilievo macrosismico hanno contribuito, in modi e tempi diversi: Arcoraci L., Berardi M., Buffarini G., Carlino S., Castellano C., Cavaliere A., D'Amico S., Del Mese S., Ercolani E., Gallipoli R., Graziani L., Leschiutta I., Lucantoni A., Maramai A., Marturano A., Massucci A., Mucciarelli M., Naso G., Paolini S., Platania R., Salimbeni S., Tripone D., Vannucci G., Verrubi V., Zuccarello L

RIASSUNTO: Galli P. et al., *Il terremoto aquilano del 6 aprile 2009: rilievo macrosismico, effetti di superficie ed implicazioni sismotettoniche*. (IT ISSN 0394-3356, 2009).

Viene dato ragguaglio sulle operazioni di rilievo macrosismico relative al terremoto aquilano del 6 Aprile 2009 (Mw=6.3; I₀=IX MCS) condotte dal QUEST e del risultato conseguito in termini di distribuzione delle intensità per 316 località visitate (vedi piano quotato ufficiale allegato). Il terremoto, che ha provocato la distruzione di numerosi centri abitati della conca Aquilana ed oltre 300 vittime, mostra un'area mesosismica allungata in direzione NW-SE, con una coda di forti risentimenti verso SE nella conca subèquana. Questo è in accordo con la geometria, cinematica e dinamica della rottura della struttura sismogenetica, individuata anche grazie alle evidenze di fagliazione di superficie seguite per circa 20 km lungo il versante nordorientale della Valle dell'Aterno, tra Collebrincioni e San Demetrio ne' Vestini (sistema di faglie di Paganica-San Demetrio). Tale struttura viene anche indicata responsabile del terremoto "gemello" del 1461, oltre che di eventi di più elevata energia, come analisi paleosismologiche e rilievi geologici in corso hanno confermato.

ABSTRACT: Galli P. et al., April 6, 2009 L'Aquila earthquake: macroseismic survey, surficial effects and seismotectonic implications. (IT ISSN 0394-3356, 2009).

In the night of April 6, 2009, a frightful earthquake (Mw=6.3) struck the L'Aquila region (central Apennines, Italy), awaking also million of citizens in the 100-km-far city of Rome. In the epicentral region the death toll reached 308, most in the town of L'Aquila. In only 90 minutes, the first experts of the Quick Earthquake Survey Team (QUEST) started the macroseismic survey, providing data on 40 localities within the first 16 hours, 70 on April 7, 130 on April 9, up to 316 at the end of the in situ survey (July; Tabs.1-2. GALLI & CAMASSI, 2009). The maximum intensity was given to Onna and Castelnuovo (9-10 MCS, Mercalli-Cancani-Sieberg scale), which were almost totally razed to the ground, while others four villages reached 9 MCS and three 8-9 MCS, amongst which L'Aquila (i.e., old town sector intramoenia). Most of the damage and collapses affect rubble-stone and/or masonry buildings, especially those which have been overloaded with not-collaborative R.C. roofs (Figs.1-3). The R.C. buildings generally experienced few structural damage, and only a dozen were involved in partial collapses (e.g., soft-first story; Fig.3A).

The mesoseismic area (7-8 MCS) is strongly NW-SE elongated, from the hypocentre zone (L'Aquila southwestern outskirts) toward the Aterno Valley (SE; Fig.4). This fact reflects the geometry, kinematics and rupture dynamics of the seismogenic fault, which has been recognized to be a N135° normal fault (dip at depth 55°), the surficial expression of which fits with the so-called Paganica-San Demetrio Fault System (PSDFS in Fig.5). In facts, we followed surficial breaks along ~19 km of this structure, from the village of Collebrincioni to the NW toward the one of San Demetrio ne' Vestini to the SE. In some places, we measured a maximum 15 cm offset across the fault, both on bedrock (carbonate and conglomerate) fault scarps, and in unconsolidated talus deposits (Fig.6).

The macroseismic effects distribution fits quite well with the few intensity datapoints of the 1461 event, that could be thus considered a historical "twin" of the 2009 earthquake. However, preliminary paleoseismological data show a more complex history of the Paganica faults, with coseismic offsets consistent with events much stronger than the 1461 and 2009 events. Therefore, we hypothesise that the PSDFS might generate both earthquakes with magnitude similar to the one of 1461 and 2009 (Mw~6.3), but also stronger events, rupturing together with adjacent structures, such as the Middle Aterno Fault System (MAFS in Fig.5). In this case, the length of the entire fault system (~35 km) would suggest the occurrence of Mw~6.9 earthquake, which is the magnitude class of many other Apennines events, like the 1915 (Fucino) and 1980 (Irpina) ones.

Parole chiave: L'Aquila, macrosismica, Media Valle dell'Aterno, sismotettonica, fagliazione di superficie

Keywords: L'Aquila earthquake, macroseismics, Middle Aterno Valley, seismotectonics, surface faulting.

1. INTRODUZIONE

La notte tra domenica e lunedì 6 Aprile 2009, alle 3.32 locali, un terremoto di Mw=6.3 (Ml=5.8) ha devastato il centro storico della città di L'Aquila (Figg.1-2) e decine di paesi lungo la Valle del Fiume Aterno. L'area

mesosismica (i.e., I₀>VII-VIII MCS), allungata per circa 20 km in direzione NW-SE, comprende 16 località con I₀≥VIII MCS, delle quali 6 hanno subito effetti di IX grado o superiori, tra cui Castelnuovo ed Onna (IX-X), che sono risultati i paesi maggiormente danneggiati. Il terremoto ha provocato 308 vittime, la maggior parte

delle quali nel centro storico dell'Aquila (circa 200), ad Onna (41) ed a Villa Sant'Angelo (17).

La rottura della faglia responsabile del *mainshock* si è enucleata ad una profondità di circa 9 km (INGV, 2009) su una struttura normale orientata N135°/55° (USGS, 2009), lungo l'emergenza della quale sono stati riconosciuti numerosi sistemi di fratturazione di superficie (*surficial break*), assimilabili nel complesso a fagliazione superficiale (faglie Collebrincioni-San Demetrio in MESSINA *et al.*, 2009; FALCUCCI *et al.*, 2009). Il terremoto è stato preceduto da una lunga sequenza sismica ($M_l < 4.0$) iniziata nella seconda metà di dicembre nella zona a sudovest di L'Aquila (bacino di Roio) e culminata con un evento di $M_l = 4.1$ il 30 Marzo 2009. Due scosse avvenute a cavallo della mezzanotte del 5 Aprile ($M_l = 3.9$ e $M_l = 3.5$), fortemente avvertite dalla popolazione aquilana, hanno indotto molte persone a passare la notte nelle automobili od a spostarsi in luoghi ritenuti più sicuri, così che l'evento devastante delle 3.32 ha causato forse meno vittime di quante la gravità dei danni ne avrebbe provocato. Certamente più alto sarebbe stato poi il numero di abitanti coinvolti in crolli se il terremoto fosse avvenuto di giorno, atteso il numero e l'importanza di alcuni edifici pubblici fortemente danneggiati o crollati (p.e., la prefettura di L'Aquila – Fig.2 - e diverse scuole in tutta la provincia).

A tutto Luglio, al *mainshock* sono seguite quasi 2000 scosse con $M_l > 2$, delle quali 195 con $M_l > 3$, 20 con $M_l > 4$, oltre a due eventi con $M_w = 5.4$ e $M_w = 5.6$ che hanno provocato un aggravamento, seppur modesto, del quadro del danneggiamento. Al momento della stesura di questa nota, la sequenza è ancora in atto, con eventi localizzati sia nell'area mesosismica, che a NW di L'Aquila (zona Amatrice-Monteverde, i.e., faglia dei Monti della Laga: GALADINI & GALLI, 2000).

Nel seguito si dà ragguaglio sulle operazioni di rilievo macrosismico, fornendo il piano quotato "ufficiale" del terremoto (Tab.1; GALLI & CAMASSI, 2009). Si discute, inoltre, sugli effetti di fagliazione superficiale osservati e sulle implicazioni di *hazard* sismico che questa nuova attesa lezione di geologia del terremoto ha comportato sulle conoscenze sismotettoniche della regione.

¹ I valori di strike e dip variano a seconda del metodo usato. Da 113° a 147° di strike e da 43° a 60° di dip. Gli ipocentri si allungano comunque lungo un piano pendente 55° in profondità.



Fig. 1 - L'Aquila, centro storico (Via Roma). Edifici in muratura mista a pietra semicrollati (foto P.G.)

View of the partial collapse of masonry buildings (mixed stones and bricks) in the old town of L'Aquila (Roma Street).



Fig. 2 - L'Aquila, edificio della Prefettura in crollo semitotale (foto P.G.)

View of the Prefect's building, which collapsed in L'Aquila old town.

Tab. 1 - Piano quotato in scala MCS del terremoto del 6 aprile 2009 (solo località direttamente rilevate dagli operatori QUEST)

MCS intensity surveyed by the QUEST for the April 6, 2009 L'Aquila earthquake.

Località	Comune	Prov	Lat	Lon	Ia	Località	Comune	Prov	Lat	Lon	Ia
Castelluccio	Castelluccio	MC	42.295	13.628	9.5	Collepietro	Collepietro	MC	42.221	13.780	5.5
Onna	L'Aquila	MC	42.322	13.480	9.5	Collicello	Cagnano Amiterno	MC	42.461	13.220	5.5
San Gregorio	L'Aquila	MC	42.327	13.430	9.5	Cornino	Cornino	MC	42.346	13.348	5.5
San'Eusebio Forconese	San'Eusebio Forconese	MC	42.268	13.526	9.0	Fiamignano	Fiamignano	MC	42.265	13.126	6.5
Tempera	L'Aquila	MC	42.366	13.498	9.0	Fiuggi	Cagnano Amiterno	MC	42.470	13.213	5.5
Villa Sant'Angelo	Villa Sant'Angelo	MC	42.269	13.538	9.0	Forne	Massa d'Albe	MC	42.112	13.444	5.5
L'Aquila	L'Aquila	MC	42.338	13.430	9.5	Froscauro	Cagnano Alto	MC	42.240	13.693	5.5
Poggio di Roni	L'Aquila	MC	42.331	13.378	8.5	Frattali	Crognaleto	MC	42.577	13.466	5.5
Poggio Picenze	Poggio Picenze	MC	42.320	13.541	8.5	Frattura Vecchia	Scanno	MC	41.940	13.864	5.5
Bazzano	L'Aquila	MC	42.337	13.485	8.0	Gagliano Aterno	Gagliano Aterno	MC	42.126	13.701	5.5
Castelluccio	Castelluccio	MC	42.301	13.620	9.0	Guglione	Isola del Gran Sasso d'Italia	MC	42.501	13.688	5.5
Colle di Roio	L'Aquila	MC	42.342	13.349	8.0	Molina Aterno	Molina Aterno	MC	42.149	13.736	5.5
Paganica	L'Aquila	MC	42.358	13.473	8.0	Nerito	Crognaleto	MC	42.548	13.479	5.5
Roiu Piano	L'Aquila	MC	42.327	13.357	8.0	Ortolano	Campotosto	MC	42.520	13.425	5.5
Sant'Arcangelo	L'Aquila	MC	42.291	13.254	9.0	Pinivittoli	Pinivittoli	MC	42.268	14.080	6.5
Tussillo	Villa Sant'Angelo	MC	42.257	13.531	8.0	Pietranico	Pietranico	MC	42.276	13.911	5.5
Arischia	L'Aquila	MC	42.419	13.342	7.5	Poggio Cancelli	Campotosto	MC	42.561	13.328	5.5
Dagno Grande	L'Aquila	MC	42.307	13.422	7.5	Pratola Peligna	Pratola Peligna	MC	42.090	13.075	5.5
Carnada	L'Aquila	MC	42.300	13.424	7.5	Prata	Amatrice	MC	42.516	13.345	5.5
Civita di Bagno	L'Aquila	MC	42.308	13.445	7.5	Pratara	Isola del Gran Sasso d'Italia	MC	42.486	13.668	5.5
Colle di Lucoli	Lucoli	MC	42.308	13.334	7.5	Ripa	Fagnano Alto	MC	42.268	13.581	5.5
Fagnano Alto (Vallecoppa)	Fagnano Alto	MC	42.254	13.676	7.6	Rozzano	Castel Caotogna	MC	42.664	13.726	5.5
Fossa	Fossa	MC	42.296	13.487	7.5	Rosciolo dei Marsi	Magliano de' Marsi	MC	42.117	13.339	5.5
Gignano	L'Aquila	MC	42.260	13.743	7.5	Salasano	Civitanova	MC	42.238	13.737	5.5
Prescorreggione	L'Aquila	MC	42.356	13.510	7.5	San Benedetto in Perillis	San Benedetto in Perillis	MC	42.184	13.771	5.5
San Benedetto	L'Aquila	MC	42.303	13.440	7.6	San Giovanni	Cagnano Amiterno	MC	42.462	13.268	6.6
San Felice d'Ocre	Ocre	MC	42.293	13.455	7.5	San Giovanni Paganica	Monterea	MC	42.506	13.276	5.5
San Giovanni	L'Aquila	MC	42.288	13.420	7.5	San Martino	Isola del Gran Sasso d'Italia	MC	42.290	13.683	5.5
Sant'Angelo	L'Aquila	MC	42.302	13.430	7.5	San Pio	Fontecchio	MC	42.230	13.012	5.5
Torretta	L'Aquila	MC	42.346	13.416	7.5	San Pio delle Camere	San Pio delle Camere	MC	42.266	13.656	5.5
Bagno Piccolo	L'Aquila	MC	42.308	13.426	7.0	San Valentino in Abruzzo Citeriore	San Valentino in Abruzzo Citeriore	MC	42.233	13.987	6.5
Castelvecchio Subegeo	Castelvecchio Subegeo	MC	42.151	13.511	6.5	Sant'Aliphan	Monteleone	MC	42.582	13.422	5.5
Citaretonga	Navoli	MC	42.246	13.706	7.0	Santa Giusta di Goriano Valli	Tione degli Abruzzi	MC	42.181	13.862	6.6
Collefraturo	L'Aquila	MC	42.324	13.323	7.0	Santa Lucia	Monteleone	MC	42.570	13.262	5.5
Collerano	L'Aquila	MC	42.285	13.560	7.0	Santa Maria del Monte	Bolognano	MC	42.233	13.962	5.5
Cupello	Fagnano Alto	MC	42.240	13.620	7.0	Sant'Onofrio	L'Aquila	MC	42.402	13.642	5.5
Goriano Sicoli	Goriano Sicoli	MC	42.080	13.775	7.0	Santo	Monteleone	MC	42.486	13.668	5.5
Pedicciano	Fagnano Alto	MC	42.239	13.593	7.0	Santo Inna	Divoli	MC	42.186	13.510	5.5
Pettino	L'Aquila	MC	42.375	13.395	7.0	Secinaro	Secinaro	MC	42.154	13.679	5.5
Pianola	L'Aquila	MC	42.322	13.404	7.0	Teramerola	Teramo	MC	42.324	13.636	5.5
Roccoli	L'Aquila	MC	42.275	13.364	7.0	Torano	Tocco da Casauria	MC	42.214	13.714	5.5
Roccapreturo	Acciano	MC	42.195	13.697	7.0	Tormintane	Borghese	MC	42.152	13.259	6.5
San Martino d'Ocre	Ocre	MC	42.273	13.477	7.0	Tormintane (villagrande)	Tormintane	MC	42.280	13.301	5.5
Tione degli Abruzzi	Tione degli Abruzzi	MC	42.304	13.836	7.0	Tuscani	Prata d'Ansidonia	MC	42.268	13.841	6.6
Valle di Sinello	L'Aquila	MC	42.242	13.620	6.5	Ventosa	Monteleone	MC	42.582	13.217	5.5
Carapelle Calvisio	Carapelle Calvisio	MC	42.298	13.684	6.5	Vestea	Civitella Casanova	MC	42.388	13.896	5.5
Casamaina	Lucoli	MC	42.259	13.391	6.5	Villa Illi	Colledara	MC	42.533	13.665	5.5
Canasessa	L'Aquila	MC	42.383	13.344	6.5	Villa Salaria	Castel Castagna	MC	42.547	13.776	6.5
Castel di Ieri	Castel di Ieri	MC	42.114	13.421	6.5	Villa Santa Maria	Ottona dei Marsi	MC	42.391	13.740	5.5
Cavalletto	Ocre	MC	42.306	13.459	6.5	Villapiano	Isola del Gran Sasso d'Italia	MC	42.491	13.685	5.5
Coppito	L'Aquila	MC	42.366	13.244	6.5	Accumoli	Accumoli	MC	42.694	13.248	5.0
Lucoli (Collimento)	Lucoli	MC	42.291	13.339	6.5	Amatrice	Amatrice	MC	42.628	13.290	5.0
Lucoli Alto	Lucoli	MC	42.268	13.350	6.5	Antrodoco	Antrodoco	MC	42.415	13.076	5.0
Prata d'Ansidonia	Prata d'Ansidonia	MC	42.277	13.609	6.5	Avversara degli Abruzzi	Avversara degli Abruzzi	MC	41.983	13.004	5.0
San Demetrio ne' Vestini	San Demetrio ne' Vestini	MC	42.288	13.558	6.5	Aprati	Crognaleto	MC	42.552	13.478	5.0
Barisciano	Barisciano	MC	42.330	13.536	6.5	Avezzano	Avezzano	MC	42.032	13.426	5.0
Santo Stefano di Sessanio	Santo Stefano di Sessanio	MC	42.343	13.645	6.5	Bagno	Posta	MC	42.434	13.126	5.0
Stile	San Demetrio ne' Vestini	MC	42.256	13.545	6.5	Baldone	Civitanova	MC	42.088	13.923	5.0
Terminia	Fagnano Alto	MC	42.261	13.584	6.5	Bagnano	Sulmona	MC	42.190	13.917	5.0
Vado	Lucoli	MC	42.292	13.348	6.5	Bisenti	Bisenti	MC	42.528	13.802	5.0
Villa Cavallotti Venditti	Tione degli Abruzzi	MC	42.182	13.868	6.5	Bolognano	Bolognano	MC	42.217	13.961	5.0
Villa Grande	Tione degli Abruzzi	MC	42.149	13.674	6.5	Borghese	Borghese	MC	42.512	13.374	5.0
Arano	L'Aquila	MC	42.396	13.459	6.0	Calascio	Calascio	MC	42.325	13.696	5.0
Aringo	Monterea	MC	42.554	13.268	6.0	Campo di Fiano	Prezza	MC	42.054	13.880	5.0
Arzita	Arzita	MC	42.502	13.764	6.0	Canera	Castel Sant'Angelo	MC	42.384	13.031	5.0
L'Aquila	L'Aquila	MC	42.414	13.605	6.0	Cassiano	Cassiano	MC	42.304	14.013	5.0
Barete	Barete	MC	42.450	13.283	6.0	Capradosso	Petrella Salto	MC	42.328	13.023	5.0
Barisciano	Barisciano	MC	42.325	13.592	6.0	Castel Sant'Angelo	Castel Sant'Angelo	MC	42.393	13.023	5.0
Beffi	Acciano	MC	42.192	13.679	6.0	Castrovalva	Avversara degli Abruzzi	MC	41.002	13.014	5.0
Capriano	Capriano	MC	42.244	13.668	6.0	Casignano	Casignano	MC	42.546	13.989	5.0
Brittoli	Brittoli	MC	42.316	13.851	6.0	Cavalletti	Monteleone	MC	42.535	13.251	5.0
Bugnara	Bugnara	MC	42.022	13.862	6.0	Cellino Attanasio	Cellino Attanasio	MC	42.888	13.889	5.0
Bucci sul Tirino	Bucci sul Tirino	MC	42.310	13.826	6.0	Cepagatti	Cepagatti	MC	42.364	14.071	6.0
Campotosto	Campotosto	MC	42.558	13.268	6.0	Cerro	Fossa	MC	42.289	13.498	5.0
Capestrano	Capestrano	MC	42.179	13.719	6.0	Crognaleto	Crognaleto	MC	42.581	13.717	5.0
Caporciano	Caporciano	MC	42.250	13.674	6.0	Chieti	Chieti	MC	42.351	14.168	5.0
Casale	L'Aquila	MC	42.013	13.787	6.0	Chieti Scalo	Chieti	MC	42.357	14.139	5.0
Casavecchia	Lucoli	MC	42.309	13.330	6.0	Cittaducale	Cittaducale	MC	42.386	12.949	5.0
Castel del Monte	Castel del Monte	MC	42.235	13.727	6.0	Cittareale	Cittareale	MC	42.469	13.162	5.0
Castelli	Castelli	MC	42.400	13.712	6.0	Civitaquana	Civitaquana	MC	42.325	13.099	5.0
Castelvecchio Calvisio	Castelvecchio Calvisio	MC	42.310	13.688	6.0	Pescorachiano	Pescorachiano	MC	42.208	13.182	5.0
Castiglione della Valle	Colledara	MC	42.550	13.676	6.0	Petrella Salto	Petrella Salto	MC	42.279	13.082	5.0
Colelara	Colelara	MC	42.211	13.671	6.0	Colla Fagnanica	Monteleone	MC	42.582	13.217	5.0
Crotomarsano	Scoppito	MC	42.563	13.280	6.0	Collasso	Monteleone	MC	42.539	13.217	6.0
Civitella Casanova	Civitella Casanova	MC	42.364	13.889	6.0	Cornilio Nuovo	Amatrice	MC	42.614	13.332	5.0
Collarmele	Collarmele	MC	42.059	13.627	6.0	Cortina	Cortina	MC	42.622	13.509	5.0
Collibrucchi	Pizzoli	MC	42.427	13.421	6.0	Corvara	Corvara	MC	42.275	13.974	5.0
Contra Convento	Castelli	MC	42.483	13.713	6.0	Corvaro	Rotoposca	MC	42.705	13.767	5.0
Cugnoli	Cugnoli	MC	42.308	13.933	6.0	Crognaleto	Crognaleto	MC	42.587	13.490	5.0
Faiano	Montorio al Vomano	MC	42.554	13.630	6.0	Fandola	Fandola	MC	42.441	13.624	5.0
Fano Adriano	Fano Adriano	MC	42.552	13.638	6.0	Fiumata	Petrella Salto	MC	42.249	13.086	5.0
Filletto	L'Aquila	MC	42.378	13.520	6.0	Fontarile	Posta	MC	42.543	13.120	5.0
Fontevignone	Rocca di Mezzo	MC	42.255	13.511	6.0	Fonte D'Amore	Sulmona	MC	42.081	13.930	5.0
Fontecchio	Fontecchio	MC	42.228	13.806	6.0	Forca di Penne	Capestrano	MC	42.262	13.936	5.0
Fontrossa	L'Aquila	MC	42.372	13.626	6.0	Gaglianico	Fiumignano	MC	42.359	13.193	5.0
Genzano	Genzano	MC	42.350	13.323	6.0	Gioia dei Marsi	Gioia dei Marsi	MC	42.487	13.052	5.0
Molino Galomere	Tormintane	MC	42.024	13.202	6.0	Grotti	Cittaducale	MC	42.355	12.9	

2. SISMICITA' DELL'AREA

L'area dell'alta e media valle dell'Aterno è stata colpita con frequenza da terremoti di elevata energia, alcuni dei quali di origine locale. La storia sismica di questa regione rievoca, naturalmente, quella di L'Aquila che, dalla sua fondazione - avvenuta nel tardo XIII secolo - ha subito per ben 6 volte effetti superiori al VII MCS, con punte di IX grado in occasione dei terremoti del 9 Settembre 1349, 27 Novembre 1461 e 2 Febbraio 1703.

A parte un forte evento del 1315 (noto solo attraverso poche fonti ed attualmente parametrizzato con $M_w=5.6$ in GRUPPO DI LAVORO CPTI, 2008; da ora CPTI08), il primo terremoto ad arrecare gravissimi danni a L'Aquila ed effetti non bene quantificabili in alcuni paesi del reatino e della conca peligna fu appunto quello del 1349 ($M_w=6.5$ in GRUPPO DI LAVORO CPTI, 2004 - da ora CPTI04; ma vedi in CPTI08, dove con gli stessi dati di base è stato parametrizzato con $M_w=5.9$). Questo terremoto ha avuto in realtà diverse aree epicentrali, la più importante delle quali presso Venafro ($M_w=6.7$, GALLI & NASO, 2009); quella aquilana, molto complessa, con danni tra Sulmona, L'Aquila e la Valle del Salto resta di dubbia comprensione, specie per quanto attiene alla sorgente sismogenetica.

Il successivo evento del 1461 (vedi anche in Rossi *et al.*, 2005) colpì duramente gli stessi paesi distrutti dal terremoto del 2009, ed in particolare Onna, Castelnuovo, Poggio Picenze e Sant'Eusanio Forconese (X MCS), L'Aquila (IX), sino al lontano Castelvecchio Subéquo² (VIII). Similmente al terremoto del 2009, quello del 1461 fu caratterizzato da una lunga sequenza sismica, protrattasi da novembre al marzo successivo, con diversi *mainshocks*.

Nuovamente l'area aquilana fu devastata dal terremoto del 2 Febbraio 1703 ($M_w=6.7$), probabilmente l'evento storico più gravoso per l'Appennino umbro-abruzzese insieme alla scossa del 14 gennaio dello stesso anno, localizzata in area nursina ($M_w=6.7$). In quell'occasione a L'Aquila l'intensità è stata stimata del IX grado MCS, mentre molti dei paesi più duramente colpiti dal terremoto del 2009 ebbero effetti valutabili con intensità tra l'VIII ed il IX MCS (p.e., Poggio Picenze, San Gregorio, Sant'Eusanio Forconese, Paganica, Bazzano, Onna, Santa Rufina e Tempera), ivi compreso Castelnuovo che raggiunse il X grado MCS.

Un ultimo terremoto distruttivo in due località fortemente danneggiate nell'Aprile 2009 avvenne il 6 Ottobre del 1762 (Castelnuovo IX-X MCS e Poggio Picenze IX), anche se l'elevata intensità in queste due località mal si comprende osservando i bassi valori dei paesi vicini o la scarsità o assenza di notizie per tutti gli altri limitrofi.

Infine, un altro evento sismico con origine locale - a parte i due accaduti nel 1786 e nel 1791 (con possibili effetti a L'Aquila di VII e VII-VIII) - occorse il 24 giugno del 1958 con $M_w \sim 5$ (Rossi *et al.*, 2005). Il terremoto

ebbe effetti di VII grado in alcuni degli stessi paesi ora gravemente danneggiati (Onna e Bazzano), oltre che a San Demetrio ne' Vestini e la sua area di risentimento, seppur scalata di diversi gradi, ricalca quella dell'evento del 2009.

3. IL RILIEVO MACROSISMICO

In occasione di terremoti al di sopra della soglia del danno, un gruppo di "pronto intervento macrosismico" (QUEST: QUick Earthquake Survey Team) composto da operatori afferenti a diverse istituzioni si attiva al fine di realizzare il rilievo speditivo del danneggiamento in termini di scala MCS (SIEBERG, 1930). Tale rilievo serve in primo luogo da supporto decisionale alle operazioni di Protezione Civile e, a posteriori, come strumento per implementare il database macrosismico nazionale. La prima e più urgente finalità viene ottemperata sia nell'immediatezza dell'evento (p.e., tramite l'indirizzo dei primi soccorsi ed il dispiegamento mirato dei mezzi di supporto alla gestione dell'emergenza nelle varie località), sia in seguito, per l'individuazione dei comuni danneggiati da inserire eventualmente nei decreti legge contenenti misure in favore delle popolazioni³. Proprio in quest'ottica, e cioè al fine di dare una visione oggettiva ed istantanea del danneggiamento al Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, viene adottata la scala MCS, applicata secondo le specifiche proposte da MOLIN (2003), che prevedono esplicitamente la definizione di percentuali dei diversi livelli di danno presenti.

Successivamente, il rilievo viene ripetuto - in alcune località anche in termini di scala EMS - ed esteso regionalmente al fine di poter parametrizzare il terremoto dal punto di vista macrosismico e renderlo confrontabile ai terremoti storici contenuti nei repertori macrosismici nazionali (p.e., DBMI04, STUCCHI *et al.*, 2007).

Nella notte del 6 aprile, l'attivazione degli operatori QUEST è avvenuta in maniera "forzata", non fosse altro perché quelli residenti a Roma sono stati svegliati insieme al resto della popolazione della Capitale dalle scosse del terremoto. Questo ha fatto sì che la prima squadra iniziasse il rilievo alle prime luci dell'alba, seguita da una seconda nel pomeriggio e da altre nei giorni successivi, fino ad oltre 5 squadre che hanno agito a rotazione per diversi giorni. In breve, la sera del 6 Aprile erano state rilevate 40 località, divenute 70 il giorno dopo, 130 il 9 Aprile, 185 il 15 Aprile, 281 il 26 Maggio e 316 il 1° Luglio (Tab.1). Molte di queste località sono state visitate da squadre diverse e molte sono state riviste in tempi successivi al fine di rendere omogenea la valutazione del grado e di verificare eventuali aggravamenti del danneggiamento.

3.1 Tipologie edilizie e condizioni di manutenzione

Occorre sottolineare che nell'area aquilana (e nello stesso capoluogo) sono presenti tipologie e condizioni edilizie molto diverse. Insieme a nuclei di edilizia

²Nei repertori sismologici correnti è erroneamente riportato Castelvecchio Calvisio, ma il toponimo *Castroveterum* attestato nella fonte sincrona è da riferirsi a C. Subéquo (P. GALLI, dati inediti).

³Per i terremoti con una vasta ed importante area di danneggiamento

storica in pietra, solitamente non squadrata (spesso ciottoli alluvionali), di pezzatura molto irregolare e con sporadiche presenze di muratura a sacco (rilevanti in alcuni casi in cui gli effetti di danno sono risultati gravissimi, in particolare per l'edilizia monumentale), convivono nuclei di edifici in cemento armato, recenti o meno recenti (Fig. 3).

All'interno dei centri storici di numerose località, fra gli edifici in pietra sono presenti gruppi di edifici in completo abbandono da decenni e parzialmente diroccati già prima del terremoto. Allo stesso tempo convivono nel medesimo insediamento edifici in muratura utilizzati abitualmente e in normali condizioni di manutenzione, edifici in pietra, mattoni o blocchetti di cemento, con solai e coperture in laterocemento, insieme a ville o condomini molto recenti in cemento armato.

In qualche caso si osservano edifici in muratura in cui sono visibili interventi relativamente recenti, con la sovrapposizione di una cordolatura e una copertura in cemento armato. Come osservato anche in occasione del terremoto del 1997 in Umbria Marche, questi interventi, senza un contestuale rinforzo delle strutture verticali, hanno solitamente determinato effetti negativi – ed a volte catastrofici – sulle murature (Fig.3B).

La distribuzione spaziale di queste tipologie edilizie, nei diversi centri, è risultata molto variabile: in qualche caso gli edifici più recenti rappresentano la semplice espansione centrifuga del vecchio centro abitato, in qualche altro caso ne sono una diramazione, in perfetta continuità, in una data direzione, oppure sono dislocati in un'area adiacente, ma significativamente diversa.

Nel complesso si è osservato che gli edifici in C.A. hanno riportato percentualmente pochi danni strutturali. Solo in pochi casi si è verificato il collasso della struttura o di almeno un piano, come per una dozzina di edifici in L'Aquila, un edificio di Pianola (vedi Fig.3A), due tra Pettino e Cansatessa ed uno a San Gregorio. La maggior parte dei danni più gravi e dei crolli sono stati a carico degli edifici in pietra, in muratura e misti, soprattutto per quanto riguarda le parti più elevate dei manufatti (tetti, cornicioni, spigoli ecc...). In molti altri casi si è osservato il crollo totale dei solai all'interno di murature all'apparenza intatte.

3.2 Stima degli effetti

Questa variabilità di situazioni ha reso molto complessa la stima dell'intensità macrosismica, ponendo un serio problema per quanto concerne la comparazione dell'intensità MCS con quella assegnata per i terremoti di epoca medievale e moderna, evidentemente espressione di effetti relativi ad un patrimonio edilizio corrispondente a quello tuttora esistente nei soli centri storici. Dal momento che molti di questi ultimi, come accennato, sono urbanisticamente separati dagli agglomerati più recenti, si è ipotizzato di poter assegnare stime di intensità distinte. Nel far questo è emerso che per alcune località l'intensità macrosismica assegnata al solo nucleo storico era maggiore anche di 2 gradi MCS di quella assegnata alla località per intero. Infatti, laddo-

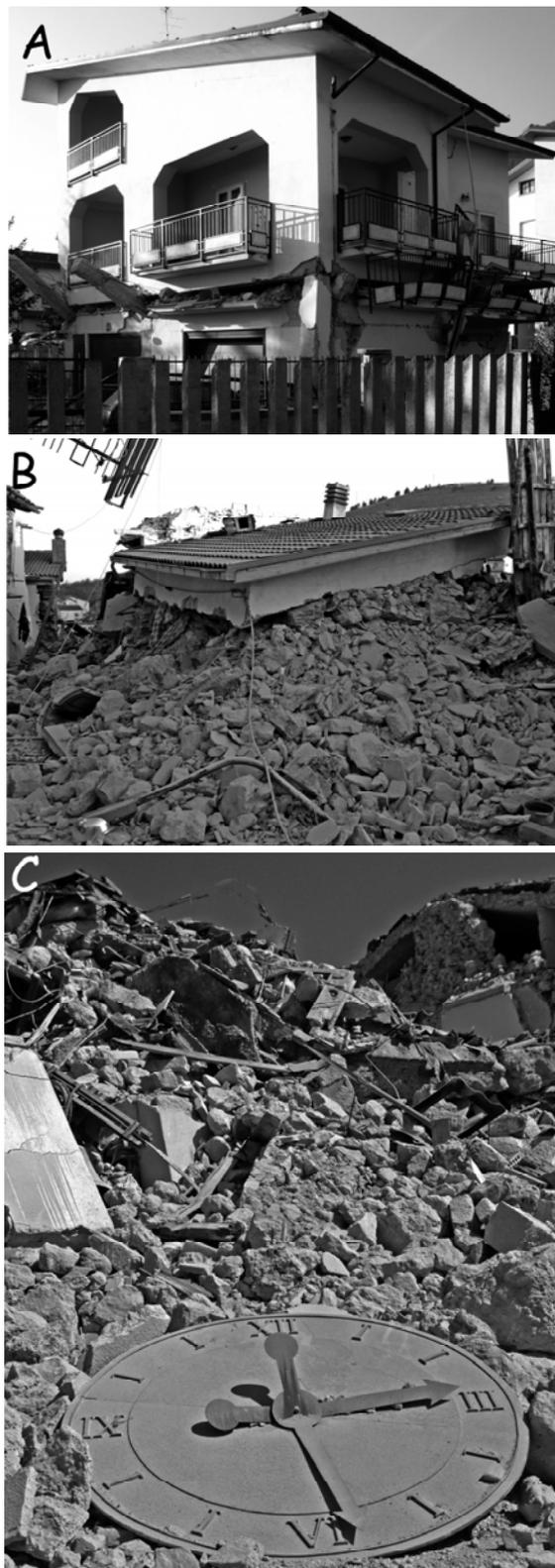


Fig. 3 - Esempi di danneggiamento subito da diverse tipologie di edifici. A, Pianola, edificio in C.A. con schiacciamento totale del primo piano; notare l'estrusione dei pilastri. B, Poggio di Roio, crollo totale di edificio in pietra al di sotto del tetto spingente in C.A.; C, crollo totale di edificio in pietra (chiesa di San Biagio a Tempera). L'orologio del piccolo campanile a vela segna l'ora del disastro (foto P.G.).

Damage affecting different building typologies in villages of the mesoseismic area. A, Pianola, crushing of the first storey of a R.C. building (note the out-folded pillars). B, Poggio di Roio, total collapse of a stone-masonry building under its heavy R.C. roof. C, total collapse of a stone-masonry church (San Biagio in Tempera; note the clock of the bell-tower, marking the time of the earthquake).

⁴Dato non riportato in Tab.1, poiché non sistematicamente raccolto.

ve l'abitato è rimasto contenuto nel centro storico, il grado MCS non differisce da quello assegnato all'intero abitato (p.e., Sant'Eusanio Forconese, Onna, Villa Sant'Angelo, Casentino), mentre per altri la differenza oscilla tra 1/2 e 2 gradi. Un caso significativo è quello di Poggio di Roio dove l'intensità nel nucleo storico sarebbe X-XI, mentre nella porzione nuova solo VII.

Questo problema è stato affrontato con particolare attenzione per l'area urbana di L'Aquila, che è stata esplorata con molta attenzione anche per consentirne una valutazione in termini di scala EMS. La stima di intensità che si formula per L'Aquila è sostanzialmente riferita all'area del centro storico, mentre il danneggiamento delle aree periferiche è sostanzialmente inferiore, di oltre un grado della scala MCS, rispetto all'area del centro storico.

4. DISTRIBUZIONE DELLE INTENSITÀ E PARAMETRI DEL TERREMOTO

Come sempre accade per i terremoti legati all'attivazione di strutture di dimensioni chilometriche (p.e., in Appennino centrale: terremoto del Fucino del 1915: MOLIN *et al.*, 1999; terremoto di Colfiorito, 1997: GALLI & GALADINI, 1999; MESSINA *et al.*, 2002), la distribuzione degli effetti in occasione dell'evento dell'aprile 2009 è stata guidata dalla geometria e orientazione della faglia attivata e dal verso di propagazione della rottura. La Figura 4 mostra bene questa situazione, con l'area mesosismica ($I_s \geq VII$) concentrata nell'*hangingwall* del sistema di faglie di Paganica-San Demetrio (PSDFS) e con un'importante "coda" di elevate intensità (VII) in direzione SE, lungo la media Valle dell'Aterno, sin verso la conca subéquana. Qui in particolare, Castelvecchio Subéquo e Goriano Sicoli hanno subito gravi danni (VII MCS), nonostante siano ubicati a circa 40 km dall'ipocentro strumentale.

In area mesosismica, come accennato, l'intensità massima è stata assegnata a Castelnuovo e ad Onna ($I_s = IX-X$ MCS), dove circa la metà degli edifici sono crollati e comunque gran parte

sono andati distrutti, con la morte di oltre un decimo della popolazione residente quella notte (circa 350 persone). Estese distruzioni e crolli (IX MCS) hanno subito anche altre frazioni ubicate in prossimità dell'emergenza in superficie della faglia, come Tempera (8 vittime), San Gregorio (8 vittime), San Demetrio (3 vittime) e Villa Sant'Angelo (17 vittime), mentre distruzioni e crolli più localizzati (VIII MCS) hanno interessato altre località prossime alla faglia, quali Paganica (5 vittime), Bazzano (1 vittima), Casentino e Tussillo.

Nella zona più prossima all'epicentro strumentale, a parte le gravi distruzioni ed i numerosi crolli parziali

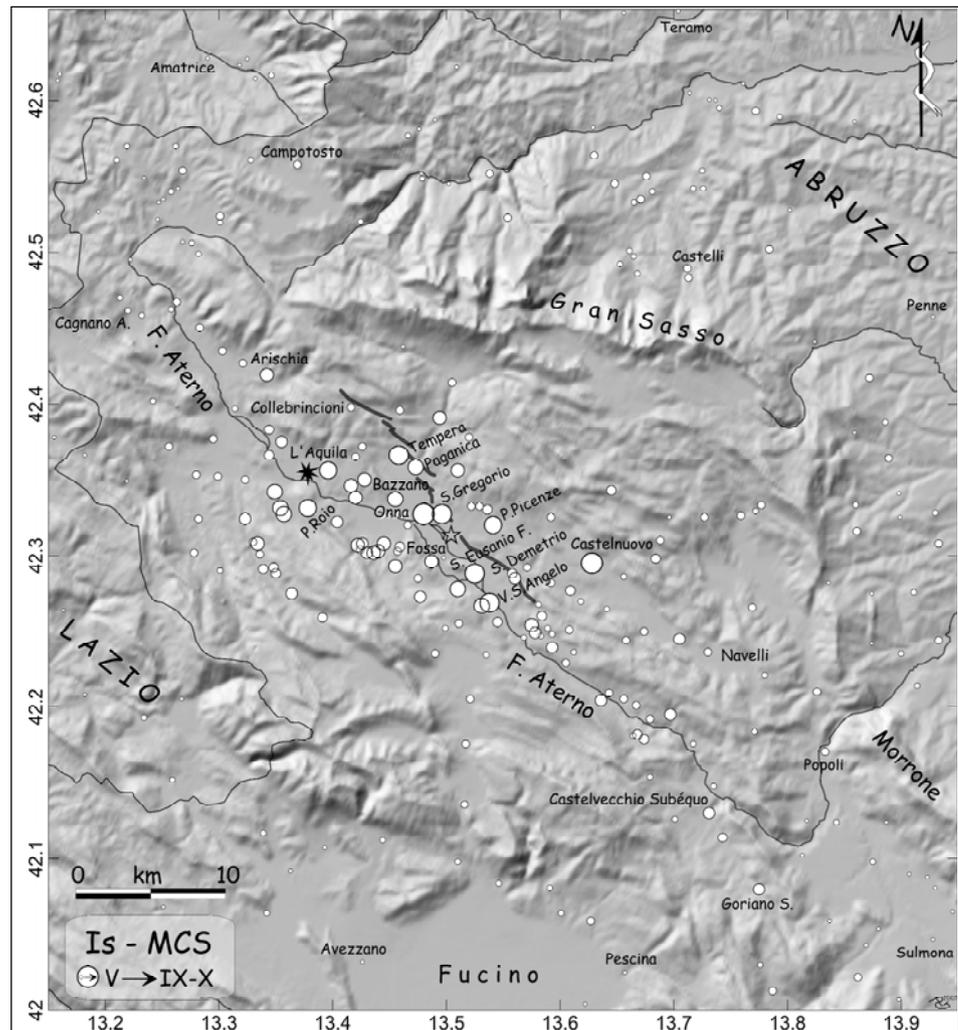


Fig. 04 - Distribuzione delle intensità macrosismiche rilevate dal QUEST in occasione del terremoto del 6 Aprile 2009 (GALLI & CAMASSI, 2009). La stella vuota è l'epicentro macrosismico calcolato mediante l'algoritmo Boxer (GASPERINI, 2004). Quella piena è l'ipocentro strumentale (rilocalizzazione INGV, 2009). Le linee in grigio rappresentano il sistema di faglie di Paganica-San Demetrio, responsabile del terremoto (faglia normale immergente a SW, caratterizzata per tutta la sua lunghezza da *surficial breaks* e/o rigetti massimi di 10-15 cm). Notare come l'area mesosismica sia quasi interamente sviluppata nell'*hangingwall* della faglia ed anche il marcato effetto di direttività della rottura, evidenziata dall'estensione verso SE delle intensità più elevate, dall'ipocentro nella conca aquilana sino a quella subéquana (Castelvecchio Subéquo-Goriano Sicoli).

Intensity datapoint distribution surveyed by the QUEST. The empty star is the macroseismic epicentre, while the black one is the instrumental hypocenter. Gray lines represent the SW-dipping Paganica-San Demetrio fault system, which was the structure responsible for the earthquake and where surface faulting effects were observed along its entire length (max. offset 10-15 cm). It is worth noting that the mesoseismic area is almost entirely extended in the hangingwall of the fault, with a SE-directivity effect, from the hypocenter zone toward the Subéquana Valley (Castelvecchio Subéquo-Goriano Sicoli).

del centro storico di L'Aquila (VIII-IX MCS, circa 200 vittime), vi è da segnalare nel bacino di Roio la distruzione pressoché totale del centro storico di Poggio di Roio (di fatto un X-XI MCS) ed i gravissimi danni ad altre tre località limitrofe (Colle di Roio, Santa Rufina e Roio Piano, VIII MCS).

In questo grave quadro di danneggiamento emergono alcune anomalie di intensità verso il basso che, a parità di tipologia costruttiva e vulnerabilità degli edifici, appaiono spiegabili appieno solo con effetti di deamplificazione del moto del suolo; queste riguardano il paese di Monticchio, nel quale - a meno di isolate eccezioni nella periferia dell'abitato - sono state osservate solo lesioni lievi in poche decine di edifici (VI MCS) e la frazione di Cerro (Fossa), ove non vi sono stati praticamente danni (V MCS). E' da sottolineare come queste località siano prossime (1-2 km) ad Onna, il primo, ed a Fossa (VII-VIII, 4 vittime) il secondo.

Altre anomalie, questa volta spiccatamente verso l'alto, sono rappresentate dal nucleo storico di Poggio Picenze (VIII-IX MCS, 5 vittime) ed il già citato Castelnuovo (IX-X MCS, 5 vittime), entrambi ubicati nel *footwall* della faglia e circondati da località con Is comprese tra il V-VI ed il VI-VII. In particolare Castelnuovo appare come il più evidente effetto di amplificazione locale dell'intero terremoto, ubicato come è in cima ad una collinetta di limi bianchi del Pleistocene inferiore. Anche in questo caso, di fatto, l'acropoli fortificata è stata rasa praticamente al suolo (X-XI MCS) come già accaduto nel 1461.

Sebbene anche l'area di VI grado appaia allungata in direzione NW-SE per oltre 70 km, essa presenta diverse riprese ed "isole" nei quadranti nordorientali (aree del teramano e pescarese), dove numerose località hanno subito un lieve danneggiamento diffuso (aree a nord della catena del Gran Sasso e ad est di quella dei monti Morrone-Cappucciata-San Vito). Nonostante queste ultime siano tutte distribuite nel *footwall* della faglia, esse sono in genere ubicate sulle successioni silicoclastiche esterne alla catena mesocenozoica carbonatica e quindi potenzialmente affette da fenomeni sia di amplificazione locale (dovuti alla presenza di terreni con scadenti proprietà meccaniche) che di dissesto (di fatto, in molte di queste località le zone maggiormente danneggiate insistono su pendii in frana).

Per quanto concerne infine la parametrizzazione macrosismica del terremoto, è possibile assegnare all'evento del 6 Aprile un'intensità epicentrale (Io) pari al IX grado MCS (Imax=IX-X; vedi Tab. 2). L'epicentro

macrosismico calcolato tramite l'algoritmo Boxer 3.3 (GASPERINI, 2004) cade poco a sud di San Gregorio, circa 10 km a SE di quello strumentale, rilocalizzato ad ovest di L'Aquila (INGV, 2009). La magnitudo equivalente calcolata con il medesimo algoritmo è Mw=6.0, inferiore a quella valutata strumentalmente. Questa differenza è facilmente spiegabile dal fatto che Boxer è stato compilato utilizzando le intensità "storiche", quelle assegnate, in altre parole, valutando gli effetti su un patrimonio edilizio decisamente più vulnerabile di quello attuale. Utilizzando per il calcolo della Mw le intensità stimate per i soli centri storici di ciascuna località rilevata (in genere, tutte maggiori, come summenzionato), il valore ottenuto tramite BOXER è Mw=6.3, ovvero lo stesso di quello strumentale.

5. QUADRO SISMOTETTONICO DELL'AREA INTERESSATA DAL TERREMOTO

La sismotettonica dell'area aquilana è dominata dai processi estensionali che caratterizzano la deformazione della crosta appenninica ed in particolare quelli relativi alla distensione NE-SW di questo settore di catena. Tale estensione (valutata nell'ordine dei 3 mm/yr tramite misurazioni GPS; MANTENUTO *et al.*, 2007) è accomodata da faglie normali ad andamento NW-SE ed immersione tirrenica, alle quali va ascritta tutta la maggiore sismicità dell'Appennino centrale (GALADINI & GALLI, 2000).

Nell'aquilano tali faglie sono ben note e molte di esse sono state investigate in dettaglio anche attraverso analisi paleosismologiche che ne hanno consentito la parametrizzazione in termini sismogenetici (GALLI *et al.*, 2008 e relativa bibliografia. Vedi Fig. 5). Ad esse sono stati anche associati i forti terremoti storici della regione, alcuni con l'utilizzo dei dati derivanti dalle analisi paleosismologiche, altri dall'associazione della distribuzione delle massime intensità rispetto all'andamento di ogni singola struttura.

In particolare, GALADINI & GALLI (2000) hanno descritto due principali set di faglie attive nell'area di interesse; l'uno, nel settore più esterno della catena, caratterizzato da faglie e sistemi di faglia normali "silenti", ovvero con evidenze geologiche e geomorfologiche di attività tardo Pleistocene superiore-Olocene, ma senza che ad esse sia possibile attribuire terremoti da catalogo (sistemi di faglie della Laga, di Campo Imperatore e del Monte Morrone, rispettivamente LMFS, CIFS e MMFS in Fig.5). L'altro, nel settore più interno, al quale sono stati associati gli eventi più distruttivi presenti nei repertori sismologici (sistemi di faglie dell'alta valle dell'Aterno, di Campo Felice-Ovindoli e del Fucino, rispettivamente UAFS, CFCFS-OPFS e FFS in Fig.5).

La Figura 5 mostra schematicamente i due set di faglie ed i terremoti con Mw \geq 6.3 associati al sistema occidentale. Il terremoto del 1703 (2 febbraio, Mw=6.7; CPTI04) è stato causato dall'attivazione del sistema di faglie dell'alta valle dell'Aterno (UAFS; faglie del M. Marine e del M. Pettino), quello del 1349 (*mainshock* settentrionale, Mw=6.5; per quello più meridionale vedi GALLI & NASO, 2009) molto dubitativamente dal sistema di faglie intorno a Campo Felice (OPFS-CFCFS, faglie di Ovindoli-Pezza, Campo Felice e Colle Cerasitto) e

Parametri epicentrali

	Io MCS	Imax MCS	Mw	Lat	Lon
Località	IX	IX-X	6.0	42.309	13.510
Centro storico	X	X-XI	6.3	-	-

Tab. 2 - Parametri epicentrali calcolati a partire dal piano quotato di Tabella 1 utilizzando l'algoritmo Boxer 3.3 (GASPERINI, 2004) per il calcolo delle coordinate epicentrali e della Mw. Il valore di quest'ultima calcolato utilizzando i dati rilevati nei soli centri storici è identico a quella calcolata strumentalmente.

Epicentral parameters evaluated through the Boxer 3.3 algorithm (GASPERINI, 2004) on the basis of the data contained in Tab. 1. It is worth noting that the instrumental value (Mw=6.3) is the same of that obtained by considering the intensities estimated ad hoc for the old-town areas.

quello catastrofico del 1915 ($M_w=7$) dal sistema di faglie del Fucino (FFS).

Per quanto concerne il terremoto del 1461 ($M_w=6.5$ in CPTI04), GALADINI & GALLI (2000) non forniscono indicazioni se non porre in maniera interrogativa la possibilità che esso sia stato generato dalla faglia di Assergi (i.e., una delle strutture incluse nel sistema di Campo Imperatore, Fig.5), oppure ad una delle faglie minori nella valle dell'Aterno (nel caso specifico e col senno di poi, al sistema di faglie di Paganica-San Demetrio; PSDFS in Fig. 5).

Sempre in zona aquilana, la Fig. 5 mostra anche il sistema di faglie della media Valle dell'Aterno, composto da diversi segmenti caratterizzati da spettacolari nastri di faglia scolpiti nelle successioni carbonatiche, nei cui *hangingwall* GALADINI & GALLI (2000) hanno riconosciuto depositi di versante del tardo Pleistocene superiore trascinati e fagliati, ma al cui insieme non è possibile collegare alcun terremoto storico.

5.1 Il sistema di faglie di Paganica-San Demetrio (PSDFS)

Diversamente – per esempio – dalla faglia del Monte Marzano (responsabile del terremoto irpino del 1980, $M_w=6.9$), citata spesso come faglia di neoformazione, ma ben riconoscibile in fotografia aerea per tutta la sua estensione anche prima del terremoto⁵, le evidenze di questo sistema di faglie sono frammentarie e limitate principalmente al solo segmento di Paganica e di San Demetrio (rispettivamente c ed e in Fig. 5). Anche per questo, la sua

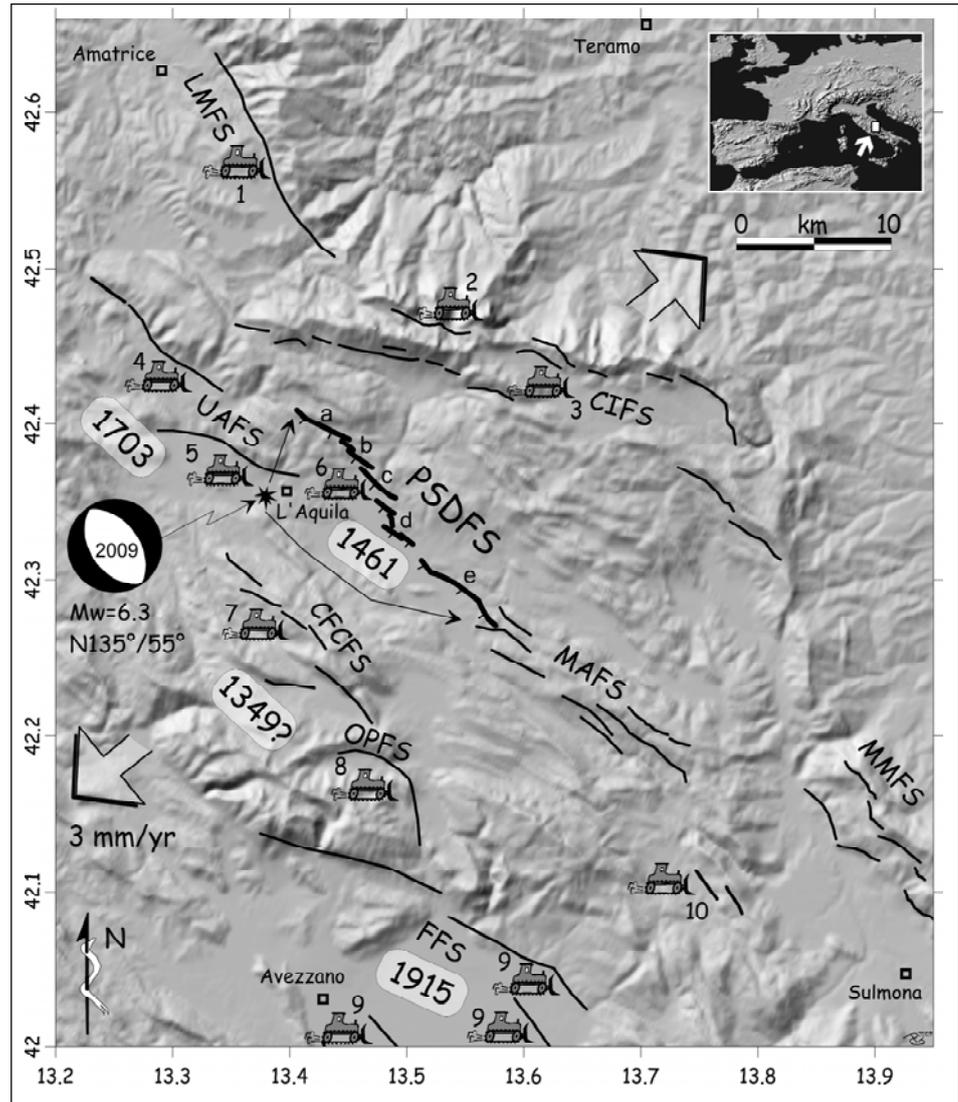


Fig. 05 - Schema delle faglie attive primarie dell'appennino aquilano (le faglie sono tutte a cinematica prevalente normale ed immergono a ~SW). LMFS, sistema di faglie dei Monti della Laga; CIFS, sistema di faglie del Monte San Franco (ad occidentale) e di Campo Imperatore (ad orientale); UAFA, sistema di faglie dell'alta valle dell'Aterno (i.e., faglie del Monte Marine e del Monte Pettino); in grassetto: PSDFS, sistema di faglie di Paganica-San Demetrio (a, segmento Collebrincioni-Colle Praticciolo; b, Colle Enzano; c, Paganica; d, San Gregorio; e, San Demetrio): l'intero sistema ha mostrato segni di riattivazione superficiale in occasione del terremoto del 6 Aprile; MAFS, sistema di faglie della media valle dell'Aterno; MMFS, sistema di faglie bordiero della piana di Sulmona (faglie del Monte Morrone); CFCFS, sistema di faglie di Campo Felice-Colle Cerasitto; OPFS, faglie di Ovindoli-Piano di Pezza; FFS, sistema di faglie del bacino del Fucino. Le grandi frecce divergenti indicano la direzione di estensione da dati GPS (MANTENUTO *et al.*, 2007). La stella nera indica l'ipocentro del terremoto del 2009 (rilocalizzazione INGV, 2009). In evidenza le date dei terremoti distruttivi associati alle relative strutture tettoniche note. Il simbolo dello scavatore indica le faglie investigate e parametrizzate tramite analisi paleosismologiche (vedi in GALLI *et al.*, 2008 gli studi relativi; i siti 5 e 6 sono stati studiati da alcuni degli scriventi a seguito del terremoto ed i risultati sono in corso di elaborazione; il sito 10 è in corso di elaborazione da FALCUCCI *et al.*). Il meccanismo focale è stato mutuato da USGS (2009).

*Primary active faults in the L'Aquila Apennine (mainly normal faults, SW-dipping). LMFS, Laga Mts. Fault System; CIFS, Mt. San Franco (west) and Campo Imperatore (east) Fault System; UAFA, Upper Aterno Fault System (i.e., Mt. Marine and Mt. Pettino faults); bold, Paganica-San Demetrio Fault System (a, Collebrincioni-Colle Praticciolo segment; b, Colle Enzano; c, Paganica; d, San Gregorio; e, San Demetrio): the whole system showed surficial faulting traces during the April 6 earthquake; MAFS, Middle Aterno Fault System; MMFS, Sulmona basin Fault System (Mt. Morrone faults); CFCFS, Campo Felice-Colle Cerasitto Fault System; OPFS, Ovindoli-Piano di Pezza Fault System; FFS, Fucino basin Fault System. The big arrows show the extension direction evaluated from GPS data (MANTENUTO *et al.*, 2007). The black star is the hypocenter of the 2009 earthquake (re-located by INGV, 2009). Years refer to historical earthquakes possibly caused by the related fault systems. The bulldozer indicates the faults investigated by means of paleoseismological analyses (see in GALLI *et al.*, 2008; sites 5-6 have been studied by GALLI *et al.*, 2009; site 10 has been recently studied by FALCUCCI *et al.*). Focal mechanism is from USGS (2009).*

⁵p.e., nel volo base Nato dei primi anni '50, almeno tra San Gregorio Magno e il M.te Valva e lungo tutto il versante a NW di Caposele

geometria, estensione ed attività erano fino ad oggi note in maniera parziale e non conclusiva. Secondo BAGNAIA *et al.* (1992) il settore di Paganica è caratterizzato da un'attività non successiva agli ultimi 18ka B.P., mentre secondo BONCIO *et al.* (2004) la faglia di Paganica s.s. si raccorda a quella del Monte Pettino (Aquilano s.l.). Per quanto concerne il segmento di San Demetrio (incluso nel MAFS in GALADINI & GALLI, 2000. Vedi già in BOSI & BERTINI, 1970), BERTINI & BOSI (1993) ne evidenziano un'attività posteriore al Pleistocene medio e, presumibilmente, di controllo all'attuale assetto geomorfologico della Valle dell'Aterno.

Tuttavia, in occasione del presente terremoto, sia alcuni degli scriventi⁶ che molti altri geologi di diversi enti ed istituzioni hanno seguito e riconosciuto sul campo tracce incontrovertibili di fagliazione di superficie (p.e., EMERGEO WORKING GROUP, 2009; FALCUCCI *et al.*, 2009; LAVECCHIA *et al.*, 2009; MESSINA *et al.*, 2009a) lungo un insieme di segmenti di faglia qui raggruppati e denominati "sistema di faglie di Paganica-San Demetrio" (PSDFS in Fig. 5, N135°). Le tracce sono costituite da un insieme di fratture beanti (in genere da pochi millimetri a 3-4 cm, ma fino a 10 cm in alcuni casi), generalmente orientate N110°-140° secondo una geometria *en-échelon* con *step* destro, sia alla mesoscala che alla macroscala. Tali fratture hanno interessato indistintamente terreni più o meno coesivi e manufatti antropici, ivi comprese strutture in cemento armato, strade, pavimentazioni varie, muri (in pietra, laterizio e cemento; Fig.6). La rottura di superficie, oltre a tagliare e danneggiare quanto sopra nominato, ha anche provocato la rottura per trazione nei giunti di importanti tubature di servizio a Paganica, tra cui l'acquedotto del Gran Sasso e la tubatura a media pressione del gas (rete EnelGas).

In genere, sono stati osservati almeno due *set* di fratture parallele, una sviluppata in corrispondenza del piano di faglia (o del nastro in roccia, ove presente in affioramento) ed una (o più) nell'*hangingwall*, a distanze variabili tra i pochi metri e qualche decametro. In alcuni casi, la beanza delle fratture in corrispondenza della faglia è stata accompagnata da rigetto verticale, cresciuto nell'arco dei successivi 50 giorni dal *mainshock* e quindi stabilizzatosi. Il rigetto ha interessato sia terreni sciolti (con un massimo misurato sulla faglia a Paganica non superiore a ~15 cm), che le labbra della faglia in *bedrock* (i.e., nastro in carbonati o conglomerati vs *talus*), con un massimo misurato tra Tempera e Collebrincioni di 9 cm, cumulati nell'arco di circa 100 giorni (su un cosismico misurato l'8 di Aprile di 6 cm; faglia di Colle Enzano).

Fatto salvo che la concentrazione e massima espressione (sia in termini di beanza che di rigetto) del campo di fratturazione sono state osservate tra gli abitati di Collebrincioni e San Gregorio (segmenti *b-c-d* del PSDFS in Fig. 5; vedi FALCUCCI *et al.*, 2009), un *set* di fratture – più discontinue e di entità minore, ma dalle stesse caratteristiche geometriche e cinematiche – è stata riconosciuta dagli scriventi a nord di Collebrincioni, sia lungo il nastro in carbonati dissecan-

te Colle Praticciolo che, soprattutto, nei campi arati sottostanti (segmento *a* in Fig. 5). Analogamente, importanti e persistenti fratture N130° sono state seguite nei campi nell'*hangingwall* della faglia di San Demetrio (segmento *e* in Fig. 5) ed in corrispondenza del piano di faglia stesso, ove interessano anche strade e manufatti in pietra e cemento armato all'interno dell'abitato di San Demetrio ne' Vestini.

Dal complesso delle nostre osservazioni, ne discende che la fagliazione si è manifestata per circa 19 km in superficie, "mobilizzando diversi segmenti di faglie precedentemente più o meno noti e/o visibili. Riassumendo, nel suo settore nordoccidentale la faglia si è manifestata lungo il segmento di Colle Enzano (e relative prosecuzioni a NW verso Collebrincioni ed a SE al di sotto del viadotto Vigne dell'autostrada A24); in quello centrale lungo la faglia s.s. di Paganica e la sua prosecuzione a SE (San Gregorio); in quello sudorientale lungo la faglia di San Demetrio.

La lunghezza della fagliazione di superficie qui documentata è in buon accordo con i modelli di faglia ottenuti dall'inversione dei dati SAR e GPS (ATZORI *et al.*, 2009), che prevedono una lunghezza di faglia di ~20 km, con l'estensione della distribuzione degli *after-shocks* (INGV, 2009), oltre che con i valori ottenibili usando leggi empiriche di regressione lunghezza faglia-magnitudo (p.e., $M_w=6.3$, $L=20$ km per le faglie italiane; in GALLI *et al.*, 2008). Tale valore è anche in buon accordo con quello proveniente dall'inversione dei dati GPS nel modello a dislocazione variabile (CHELONI *et al.*, 2009). Tenuto conto della distribuzione degli *after-shocks* in profondità lungo una sezione NE-SW e della distanza tra l'ipocentro fornito da INGV (2009) e la faglia in superficie, la pendenza media della faglia in profondità è di ~60°, circa la stessa di quella misurata sui piani di faglia in roccia rimobilizzati ($65^\circ \pm 5^\circ$).

Per quanto riguarda l'attività tardo Quaternaria di questo sistema di faglie, si sottolinea che studi in corso - oltre ad evidenziare la forte impronta sull'evoluzione tettono-sedimentaria e morfologica dell'area (si veda anche MESSINA *et al.*, 2009a e 2009b e bibliografia ivi contenuta) - suggeriscono uno *slip-rate* minimo a lungo termine di 0.5 mm/yr, distribuito su almeno tre *splay* paralleli del segmento di Paganica (*c* in Fig.5), dislocanti paleosuperfici e depositi databili a ~0.35-0.56 Ma (MESSINA *et al.*, 2009b).

D'altra parte, una serie di trincee paleosismologiche - aperte in urgenza e per motivi legati all'agibilità⁷ degli edifici fondati lungo il segmento di Paganica - hanno mostrato rigetti cosismici dei depositi del tardo Pleistocene superiore e dell'Olocene ben più consistenti di quelli verificatisi in occasione del terremoto del 2009 e, probabilmente, del 1461 (6 in Fig.5; GALLI *et al.*, 2009). In particolare, dalle analisi preliminari - confortate da numerose datazioni assolute - l'ultimo evento caratterizzato da rigetto pluridecimetrico dei livelli dislocati è avvenuto sicuramente dopo la fine del primo millennio AD e probabilmente in occasione del terremoto del 2 Febbraio 1703 ($M_w=6.7$).

⁶P. Galli, G. Naso ed E. Peronace.

⁷Molti edifici temporaneamente dichiarati "inagibili" sono ubicati al di sopra od in prossimità della faglia.



Fig. 6 - Diverse espressioni superficiali del sistema di faglie di Paganica-San Demetrio. A, fagliazione lungo il "nastro" scolpito nelle successioni carbonatiche bordiere del bacino di Colle Enzano (segmento b in Fig.5). Il rigetto, misurato l'8 aprile a 6 cm e cresciuto a 9 nei due mesi successivi, è qui evidenziato dalla presenza di una guaina di caucciù solidale all'*hangingwall*. B, fagliazione nei depositi di versante a ridosso della faglia di Paganica s.s. (segmento c in Fig.5). Il rigetto misurato il 9 aprile era di 11 cm, salito a 13 alla fine dello stesso mese. C, effetti di fratturazione cosismica in un edificio posto in corrispondenza del segmento di Paganica. D, esempio di *surficial break* nei terreni sciolti attraversati dalla frattura cosismica (segmento e in Fig.5). E, faglia tra le ghiaie del paleoconoide medio-pleistocenico del Torrente Raiale (a destra) e depositi colluviali di versante di epoca storica (i tre rettangoli sono campioni per i quali sono stati ottenuti datazioni AMS tra 2.5ka e 900 AD; GALLI et al., 2009). Log effettuato sulla parete della "trincea" aperta la notte del 6 Aprile dal getto d'acqua a pressione (35 atm.) fuoriuscito a causa della rottura a trazione del giunto dell'acquedotto del Gran Sasso tra Paganica e Tempera in corrispondenza della zona di faglia (reticolo 0.5 m).

pio di *surficial break* nei terreni sciolti attraversati dalla frattura cosismica (segmento e in Fig.5). E, faglia tra le ghiaie del paleoconoide medio-pleistocenico del Torrente Raiale (a destra) e depositi colluviali di versante di epoca storica (i tre rettangoli sono campioni per i quali sono stati ottenuti datazioni AMS tra 2.5ka e 900 AD; GALLI et al., 2009). Log effettuato sulla parete della "trincea" aperta la notte del 6 Aprile dal getto d'acqua a pressione (35 atm.) fuoriuscito a causa della rottura a trazione del giunto dell'acquedotto del Gran Sasso tra Paganica e Tempera in corrispondenza della zona di faglia (reticolo 0.5 m).

Different surficial expression of the Paganica-San Demetrio Fault system. A, faulting along the "nastro" carved in carbonate rocks in the Colle Enzano intermontane basin (segment b in Fig. 5). The offset measured on April 8 was 6 cm, increased up to 9 cm during the following two months (the precise measuring has been obtained thanks to the rubber sheath visible in the picture). B, faulting of the slope deposits close to the Paganica fault s.s. (segment c in Fig. 5). The offset measured on April 9 was 11 cm, increased to 13 cm at the end of the same month. C, surficial breaks affecting a building crossed by the Paganica fault strand. D, surficial breaks in loose deposits (segment e in Fig. 5). E, fault between the Middle Pleistocene gravel of the Raiale paleofan (right) and colluvial deposits of historical age (the three rectangles are samples AMS-dated between 2.5 ka and 900 AD; GALLI et al., 2009). Log performed on part of the trench opened by the Gran Sasso 35-atm. pipeline (broken in the night of the earthquake); net 0.5 m.

6. CONCLUSIONI ED IMPLICAZIONI SISMOTETTONICHE

All'alba del 6 Aprile 2009 le prime squadre QUEST di rilevamento macrosismico sono giunte in area epicentrale ad appena 90 minuti dall'accadimento del sisma, fornendo già in serata stime di intensità per 40 località, divenute oltre 180 nei primi dieci giorni. Nel corso delle prime ore i risultati del rilevamento sono stati di primaria importanza ai fini della gestione dell'emergenza (indirizzo di soccorsi e mezzi), divenendo quindi uno strumento imprescindibile per la valutazione e perimetrazione delle aree di danneggiamento sia per fini di protezione civile prima che come strumento legislativo poi. Il risultato finale del rilevamento consta di 316 località con $I_s \geq V$ MCS, tutte visitate una o più volte dalle squadre (Tab.1).

L'intensità epicentrale attribuita è del IX grado MCS, con epicentro macrosismico spostato di circa 10 km a SE di quello strumentale. Le due località più duramente colpite sono risultate quelle di Onna e Castelnuovo (entrambe IX-X MCS), mentre il numero in assoluto più alto di edifici danneggiati e di vittime si è verificato nel centro storico di L'Aquila (VIII-IX MCS, oltre 200 vittime). La magnitudo equivalente stimata utilizzando le intensità calcolate per i soli centri storici delle località nell'area mesosismica – generalmente affetti da danni più severi – restituisce un valore simile a quello valutato strumentalmente ($M_w=6.3$).

La distribuzione degli effetti è nettamente allungata in direzione NW-SE, con un marcato effetto di direttività verso SE. Questo fatto è congruente con la direzione della struttura sismogenetica responsabile del terremoto, la cui geometria e cinematica – oltre che dai dati strumentali – si è resa palese a seguito del fenomeno di fagliazione di superficie riconosciuto consensualmente da decine di geologi di diverse istituzioni lungo il c.d. sistema di faglie di Paganica-San Demetrio. In particolare, secondo gli scriventi, la fagliazione ha avuto luogo per circa 19 km, tra i paesi di Collebrincioni a NW e San Demetrio ne' Vestini a SE.

Considerando l'analogia tra la distribuzione degli effetti di questo terremoto e quelli relativi all'evento di simile magnitudo occorso nel 1461, è possibile ipotizzare per questa struttura sismogenetica un tempo di ritorno di ~0.5ka per eventi di questa classe di energia. Tuttavia, sia i risultati preliminari del rilevamento dei depositi e delle forme tardo quaternarie dell'area che quelli provenienti da alcune trincee paleosismologiche scavate attraverso il segmento di Paganica, permettono di ipotizzare un comportamento complesso di questa struttura, capace di generare terremoti di magnitudo pari a quella degli eventi del 1461 e del 2009, ma anche eventi assai più energetici, caratterizzati da dislocazioni superficiali molto più consistenti di quelle centimetriche osservate in occasione dell'ultimo evento (per esempio quello del 2 Febbraio 1703, $M_w = 6.7$).

E' ragionevole pensare che in occasione di eventi con elevata magnitudo il sistema di faglie di Paganica-San Demetrio si rompa contemporaneamente ad altre strutture contermini separate da barriere; tra queste, i candidati più probabili sembrano essere sia i sistemi di faglie della Alta che della media Valle dell'Aterno, il secondo silente storicamente, ma sicuramente attivo nel corso della parte alta del Pleistocene superiore

(GALADINI & GALLI, 2000). In questa ipotesi, la lunghezza complessiva della struttura che si potrebbe attivare è di circa 30-35 km, cui corrisponde un valore stimabile di $M_w \sim 6.7-6.9$ (GALLI *et al.*, 2008), del tutto compatibile con i rigetti istantanei osservati nelle trincee summenzionate e con l'energia messa in gioco in occasione dei più forti eventi dell'Appennino centro-meridionale (p.e., L'Aquila 1703, Fucino 1915 ed Irpinia 1980).

Da tutto quanto esposto appare che il terremoto aquilano del 6 Aprile ben si inserisce nel quadro sismotettonico già precedentemente descritto da diversi autori nella regione, con l'attivazione in profondità di una faglia normale appenninica ad alto angolo (60°), corrispondente in superficie a una serie *en-echelon* di faglie più o meno note e in parte già inserite, seppur con criteri di segmentazione differenti, in lavori di *hazard* sismico (GALADINI & GALLI, 2000; BONCIO *et al.*, 2004). Come dimostrano i precedenti studi di geologia del Quaternario (vedi bibliografia in MESSINA *et al.*, 2009a) e quelli in corso (vedi citazioni precedenti), anche questa faglia, come molte altre dell'Appennino centrale, controlla ampiamente l'assetto topografico, morfologico e sedimentario del suo bacino, potendosi considerare – alla stregua delle contermini strutture dell'alta Valle dell'Aterno (faglie del M.te Marine-M.te Pettino) e della media Valle dell'Aterno (faglie di Ripa-Roccapreturo-Acciano) – una faglia primaria sismogenetica di questo tratto di catena.

BIBLIOGRAFIA

- ATZORI S., HUNSTAD I., CHINI M., SALVI S., TOLOMEI C., BIGNAMI C., STRAMONDO S., TRASATTI E., ANTONIOLI A. & BOSCHI E. (2009) - *Finite fault inversion of DInSAR coseismic displacement of the 2009 L'Aquila earthquake (Central Italy)* - Geoph. Res. Lett., doi: 10.1029/2009GL039293.
- BAGNAIA R., D'EPIFANIO A. & SYLOS LABINI S. (1992) - *Aquila and subaequan basins: an example of Quaternary evolution in Central Apennines, Italy* - Quaternaria Nova, II, 187-209 (preprint spec. number 1, 1-23 1989).
- BERTINI, T. & BOSI, C. (1993) - *La tettonica quaternaria della conca di Fossa (L'Aquila)*, II Quaternario 6, 293-314.
- BONCIO P., LAVECCHIA G. & PACE B. (2004) - *Defining a model of 3D seismogenic sources for Seismic Hazard Assessment applications: the case of central Apennines (Italy)* - Journal of Seismology, **8/3**, 407-425.
- BOSI C. & BERTINI T. (1970) - *Geologia della media valle dell'Aterno* - Mem. Soc. Geol. It. **9**, 719 - 777.
- CHELONI D., D'AGOSTINO N., D'ANASTASIO E, MANTENUTO S, GIULIANI R., CALCATERRA S., GAMBINO P. & MATTONE M. (2009) - *Coseismic and initial postseismic slip of the 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake* - Geophysical International Journal, Fast Abstracts, in stampa.
- EMERGE WORKING GROUP (2009) - *Rilievi Geologici Nell'area Epicentrale Della Sequenza Sismica Dell'aquilano Del 6 Aprile 2009* – Quaderni Di Geofisica, N 70, [Http://Portale.Ingv.it/Produzione-Scientifica/Quaderni-Di-Geofisica/Quaderni-Di-Geofisica-2009/2009-06-23.3943171797](http://Portale.Ingv.it/Produzione-Scientifica/Quaderni-Di-Geofisica/Quaderni-Di-Geofisica-2009/2009-06-23.3943171797).

- FALCUCCI E., GORI S., PERONACE E., FUBELLI G., MORO M., SAROLI M., GIACCIO B., MESSINA P., NASO G., SCARDIA G., SPOSATO A., VOLTAGGIO M., GALLI P., GALADINI F. & PANTOSTI D. (2009) - *Surface faulting due to the L'Aquila earthquake of April 6th 2009* - Seismological Research Letters, **80**, 940-950.
- GALADINI F. & GALLI P. (2000) - *Active tectonics in the central Apennines (Italy) - input data for seismic hazard assessment* - Nat. Haz. **22**, 225-270.
- GALLI P. & CAMASSI R. (eds.), (2009): *Rapporto sugli effetti del terremoto aquilano del 6 aprile 2009, Rapporto congiunto DPC-INGV*, 12 pp. http://portale.ingv.it/real-time-monitoring/quest/macrodef_sito.pdf
- GALLI P. & GALADINI F. (1999) - *Seismotectonic framework of the 1997-98 Umbria-Marche (Central Italy) earthquakes* - Seismological Res. Letters, **70**, 4, 404-414.
- GALLI P., GALADINI F. & PANTOSTI D. (2008) - *Twenty years of paleoseismology in Italy* - Earth Science Review, **88**, 89-117.
- GALLI P. & NASO G. (2009) - *Unmasking the 1349 earthquake source (southern Italy). Paleoseismological and archaeoseismological indications from the Aquae Juliae fault* - J. Structural Geology, **31**, 128-149.
- GALLI P., GIACCIO B., MESSINA P., PERONACE E. (2009) - *Paleoseismological news from L'Aquila faults*, Riassunti del 28° Convegno Nazionale GNGTS, Trieste 16-19 Novembre 2009, 34-37.
- GASPERINI P. (2004) - *Boxer program* - Programma disponibile in internet al sito: <http://ibogfs.df.unibo.it/user2/paolo/www/boxer/boxer.html>
- GRUPPO DI LAVORO CPTI (2004) - *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04)*, INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04/>
- GRUPPO DI LAVORO CPTI (2008) - *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2008 (CPTI08)*, INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI08/>
- INGV (2009) - *La sequenza sismica dell'Aquilano, Aprile 2009. Attività in corso e primi risultati* - http://portale.ingv.it/primo-piano/archivio-primo-piano/notizie-2009/terremoto-6-aprile/copy_of_la-sequenza-sismica-dell-aquilano-aprile-2009/
- LAVECCHIA G., BONCIO P., BROZZETTI F., DE NARDIS R., DI NACCIO D., FERRARINI F., PIZZI A. & POMPOSO G. (2009) - *The April 2009 Aquila (central Italy) seismic sequence (Mw6.3): A preliminary seismotectonic picture* - in: P. Guarnieri (ed.), Recent Progress on Earthquake Geology, Nova Publisher, in stampa.
- MANTENUTO S., BONCI L., CALCATERRA S., D'AGOSTINO N., GIULIANI R., MATTONE M. & MERLI K. (2007) - *Analysis of active extension in the Central Apennines (Abruzzo, Italy) using GPS measurements* - Geophysical Research Abstracts **9**, 04341. EGU2007-A-04341
- MESSINA P., GALADINI F., GALLI P., & SPOSATO A. (2002) - *Quaternary basin evolution and present tectonic regime in the area of the 1997-1998 Umbria-Marche seismic sequence (central Italy)*, Geomorphology, **42**, 97-116.
- MESSINA P., GALLI P., FALCUCCI E., GALADINI F., GIACCIO B., GORI S., PERONACE E. & SPOSATO A. (2009a) - *Evoluzione geologica e tettonica quaternaria dell'area interessata dal terremoto aquilano del 2009* - Geoitalia 2009, 28, pp 24-29, doi: 10.1474/Geoitalia-28-06.
- MESSINA P., GALLI P., GIACCIO B., PERONACE E. (2009b) - *Evoluzione tettonica tardo quaternaria dell'area interessata dalla faglia di Paganica (AQ)*, Riassunti del 28° Convegno Nazionale GNGTS, Trieste 16-19 Novembre 2009, 47-50.
- MOLIN D., GALADINI F., GALLI P., MUCCI L. & ROSSI A. (1999) - *Terremoto del Fucino del 13 gennaio 1915 - Studio macrosismico, in S. Castenetto, F. Galadini (a cura di): "13 gennaio del 1915. Il terremoto nella Marsica"*. Monografia del Servizio Sismico Nazionale, 321-340.
- MOLIN D. (2003) - *Considerazioni sull'eventuale adozione in Italia della scala macrosismica europea (EMS-1998)* - Atti del 22° convegno nazionale GNGTS, ISBN/ISSN:88-900385-9-4, 06.21, 11 pp.
- ROSSI A., TERTULLIANI A. & VECCHI M. (2005) - *Studio macrosismico del terremoto dell'Aquilano del 24 giugno 1958* - Il Quaternario, 2/18.
- SIEBERG A (1930) - *Die Erdbeben, Handbuch der Geophysik 4, tab.102*, Berlin, pp. 527-686.
- STUCCHI et alii (2007) - *DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04* - <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04/>, Quaderni di Geofisica, Vol **49**, pp.38.
- USGS (2009) - *Focal mechanism of 01:32 (UTC time) 06/04/09 earthquake (Italy)* - internet page: <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2009/us2009fcaf/#scitech>

Ms. ricevuto il 14 agosto 2009
 Testo definitivo ricevuto il 14 settembre 2009

Ms. received: August 14, 2009
 Final text received: September 14, 2009