



Indagini macrosismiche ad alta densità per lo studio del risentimento sismico nella città di Roma

High-density macroseismic investigation in the city of Rome for the study of seismic effect

S. DONATI*, F. CIFELLI**, F. FUNICIELLO**

RIASSUNTO - In base alle conoscenze attuali sui caratteri geologici, sulla sismicità storica e a seguito delle modellazioni numeriche della risposta sismica, la città di Roma potrebbe essere soggetta a effetti di sito non trascurabili nel caso di forti terremoti dell'Italia centrale. In seguito ai terremoti della sequenza sismica umbro-marchigiana del 14 ottobre 1997 ($M_w=5.6$; $I_0=VIII$ MCS) e del 26 Marzo 1998 ($M_w=5.3$; $I_0=VI-VII$ MCS), sono stati realizzati due rilevamenti macrosismici ad alta densità nell'area urbana di Roma, con l'obiettivo di confermare la possibilità di effetti di amplificazione locale e studiare le relazioni tra distribuzione delle intensità sismiche e geologia locale, in particolare per l'area della città di recente urbanizzazione, un ambito mai esaminato in precedenza. I dati di intensità di entrambi gli eventi sono stati correlati alla geologia di superficie ed i risultati mostrano un'amplificazione significativa in corrispondenza dei depositi alluvionali olocenici, con circa un grado di intensità MCS di differenza tra le alluvioni recenti e le formazioni del bedrock. La distribuzione degli effetti sismici sui depositi olocenici è stata studiata anche in funzione dei caratteri geometrici della sezione (profondità/lunghezza) dei bacini alluvionali. Nel valle del Tevere i maggiori effetti si distribuiscono in corrispondenza di una fascia di 150 m lungo la transizione tra il substrato plio-pleistocenico e le alluvioni oloceniche, suggerendo il verificarsi di un caratteristico effetto di bordo. In aggiunta, anche i corpi alluvionali minori (lunghezza della sezione < 150 m) del reticolo idrografico secondario risultano caratterizzati dalle maggiori intensità sismiche. Tale comportamento è in accordo con la caratteristica risonanza bidimensionale dei bacini alluvionali di piccole dimensioni. Per l'area urbana di Roma, questi risultati contribuiscono a una migliore valutazione della pericolosità delle aree urbanizzate in epoca moderna al di sopra dei depositi alluvionali olocenici, dove possono verificarsi fenomeni di amplificazione locale. Tali effetti di sito possono rappresentare una seria minaccia sia per le aree recenti densamente popolate, sia per il patrimonio archeologico e architettonico dei nostri centri storici, anche in aree distanti dai distretti sismogenetici. Studi di dettaglio come quello descritto sono relativamente economici e speditivi e possono essere facilmente applicati ad altre realtà, in particolare ai casi in cui non siano disponibili dati storici o siano difficili da realizzare misure strumentali.

PAROLE CHIAVE: effetti di sito, Roma, indagine macrosismica, depositi olocenici

ABSTRACT - According to recent studies on nearsurface geology, historical damage distribution and numerical simulations, the city of Rome might be prone to moderate site effects in case of large earthquakes in Central Italy. After the October 14, 1997 ($M_w=5.6$; $I_0=VIII$ MCS) and the March 26, 1998 ($M_w=5.3$; $I_0=VI-VII$ MCS) Umbria-Marche (Central Italy) earthquakes, two high-density macroseismic surveys were carried out in the urban area of Rome. The aim was to confirm the occurrence of site amplification phenomena and to investigate the relationship between intensity and local geology for the modern urban area of the town, an issue yet to be examined in contemporary times. Intensity data for both earthquakes were correlated with near-surface geology. The results show a statistically significant amplification in Holocene alluvial deposits, with one degree of difference in MCS intensity between recent alluvium and bedrock formations. Furthermore, the distribution of seismic effects in alluvium-filled valleys was studied as a function of the shape ratio (depth/length) of the alluvial basins. In the Tiber River valley, higher effects were found to be concentrated within a 150 m wide band along the bedrock-alluvium surface contact, suggesting the occurrence of an edge effect. Surprisingly, also minor alluvial valleys displayed the strongest effects: the narrowest valleys (width < 150 m) revealed the highest intensities. This behavior is in agreement with expected 2-D resonance in small-sized alluvial basins. For areas of Rome, these results contribute to a precise hazard assessment of areas recently urbanized located above holocene alluvial deposits, where local amplification phenomena may occur. These site effects may represent a serious threat for both modern densely populated areas and the archaeological and architectural heritage of our historical cities, even in areas far away from seismogenic districts. Such a detailed analysis has the advantage of being fast and cheap, and could be easily applied to other cities, particularly where historical data are not available or instrumental measurements are difficult to obtain.

KEY WORDS: site effects, Rome, macroseismic survey, holocene deposits

* Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, via Cristoforo Colombo, 44 - Roma

** Dipartimento di Scienze Geologiche - Università degli Studi "Roma Tre", Largo San Leonardo Murialdo, 1 - 00146 Roma

1 - INTRODUZIONE

1.1 - LA SISMICITÀ DI ROMA

La sismicità dell'area romana è ritenuta, nel contesto nazionale, di modesta entità (fig. 1). Ciò nonostante, nel corso degli oltre 2.500 anni della sua storia, Roma ha risentito dei terremoti delle aree sismogenetiche limitrofe, registrando un numero di danneggiamenti al patrimonio storico e monumentale non trascurabile. Nel complesso, le fonti storiche e i più aggiornati studi sugli scenari dei terremoti storici (si veda il "Catalogo dei Forti Terremoti" di BOSCHI *et alii*, 1995a) riportano, a partire dal 461 a.C., otto eventi con intensità a Roma attorno al VII-VIII grado della scala MCS, oltre 60 terremoti avvertiti dalla popolazione

(intensità superiore al IV grado) e numerosi danni di una certa entità al patrimonio monumentale della città (MOLIN *et alii*, 1995; DONATI *et alii*, 1999).

I recenti progressi degli studi geologici e sismologici hanno consentito di delineare un quadro preciso della sismicità di Roma (MOLIN *et alii*, 1995), suddividendola in: (i) sismicità regionale, legata alle aree sismogenetiche dell'Appennino centro-meridionale; (ii) sismicità locale, legata alla persistente attività sismica del distretto vulcanico dei Colli Albani; e (iii) sismicità urbana, legata alla modesta sismicità propria dell'area Romana.

L'attività sismica regionale è associata alle aree sismogenetiche dell'Appennino centro-meridionale, distanti tra i 60 e i 130 km da Roma, ed è responsabile dei massimi risentimenti avvertiti dalla città. In particolare, i terremoti riferibili al settore abruzz-

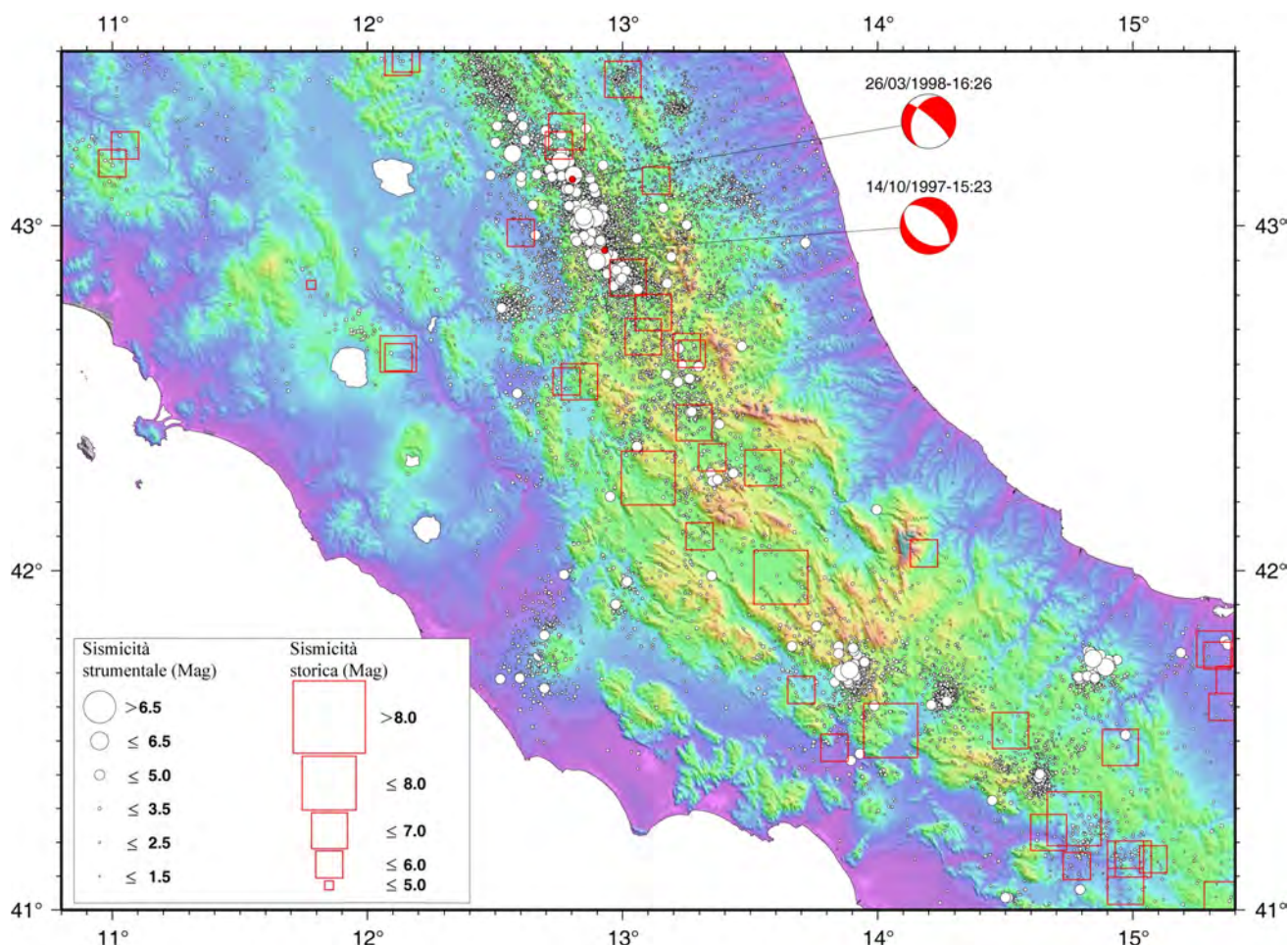


Fig. 1 - Mappa dell'Italia centrale con la distribuzione della sismicità negli ultimi 1000 anni. Sono localizzati gli epicentri e i meccanismi focali dei terremoti dell'Appennino Umbro-Marchigiano del 14 Ottobre 1997 (15:23 GMT; Mw=5.6; I0=VIII MCS; h=10 km) e del 26 Marzo 1998 (15:25 GMT; Mw=5.3; I0=VII MCS; h=50 km). Entrambi gli eventi si sono verificati a nord di Roma, rispettivamente a 115 e 145 km di distanza.

- Map of Central Italy with seismicity distribution in the last 1000 years. Epicentres and focal mechanisms of the October 14, 1997 earthquake (15:23 GMT; Mw=5.6; I0=VIII MCS; h=10 km) and March 26, 1998 earthquake (15:25 GMT; Mw=5.3; I0=VII MCS; h=50 km) are reported. These two events occurred north of the city of Rome, at 115 and 145 Km, respectively.





zese della catena (zone dell'Aquilano e del Fucino) possono generare eventi di magnitudo intorno a 7, a profondità ipocentrale compresa tra i 10 e i 15 km, con effetti massimi a Roma del VII-VIII grado MCS e stime dei tempi di ricorrenza attorno ai 100 anni. I più celebri eventi storicamente documentati riferibili a queste aree sono quelli del 2 febbraio 1703 e del 13 gennaio 1915, che portarono morte e distruzione in ampie zone dell'Italia centrale. Tuttavia, lo stato attuale delle conoscenze sulla sismicità romana autorizza ad attribuire alla sismicità centro-appenninica anche altri terremoti che provocarono gravi risentimenti in città nelle varie epoche storiche (i sismi del 443, del 29 aprile 801 e del 9 settembre 1349, solo per citarne alcuni). Anche la sequenza sismica Umbro-Marchigiana del 1997-1998, i cui effetti a Roma saranno descritti di seguito, è chiaramente ascrivibile all'attività sismica centro-appenninica.

L'attività sismica locale, dovuta alle aree sismogenetiche prossime a Roma, è riferibile essenzialmente ai distretti sismici del litorale tirrenico e della fascia vulcanica tosco-laziale (apparati dei Vulsini, dei Cimini, dei Sabatini e dei Colli Albani). L'area vulcanica a maggior tasso di attività sismica in tempi recenti è quella dei Colli Albani, sede di terremoti piuttosto frequenti, ma relativamente modesti in termini di energia liberata: le magnitudo massime si aggirano, infatti, intorno a 4.5 (AMATO *et alii*, 1994), con profondità ipocentrali limitate (comprese tra i 5 e 10 km), intensità massime a Roma del VI grado MCS e tempi di ritorno di 20 anni. Tale attività si manifesta sovente in caratteristici sciame sismici (1981, 1987, 1989). Gli studi di TERTULLIANI & RIGUZZI (1995) hanno ridimensionato il ruolo del distretto sismogenetico del litorale tirrenico, rilocalizzando gli eventi del 1 novembre 1895 e del 22 ottobre 1919 in un'area immediatamente a sud di Roma e attribuendoli alla sismicità urbana. Il litorale tirrenico è, comunque, responsabile di rari episodi con intensità nell'area di Roma attorno al V grado MCS. L'evento più recente che ha provocato lievi danni a Roma (fino al VI grado MCS), che sia riferibile alla sismicità tirrenica, risale al 19 luglio 1899.

L'attività sismica di origine urbana, compresa in un'area di circa 20 km di raggio con epicentri concentrati nell'area sud-orientale di Roma, è caratterizzata da frequenza di ricorrenza non elevata (tempi di ritorno di 100 anni), magnitudo inferiori a 4, intensità massime attorno al VI-VII grado MCS e profondità ipocentrali massime attorno ai

12 km, come accertato in occasione del terremoto romano del 12 giugno 1995 del VI grado MCS (BASILI *et alii*, 1996; TERTULLIANI *et alii*, 1996). L'evento storico meglio documentato della sismicità urbana è quello del 1 Novembre 1895 (TERTULLIANI & RIGUZZI, 1995). I cataloghi sismici generalmente ascrivono alla sismicità propria di Roma alcuni forti terremoti storici (nel 443 e nel 801, tra gli altri), la cui origine rimane incerta.

Per quanto riguarda le differenti aree sismogenetiche, dallo studio di FUNICIELLO *et alii* (1998) si evince che la pericolosità legata all'attività sismica propria dell'area Romana (sismicità urbana) e dei Colli Albani (sismicità locale) è relativamente modesta, per quanto non trascurabile. Per l'area di Roma la pericolosità sismica sarebbe essenzialmente legata ai terremoti generati dalle strutture sismogenetiche appenniniche, i cui effetti remoti possono costituire una minaccia nelle zone della città occupate dalle alluvioni recenti.

1.2 - LA RISPOSTA SISMICA DELL'AREA URBANA DI ROMA

Numerose aree urbane presentano complessità geologiche e variabilità delle caratteristiche geomeccaniche dei suoli che possono essere responsabili di effetti di amplificazione locale del moto del suolo durante un terremoto. In particolare, in occasione di numerosi terremoti sono stati osservati effetti di sito significativi, che hanno prodotto incrementi dell'intensità, dei danni e delle vittime, in aree dove la geologia di superficie presenta bruschi passaggi laterali tra il substrato roccioso stabile (bedrock) e i depositi incoerenti e alluvionali (soft soils). Tutti i recenti terremoti catastrofici, infatti, hanno evidenziato anomali aumenti del danneggiamento nelle città caratterizzate dalla presenza di depositi alluvionali. Il caso più noto è sicuramente quello del terribile terremoto ($M_s=8.1$) del 19 Settembre 1985 di Michoacan (Messico), in cui un'eccezionale amplificazione locale dello scuotimento in un bacino lacustre ha provocato danni catastrofici a Mexico City, situata a circa 300 km di distanza dall'epicentro (SANCHEZ-SESMA *et alii*, 1988; SINGH *et alii*, 1988). Anche la sorprendente distruzione provocata dal terremoto dell'Armenia del 7 dicembre 1988 ($M_s=6.8$; $I_0=X$), è stata associata all'anomala amplificazione del moto del suolo di alcuni depositi argillosi lacustri affioranti (HADJIAN, 1993). Ugualmente, i danni ingenti provocati dal terremoto di Loma Prieta (USA) dell'11

ottobre 1989 ($M_s=7.0$; $I_0=IX$) nella città di San Francisco, situata a 90 km dall'epicentro, sembrerebbero correlati al comportamento del substrato geologico della città (SEEKINS & BOATWRIGHT, 1994). Nel caso del terremoto di Kobe (Giappone) del 17 gennaio 1995 ($M_w=6.9$; $I_0=X$), il drammatico danneggiamento di parte della città è stato spiegato da KAWASE (1996) e PITARKA *et alii* (1996)

con la presenza di un effetto di bordo del bacino alluvionale sottostante. Secondo MOTOSAKA & NAGANO (1996) il fenomeno di amplificazione locale sarebbe legato al duplice effetto di un bacino alluvionale profondo e del comportamento sismico di strati soffici superficiali.

Negli anni passati, numerosi studi sulle caratteristiche della geologia locale e la distribuzione dei

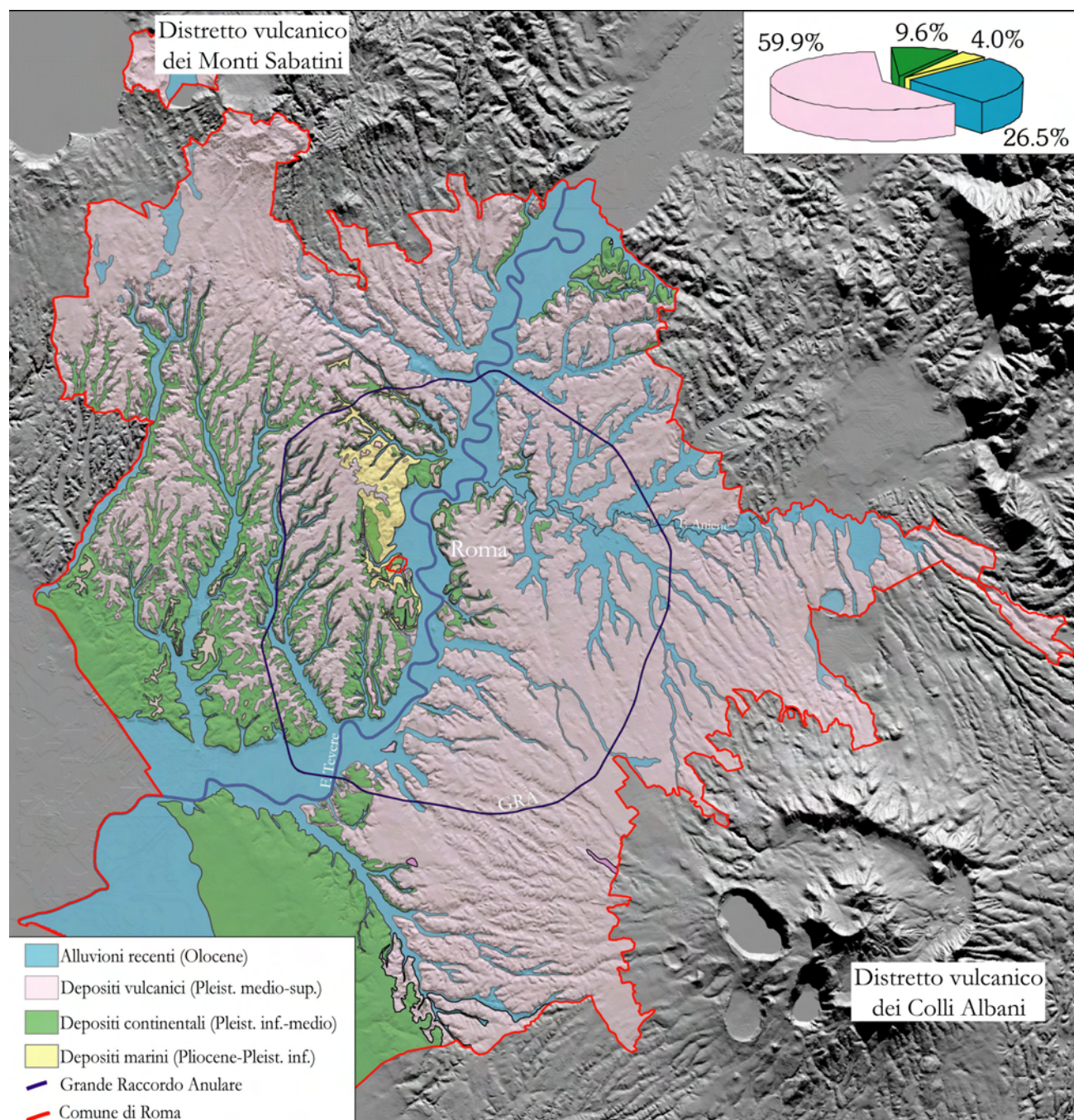


Fig. 2 - Carta geolitologica dell'area comunale di Roma e ripartizione percentuale delle diverse unità litologiche all'interno del Grande Raccordo Anulare (nel riquadro in alto a destra della figura).

- Lithologic map of the urban area of Rome and percentage distribution (in the inset) of the outcropping units within the ring road (G.R.A)





danni sismici in occasione dei terremoti storici hanno impresso un forte impulso alle conoscenze sulla risposta sismica dell'area urbana di Roma. Gli studi di AMBROSINI *et alii* (1986) e MOLIN & GUIDOBONI (1989) hanno evidenziato una stretta correlazione qualitativa tra distribuzione del danneggiamento e caratteristiche meccaniche dei terreni alluvionali recenti. La successiva creazione di una banca dati dei sondaggi stratigrafici esistenti e la ricostruzione dettagliata del sottosuolo della città (FUNICIELLO, 1995) hanno consentito di effettuare delle simulazioni numeriche del moto del suolo atteso in caso di forte terremoto (ROVELLI *et alii*, 1994, 1995a, 1995b). I maggiori livelli di accelerazione sono stati registrati proprio in corrispondenza dei terreni alluvionali recenti, in particolare lungo i margini della valle alluvionale del Tevere, nelle stesse situazioni geologiche dove tendono a concentrarsi gli effetti sismici più gravi. Una percentuale significativa dell'area romana è rappresentata in affioramento dalle alluvioni oloceniche (fig. 2) ed è, quindi, per l'insieme dei fattori sopra esposti, in condizioni di dare risposta sismica con effetti massimi d'intensità dell'VIII grado della scala MCS.

1.3 - GLI EFFETTI DEI TERREMOTI SUI MONUMENTI DI ROMA

Le fonti storiche scritte, gli studi macrosismici e sismologici e i dati geoarcheologici riportano numerosi casi di danneggiamento sismico al patrimonio storico, artistico e monumentale di Roma. Nel corso della sua bimillenaria storia, lesioni di origine sismica di un certo rilievo sono state riportate da quasi tutti i principali monumenti della città, anche per effetto dell'elevata vulnerabilità strutturale e della vetustà degli edifici. Nel corso dei secoli, il Colosseo venne ripetutamente danneggiato e indebolito, fino a trasformare il settore meridionale dell'anello esterno in una cava di pietre nel Basso Medio Evo. Numerosi templi e basiliche della Roma antica crollarono in seguito alle scosse sismiche, o furono distrutti nel corso degli incendi divampati a seguito dei terremoti. Le due più alte e formidabili torri della Roma medievale, la Torre delle Milizie e la Torre dei Conti, furono decapitate nel corso del tremendo terremoto del 1349, documentato da Francesco Petrarca. Le profonde lesioni ancora oggi riscontrabili sulla Colonna di Marco Aurelio sono quasi certamente da attribuire ad un terremoto del XIV secolo. Solo

negli ultimi 1000 anni, oltre 70 chiese e basiliche della città sono state danneggiate dagli eventi sismici (FUNICIELLO *et alii*, 1998); di queste almeno 16 (fra cui S. Paolo fuori le Mura e S. Giovanni in Laterano) hanno riportato lesioni gravi. Oltre 40 palazzi monumentali della Roma rinascimentale e barocca, infine, sono stati lesionati dai terremoti (DONATI *et alii*, 1999).

Tra gli studi effettuati sugli effetti dei terremoti sui monumenti di Roma, hanno rivestito particolare importanza quelli sul Colosseo e la Colonna di Marco Aurelio. Nel primo caso, in relazione ai numerosi danneggiamenti subiti dall'Anfiteatro Flavio in occasione dei terremoti storici, sono state ricostruite in modo dettagliato le caratteristiche geologiche e geotecniche del sottosuolo del monumento (BOZZANO *et alii*, 1995). Le analisi di laboratorio dei sondaggi effettuati nel sottosuolo del Colosseo hanno indicato una minore densità per i depositi alluvionali recenti del Fosso Labicano rispetto alle più antiche unità sedimentarie e vulcaniche plio-pleistoceniche. Anche i parametri di resistenza al taglio mostrano una netta transizione tra i depositi alluvionali recenti e le unità che costituiscono il bedrock; tale diverso comportamento meccanico può provocare una differenza significativa nell'impedenza sismica delle diverse unità geologiche del sottosuolo romano. Le analisi stratigrafiche hanno confermato che la porzione meridionale del Colosseo, che è il settore maggiormente danneggiato (si pensi all'assenza dell'anello esterno), poggia sulla valle sepolta del Fosso Labicano, un affluente minore del Tevere. Tale paleoinvaso è riempito di depositi alluvionali olocenici, potenzialmente responsabili di forti amplificazioni del moto del suolo durante i terremoti (FUNICIELLO *et alii*, 1995). Lo studio della risposta sismica del sottosuolo del Colosseo, condotto attraverso una modellazione numerica 2-D (MOCZO *et alii*, 1995), ha confermato che la parte meridionale dell'Anfiteatro, costruita sopra la valle minore del reticolo idrografico del Tevere nota come Fosso Labicano, riempita di terreni alluvionali poco consolidati, può essere soggetta ad una risonanza bidimensionale della valle, con un moto sismico del suolo con ampiezza, spostamento differenziale e durata maggiore della parte settentrionale. I ripetuti scuotimenti sismici possono, quindi, avere giocato un ruolo chiave nell'indebolimento ed il deterioramento della struttura nel corso dei secoli successivi al crollo dell'impero romano.

Altri studi (BOSCHI *et alii*, 1993) sono stati con-

dotti per verificare se il differente stato di conservazione delle due colonne imperiali di Traiano (la Colonna Traiana, presso il Foro omonimo, praticamente integra) e Marco Aurelio (la cosiddetta Colonna Antonina, sita in piazza Colonna, che presenta una evidente traslazione di alcuni rocchi) sia da addebitare al verificarsi di forti variazioni del moto del suolo all'interno di un'area limitata a causa delle variazioni della geologia locale. Le colonne, infatti, sono sostanzialmente simili per architettura, età, dimensione e materiali e distano solo 700 metri. L'esame della storia e della struttura delle colonne, l'analisi dei caratteri stratigrafici e geologico-tecnici del sottosuolo e la modellazione numerica della risposta sismica locale (BOSCHI *et alii*, 1995b), hanno confermato la tesi che individua nelle azioni sismiche la causa degli ingenti danni riscontrabili sulla Colonna Antonina. In particola-

re, la modellazione numerica della risposta del sito della Colonna Antonina ha evidenziato una significativa amplificazione spettrale attorno ad una ristretta banda di frequenza (1-1.5 hertz) corrispondente al modo di vibrazione naturale della colonna. Sulla base della modellazione, nel corso di un terremoto appenninico di magnitudo 7 posto a 100 km da Roma, tale accoppiamento potrebbe provocare la risonanza della Colonna. Le due cause concomitanti del danneggiamento sarebbero quindi la coincidenza tra la frequenza di risonanza dei terreni e la frequenza propria di vibrazione della colonna e l'indebolimento strutturale della colonna stessa, conseguente alla rimozione dei fermi di metallo avvenuta tra il XIII ed il XIV secolo, prima del grande restauro strutturale promosso da Papa Sisto V nel 1585.

Una revisione complessiva del livello di danneggiamento subito da oltre 150 edifici monumentali di Roma in occasione di tutti i maggiori terremoti storici (DONATI *et alii*, 1999) in funzione dell'area sismogenetica (Appennino centrale, Colli Albani e Area Romana) e del substrato geologico ha ulteriormente confermato come la distribuzione degli effetti sismici sia direttamente correlabile alle variazioni della geologia superficiale e statisticamente significativa: quasi l'80% degli effetti di maggiore gravità si è verificato in corrispondenza dei depositi alluvionali olocenici (fig. 3). In particolare, sono state evidenziate locali accentuazioni del danneggiamento nei settori dove le discontinuità geologiche e morfologiche sono più marcate: ai bordi della valle del Tevere, suggerendo un "effetto di bordo", e in corrispondenza dei letti alluvionali del reticolo idrografico minore del Tevere (i Velabri Maggiore e Minore ed il Fosso Labicano), dove sono ipotizzabili effetti di risonanza. Alcuni effetti secondari sono legati ai caratteri geomorfologici, quali la presenza dei rilievi topografici dei Sette Colli (effetto topografico). Anche la distribuzione areale degli interventi di restauro strutturale sui medesimi monumenti danneggiati dai terremoti, ricavata attraverso la classificazione degli edifici per numero d'interventi di recupero, ha evidenziato una notevole correlazione con le variazioni locali della geologia di superficie (DONATI *et alii*, 1999). Tale dato conferma l'ipotesi che i monumenti costruiti sulle alluvioni oloceniche delle valli alluvionali del Tevere e dei suoi affluenti abbiano richiesto, nel corso dei secoli, un maggior numero di interventi di restauro strutturale rispetto agli edifici costruiti sul substrato roccioso.

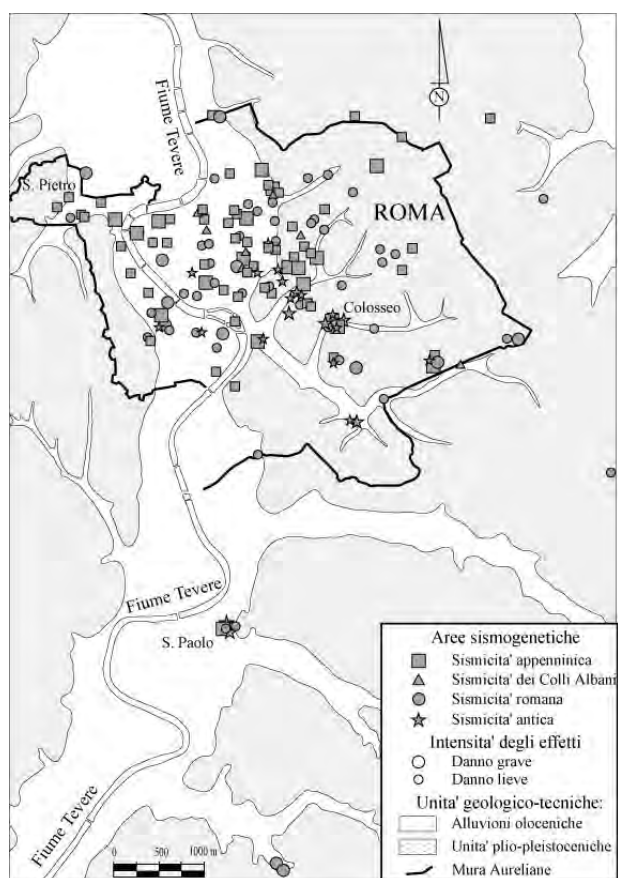


Fig. 3 - Distribuzione degli effetti sismici dei principali terremoti storici su 151 monumenti di Roma, in funzione dell'intensità, dell'area sismogenetica di provenienza e dei caratteri geologico-tecnici delle unità affioranti (da DONATI *et alii*, 1999).

- Distribution of seismic effects caused by main historical earthquakes on 151 Roman monuments. Effects are a function of the intensity, seismogenetic area and geological-geotechnical characteristics of outcropping units (from DONATI *et alii*, 1999).



2 - IL RILEVAMENTO MACROSISMICO AD ALTA DENSITÀ DI DATI NELLA CITTÀ DI ROMA

2.1 - PREMESSA

Nell'ambito degli studi sulla risposta sismica locale, gli studi macrosismici per la stima delle intensità nelle aree urbane hanno rivestito generalmente un ruolo piuttosto marginale. Tra le poche applicazioni di questo approccio figurano gli studi sulle città di San Francisco (USA; SEEKINS & BOATWRIGHT, 1994) e di Christchurch (Nuova Zelanda; TOSHINAWA *et alii*, 1997). Per quanto riguarda il contesto italiano, la sequenza sismica umbro-marchigiana del settembre 1997-aprile 1998 ha rappresentato un'occasione per confrontarsi con la problematica degli effetti di sito nella città di Roma (CIFELLI *et alii*, 1999a, 1999b, 2000). La sequenza umbro-marchigiana ha rappresentato, infatti, una valida opportunità per studiare la risposta sismica di Roma sulla base di un diverso metodo d'indagine: il rilevamento macrosismico ad alta densità di dati. Tale strumento, che integra i dati geologici di base (stratigrafici, strutturali e geotecnici) con un grande numero di informazioni di carattere macrosismico, consente la copertura del territorio con una notevole densità di dati sulla risposta sismica del suolo e si presta in modo particolarmente efficace, oltretutto economico, al monitoraggio di una moderna area urbana.

Roma, metropoli di oltre 3 milioni di abitanti, con un patrimonio artistico e archeologico inestimabile e un'edilizia estremamente differenziata, storicamente soggetta ad un rischio sismico non trascurabile, ha risentito di molte delle scosse principali della sequenza sismica umbro-marchigiana, anche con punte di intensità fino al V-VI grado della scala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS), pur trovandosi a più di 100 km dai margini meridionali della struttura sismogenetica.

La possibilità di un'applicazione di un'indagine macrosismica nell'area di Roma è stata operata considerando una serie di fattori: (i) la conoscenza sempre più dettagliata dei caratteri geologici (TELLINI, 1893; VERRI, 1915; DRAGONE *et alii*, 1963; ALBERTI *et alii*, 1967; VENTRIGLIA, 1971; CONATO *et alii*, 1980; DE RITA *et alii*, 1988; MARRA & ROSA, 1995; MARRA *et alii*, 1998; BOZZANO *et alii*, 1999; CORAZZA *et alii*, 1999; FUNICIELLO & GIORDANO, questo volume); (ii) il grande numero di studi sulla risposta sismica dell'area (tra gli altri, AMBROSINI *et*

alii, 1986, MOLIN & GUIDOBONI, 1989, TERTULLIANI & RIGUZZI, 1995, DONATI *et alii* 1999) e le modellazioni numeriche (FAH *et alii* 1993, 1995; e ROVELLI *et alii* 1994, 1995b); (iii) il fatto che l'ultima analisi della risposta sismica di Roma dovuta ad un grande terremoto Appenninico (AMBROSINI *et alii*, 1986), risalga al grande sisma di Avezzano del 1915, e che si riferisca, inevitabilmente ad un contesto urbanistico poco rappresentativo della situazione attuale; (iv) la straordinaria importanza di Roma in considerazione del suo significato storico, politico ed economico, che comporta un valore esposto e una vulnerabilità molto elevati.

Roma si presta, dunque, a verificare il possibile contributo della moderna macrosismica allo studio della risposta sismica delle aree urbane in un contesto geologico, sismotettonico e urbanistico del tutto peculiare. Il caso di Roma si può considerare come paradigmatico di una grande metropoli, situata a oltre 100 km dai centri sismogenetici più pericolosi, con un substrato geologico caratterizzato da un reticolo idrografico recente che incide un bedrock sedimentario e vulcanico, e con un patrimonio edilizio fortemente differenziato. Come noto, dal punto di vista geologico, la città è caratterizzata da forti variazioni laterali delle proprietà geotecniche nei terreni del sottosuolo, come la presenza di depositi recenti olocenici e coperture antropiche che ricolmano le incisioni fluviali generate durante l'ultimo picco glaciale (WÜRM) (FUNICIELLO & GIORDANO, questo volume).

2.2 - METODOLOGIA UTILIZZATA

L'analisi delle variazioni dell'intensità macrosismica entro aree limitate presenta numerosi evidenti vantaggi: (i) consente di delineare in breve tempo lo scenario del terremoto; (ii) è una tecnica relativamente semplice, veloce ed economica; (iii) rappresenta il complemento ideale delle registrazioni strumentali e un valido test per la verifica delle modellazioni numeriche; (iv) è un utile strumento per mettere in relazione i dati eventualmente disponibili sui terremoti storici con quelli degli eventi più recenti; (v) può fornire dati ad alta densità, in misura difficilmente riproducibile con le altre metodologie.

Lo sviluppo di una metodologia per i rilevamenti macrosismici ad alta densità di dati in aree urbane si basa sul concetto che la percezione umana del terremoto può costituire un indicatore del livello dello scuotimento solo se è "mediata"



Tab. 1: Questionario macrosismico - *Macroseismic questionnatie*

Come compilare il questionario:

1. Leggere attentamente tutte le domande.
2. Intervistare il maggior numero di persone presenti nello stesso luogo (casa, ufficio, ecc.) durante l'evento sismico, raccogliendo le informazioni da persone presenti sia ai piani bassi che ai piani alti dell'edificio.
3. Rispondere alle domande sintetizzando tutte le informazioni raccolte.
4. Scrivere il numero di interviste compiute: _____
5. Scrivere l'indirizzo corretto del punto d'osservazione al fine di individuarne l'esatta posizione topografica: via _____, n. civico _____, incrocio più vicino _____.
6. Annotare altre possibili osservazioni non incluse nel questionario (innesco antifurto, danni agli edifici) e altri eventuali commenti.

1 *Scossa non avvertita*

2 *Scossa avvertita solamente da qualche persona in condizioni di riposo ai piani alti delle case*

3 *Scossa sentita da pochi e non riconosciuta come terremoto*

4 *La scossa ha provocato sbandamenti nella guida di autovetture*

Scossa sentita in luoghi chiusi da:

5 *pochi*

6 *molto*

7 *la maggior parte*

Scossa sentita all'aperto da:

8 *pochi*

9 *molto*

10 *la maggior parte*

Il terremoto ha svegliato:

11 *nessuno*

12 *pochi*

13 *molto*

14 *tutti*

Il terremoto ha spaventato:

15 *nessuno*

16 *pochi*

17 *molto*

18 *tutti*

19 *Ai piani bassi delle case i lampadari hanno oscillato*

Leggero scuotimento di porte, finestre, suppellettili, leggera vibrazione di sedie, letti, ecc.:

20 *solo ai piani superiori al secondo*

21 *a tutti i piani*

22 *liquidi in recipienti hanno oscillato*

23 *con piccoli versamenti*

24 *con traboccamento*

Tintinnio di vetri di finestre, di vetrine di mobili o di bicchieri e piatti:

25 *solo ai piani alti*

26 *a tutti i piani*

27 *Scricchiolio di mobili e/o travi e assi nei soffitti*

I quadri appesi:

28 *si sono mossi o hanno sbattuto contro la parete*

29 *sono caduti*

30 *Sbattimento o apertura di porte, finestre, sportelli*

Hanno suonato:

31 *piccole campane*

32 *campane in campanili o torri*

Piccoli oggetti sono:

33 *stati spostati*

34 *caduti*

35 *Caduta di bicchieri, libri e cose simili*

Oggetti stabili e pesanti sono:

36 *stati spostati*

37 *caduti*

38 *Mobili leggeri sono stati spostati*

Mobili pesanti sono:

39 *Stati spostati*

40 *caduti*



attraverso una grande mole di dati (KAYANO, 1990; DENGLE & DEWEY, 1998). Nella ricerca condotta da CIFELLI *et alii* (1999a, 1999b, 2000) sono stati esaminati gli effetti avvertiti dalla città di Roma dei terremoti dell'Appennino Umbro-Marchigiano del 14 ottobre 1997 (15:23 GMT; $M_w=5.6$; $I_0=VIII$ MCS; $h=10$ km), il più forte tra gli eventi situati nel settore meridionale della struttura sismogenetica, e del 26 Marzo 1998 ($M_w=5.3$; $I_0=VI-VII$ MCS; $h=50$ km) che costituisce l'evento più profondo, subcrostale, della sequenza.

A seguito del terremoto del 14 Ottobre 1997, con epicentro nell'area di Sellano (EKSTRÖM *et alii*, 1998), a circa 115 km da Roma ma fortemente risentito nella città (IV-V grado MCS, con punte del V-VI), è stata testata per la prima volta una metodologia originale per il rilevamento macrosismico ad alta densità nelle aree urbane (CIFELLI *et alii*, 1999a, 1999b). In occasione del terremoto del 26 Marzo 1998, con epicentro 145 km a nord di Roma (EKSTRÖM *et alii*, 1998), la stessa metodologia è stata nuovamente applicata e perfezionata. Tale metodologia, finalizzata alla raccolta nel più breve tempo possibile della maggiore quantità di informazioni macrosismiche ricavate in maniera indi-

retta, è stata attuata attraverso la distribuzione di un questionario macrosismico in una rete di scuole superiori di Roma (CIFELLI *et alii*, 1999b). La scala macrosismica adottata è la Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS). Il questionario macrosismico utilizzato nella procedura standard adottata dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) per la stima dell'intensità è stato parzialmente riformulato *ad hoc*, in una veste maggiormente accessibile a un pubblico di studenti delle scuole medie superiori (tab.1). I moduli sono stati distribuiti in un campione di scuole selezionate sulla base della collocazione geografica, per raggiungere una configurazione dell'area metropolitana il più possibile omogenea. La sistematica e attiva collaborazione delle scuole ha consentito la realizzazione di una vera e propria rete di monitoraggio macrosismico (CIFELLI *et alii*, 2000).

Le informazioni macrosismiche raccolte sono state riportate in una carta geolitologica di sintesi. In tale carta, le formazioni affioranti sono state distinte in 4 unità principali, sulla base dell'età e delle proprietà geotecniche che regolano l'impedenza sismica (densità e velocità): i depositi marini pliocenici, che rappresentano il substrato roccioso

Tab. 2 - Accorpamento delle formazioni geologiche dell'Area Romana in unità geolitologiche sulla base dell'età e delle proprietà geotecniche (densità e Vs) che regolano l'impedenza sismica. (Dai lavori di BOSCHI *et alii*, 1992, ROVELLI *et alii*, 1994, BOZZANO *et alii*, 1995 e FUNICIELLO *et alii*, 1995).

- *Gathering of the geological formations of the Roman area into 4 principal lithological units.*

Formazione geologica	Unità geolitologica	Periodo	ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)
Riporti antropici	Alluvioni Recenti	Olocene	1.30-1.89	100-400
Depositi alluvionali				
Formazione di Vitinia	Prodotti vulcanici	Pleistocene medio-superiore	1.90-2.00	400-600
Formazione Aurelia				
Prodotti dei Monti Sabatini				
Prodotti dei Colli Albani				
Formazione Fosso del Torrino	Depositi Continentali	Pleistocene inferiore-medio	1.89-2.00	350-450
Formazione di Valle Giulia				
Formazione di Santa Cecilia				
Formazione Fosso della Crescenza				
Formazione Ponte Galeria				
Unità di Monte Mario	Depositi Marini	Pliocene-Pleistocene inferiore	2.01-2.10	600-1300
Unità di Monte Vaticano				

dell'area, i depositi continentali del Pleistocene inferiore e medio, le formazioni vulcaniche tardo-pleistoceniche e i depositi alluvionali olocenici. La Tabella 2 mostra la corrispondenza tra queste 4 unità geolitologiche e le formazioni note in letteratura.

Il processamento dei questionari macrosismici raccolti secondo la procedura di routine

dell'INGV (GASPARINI *et alii*, 1992) ha consentito di attribuire valori di intensità a ridotte porzioni di territorio. Tale approccio si discosta parzialmente dai metodi macrosismici tradizionali, presentando delle analogie con le procedure caratteristiche della sismologia storica. Gli studi macrosismici tradizionali, infatti, finalizzati alla ricostruzione di scenari regionali e a scopi di protezione civile, assegnano

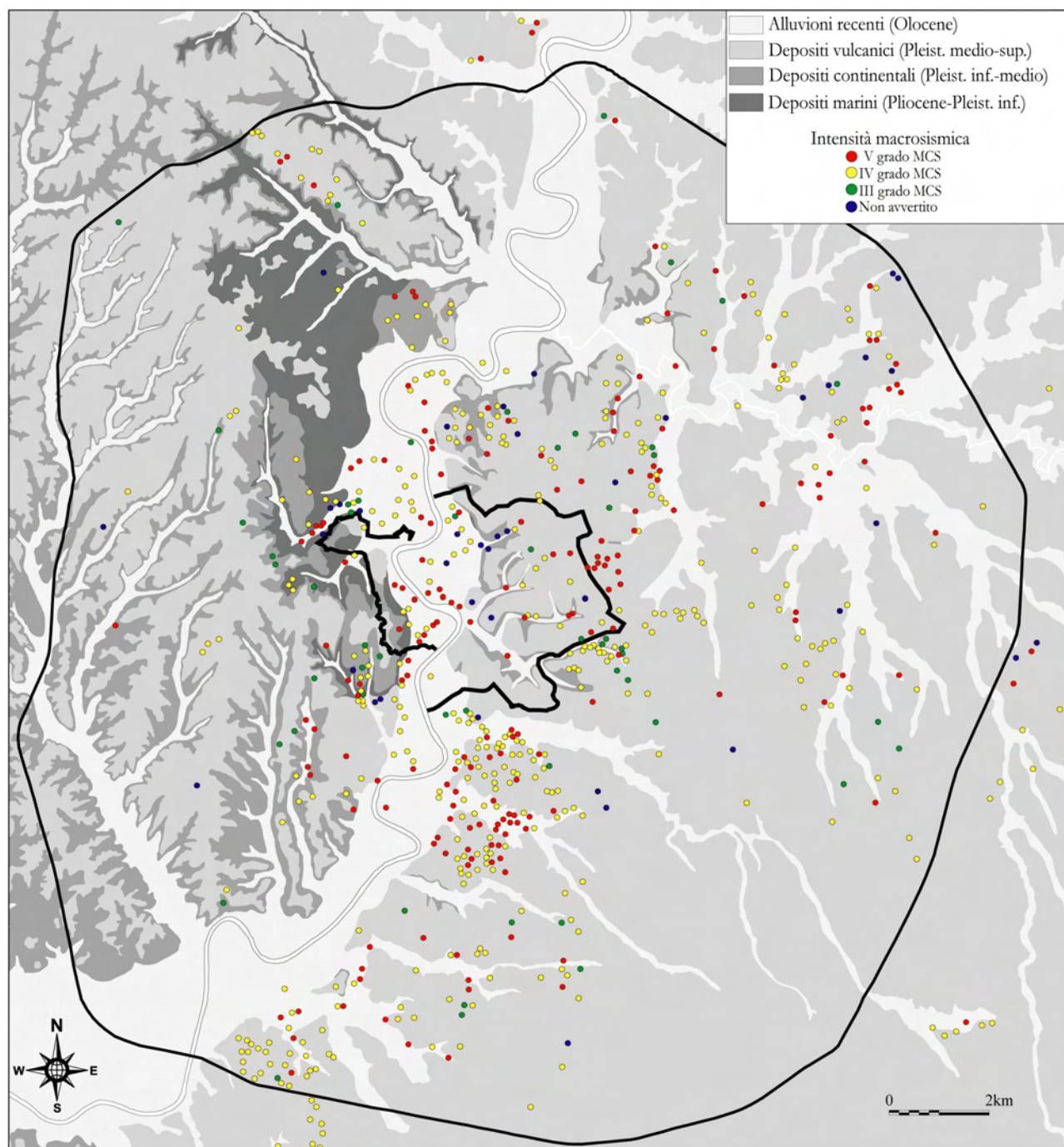


Fig. 4 - Distribuzione dei punti di intensità MCS del terremoto umbro-marchigiano del 14 ottobre 1997 sovrapposta alla carta geo-litologica di Roma.
- Distribution of observation points in the area of Rome for the October 14, 1997 earthquake.



gradi di intensità ad ambiti territoriali di medie o grandi dimensioni definiti sulla base di confini amministrativi (frazioni, comuni, ecc.). Tali metodologie di routine, pertanto, non sono tagliate per l'individuazione degli eventuali effetti locali che si possono riscontrare in una grande area urbana. Gli studi sugli effetti dei terremoti storici, invece, attribuiscono a singoli edifici valori di intensità in base

all'entità del danno riportato nelle cronache. Tale procedura, ad esempio, è stata utilizzata da AMBROSINI *et alii* (1986) e MOLIN & GUIDOBONI (1989) per analizzare la distribuzione dei danni causati dai terremoti storici nella città di Roma. Un approccio analogo è stato utilizzato da TERTULLIANI *et alii* (1996) per lo studio macrosismico del terremoto locale del 12 giugno 1995, riferi-

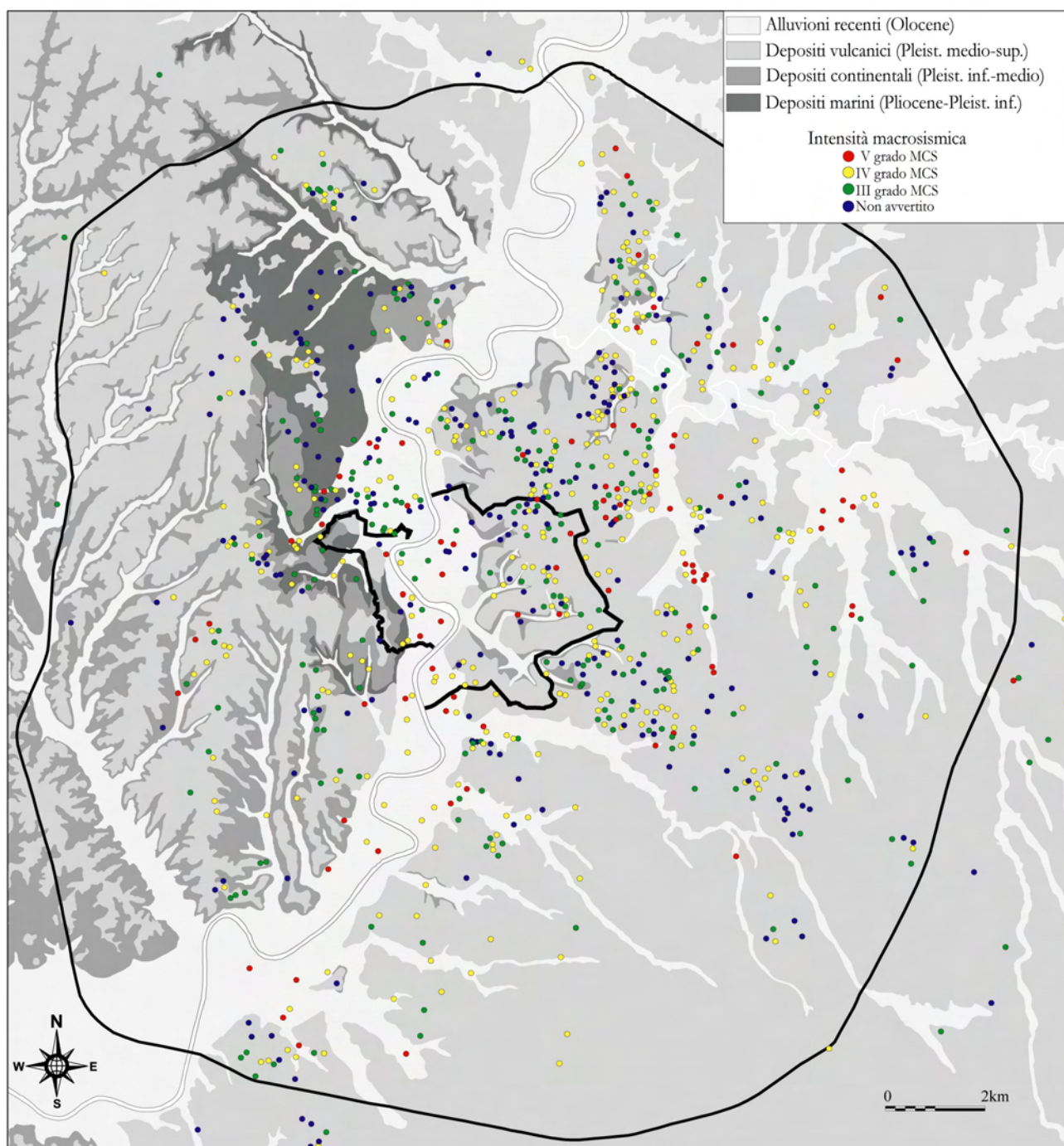


Fig. 5 - Distribuzione dei punti di intensità MCS del terremoto umbro-marchigiano del 26 marzo 1998 sovrapposta alla carta geo-litologica di Roma.
- Distribution of observation points in the area of Rome for the March 26, 1998 earthquake.

bile alla sismicità caratteristica dell'area romana. Secondo un approccio intermedio tra queste due discipline, sono stati attribuiti valori di intensità a porzioni di territorio la cui informazione copre un'area di 50 m di raggio, dove tutte le informazioni contenute nei questionari che ricadono in quel punto di osservazione sono sintetizzate e mediate attraverso un algoritmo (GASPARINI *et alii*, 1992). La versione finale del questionario adottata (Tabella 1) è essenzialmente incentrata sugli effetti percepiti sulle persone e gli oggetti; la parte riguardante i danneggiamenti e le strutture è stata eliminata, considerando l'inadeguata conoscenza dei dettagli strutturali degli edifici e delle strutture da parte degli studenti (CIFELLI *et alii*, 1999a).

2.3 - RISULTATI

Complessivamente, per l'evento sismico del 14 Ottobre 1997 le informazioni macrosismiche locali sono state sintetizzate in 669 punti di osservazione, con una densità media nell'area urbana di Roma compresa entro il Grande Raccordo Anulare (circa 366 km²) di 1.8 dati/km² (fig. 4). In



Fig. 6 - Schema dell'area urbanizzata di Roma all'interno del Grande Raccordo Anulare. E' interessante notare che l'area urbanizzata all'epoca del disastroso terremoto dell'Appennino centrale del 13 gennaio del 1915 rappresenta una minima parte della moderna città, che si è sviluppata per l'80 % durante gli ultimi 100 anni.

- Sketch of the urbanised area of Rome within the local ring road (G.R.A.). It is worth nothing the urban setting after the 13 Jenuary earthquake is a small part of the modern city, mostly developed in the twentieth century

occasione del sisma del 26 Marzo 1998 sono state coinvolte complessivamente 27 scuole superiori di Roma, quasi triplicando gli istituti coinvolti nella ricerca rispetto alla prima indagine. I valori di intensità macrosismica sono stati sintetizzati in 928 punti di osservazione, con una densità media all'interno del settore compreso nel Grande Raccordo Anulare di 2.5 dati/km² (fig. 5). Considerando però la disomogeneità del tessuto urbano di Roma, accresciutasi in fasi successive nell'arco di 2.500 anni di storia, nell'area compresa all'interno del Grande Raccordo Anulare (GRA) sono presenti ampie zone non edificate, tra cui le "ville", i grandi giardini pubblici cittadini, le aree archeologiche, le aree golenali del Tevere e alcune zone ancora soggette ad una certa naturalità (fig. 6). Per tali motivi, la reale estensione del settore urbanizzato

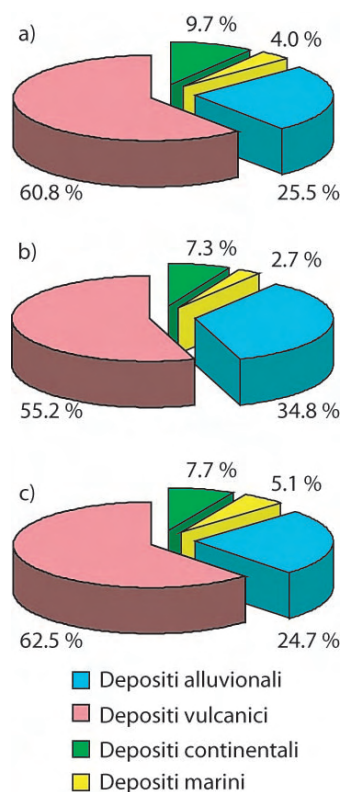


Fig. 7 - a) distribuzione percentuale delle litologie affioranti nell'area urbanizzata di Roma (vedi fig. 6); b) distribuzione dei punti di osservazione macrosismica nelle litologie affioranti nell'area urbanizzata per il terremoto del 14 ottobre 1997; c) distribuzione dei punti di osservazione macrosismica nelle litologie affioranti nell'area urbanizzata per il terremoto del 26 marzo 1998. Si noti come la distribuzione dei punti sulle diverse litologie sia consistente con la distribuzione percentuale delle stesse litologie nell'area urbanizzata di Roma.

- a) percentage distribution of the outcropping units in the urbanized area of Rome; b) distribution of the intensity points of the october 14, 1997 survey; c) distribution of the intensity points of the 26 march 1998 survey. The data distribution on the different lithological units is consistent with the percentage distribution of the same units the urbanized area of Rome.



all'interno del GRA può essere stimata attorno al 54,3% (pari a poco meno di 200 km²) della superficie complessiva. Alla luce di ciò, la densità media dei punti di osservazione del rilevamento del sisma del 14 ottobre 1997 nell'area effettivamente urbanizzata è di 3.37 dati/km², mentre per il sisma del 26 marzo 1998 la media sale a 4.67dati/km².

La rappresentatività della distribuzione geografica dei dati acquisiti nell'intera area urbana di Roma è stata verificata attraverso il confronto con la distribuzione percentuale di affioramento nell'area studiata delle principali unità geologiche (fig. 7). Questa comparazione è particolarmente significativa nel contesto geologico dell'area romana, caratterizzata da un esteso plateau vulcanico e dalla dorsale sedimentaria dove affiora il bedrock regionale, entrambi profondamente incisi dall'articolato reticolo idrografico del fiume Tevere e dei suoi affluenti. Questo peculiare assetto geologico comporta la presenza di zone di affioramento del substrato sedimentario plio-pleistocenico di ridotte

dimensioni lungo i fossi scavati dagli affluenti del primo e del secondo ordine del Tevere.

Verificata l'attendibilità della distribuzione delle informazioni macrosismiche, è stato possibile procedere all'analisi dei dati. La correlazione dell'intensità con la geologia di superficie ha evidenziato una distribuzione degli effetti non casuale. L'analisi delle intensità in funzione dei caratteri geologici del sottosuolo ha evidenziato una distribuzione preferenziale dei maggiori effetti nelle aree caratterizzate dai depositi alluvionali olocenici sia della valle del Tevere che del reticolo idrografico minore (CIFELLI *et alii*, 2000). Tale elemento risulta evidente già a livello qualitativo, esaminando la già citata distribuzione dei punti di intensità sulla carta geo-litologica di Roma (figg. 4 e 5).

L'analisi della frequenza delle classi d'intensità in funzione delle unità geolitologiche mostra per l'evento del 14 ottobre 1997 come le aree caratterizzate dalle alluvioni recenti siano risultate soggette mediamente ad effetti del V grado della scala

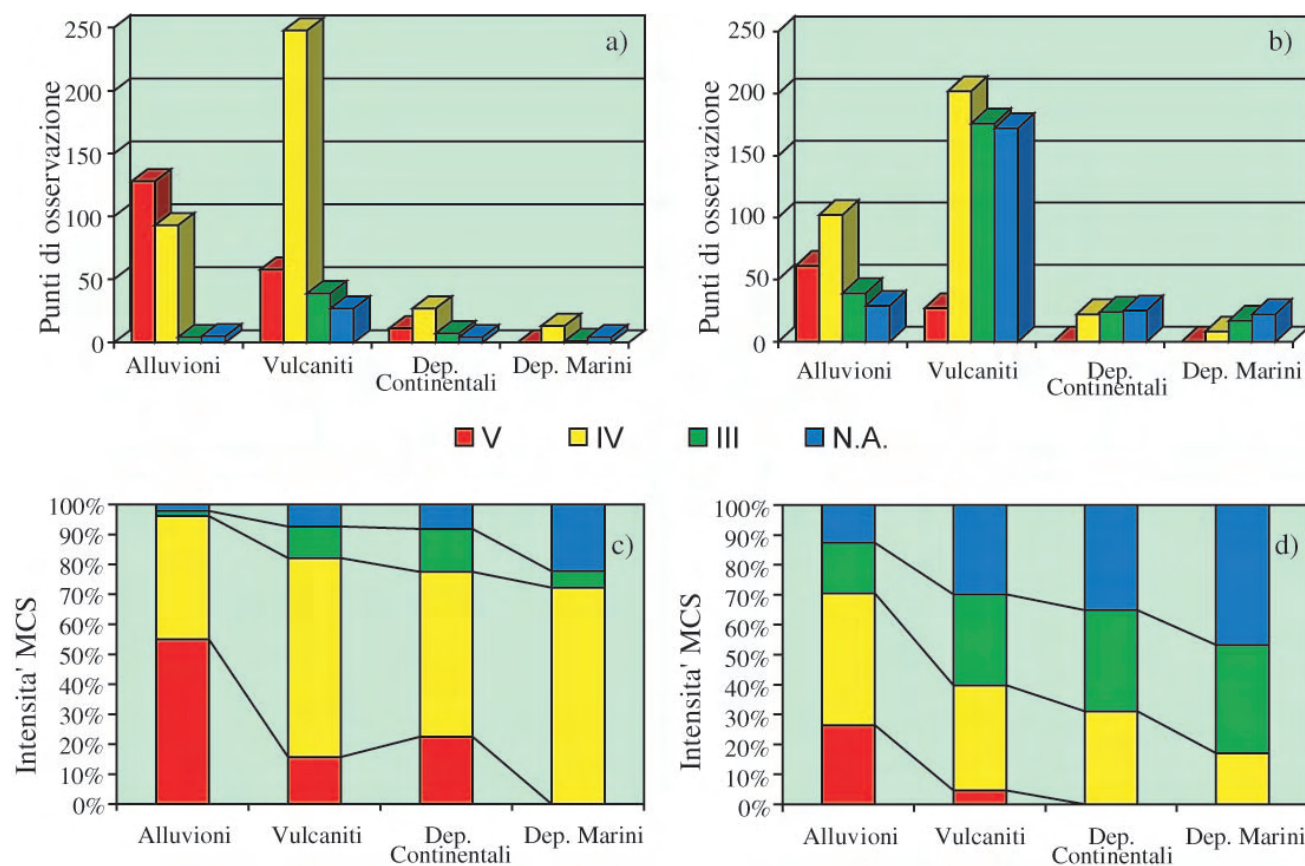


Fig. 8 - Effetti a Roma del terremoto umbro-marchigiano del 14 Ottobre 1997 (colonna sinistra) e del 26 Marzo 1998 (colonna destra): a) e b) frequenza dei punti di intensità MCS in funzione delle unità geolitologiche; c) e d) distribuzione normalizzata dei punti di intensità MCS in funzione delle unità geolitologiche.

- Distribution of intensity points in relation to each single geolithological unit (a,b) and percentage distribution of density classes for each single geolithological unit (c,d) in Rome for the 14 October 1997 (left column) and 26 March 1998 (right column) Umbria-Marche (Central Italy) earthquakes.

MCS, mentre l'intensità riscontrata nelle aree occupate dalle formazioni vulcaniche e sedimentarie preoloceniche è risultata mediamente del IV grado MCS (fig. 8a). In particolare, quasi il 60% degli effetti sulle alluvioni oloceniche è stato del V grado MCS (fig. 8c). Gli effetti compresi dal IV grado MCS al non avvertito (NA) hanno caratterizzato essenzialmente la risposta delle unità preoloceniche; nessun effetto del V grado è stato riscontrato sul bedrock pliocenico. Per l'evento del 26 Marzo 1998, l'intensità media del terremoto è risultata minore rispetto all'evento del 14 ottobre 1997, riconducibile alla minore magnitudo (5.3 rispetto a 5.6), alla maggiore distanza epicentrale (145 km rispetto a 115 km) e alla maggiore profondità ipocentrale (50 km rispetto a 10 km). Nonostante il minor risentimento generale rispetto all'evento precedente, la correlazione dell'intensità con la geologia di superficie conferma una

distribuzione preferenziale degli effetti maggiori nelle zone caratterizzate dalle alluvioni oloceniche della valle del Tevere e del reticolo idrografico minore.

L'analisi della frequenza delle classi d'intensità in funzione delle unità geolitologiche (fig. 8b) mostra come le aree caratterizzate dalle alluvioni recenti (IV grado MCS, mediamente) sono risultate soggette ad effetti maggiori di almeno un grado della scala MCS rispetto alle aree occupate dalle formazioni preoloceniche (III grado MCS, mediamente). In questo rilevamento risulta evidente il trend negativo delle intensità MCS al passaggio verso le litologie più antiche, caratterizzate da una più elevata impedenza sismica (fig. 8d). Anche in questo caso, gli effetti di V grado si sono verificati preferenzialmente sulle alluvioni oloceniche e sono stati del tutto assenti nelle zone caratterizzate dal bedrock sedimentario plio-pleistocenico.

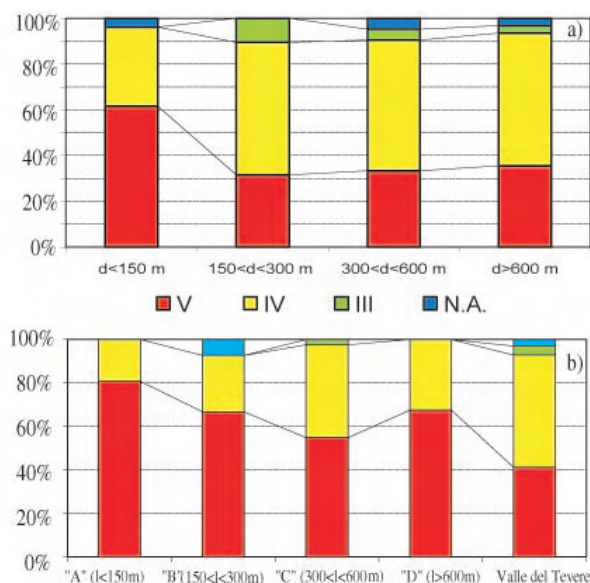


Fig. 9 - Distribuzione normalizzata dei punti di intensità MSC del territorio del terremoto del 14 Ottobre 1997. a) Nella valle del Tevere, in funzione della distanza (d) dal margine del bacino alluvionale: l'intensità macrosismica in prossimità del margine ($d < 600$ m) è di circa un grado MSC maggiore rispetto al centro della valle del Tevere ($d > 600$ m). b) Nelle valli alluvionali del reticoloidrografico minore e del Tevere, in funzione della larghezza (l) del bacino alluvionale: l'intensità macrosismica in corrispondenza dei fossi minori ($l < 150$ m) è di circa un grado MSC maggiore rispetto alla valle del Tevere.

- *Normalize, intensity distribution of the 14 October 1997 earthquake: a) within the Tiber River alluvial valley. The edge band ($d < 150$ m) is affected by higher effects (V MSC) than the central part of the basin. b) in the different alluvium-filled valley of Rome, as a function of their width and shape ratio (h/l). Narrowest streams (type A) and Tiber valley display a very different seismic response with respect to other alluvial basins; in particular, the formers are prone to the highest effects, while the latter to the lowest.*

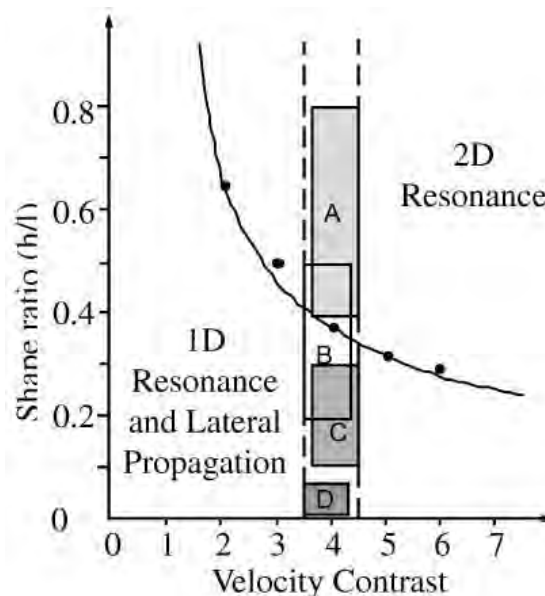


Fig. 10 - La curva rappresenta le condizioni di esistenza della risonanza 2-D dei depositi alluvionali che ricolmano le valli alluvionali, in funzione dello shape ratio (h/l) e del contrasto di velocità bedrock/alluvionali delle onde di taglio (V_s), che regola l'impedenza sismica (ridisegnato da BARD & BOUCHON, 1985). I quattro rettangoli rappresentano le tipologie di valli alluvionali di Roma (tipi A, B, C, e D). La linea tratteggiata rappresenta il contrasto d'impedenza sismica stimato per l'area romana (attorno a 4). Le valli di tipo A ($l < 150$ m), dove sono stati avvertiti i maggiori valori di intensità, ricadono completamente nel campo della risonanza bidimensionale.

- *The curve represents the existence conditions of the 2-D resonance of sediment-filled valleys, as a function of shape ratio (h/l) and velocity contrast (redrawn from BARD & BOUCHON, 1985). The four rectangles correspond to the different types of valley studied in Rome (type A, B, C and D). Dashed lines represent the bedrock-alluvium impedance contrast in Rome (estimated around 4). Valleys of type A (width < 150 m), where highest effects occurred, lay entirely in the 2-D resonance range.*



2.3.1 - LA DISTRIBUZIONE DI INTENSITÀ NELLE VALLI ALLUVIONALI OLOCENICHE

Lo studio macrosismico condotto nell'area di Roma all'interno del GRA ha evidenziato che le maggiori intensità MCS ricadono nelle alluvioni oloceniche della valle del Tevere e del reticolo idrografico minore, in occasione di entrambi i terremoti studiati. In particolare, è stata verificata la presenza di anomalie locali dell'intensità, riconducibili ad un effetto di bordo nella valle alluvionale del Tevere e a fenomeni di amplificazione nei bacini alluvionali minori.

Lo studio della distribuzione dell'intensità MCS sui depositi olocenici della valle del Tevere ha evidenziato, in particolare per l'evento del 14 ottobre 1997, circa un grado di differenza tra la fascia larga 150 m, situata al margine della valle, e il settore centrale del bacino (fig. 9a). Tale dato potrebbe essere associato a un caratteristico effetto di bordo (*edge effect*), confermando quanto ipotizzato da studi sui terremoti storici (TERTULLIANI & RIGUZZI, 1995) e da modellazioni numeriche (ROVELLI *et alii*, 1995b) della risposta sismica di Roma. Questi risultati sono molto simili a quelli ottenuti nello studio di AMBROSINI *et alii* (1986) sulla distribuzione dei danni nel centro storico di Roma in occasione del grande terremoto di Avezzano del 13 gennaio 1915. Questa corrispondenza suggerisce l'ipotesi interessante che il verificarsi di effetti di sito nella valle alluvionale del Tevere sia indipendente dall'azimut del terremoto.

Una risposta sismica di inaspettata dimensione si è verificata in corrispondenza dei bacini alluvionali minori nell'area suburbana di Roma (Fig. 9b); tale effetto non era mai stato studiato in precedenza con un tale dettaglio. L'esame della distribuzione delle intensità in funzione della forma della sezione del bacino (*shape-ratio* profondità/lunghezza della sezione = h/l) ha evidenziato i maggiori valori in corrispondenza dei corpi alluvionali di minore larghezza del reticolo idrografico secondario (sezioni tipo "A", con valori di *shape-ratio* compresi tra 0.4 e 0.8), mentre i bacini di maggiore dimensione, e particolarmente la valle del Tevere, hanno mostrato una risposta minore (CIFELLI *et alii*, 2000, DONATI, 2000). Secondo le ipotesi formulate da BARD & BOUCHON (1985), questi valori di h/l , se accoppiati a un contrasto d'impedenza sismica attorno a 4, come nel caso della transizione bedrock/alluvioni nell'area romana (BOZZANO *et alii*, 1995), possono indurre dei fenomeni di risonanza bidimensionale (2-D) nella valle (Fig. 10).

Una tale amplificazione del moto del suolo nei fossi alluvionali del reticolo idrografico minore dell'area romana era stata ipotizzata dalle modellazioni numeriche della risposta sismica nella valle del Fosso Labicano (MOCZO *et alii*, 1995) e nell'area del Palatino (ROVELLI *et alii*, 1994). Per gli altri tipi di bacini alluvionali dell'area studiata (larghezza > 150 m), il cui *shape ratio* non può superare il valore di 0.2, non sono prevedibili fenomeni di risonanza 2-D (Fig. 10). Inoltre, rispetto alle valli alluvionali principali, la caratterizzazione geotecnica relativamente più scadente dei sedimenti alluvionali che ricolmano i piccoli fossi (BOZZANO *et alii*, 1999), può implicare un locale effetto di amplificazione dello scuotimento. Il verificarsi di effetti di amplificazione nel bacino del Paleo Tevere, ipotizzata da FAH *et alii* (1993, 1995) attraverso modellazioni numeriche, non è stato confermato dallo studio di CIFELLI *et alii* (2000). Tale discrepanza potrebbe essere dovuta ai diversi azimut dei due terremoti umbro-marchigiani (localizzati a N di Roma) rispetto a quello dell'input teorico su cui sono basate le modellazioni (lo stesso del terremoto di Avezzano del 13 gennaio 1915, localizzato a W-NW di Roma). È anche possibile, in alternativa, che la scelta dei parametri geomeccanici e delle variazioni laterali della geologia di superficie usate da FAH *et alii* (1995) non siano appropriate alla situazione di Roma.

3 - CONCLUSIONI

Lo studio macrosismico condotto nell'area di Roma in occasione della sequenza sismica umbro-marchigiana ha fornito una valida conferma del ruolo giocato dalle variazioni locali dei caratteri geologici nella risposta sismica della città, in accordo con le previsioni formulate su base numerica (FAH *et alii*, 1993, 1995; ROVELLI *et alii*, 1994, 1995a, 1995b) e con gli studi di sismicità storica (tra gli altri, AMBROSINI *et alii*, 1986; MOLIN & GUIDOBONI, 1989; TERTULLIANI & RIGUZZI, 1995), estendendo l'esame degli effetti all'intero settore urbanizzato compreso all'interno del Grande Raccordo Anulare, mai studiato in precedenza.

L'analisi delle intensità ha rivelato il verificarsi di significativi effetti di sito nell'area urbana di Roma, con i maggiori effetti ben correlabili con le variazioni laterali della geologia locale (figg. 4 e 5). Tutti i dati suggeriscono una maggiore pericolosità sismica dei depositi alluvionali olocenici rispetto al

bedrock sedimentario e vulcanico plio-pleistocenico. I depositi alluvionali recenti, infatti, essenzialmente incoerenti, saturi in acqua e con proprietà geomeccaniche relativamente scadenti, sono caratterizzati da una notevole differenza in intensità (mediamente, di circa un grado MCS) rispetto alle formazioni pre-oloceniche vulcaniche e sedimentarie, in cui non sono emerse sostanziali variazioni della risposta (Fig. 8). Il diverso comportamento sismico, come ampiamente documentato nella letteratura esistente, è legato alla differente impedenza sismica del substrato vulcanico e sedimentario rispetto ai depositi alluvionali olocenici, confermato, ove possibile, da un significativo scadimento dei parametri geomeccanici delle alluvioni recenti. Nell'area romana questo contrasto d'impedenza può essere responsabile di fenomeni di amplificazione locale (BOZZANO *et alii*, 1999).

Oltre agli effetti locali riscontrati in corrispondenza della valle del Tevere, a conferma dei dati desunti dai terremoti storici reperibili in letteratura (AMBROSINI *et alii*, 1986; MOLIN & GUIDOBONI, 1989; TERTULLIANI & RIGUZZI, 1995; DONATI *et alii*, 1999), questo studio ha inoltre evidenziato un'accentuazione degli effetti sui depositi alluvionali della valle dell'Aniene e, nelle aree periferiche, nei bacini alluvionali dei fossi di ordine minore del reticolo idrografico. Tale dato costituisce una novità assoluta nel panorama della risposta sismica dell'area, poiché tali zone non erano mai state analizzate in precedenza dagli studi di sismologia storica.

La conferma di queste distribuzioni delle intensità MCS riconducibili alla tipologia degli effetti di sito anche in campi macrosismici di bassa intensità (IV e III grado MCS a Roma, mediamente), per terremoti di medio-bassa energia situati a distanze superiori ai 100 km, è di assoluto rilievo e suggerisce la probabilità del verificarsi di effetti più marcati in occasione di eventi più vicini o di maggiori dimensioni. Tale dato acquista un notevole significato anche in considerazione del fatto che l'ultimo studio macrosismico sugli effetti a Roma di un forte terremoto si riferisce al sisma di Avezzano del 1915 (AMBROSINI *et alii*, 1986), quando il patrimonio edilizio della città copriva solo il 10% dell'attuale tessuto urbano (Fig. 6).

L'indagine macrosismica condotta nella città di Roma può rappresentare uno strumento appropriato per la valutazione della risposta sismica in quelle aree urbane dove non sono disponibili registrazioni strumentali. Inoltre, le acquisizioni strumentali, anche se costituiscono un dato sicuramen-

te più oggettivo, possono difficilmente produrre una tale densità di punti di osservazione, in grado di fornire uno scenario di grande dettaglio della risposta, che, più che mai nel caso delle aree urbane, è legata a dei caratteri geologici superficiali estremamente variabili. Nelle aree urbane, quali Roma, dove sono possibili studi sui terremoti storici questa metodologia può efficacemente integrare lo stato delle conoscenze o costituire un test per le ipotesi eventualmente formulate su base storica. In alternativa, i rilevamenti macrosismici ad alta densità possono anche produrre informazioni sulla risposta sismica delle aree suburbane moderne, che non possono essere studiate su base storica, come in questa circostanza per il caso di Roma. Il rilevamento macrosismico ad alta densità di una grande area urbana si presta naturalmente a un utilizzo per compiti di microzonazione, soprattutto se considerata come uno strumento integrativo dei dati strumentali (*strong motion*, *weak motion* e microtremiti) o delle simulazioni numeriche nella valutazione del comportamento sismico di un'area metropolitana.

Malgrado la sismicità moderata dell'area romana, se si considera lo straordinario valore storico, artistico ed economico del patrimonio edilizio e monumentale di Roma, la notevole vulnerabilità di ampi settori del tessuto urbano cittadino e la non trascurabile pericolosità sismica di quella parte dell'area urbana che poggia sui depositi alluvionali olocenici (centro storico e zone suburbane moderne), il rischio sismico dell'area Romana risulta piuttosto elevato. Le zone caratterizzate da questi corpi alluvionali, che rappresentano poco più del 25% del substrato geologico dell'area urbanizzata, sono state teatro di un'occupazione indiscriminata del territorio, sovente con un patrimonio edilizio di grande pregio e di notevole vetustà (soprattutto nel centro storico), e sono attualmente gravate da una elevata densità abitativa e dalla presenza di attività politiche ed economiche di estrema importanza. Tali fattori comportano un drastico incremento della vulnerabilità e del valore esposto, determinando, a dispetto di una pericolosità medio-bassa, un indice di rischio medio-alto.

In tale quadro, l'approfondimento delle conoscenze del substrato geologico e delle caratteristiche di scuotibilità dei terreni nell'area compresa all'interno del GRA riveste un ruolo fondamentale nella valutazione del rischio sismico nelle aree di sviluppo urbano recente e futuro, così come nelle aree del centro storico in cui il patrimonio edilizio mostri evidenti condizioni di dissesto.



RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano Andrea TERTULLIANI e Calvino GASPARINI per il loro prezioso contributo al lavoro. Renato FUNICIELLO è, inoltre, ringraziato per il continuo supporto e incoraggiamento.

BIBLIOGRAFIA

- ALBERTI, A., DRAGONE, F. MANFREDINI M. & SEGRE A.G. (1967) - *Carta Geologica d'Italia, F. 150 Roma, Scala 1:100.000*, Roma.
- AMATO, A., CHIARABBA C., COCCO M., DI BONA M., & SELVAGGI G. (1994) - *The 1989-1990 seismic swarm in the Alban Hills volcanic area, Central Italy*. Journal of Volcanology & Geothermal Res., 61: 225-237.
- AMBROSINI S., CASTENETTO S., CEVOLAN F., DI LORETO E., FUNICIELLO R., LIPERI L. & MOLIN D. (1986) - *Risposta sismica dell'area urbana di Roma in occasione del terremoto del Fucino del 13-1-1915*. Mem. Soc. Geol. It., 35: 445-452.
- BARD, P. Y. & BOUCHON M. (1985) - *The Two-Dimensional Resonance of Sediment-Filled Valleys*. Bull. Seism. Soc. Am., 75: 519-541.
- BASILIA., CANTORE L., COCCO M., FREPOLI A., MARGHERITI L., NOSTRO C., & SELVAGGI G. (1996) - *The June 12, 1995 microearthquake sequence in the city of Rome*. Annali di Geofisica, 39(6): 1167-1175.
- BOSCHI E., FUNICIELLO R., MALAGNINI L., MARRA F., ROVELLI A. & SALVI S. (1992) - *Assetto geologico delle unità Plio-quaternarie e risposta sismica nell'area romana*. In: Ricerche nel campo della sismologia e geodinamica negli anni 1990-1991, vol. spec. ING, 329-355.
- BOSCHI E., CONTI C., DI BONA M. FUNICIELLO R., MALAGNINI L., MARRA F., MARTINES G., ROVELLI A. & SALVI S. (1993). *Risonanza dei sedimenti del Tevere e danneggiamento dei monumenti nel centro storico di Roma: il caso della Colonna Antonina*. In: "Ricerche nel campo della Sismologia e Geodinamica negli anni 1990-1991", I.N.G., Roma, 357-370.
- BOSCHI E., FERRARI G., GASPERINI P., GUIDOBONI E., SMRIGLIO G., AND VALENSISE G. (1995 a). *Catalogo dei forti terremoti dal 461 a.C. al 1980*. I.N.G.-S.G.A., Bologna.
- BOSCHI E., CASERTA A., CONTI C., DI BONA M., FUNICIELLO R., MALAGNINI L., MARRA F., MARTINES G., ROVELLI A. & SALVI S. (1995b) - *Resonance of Subsurface Sediments: an Unforeseen Complication for Designers of Roman Columns*. Bulletin of the Seismological Society of America, 85(1): 320-324.
- BOZZANO F., FUNICIELLO R., MARRA F., ROVELLI A. & VALENTINI G. (1995). *Il sottosuolo dell'area dell'Anfiteatro Flavio a Roma*. Geologia Applicata e Idrogeologia, 30: 417-436.
- BOZZANO F., ANDREUCCI A., GAETA M. & SALUCCI R. (2000). *Geological model of the buried Tiber river valley*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 59 (1), 1-21.
- CIFELLI F., DONATI S., FUNICIELLO F. & TERTULLIANI A. (1999 a) - *High-density macroseismic survey in urban areas. Part 1: proposal for a methodology and its application to the city of Rome*. Annali di Geofisica, 42(1): 99-114.
- CIFELLI F., DONATI S. & FUNICIELLO F. (1999 b) - *Distribution of Effects in the Urban Area of Rome, for the October 14, 1997 (Central Italy) Event*. Physics and Chemistry of the Earth, 24(6): 483-488.
- CIFELLI F., DONATI S., FUNICIELLO F. & TERTULLIANI A. (2000) - *High-density macroseismic survey in urban areas. Part 2: results for the city of Rome*. Bulletin of the Seismological Society of America, 90 (2): 298-311.
- CONATO V., ESU D., MALATESTA A. & ZARLENGA F. (1980) - *New data on the Pleistocene of Rome*. Quaternaria, 22: 131-176.
- CORAZZA A., LANZINI M., ROSA C. & SALUCCI R. (1999) - *Caratteri stratigrafici, idrogeologici e geotecnici delle alluvioni tiberine nel settore del centro storico di Roma*. Il Quaternario, 12 (2): 215-235.
- DE RITA D., FUNICIELLO R. & PAROTTO M. (1988) - *Carta geologica del complesso vulcanico dei Colli Albani*. Scala 1:50.000. CNR, Roma.
- DENGLER L.A. & DEWEY J.W. (1998) - *An intensity survey of households by the Northridge, California, earthquake of 17 January 1994*. Bull. Seis. Soc. Am. 88: 441-462.
- DONATI S., FUNICIELLO R. & ROVELLI A. (1999) - *Seismic response in archaeological areas: the Case-Histories of Rome*. Jour. Appl. Geophys. 41: 229-239.
- DONATI S. (2000) - *Metodologie per lo studio della risposta sismica in aree urbane*. Tesi di Dottorato di ricerca in geodinamica. Dipartimento di Scienze Geologiche, Università degli Studi di Roma Tre.
- DRAGONE F., MALATESTA A. & SEGRE A. G. (1963) - *Carta Geologica d'Italia, F. 149 "Cerveteri", Scala 1:100.000 (II ed.)*, Roma.
- EKSTRÖM G., MORELLI A., BOSCHI E. & DZIEWONSKI A. M. (1998) - *Moment tensor of the Central Italy earthquake sequence of September-October 1997*. Geophys. Res. Lett., 25(11): 1971-1974.
- FAH D., IODICE C., SUHADOLC P. & PANZA G.F. (1993) - *A New Method for the Realistic Estimation of Seismic Ground Motion in Megacities: the Case of Rome*. Earthquake Spectra, 9(4): 643-668.
- FAH, D., IODICE C., SUHADOLC P. & PANZA G.F. (1995) - *Application of numerical simulations for a tentative seismic microzonation of the city of Rome*. Annali di Geofisica, 38 (5-6): 607-616.
- FUNICIELLO R. a cura di (1995) - *"La Geologia di Roma. Il Centro Storico"*, Mem. Descr. della Carta Geologica d'Italia, Vol. spec. 50.
- FUNICIELLO R., BOSCHI E., CASERTA A., DONATI S., MARRA F. AND ROVELLI A. (1998) - *Distribution of Seismic Damage to monuments in Rome: an interpretation in terms of source and site effect*. Riassunti del "1st International Congress on "Science and technology for the safeguard of cultural heritage in the Mediterranean Basin", 27 Novembre -2 Dicembre 1995, Catania, Siracusa - Itala. Vol. I: 417-420.
- FUNICIELLO R., LOMBARDI L., MARRA F. & PAROTTO M. (1995) - *Seismic damage and geological heterogeneity in Rome's Colosseum area: are they related?* Annali di Geofisica, 38 (5-6): 927-937.
- FUNICIELLO R., GIORDANO G. (questo volume) - *La nuova carta geologica di Roma*.
- GASPARINI C., DE RUBEIS V. & TERTULLIANI A. (1992) - *A method for the analysis of macroseismic questionnaires*. Natural Hazards, 5: 169-177.
- HADJIAN, A. H. (1993) - *The Spitak, Armenia earthquake of 7 December 1988 - why so much destruction*. Soil Dyn. and Earthq. Eng. 12: 1-24.
- KAWASE, H. (1996) - *The cause of the damage belt in Kobe: "the basin-edge effect", constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves*, Seism. Res. Lett. 67: 25-34.
- KAYANO I. (1990) - *Distribution of various effects and damages caused by earthquakes and of seismic intensities on the basis of questionnaire sur-*

- veys: a newly developed group survey method, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 65: 463-520.
- KING J. L. & TUCKER B. E. (1984) - *Observed variations of earthquake motion over a sediment-filled valley*. *Bull. Seism. Soc. Am.* 74: 137-152.
- MARRA F. & C. ROSA (1995) - *Stratigrafia e assetto geologico dell'area romana*. In: R. Funicello (Ed.), *La geologia di Roma. Il centro storico*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 50: 49-112.
- MARRA F., ROSA C., DE RITA D. & FUNICIELLO R. (1998) - *Stratigraphic and tectonic features of the Middle-Pleistocene sedimentary and volcanic deposits in the area of Rome (Italy)*. *Quaternary International*, 47/48: 51-63.
- MOCZO P., ROVELLI A., LABÁK P. & MALAGNINI L. (1995) - *Seismic response of the geologic structure underlying the Roman Colosseum and a 2-D resonance of a sediment valley*. *Annali di Geofisica*, 38 (5-6): 939-956.
- MOLIN D., CASTENETTO S., DI LORETO E., GUIDOBONI E., LIPERI L., NARCISI B., PACIELLO A., RIGUZZI F., ROSSI A., TERTULLIANI A., TRAINA G. (1995) - *Caratteri della sismicità*. In: R. Funicello (Ed.), *La geologia di Roma. Il centro storico*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 50: 391-403.
- MOLIN D. & GUIDOBONI E. (1989) - *Effetto fonti effetto monumenti a Roma: i terremoti dall'antichità ad oggi*. In: Guidoboni E. (Ed.), *I terremoti prima del Mille in Italia e nell'Area Mediterranea*, I.N.G.: 194-223.
- MOTOSAKA M. & NAGANO M. (1996) - *Analysis of ground motion amplification characteristics in Kobe City considering a deep irregular underground structure. Interpretation of heavily damaged belt zone during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake*. *J. Phys. Earth.*, 44: 577-590.
- PITARKA A., IRIKURA K., IWATA T. & KAGAWA T. (1996) - *Basin structure effects in the Kobe area inferred from the modeling of ground motions from two aftershocks of the January 17, 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake*. *J. Phys. Earth.*, 44: 563-576.
- ROVELLI A., CASERTA A., MALAGNINI L. & MARRA F. (1994) - *Assessment of potential strong ground motion in the city of Rome*. *Annali di Geofisica*, 37 (6): 1745-1769.
- ROVELLI A., MALAGNINI L., CASERTA A. & MARRA F. (1995 a) - *Using 1-D and 2-D modelling of ground motion for seismic zonation criteria: results for the city of Rome*. *Annali di Geofisica*, 38 (6): 591-606.
- ROVELLI A., MOLIN D., MALAGNINI L. & CASERTA A. (1995 b) - *Variability of damage pattern in Rome: combination of source and local effects*. Riassunti della 5th Internat. Conf. on Seismic Zonation, AFPS-EERI, Nice, France, II: 1359-1366.
- SÀNCHEZ-SESMA F. J., CHÀVEZ-PÉREZ S., SUÁREZ M., BRAVO M. A. & PÉREZ-ROCHA L. E. (1988) - *On the seismic response of the Valley of Mexico*. *Earthquake Spectra*, 4: 569-590.
- SEEKINS L. C. AND J. BOATWRIGHT (1994). *Ground motion amplification, geology, and damage from the 1989 Loma Prieta earthquake in the city of San Francisco*, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 16-30.
- TELLINI A. (1893) - *Carta geologica dei dintorni di Roma. Regione alla destra del Tevere*. Scala 1:15.000, Roma.
- TERTULLIANI A. & RIGUZZI F. (1995) - *Earthquakes in Rome during the past one hundred years*. *Annali di Geofisica*, 38 (5-6): 581-590.
- TERTULLIANI A., TOSI P. & DE RUBEIS V. (1996) - *Local seismicity in Rome (Italy): recent results from macroseismic evidences*. *Annali di Geofisica*, 39 (6): 1235-1240.
- TOSHINAWA T., TABER J. J. & BERRILL J. B. (1997) - *Distribution of ground-motion intensity inferred from questionnaire survey, earthquake recordings, and microtremor measurements. A case study in Christchurch, New Zealand, during the 1994 Arthur Pass earthquake*. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87: 356-369.
- VENTRIGLIA U. (1971) - *La geologia della città di Roma*. Amministrazione Provinciale, Roma.
- VERRI A. (1915) - *Cenni spiegativi della Carta Geologica di Roma pubblicata dal R. Uff. Geologico su rilevamento del Tenente Generale A. Verri*. Istituto Geogr. De Agostini, Novara, pp. 56.

