

Analisi della suscettibilità ai sinkholes antropogenici nel centro urbano di Roma

Anthropogenic sinkhole susceptibility analysis in Rome urban center

CIOTOLI G. (*), NISIO S. (**), SERAFINI R. (**)

RIASSUNTO - I sinkholes antropogenici nel territorio urbano di Roma sono strettamente connessi alla rete di cavità sotterranee prodotta dalle attività umane (reti idrauliche, cave, catacombe, etc.) in più di duemila anni di storia della città.

La presenza di tali cavità sotterranee produce il collasso degli strati più superficiali del terreno con l'effetto in superficie della formazione di voragini di dimensioni metriche. Ulteriore causa della formazione di voragini, è connessa a perdite d'acqua, in sotterraneo e alla disfunzione in genere della rete idraulica dei sottoservizi, che produce il dilavamento dei terreni sciolti di copertura. La concomitanza di entrambi i fattori (cavità e perdite dalla rete idraulica) intensifica il fenomeno.

Negli ultimi quindici anni si è registrato un incremento di tali fenomeni di sprofondamento, soprattutto con la maggiore frequenza di eventi piovosi brevi e di forte intensità ("bombe d'acqua"), ciò determina un maggiore rischio per la popolazione e per le infrastrutture, con danni alle strade e ai sottoservizi stessi.

I sinkholes antropogenici costituiscono per la città di Roma, inoltre, un serio problema per gli eventuali danni al patrimonio archeologico e per la preservazione dello stesso.

Nello scenario romano la valutazione del rischio indotto dal verificarsi di un sinkhole antropogenico è davvero difficile, ma più facilmente può essere determinata la suscettibilità ai sinkholes, calcolata come la probabilità che un evento di sprofondamento si verifichi in un determinato spazio, con caratteristiche geologico-morfologiche note al contorno, in un tempo infinito. È stata, pertanto, realizzata una mappa di suscettibilità ai sinkholes del territorio di Roma, aggiornata al 2014 utilizzando la regressione geografica pesata e le tecniche geostatistiche. La mappa è stata ottenuta analizzando più di 2600 sinkholes antropogenici (dal 1875 al 2014), unitamente a dati geologici, morfologici, idrogeologici, ele-

menti antropici, quali la presenza di cavità nel sottosuolo, la distribuzione della rete dei sottoservizi etc.

Il modello di suscettibilità ottenuto è stato di seguito confrontato con i dati di abbassamento del suolo (InSar) al fine di ottenere un modello previsionale.

PAROLE CHIAVE: Roma, sinkhole, cavità sotterranee, suscettibilità

ABSTRACT - The anthropogenic sinkholes in the urban area of Rome are closely linked to the network of underground cavities produced by human activities (water networks, caves, catacombs, etc.) in more than two thousand years of history. The collapse of such underground cavities and the subsequent fall down of the shallower layers of the soil may originate at surface pits up to metric dimensions. Furthermore, the formation of these pits can cause underground water leaks and failure of the hydraulic network producing the washing away of loose soil cover. The combination of both factors (e.g., cavity losses and the hydraulic network) increases this process. Over the past fifteen years the increased frequency of intense rainfall events, favors sinkhole formation; this leads to a greater risk to the population and infrastructure with damage to roads and underground utilities. Furthermore, the anthropogenic sinkholes may constitute a serious problem for the city of Rome, especially for the damages to the archaeological heritage and their preservation. In this scenario a risk assessment induced by anthropogenic sinkhole is really difficult. However, a susceptibility of the territory to sinkholes can be more easily determined as the probability that an event may occur in a given space, with unique geological-morphological characteristics, and in an infinite time. A map of sinkhole susceptibility of the Rome territory up to the ring road has been constructed by using Geographically Weighted Regression

(*) Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, CNR

(**) Istituto Superiore per la protezione e la ricerca Ambientale. Servizio Geologico d'Italia, ISPRA.

technique and geostatistics. The spatial regression model includes the analysis of more than 2600 anthropogenic sinkholes (recorded from 1875 to 2014), as well as geological, morphological, hydrological and predisposing anthropogenic characteristics (e.g., presence of cavities in the ground, the distribution network of underground etc.) of the study area. The susceptibility map was then compared with the data of ground subsidence (InSAR) to obtain a predictive model.

KEY WORDS: Rome, sinkhole, underground cavities, susceptibility

1. - INTRODUZIONE

Il territorio romano è tra le aree al mondo maggiormente interessate dai fenomeni di sprofondamento improvviso del terreno.

Le voragini, che si aprono sulle strade cittadine, sono di natura antropica, dovute cioè a crolli di cavità sotterranee realizzate dall'uomo o prodotte da fuoriuscite di acqua da tubature idrauliche (*sinkholes antropogenici*).

Tali *sinkholes antropogenici* sono riconducibili nel dettaglio, per lo più, ai crolli delle volte e/o delle strutture di sostegno delle cavità storiche e di interesse archeologico, innescati durante eventi piovosi intensi unitamente, a volte, a perdite d'acqua dalle condutture, e, in misura minore, ma non meno frequenti, sono connessi a fenomeni erosivi sotterranei operati da flussi idrici nei terreni sciolti, conseguenti ai dissesti delle reti fognarie e acquedottistiche (NISIO 2010a,c, 2011; CIOTOLI *et alii* 2013).

La presenza di questa estesa rete di cavità sotterranee è, dunque, la causa principale che mette in serio pericolo le infrastrutture, il patrimonio artistico nonché l'incolumità delle persone.

Purtroppo l'intricato sistema di gallerie sotterranee, è conosciuto solamente in forma frammentaria, molte abitazioni civili sono state realizzate su tali vuoti nel terreno, non bonificati in precedenza.

Il più importante censimento su terreni di *sinkholes antropogenici* a Roma è stato compiuto a partire dal 2008 da ISPRA (NISIO 2010, CIOTOLI *et alii* 2013) ed è oggi ancora in corso. Nel 2008, infatti, è stato avviato dal Dipartimento Difesa del Suolo dell'ISPRA il "Progetto sprofondamenti nei centri urbani", Resp. Dott.ssa Nisio, che ha portato al censimento di 1800 casi di sprofondamento a Roma in soli due anni, e a più di 2600 eventi in sei anni (NISIO, 2010 b; CIOTOLI *et alii*, 2013).

Dal censimento effettuato è emerso che negli ultimi quindici anni si è assistito all'incremento dei fenomeni di dissesto che determina un rischio sempre maggiore per la popolazione e per le infrastrutture, con danni alle strade e ai sottoservizi.

Dal 2012 al 2014, poi, i sinkholes censiti si sono triplicati con numero di sprofondamenti che su-

pera il centinaio di eventi l'anno (124 nel 2012, 103 nel 2013 e 90 nel 2014; fig. 1).

Il *database* dei fenomeni di sprofondamento ISPRA (Resp. Dott.ssa Nisio) comprende, al momento, 2620 casi (dal 1875 al 2014) censiti esattamente all'interno del Grande Raccordo Anulare, dei quali più della metà sono localizzati nel settore orientale della città, sulla riva sinistra del fiume Tevere. I dati sono stati raccolti attraverso l'esame della cartografia storica, censendo anche le paleoforme da sprofondamento, "sfornellamenti" (CIOTOLI *et alii*, 2013) e, mediante l'analisi di foto aeree (fenomeni più antichi o per le forme ubicate nelle aree non urbanizzate della città). A tali fenomeni si aggiungono i casi storici, da cronache raccolte nelle emeroteche e/o da documenti tecnici, nonché i fenomeni di cui si ha maggiore informazione e sui cui vengono svolti sopralluoghi in sito.

Sono stati confrontati gli eventi di sprofondamento con le cavità accertate nel sottosuolo e realizzata una mappa di densità di cavità sotterranee e di ubicazione dei sinkholes; gli elaborati ottenuti sono serviti a realizzare una prima mappa di suscettibilità ai sinkholes antropogenici (Tavola I allegata fuori testo).

2. - CARATTERI DEL TERRITORIO ROMANO

La città di Roma si estende su alcuni rilievi collinari che sono caratterizzati da differente composizione dei terreni: terreni vulcanici, terreni a composizione mista e terreni clastici.

I rilievi collinari di origine vulcanica (fig. 2), affiorano prevalentemente nella porzione orientale del territorio romano e sono le morfologie più interessate dalla presenza di aree di coltivazione mineraria per materiali da costruzione. Tali colline sono parti del più esteso *plateau* piroclastico che, in relazione ai processi erosivi evolutivi, hanno dato origine a morfologie tabulari di varie forme ed estensione. Queste morfologie costituiscono il territorio della porzione cittadina in sinistra del Tevere e di destra e sinistra dell'Aniene (nonché i rilievi del centro storico: Quirinale, Viminale, Esquilino, Celio, Campidoglio, Palatino e Aventino).

I rilievi collinari di tipo misto (costituiti nelle parti sommitali da depositi piroclastici del distretto vulcanico dei Sabatini e inferiormente da sedimenti clastici quali sabbie e argille) formano le vaste aree collinari ubicate alla destra del Tevere. Tali rilievi, nei primi del '900, sono stati interessati da attività estrattive in sotterraneo di ghiaia e sabbia per inerti.

Per quanto riguarda, invece, i rilievi collinari di tipo clastico, questi affiorano in destra del Tevere e, in relazione alla loro costituzione litologica, possono essere distinti in due sottotipi: tipi collinari

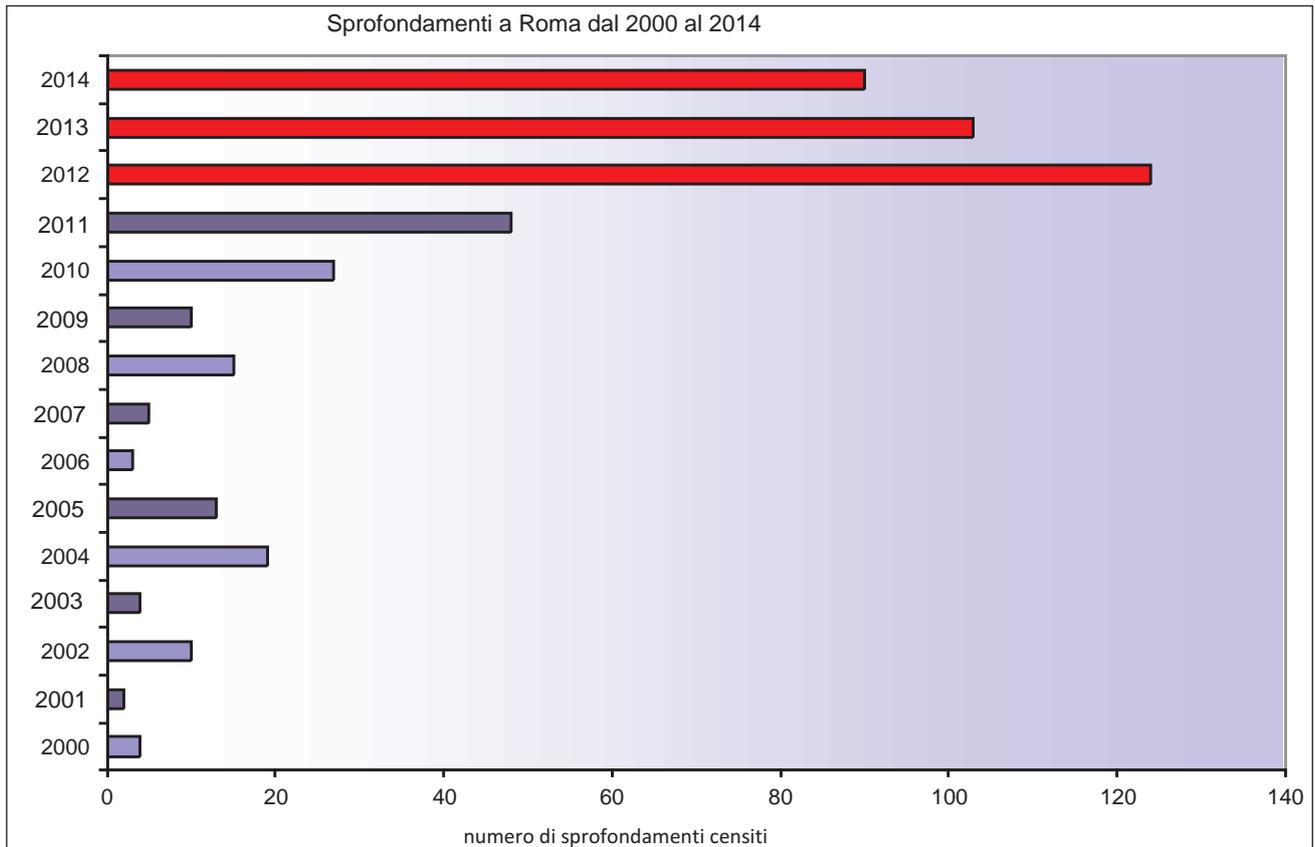


Fig. 1 - Distribuzione dei sinkholes antropogenici a Roma negli ultimi 14 anni: è osservabile un grande incremento dei fenomeni negli ultimi tre anni.
 - Distribution of roman anthropogenic sinkholes in recent times (14 years): a large increase of phenomena is observable in the last three years.

prevalentemente sabbioso-ghiaiosi e tipi collinari prevalentemente argillosi.

Le morfologie collinari prevalentemente sabbioso – ghiaiose costituiscono il territorio dei settori inferiori dei bacini idrografici del Rio Galeria e del Fosso della Magliana e sono sede di sfruttamento intensivo per l'estrazione di sabbia e ghiaia per l'edilizia. Le colline prevalentemente argillose sono rappresentate principalmente dal rilievo Monte Mario-Vaticano-Gianicolo (140 m s.l.m. scendendo verso sud sino a 60 m). Tali aree sono state interessate in passato da numerose cave per l'estrazione dell'argilla, utilizzata per la produzione di laterizi e manufatti in ceramica (Monte Mario, Monti della Creta e la Valle dell'Inferno).

3. - LE CAVITÀ SOTTERRANEE

Sono molti gli studi di tipo archeologico e geologico-geotecnico, riguardanti le cavità sotterranee nel territorio di Roma. Manca tuttavia, ad oggi, un database o censimento dei vuoti sotterranei completo, che riporti, cioè, l'effettiva estensione delle cavità, al fine di studiare la pericolosità del territorio.

Le tipologie di cavità che si rinvergono nel sottosuolo romano possono essere riassunte in: *cave* per materiali da costruzione; *catacombe* ad uso religioso di epoca romana e paleocristiana, *acquedotti e opere idrauliche*, connesse all'approvvigionamento idrico; *cunicoli* idraulici per la regimazione delle acque meteoriche, cunicoli di collegamento per il transito pedonale, *infrastrutture fognarie*, *ambienti ad uso funerario*, religioso e idraulico (CIOTOLI *et alii*, 2013).

Le cave relative ai depositi dei materiali vulcanici, sono le cavità maggiormente diffuse; esse hanno interessato principalmente la formazione delle *Pozzolane Rosse Auct.* e subordinatamente le *Pozzolane Nere Auct.* e *Pozzolanelle Auct.*; veniva coltivato, inoltre, il *Tufo lionato Auct.*

I terreni vulcanici venivano sfruttati in epoca romana e successiva, sino ai primi decenni del 1900 in alcune zone di Roma.

Per quanto riguarda i terreni sedimentari, ghiaie e sabbie, venivano e vengono tuttora coltivate, le formazioni sedimentarie pleistoceniche, al fine di ricavare inerti per costruzione (*Unità di Ponte Galeria* e di *Santa Cecilia*). I rilievi collinari caratterizzati da questi terreni sono ubicati nella porzione sud-occidentale della città, presso la Via Magliana e la

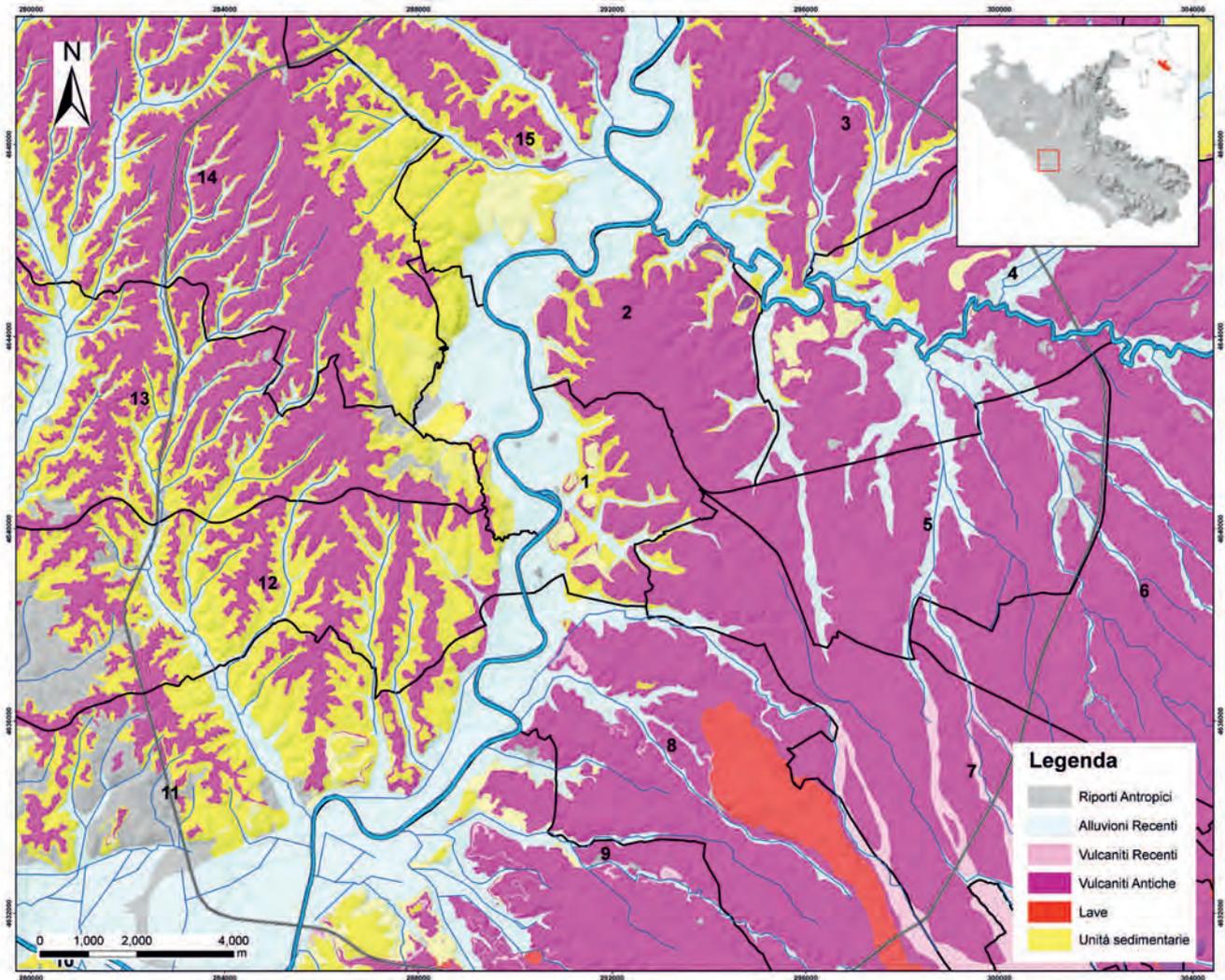


Fig. 2 – Schema delle unità litologiche nell'area di Roma.
- *Lithological units map in Rome.*

Via Portuense.

La coltivazione mineraria avveniva attraverso la realizzazione di gallerie che prevedevano un imbocco alla base del versante (tali imbocchi sono stati censiti per buona parte del territorio; fig. 3). L'antico metodo di scavo prevedeva la realizzazione di una galleria principale e di alcune gallerie secondarie (con andamento sub-rettangolare). La galleria principale veniva realizzata, a partire dal suo imbocco sotterraneo, con asse ortogonale alla base del pendio.

Gli imbocchi (fig. 4) per gli accessi alle gallerie potevano essere realizzati anche mediante discenderie, più o meno inclinate e aerate con pozzi. Durante la fase di avanzamento degli scavi, fra una galleria e l'altra, venivano isolati pilastri a sezione quadrangolare con lati di dimensioni variabili da 8 a 15 metri e da 8 a 6 metri di lato in ragione nel fatto che al momento di abbandonare la rete ipogea di coltivazione, i pilastri venivano ulterior-

mente ridotti per ottenere ancora materiale (operazione di riquartatura).

L'utilizzo delle cave di tufo come aree di culto e cimiteriali risale al I–III sec. d.C. Nel territorio di Roma sono state censite 86 aree interessate da reti di catacombe che rappresentano la seconda tipologia di cavità sotterranea più diffusa dopo le cave.

Le cave di conglomerati, ghiaia e sabbia, realizzate nella porzione sud-occidentale della città, non furono mai utilizzate come necropoli (forse per la minore estensione delle gallerie): una volta abbandonata l'attività estrattiva le gallerie furono, parzialmente, riutilizzate come deposito, fungaia, ecc. Anche le gallerie eseguite nelle formazioni ghiaioso-sabbiose sono state realizzate con la tecnica delle camere e pilastri ma le dimensioni delle camere e degli ambienti sono complessivamente minori.

Il censimento delle cavità sotterranee è ben

lungi dall'essere completato (fig. 3), il primo censimento è stato compiuto da VENTRIGLIA e riporta una raccolta di sondaggi da cui si evidenziano vuoti nel sottosuolo (VENTRIGLIA 1970, 2002). In questa sede è stato arricchito il database delle cavità di VENTRIGLIA (2002) con nuovi punti di interesse, e cioè ulteriori cavità riscontrate in sondaggio, antichi imbocchi di cava, bunker, catacombe note considerando la loro completa estensione, nonché ulteriori ipogei privati. I dati risultano per la grande maggioranza di tipo puntuale e non poligonale, per la scarsità di conoscenze circa la reale estensione delle aree in cava. Sono stati censiti inoltre nella mappa i bunker, utilizzati negli ultimi conflitti mondiali, nonché gli imbocchi di cava (fig. 3). Dai dati puntuali è stato possibile realizzare una mappa di densità di cavità (fig. 5).

4. - SPROFONDAMENTI E CAVITÀ SOTTERRANEE NEI QUATTRO QUADRANTI DI ROMA

Sono molti a Roma gli eventi di sprofondamento recenti che hanno messo in luce la presenza di gallerie sotterranee di cui si era persa memoria. Viene analizzata, sinteticamente, la situazione nei quattro quadranti in cui può essere divisa l'area urbana (fig. 6).

I - Quadrante NW

Nella zona settentrionale di Roma (Municipi 13, 14 e parte del Municipio 15), nei quartieri Trionfale, Balduina e Boccea, poiché i terreni vulcanici, ivi presenti, sono costituiti per lo più da piroclastiti stratificate e incoerenti, le cavità sotterranee sono sporadiche e non presentano una grande

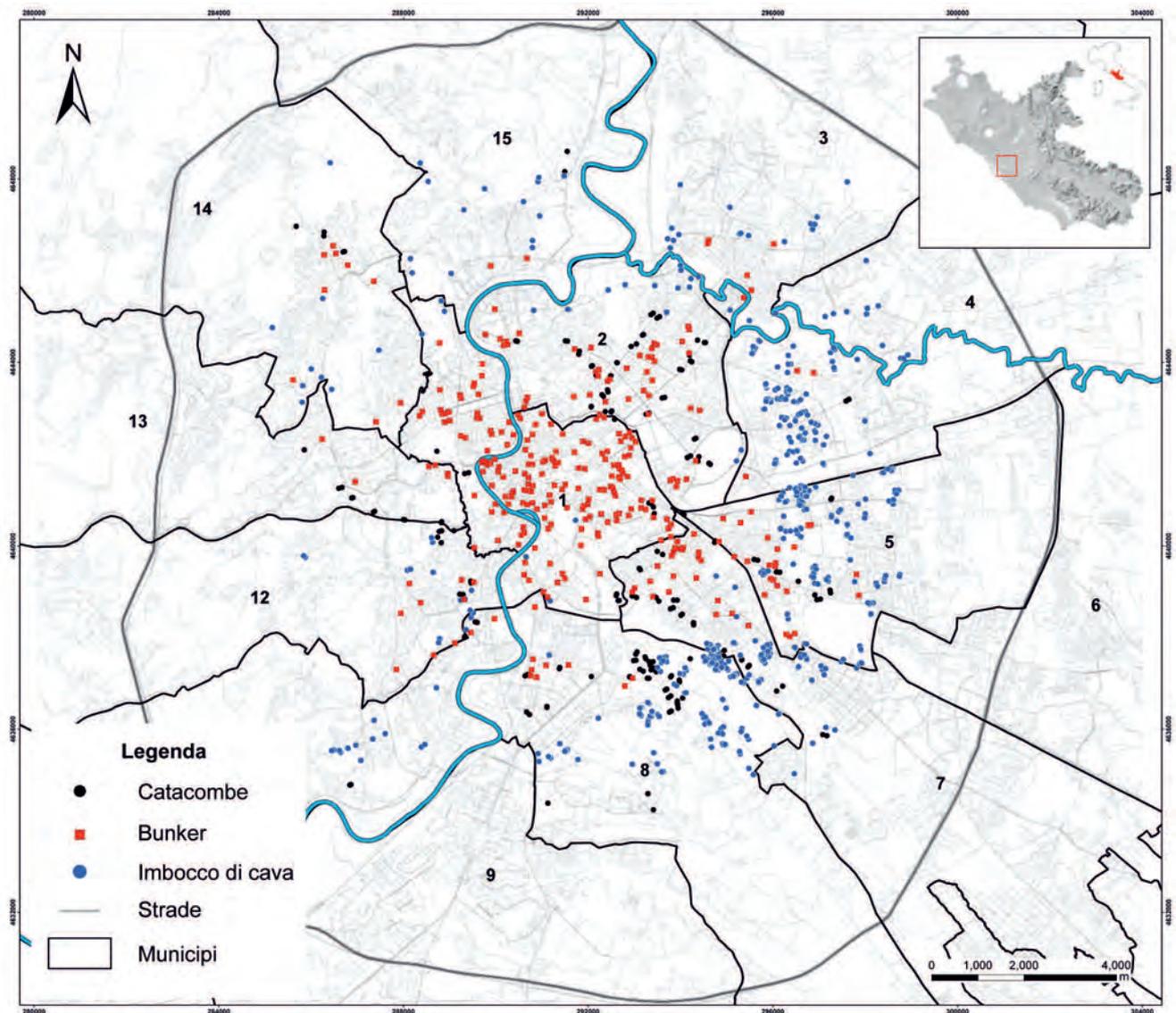


Fig. 3 - Ubicazione delle cavità sotterranee rilevate dai sondaggi, degli imbocchi di cava e dei bunker.
- Location of underground cavities, polls, entrances to the quarry and bunkers.



Fig. 4 - Un imbocco di una cavità sotterranea, Parco della Caffarella, quartiere Appio Latino.

- An entrance to an underground cavity, Parco della Caffarella, Appio Latino district.

estensione; si rinvengono soprattutto cunicoli idraulici di limitata estensione. Tuttavia, presso Via Trionfale, nel tratto tra Via Igea e Via Fani, sono state intercettate, durante i lavori di realizzazione della strada, gallerie di coltivazione della pozzolana (VENTRIGLIA, 2002). In questo quadrante affiorano anche terreni clastici, a luoghi diffusamente, (sabbie e ghiaie, nonché argille nell'area di Monte Vaticano), sottoposti a volte a coltivazioni per estrazione di inerti.

È da segnalare, a tal proposito, nell'area della Farnesina – Foro Italico la coltivazione delle ghiaie e sabbie, attraverso la realizzazione di ampie gallerie (Via della Farnesiana, Via Orti della Farnesina, Piazzale Ponte Milvio, Via Cassia). Presso Monte Mario, inoltre, son stati rinvenuti cunicoli idraulici e grotte facenti parte di un sistema ipogeo di opere idrauliche (VENTRIGLIA, 2002).

Tale quadrante presenta morfologie collinari caratterizzate da scarpate e da discreta energia di rilievo (Balduina, Monte Mario) che facilita il dilavamento degli strati superficiali e scioli del terreno.

Il 24 agosto del 1977 a Via della Balduina, nel tratto tra Via Duccio Galimberti e Piazza Balduina, vi fu un grande evento di sprofondamento, si aprì una voragine con 20 m di diametro ed alcuni metri di profondità. L'intera strada fu evacuata e tutto il quartiere rimase senza acqua e senza luce per alcuni giorni. Da quell'evento si sono verificati sulla stessa strada 11 altri eventi di sprofondamento di cui l'ultimo tra Via Ugo De Carolis e Via Franco Lucchini è stato registrato il 24 maggio 2014.

Il 26 agosto del 1997 presso Viale Cardinale Angelo dell'Acqua (Castel Sant'Angelo, tra il fosso interno e il bastione della cinta pentagonale) si aprì una voragine con diametro di 3-4 m, e 8 m

di profondità che mise in evidenza la presenza di un cunicolo sotterraneo (fig. 7), di cui nessuno ne conosceva l'esistenza, lungo almeno 30 m.

II - Quadrante NE

Il territorio delimitato a nord dal fiume Aniene, ad ovest da Viale Parioli, a sud da Piazza di Porta Maggiore e ad est dalla Via Nomentana (municipi parte dell'1, 2, 3, 4, e parte del 15) è interessato da gallerie sotterranee. I maggiori addensamenti di cavità sotterranee si rinvengono presso la Via Salaria, Via XX Settembre, Piazza dei Cinquecento, Via Giolitti e Piazza di Porta Maggiore. L'area di Via XX Settembre, ad esempio, in cui è stato realizzato l'edificio del Ministero del Tesoro era caratterizzata, in passato, da grandi estensioni di vuoti sotterranei in parte bonificati (VENTRIGLIA, 2002), così come l'area di Piazza Fiume e dell'inizio della Via Salaria. Villa Ada (Via Salaria) è stata interessata in passato da coltivazioni e da realizzazione di luoghi di culto ipogei (Catacombe di Priscilla); recentemente, presso Parco Rabin (fig. 8), si sono aperte alcune voragini.

Il 4 settembre del 1964 una voragine apertasi a Piazza Fiume ha portato alla luce un vasto sistema di cunicoli sotterranei che si estendono in un vasta area tra Piazza Fiume e la Salaria. L'intera area non è stata bonificata ma nasconde altre necropoli e gallerie di coltivazione che formano un intricato reticolo.

Presso Via Po, civico 10, il 12 settembre 2013, l'apertura di una voragine al ciglio della strada ha permesso di individuare alcuni cunicoli (due livelli sovrapposti) di cui il più profondo è posto a 12 m di profondità. La voragine si è aperta in seguito ad alcuni lavori svolti da Telecom Italia. La cavità individuata, una camera ampia con lato di 7-8 m, faceva parte di un esteso sistema di necropoli comprendente l'area di Piazza Fiume e Via Salaria.

L'area della stazione Termini costituiva in passato un bacino di approvvigionamento del tufo, in parte bonificata, ancora oggi nasconde dei vuoti sconosciuti: nel '98 a Via Giolitti si aprì una voragine, un altro evento si verificò il 26 novembre del 2010; nei pressi di Porta Maggiore che mise in luce dei cunicoli sotterranei; l'ultimo sinkhole antropogenico è del 7 luglio 2014 presso Piazza di Porta Maggiore angolo Via Giolitti che ha coinvolto le rotaie del tram e ha messo in evidenza ampi locali sotterranei con resti archeologici di età romana.

La zona compresa tra la via Casilina, Viale Togliatti e la Circonvallazione Nomentana è stata interessata in passato dalla coltivazione delle pozzolane. Presso la Via Nomentana, Villa Torlonia, sono noti cunicoli sotterranei con formazione di voragini in superficie, la presenza di tali cunicoli è visibile all'interno delle antiche cucine della Villa

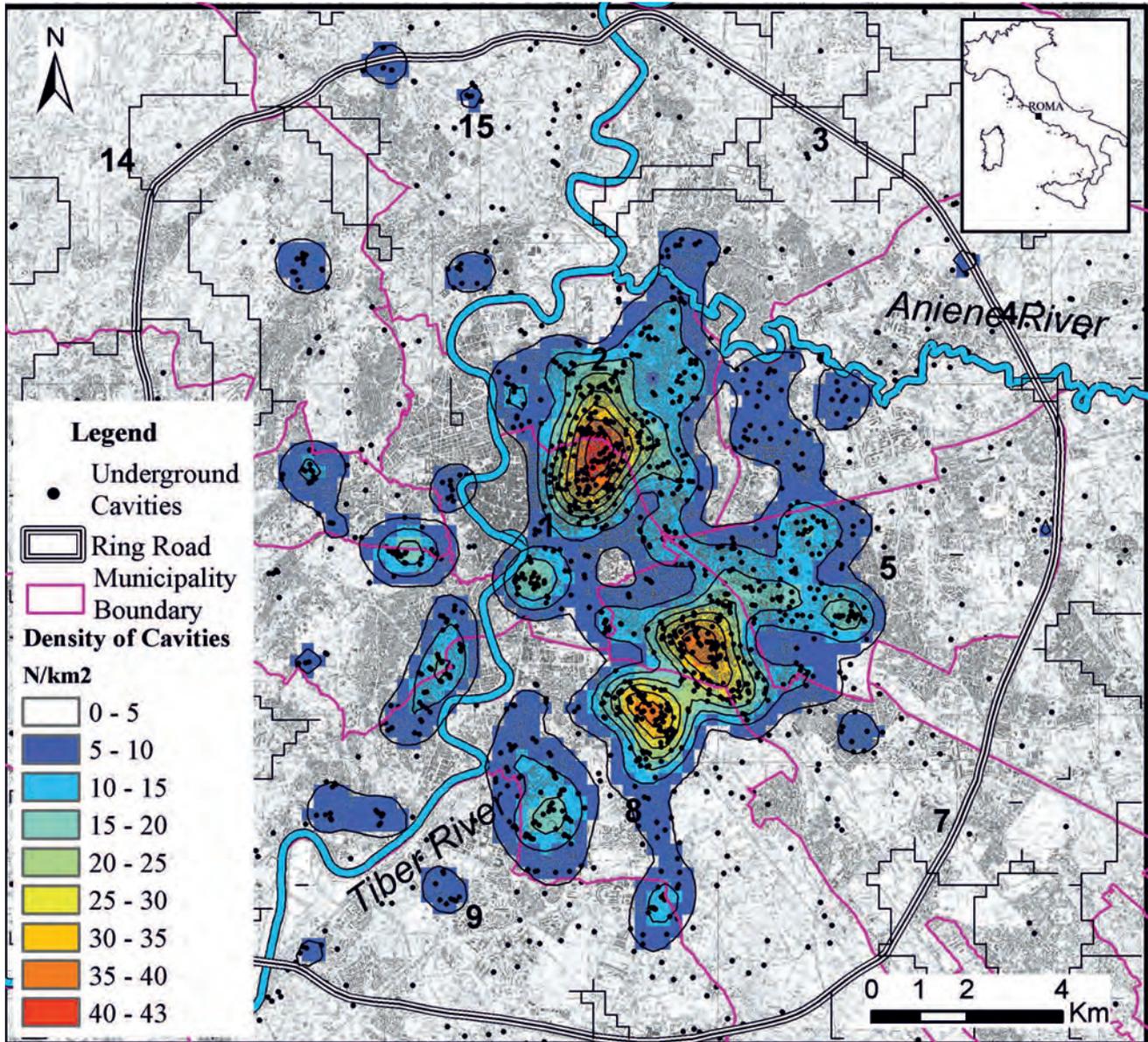


Fig. 5 - Mappa di densità di cavità sotterranee.
- Map of density underground cavities.

e la effettiva estensione di tali gallerie è tuttora sconosciuta. Inoltre sono da segnalare, presso Villa Glori, ai Parioli, ingressi di gallerie che coltivavano una formazione sabbioso-travertinoso; nonché presso Viale Tiziano nella formazione delle ghiaie e sabbie, la presenza di antiche cave, oltre alle Catacombe di S. Valentino.

Il Quadrante III SE

Il terzo quadrante è sicuramente quello maggiormente interessato da eventi di sinkholes e da presenza di cavità sotterranee. Il centro storico e tutta la zona Appia – Tuscolana, sino al fosso della Caffarella e al Quadraro (municipi parte dell'1, 5, 8, 7, 6) sono interessati da estese gallerie sotterranee che si congiungono senza soluzione di conti-

nuità, dopo un percorso di chilometri, con quelle della zona Casilina - Prenestina – Tiburtina.

Nel Centro storico le cavità sotterranee si rinvennero presso il colle Celio (Tempio di Augusto fig. 9) e prevalentemente presso il Colle Aventino dove i sistemi caveali, connessi anche al Mitreo di S. Prisca, hanno messo a rischio alcune abitazioni civili. A settembre 2013 una voragine ha interessato il giardino e il muro perimetrale di una abitazione presso Piazza Albina (fig. 10), le indagini hanno rilevato una galleria sotterranea che congiunge Via San Giosafat (ormai interdetta al traffico per la voragine che si aprì nel 1980) con la Piazza stessa.

Nell'area dell'Appia Antica e della Caffarella le gallerie venivano scavate nella pozzolana (fig. 11) e

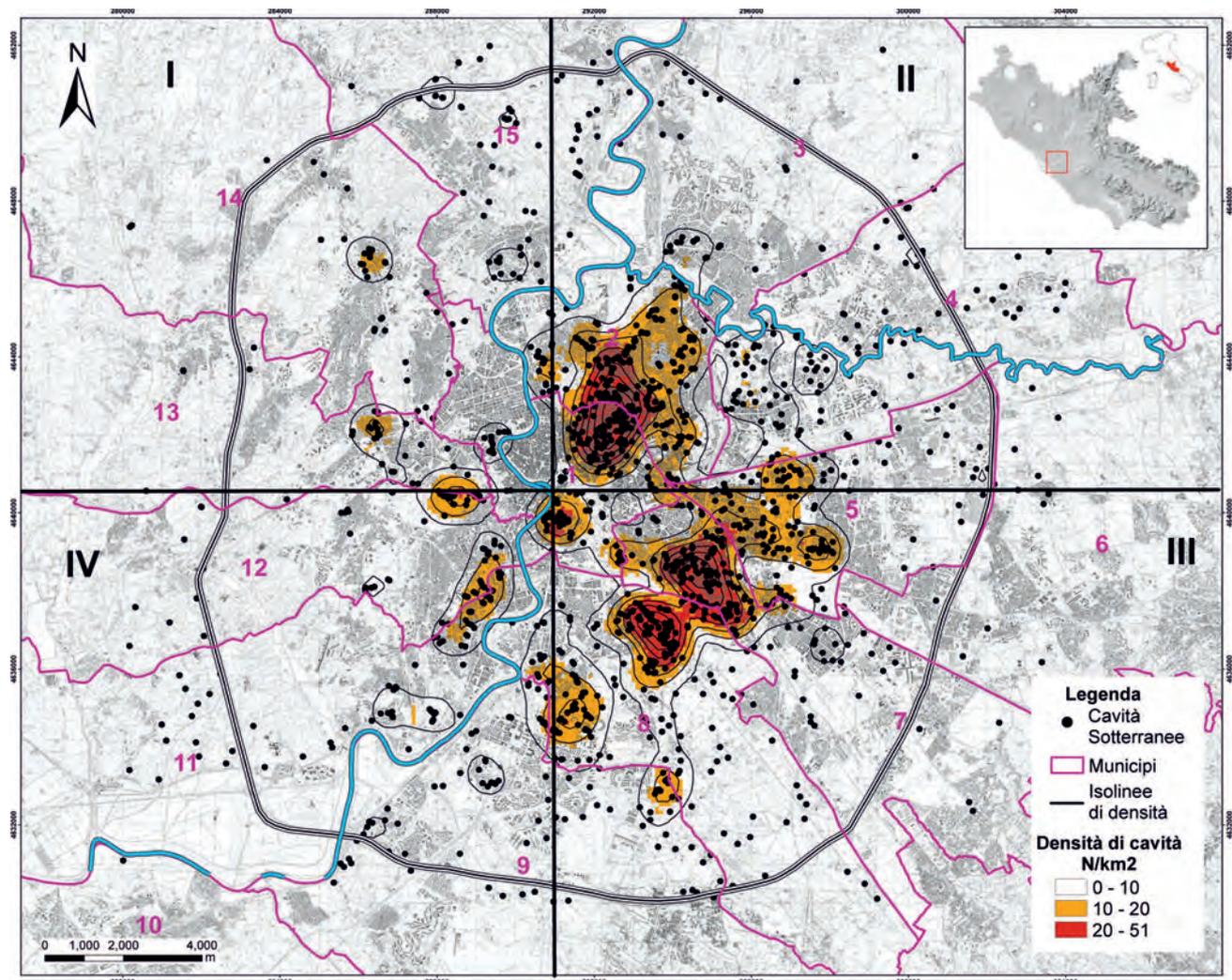


Fig. 6 – Suddivisione del territorio di Roma in 4 quadranti e ubicazione delle principali aree interessate da cavità sotterranee.
 - Subdivision of the territory of Rome in 4 quadrants and location of the underground cavities main areas.

nel tufo litoide, molte di esse vennero utilizzate come necropoli, altre furono realizzate sin da subito come catacombe, sia cristiane che ebraiche (fig. 12), ed in quest'area sono molto estese (Catacombe di S. Callisto, S. Sebastiano, S. Domitilla etc.). Ad agosto 2014, nel Parco della Caffarella i sopralluoghi svolti nelle aree sotterranee conosciute e già mappate hanno permesso di individuare ulteriori gallerie inesplorate, che hanno portato alla conoscenza di un'area di necropoli paleocristiana.

Nella zona Tuscolana, Piazza S. Maria Ausiliatrice -Via delle Cave, le gallerie intercettano la falda acquifera. In quest'area le gallerie costituiscono un intricato reticolo di cui buona parte è sconosciuta, esse risultano larghe sino a 10 m ed alte fino a 18 m con pilastri abbandonati di diametro di 10 – 11 m. La rete caveale inoltre si estende per chilometri ma non tutte le gallerie sono percorribili ed indagate, se ne conoscono alcune porzioni presso Tor Fiscale (fig. 13). Una voragine apertasi a Via Gen-

zano, il 2012 (fig. 14), ha permesso di identificare una vasta area di vuoto su cui poggia la sede stradale; la strada da allora è interdetta al traffico.

Anche presso l'area del Quadraro-Aeroporto di Centocelle l'intricato reticolo sotterraneo non risulta, ad oggi, totalmente conosciuto. Il quartiere Tuscolano è densamente urbanizzato, le moderne costruzioni sono fondate su pali di grande diametro, ma in alcune zone, più periferiche, permangono abitazioni costruite abusivamente ed in seguito condonate che potrebbero essere state realizzate su terreni non bonificati e senza indagini esplorative del sottosuolo.

Via Columella, in zona Quadraro, infatti, è stata interessata in passato da molti eventi di sinkholes che si sono succeduti con frequenza decennale e con episodi importanti di cedimento che hanno portato all'evacuazione di alcuni edifici nel 1957, 1969, 1971; gli ultimi due episodi di sprofondamento si sono originati il 6 giugno 2005 e il 9 dicembre 2010. I sopralluoghi svolti hanno portato



Fig. 7 - Castel Sant'Angelo: nel 1997 fu trovato un cunicolo sotterraneo in seguito alla formazione di una voragine in superficie.
 - Castel Sant'Angelo: in 1997 it was found an underground tunnel following the formation of a sinkhole.

all'individuazione di una rete di gallerie che dovrebbero estendersi sino a Centocelle. Tale rete risulta interrotta in vari punti da grandi episodi di crollo (fig. 15) che non ne permettono la mappatura i cunicoli si estendono anche in Via Menas, dove l'edificio scolastico ivi presente, ha subito in passato numerosi episodi di cedimento.

Il settore Prenestino - Tiburtino, sicuramente è il più sfruttato della città per le coltivazioni dei terreni piroclastici; gli sfornellamenti di cava sono ben visibili su ortofoto e riportati sulle cartografie del 1884 e 1907. I sistemi caveali, articolati su più livelli (Via Teano, Via Formia), sono stati in parte bonificati con la realizzazione della linea della metro C. Permangono, tuttavia, numerose zone non interessate dalla bonifica (Via Dulceri, Via Formia, Via di Villa Gordiani e l'area del Pigneto) che sono sottoposte periodicamente ad episodi di sinkholes.

Il Quadrante IV SW

L'area di Monteverde Vecchio – Gianicolense - Portuense (municipi 9, 10, 11, 12) era un'area di approvvigionamento di materiali da costruzione; le coltivazioni a Monteverde Vecchio interessavano dall'alto verso il basso un banco di tufo semilitoide rossiccio, un banco di scorie e materiale vulcanico ed il tufo litoide da costruzione di Monteverde (*lapis Ruber Auct.*)



Fig. 8 - Evento di sprofondamento presso Parco Rabin, Villa Ada, quartiere Salario.
 - Sinkhole in Rabin Park, Villa Ada, Salario district.



Fig. 9 - Zona Celio. Sotterranei presso il Tempio di Claudio, è presente una vasta area allagata.
 - Zone Celio. Underground at the Temple of Claudius, is a large area flooded.



Fig. 10 - Sprofondamento presso Piazza Albina, Aventino.
 - Piazza Albina sinkhole, Aventino.



Fig. 11 - Cavità sotterranee presso il Parco della Caffarella.
- *Underground cavity in the Caffarella Park.*

Nell'area di Monteverde i luoghi di culto e le necropoli erano molto estese, oltre alle note catacombe di S. Pancrazio sono presenti quelle di S. Ponziano e le catacombe ebraiche. Quest'ultime erano situate presso l'incrocio di Via F. Massi con la circonvallazione Gianicolense, il cui ingresso era a quota 42 m s.l.m. La catacomba, aveva un approfondimento di circa 9 m dal p.c., identificato l'ingresso agli inizi del

secolo lo stesso è stato poi obliterato dal tessuto urbano (DE ANGELIS D'OSSAT, 1943).

L'area ha mostrato sempre una maggiore instabilità e negli ultimi anni sono aumentati gli eventi di sinkholes.

Il 21 aprile 2012, solo a titolo d'esempio, la voragine apertasi presso via Bartali (fig. 16), Monteverde Vecchio, ha permesso di individuare alcune gallerie (fig. 17) con volte in parte stabilizzate, in cui sono stati ritrovati frammenti ceramici e ossa umane. Tale sistema di vuoti era probabilmente connesso ad un più vasto sistema caveale e cimiteriale di Monteverde Vecchio, che comprendeva le catacombe ebraiche su di un livello a quota più alta e alcune aree di cava alla quota più bassa della circonvallazione Gianicolense. Tale tesi è stata suffragata dal ritrovamento di un'ulteriore vasta rete di gallerie di cava, in seguito a dei lavori di scavo per un edificio, presso la circonvallazione Gianicolense; l'accesso a dette aree è stato aperto presso un garage al civico 140, ed hanno portato al ritrovamento di un'area sotterranea allagata dall'acqua di falda (fig. 18). Nella zona sono molte le voragini che si sono aperte in seguito, recentemente, il 7 novembre 2014, si è aperta una voragine presso il S. Camillo determinata da una vasta area cava al di sotto della Circonvallazione Gianicolense.



Fig. 12 - Catacombe ebraiche presso Via Appia Pignatelli.
- *Jewish catacombs in Via Appia Pignatelli.*



Fig. 13 – Reticolo caveale presso Via di Tor Fiscale.
- *Underground net in Via di Tor Fiscale, Tuscolano district.*



Fig. 15 – Eventi di crollo presso i sotterranei di Via Columella, Quadraro.
- *Events of collapse in the underground of Via Columella, Quadraro district.*



Fig. 14 – Voragine presso Via Genzano, zona largo Colli Albani-Via delle Cave.
- *Via Genzano sinkhole, Colli Albani- Via delle Cave area.*



Fig. 16 – Voragine di Via Bartali, Monteverde Vecchio.
- *Via Bartali sinkhole, Monteverde Vecchio.*

La Via Portuense nasconde, inoltre, la necropoli di S. Felice, segnalata in vari testi storici ma persa nell'arco dei secoli; su di essa vi sono vari imbocchi ad aree di coltivazione del tufo che hanno permesso la realizzazione dei complessi ospedalieri (S. Camillo, Forlanini e Spallanzani). Sotto il Forlanini è presente uno specchio d'acqua che raccoglie l'acqua di falda all'interno della vasta area di estrazione realizzata per la costruzione del complesso ospedaliero.

In Via Giannetto Valli - Via Prospero Colonna affiora un banco di ghiaia e sabbia la cui coltivazione avveniva esclusivamente in sotterraneo; in quest'area sono stati registrati problemi di cedimento nei palazzi e nelle sedi stradali che hanno portato alla chiusura di V. G. Valli. Presso via della Magliana angolo con Via del Trullo, sono ubicate le catacombe di Generosa altre gallerie con buona estensione sono state scavate per la coltivazione delle ghiaie (zona V. delle Vigne; fig. 19). Nell'area di Via delle Vigne le gallerie sotterranee hanno dato luogo negli anni a numerosi fenomeni di sinkhole (fig. 20).



Fig. 17 – Volte di cunicoli sotterranei presso via Bartali.
- *Underground tunnels under Via Bartali.*



Fig. 18 – Cavità sotterranee della Gianicolense, lago sotterraneo.
- *Gianicolense underground cave and underground lake.*

5. - RACCOLTA DI DATI ED ELABORAZIONE CARTOGRAFICA

Il modello concettuale per la definizione della carta di suscettibilità al verificarsi di uno sprofondamento è stato realizzato prendendo in considerazione:

- 1 - le caratteristiche morfologico-fisiografiche e geologiche del territorio, ovvero l'individuazione dei fattori territoriali (recenti e passati) che predispongono il fenomeno;
- 2 - gli aspetti antropici (presenza di cavità sotterranee e rete dei sottoservizi).

Successivamente si è provveduto a svolgere:

- 1 - la gerarchizzazione (“pesatura”) di tali fattori in base alla loro influenza sul fenomeno;
- 2 - la schematizzazione del problema in fasi di lavoro secondo gli obiettivi definiti;
- 3 - la creazione di un modello adeguato all'obiettivo e proporzionato alla quantità e alla qualità dei dati disponibili e/o acquisibili.

Nella valutazione della pericolosità dovuta al crollo di una cavità sotterranea non è quasi mai possibile eseguire valutazioni probabilistiche sul verificarsi dell'evento in un determinato orizzonte temporale. Per ovviare a tale difficoltà si è sostituito il concetto di “pericolosità/rischio” con quelli più generici di pericolo e/o suscettibilità, dove si elimina il termine probabilistico legato al tempo, e si indica il “rischio” in termini esclusivamente spaziali, cioè *“che uno sprofondamento possa verificarsi in una certa area in un intervallo di tempo infinito e che una certa area abbia caratteristiche tali da favorire uno sprofondamento”*.

In relazione alla presenza di cavità ipogee, pertanto, possono essere definiti:

- il pericolo di crollo come la minore o maggiore probabilità che in una data area possano verificarsi voragini e/o subsidenze per crollo delle cavità stesse;

- la suscettibilità ovvero la propensione di una certa porzione di territorio a generare sprofondamenti in relazione alle proprie caratteristiche fisiche e alle condizioni geoambientali al contorno.

A fronte della creazione di un modello spaziale di probabilità che possa essere estrapolato ad altre aree simili, una completa rappresentazione cartografica della pericolosità da *anthropogenic sinkholes* si può ottenere elaborando una mappa di suscettibilità in cui sono identificate le aree con caratteristiche tali da favorirne l'insorgere del fenomeno.

La prima fase prevede lo studio diretto della distribuzione degli eventi censiti (fig. 21) mediante l'applicazione di alcune procedure e tecniche quantitative dell'analisi spaziale, rivolte all'analisi dei pattern di distribuzione di punti che rappresentano il fenomeno. L'obiettivo è quello di produrre una cartografia tematica relativa alla zonazione del territorio mediante l'applicazione dei dati raccolti con tematismi cartografici di base e/o di sintesi già disponibili (BASSO *et alii*, 2013, CIOTOLI *et alii*, 2013, 2015; MELONI *et alii*, 2013 a, b).

La seconda fase prevede l'utilizzo di metodi indiretti mediante analisi statistiche bivariate o multivariate che valutano l'importanza di alcune



Fig. 19 – Gallerie di coltivazione delle sabbie e ghiaie presso Via delle Vigne.
- *Galleries of cultivation of the sands and gravels near Via delle Vigne.*



Fig. 20 – Sinkhole presso Via del Fosso della Torretta - zona Magliana Via delle Vigne.
- Sinkhole near Via del Fosso della Torretta - Magliana - Via delle Vigne area.

combinazioni “critiche” di diversi fattori geologico-ambientali (morfometria, geologia, geomorfologia, caratteristiche geologico-tecniche, ecc.) presenti nell’area in cui il dissesto si è verificato, definendo per queste aree una probabilità di verifica del fenomeno e quindi una potenzialità ad essere pericolose (McCULLAGH & NELDER, 1989; DAI & LEE, 2002; GIUDICI, 2005; LEE & SAMBATH, 2006, CHEN & WANG, 2007; ROGERSON, 2010).

Sono state, in seguito, applicate tecniche di analisi spaziale via via più complesse al fine di valutare l’interdipendenza tra i singoli eventi: il calcolo dei semplici indici relativi alle statistiche centrografiche (calcolo del centro medio e della distanza *standard*), l’analisi delle misure di distribuzione geografica (indice di vicinaggio), l’analisi dei raggruppamenti spaziali (*Cluster Analysis*) e l’analisi di densità.

L’analisi di densità della distribuzione degli eventi (fig. 22) costituisce una tecnica fondamentale e semplice per determinare l’area più incline

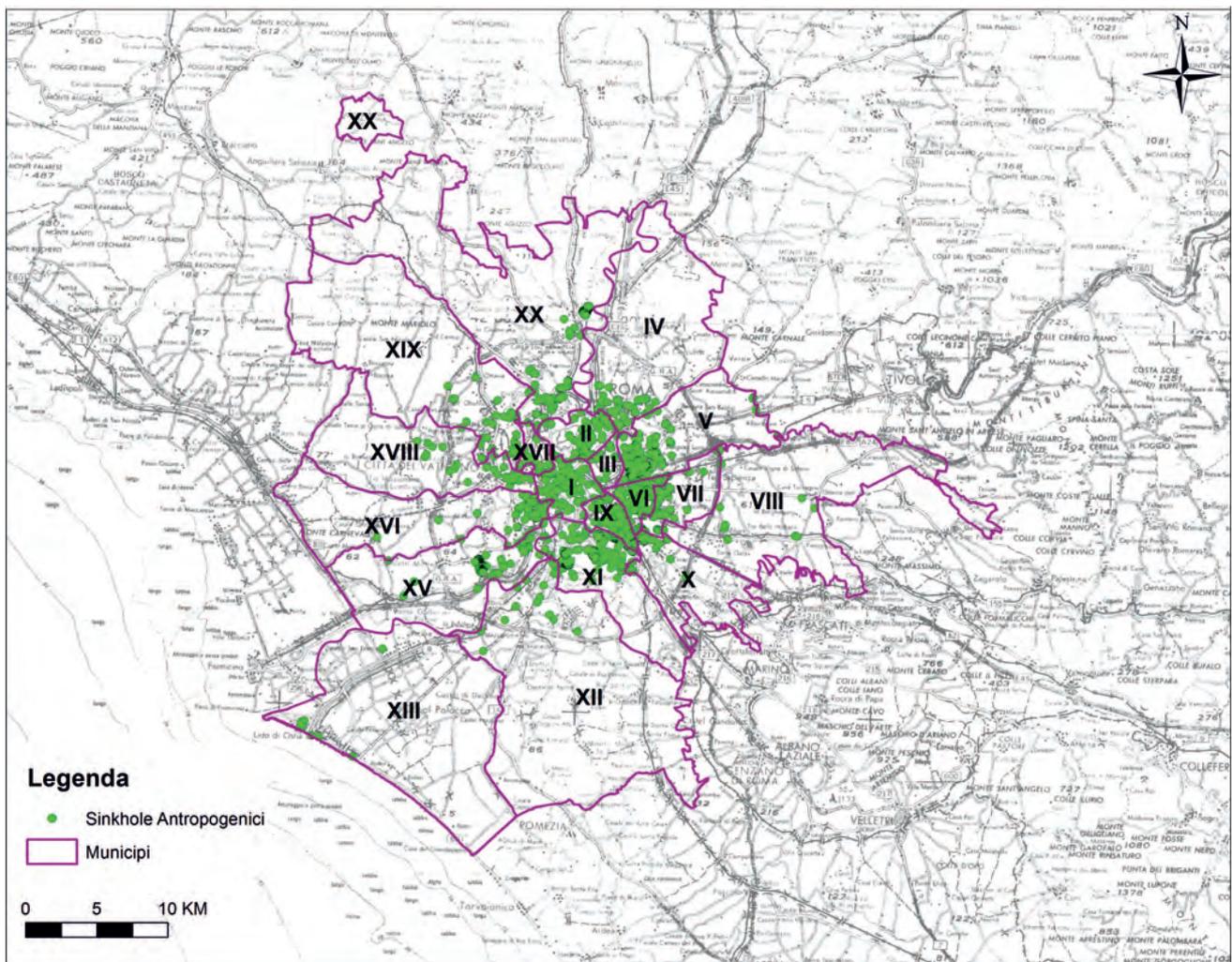


Fig. 21 - Censimento dei sinkholes antropogenici e distribuzione nei municipi romani.
- Census of anthropogenic sinkholes and distribution in the Roman municipalities.

alla presenza di sprofondamenti. L'ipotesi su cui si fonda il modello di densità è rappresentata dal fatto che le zone in cui si sono verificati più eventi di collasso costituiscono delle aree in cui è più probabile che se ne verificino altri (BRZEZINSKI, 2004). In genere, si possono utilizzare due metodi per determinare la densità degli eventi. Il primo è un metodo diretto che applica l'algoritmo di kernel (*Kernel Density Estimation*) (SILVERMAN, 1986) con il quale è calcolato il numero di eventi intorno ad ogni sprofondamento che ricade all'interno di un'area di vicinaggio stabilita. Il secondo metodo si applica costruendo fasce di rispetto intorno ad ogni evento che possono esprimere il grado di pericolosità in funzione del numero di eventi che vi ricadono. Di conse-

guenza ogni evento riceve un attributo che è la densità di eventi nella sua zona circostante. L'*output* che ne deriva è costituito da mappe ad isolinee di densità di evento (fig. 22). Questo tipo di elaborazione costituisce una mappa di pericolosità di primo livello in quanto il numero di eventi per unità di area rappresenta una prima indicazione sulle aree in cui è più probabile si manifestino nuovi eventi. Questo risultato può essere utilizzato in seguito per ulteriori calcoli per la stima della suscettibilità. Tale tecnica può essere ovviamente utilizzata per rappresentare diversi tipi di fenomeno legati alla presenza degli sprofondamenti, la figura 3 mostra, ad esempio, la mappa di densità di 22 cavità. Le cavità censite sono tratte da vuoti riscontrati in sondaggio e derivano

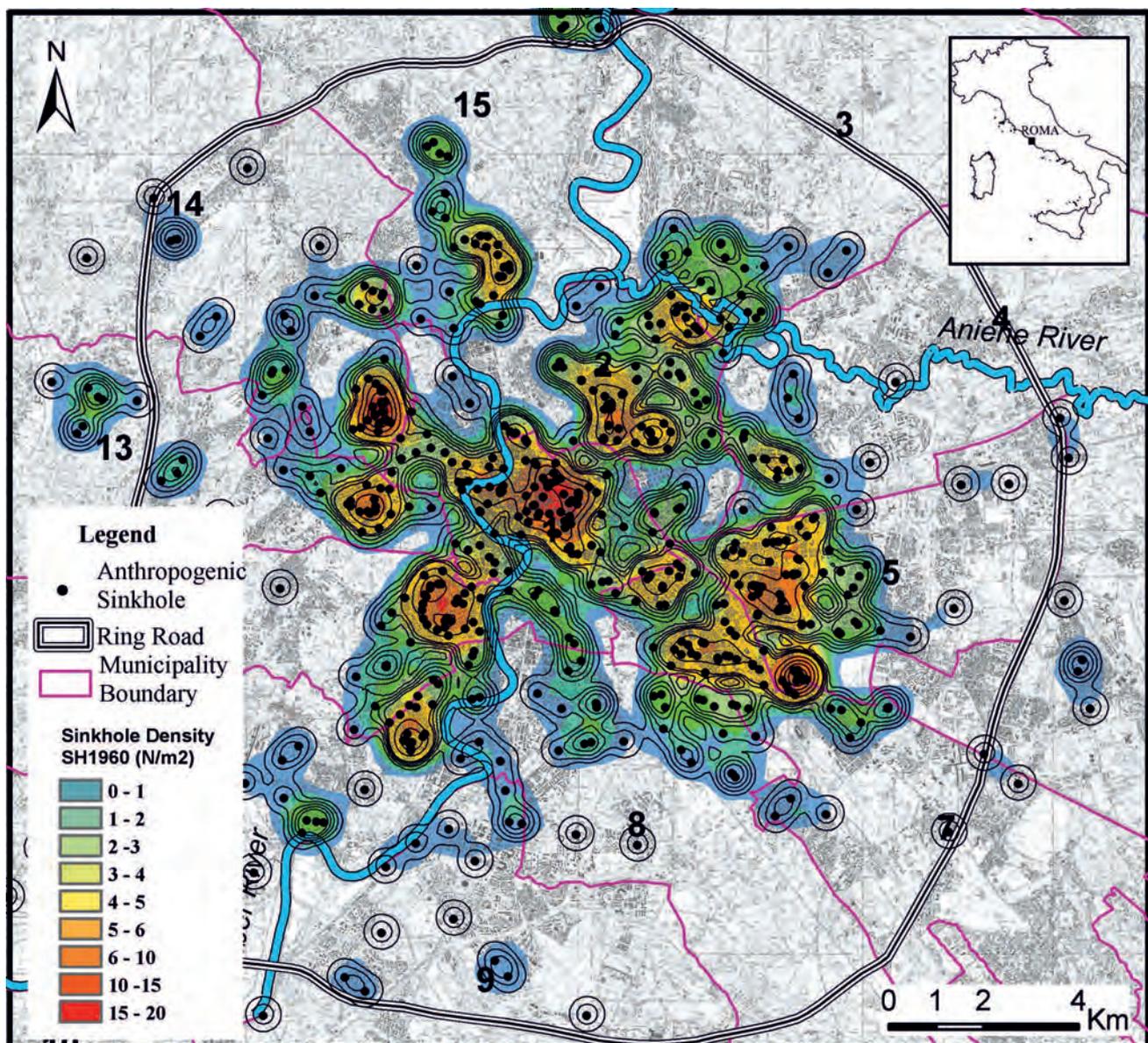


Fig. 22 - Mappa di densità di sinkholes. Sono stati inseriti solo gli eventi di sprofondamento dal 1960 al 2014.
- Sinkholes density Map. Have been included only events sinking 1960-2014.

da dati di letteratura (VENTRIGLIA 2002) e da ulteriori sondaggi geognostici realizzati nell'area urbana; a questi si sommano le catacombe, gli ipogei privati conosciuti (tav. fuori testo).

5.1. - SECONDA FASE DI ELABORAZIONE: REGRESSIONE GEOGRAFICA PESATA E MAPPA DI SUSCETTIBILITÀ

Il *geodatabase* spaziale utilizzato comprende, oltre all'inventario degli sprofondamenti, le informazioni relative ad una serie di strati informativi, potenziali fattori predisponenti, che possono essere raggruppati in quattro categorie: fattori orografici, fattori geologici, fattori idrologici, fattori antropici. Tutti gli strati informativi sono stati trasformati in un formato *raster* con una dimensione del *pixel* di 200 x 200 m e sono stati analizzati mediante *software* GIS (ESRI ®ArcMap TM 10). L'elaborazione di alcuni degli strati informativi di base ha prodotto altri strati informativi utilizzati per la costruzione del modello probabilistico di suscettibilità.

5.1.1. - Fattori orografici

Nel caso specifico è stato utilizzato un modello digitale delle quote (DTM) con una risoluzione di 20 x 20 m e con valori della quota compresi tra 1 e 300 m s.l.m. Il DTM è stato utilizzato per elaborare una mappa delle aree depresse ("sink") mediante il *software* ArcHydro (Copyright © 2009 ESRI) le quali costituiscono possibili zone di accumulo di acqua che a lungo termine possono influenzare le caratteristiche meccaniche dei materiali. Di seguito, è stata elaborata anche una carta della distanza degli sprofondamenti dal "sink" più vicino.

5.1.2. - Fattori geologici

È stata utilizzata la cartografia geologica di base dell'area romana distinta in unità morfo-litotecniche per ognuna delle quali è stata calcolata una frequenza percentuale relativa alla presenza di sprofondamenti. La frequenza è stata utilizzata per pesare l'area delle unità litotecniche presenti all'interno della cella elementare della griglia *raster* in funzione dell'area totale della cella di griglia. In questo modo la mappa delle unità litotecniche viene pesata in funzione della presenza di sprofondamenti e trasformata in una variabile continua. Tra i fattori geologici è considerata la carta dello spessore dei riporti, che può fornire importanti informazioni ai fini classificativi nel caso di sprofondamenti (tipo "scavernamenti") originati dall'azione dilavante ad opera della circolazione dei fluidi nel sottosuolo su materiali con scarse caratteristiche fisico-meccaniche (CIOTOLI *et alii*, 2011, 2013).

5.1.3. - Fattori idrologici

La carta delle isopieze è stata ricostruita a partire dal modello idrogeologico di Roma (ISPRA, 2008). Dalla carta delle isopieze è stata derivata la carta della soggiacenza della falda superficiale per differenza con il *raster* del DTM.

5.1.3. - Fattori antropici

Tra i fattori predisponenti di tipo antropico sono stati considerati: l'ubicazione delle cavità ipogee (raccolta di sintesi di dati letteratura, più raccolta di dati da sondaggi geognostici), l'ubicazione degli imbocchi di cava e dei bunker sotterranei utilizzati nell'ultima guerra mondiale. Da questi dati è stata derivata la mappa di densità di cavità (v. fig. 4). Dall'ubicazione della rete dei sottoservizi fognari (rete dei collettori) (fornite da Roma Capitale) è stata prodotta la carta della densità della rete fognaria e la carta delle distanze degli sprofondamenti dal collettore fognario più vicino.

Nell'ambito della mappatura delle pericolosità ambientali costituisce un punto chiave la pesatura delle variabili in funzione della loro importanza nel fenomeno investigato, peso che generalmente viene assegnato in maniera soggettiva sulla base dell'esperienza dell'operatore. L'approccio statistico prevede l'applicazione delle tecniche della statistica multivariata con particolare riferimento alla regressione logistica mediante la quale è stata studiata l'interazione e la dipendenza tra i fattori che predispongono il fenomeno, nella loro combinazione simultanea, e il verificarsi di uno sprofondamento al fine di stabilire l'influenza che ognuno di essi esercita nell'innescare del fenomeno. La tecnica della regressione logistica rappresenta un metodo indiretto di tipo quantitativo i cui risultati sono espressi in termini di probabilità che il fenomeno si manifesti in un certo punto dello spazio.

Ciascun strato informativo, dunque, rappresenta un fattore che condiziona la probabilità di verificarsi di uno sprofondamento, il cui peso è rappresentato dai coefficienti di una regressione multivariata risolta nello spazio mediante l'applicazione delle Regressione Geografica Pesata, GWR (FOTHERINGHAM *et alii*, 2002; 1998). In questo caso specifico tutte le variabili indipendenti considerate (fattori predisponenti) sono state inserite nel foglio di input come variabili continue, mentre la variabile dipendente è stata considerata una variabile binaria (presenza/assenza sprofondamento). I dati di *input* sono stati ottenuti estraendo il centroide delle celle dei *raster* relativi ai singoli strati informativi. Il campione è stato poi depurato dai valori nulli, ed è stato suddiviso in due sottocampioni (dati di *training* e dati di *test*), tramite estrazione casuale, in maniera da avere un numero equilibrato di celle con presenza di evento rispetto al numero di celle senza evento.

L'analisi ha permesso di realizzare due carte di suscettibilità ai sinkholes per la città di Roma sino al raccordo anulare. La prima è stata realizzata plot-tando, per le analisi di stabilità, tutti gli eventi di sprofondamento compresi gli eventi storici tratti dalla cartografia storica di fine '800 e di inizio se-colo '900 (fig. 23). Tale mappa mostra un'area molto suscettibile ai sinkholes antropogenici tra il II e il III quadrante, dove si concentrano numerosi eventi di sinkholes. In seguito le analisi sono state ripetute utilizzando solo i dati degli sprofonda-menti avvenuti dal 1960 al 2014, in questa seconda carta (fig. 24; allegato fuori testo) è evidente come la suscettibilità aumenta nel I e nel IV quadrante dove si individuano aree a suscettibilità alta e di-minuisce contemporaneamente nel II quadrante (in particolare nel municipio 8) dove i fenomeni di sprofondamento sono diminuiti in seguito alla bo-nifica del sottosuolo.

6. - CONFRONTO CON I DATI INSAR

Al fine di proporre un modello previsionale per l'individuazione di aree suscettibili ai sinkholes an-tropogenici si è tentato di confrontare la carta degli

eventi di sprofondamento con la subsidenza del-l'area romana.

Sono stati estrapolati i dati di abbassamento del suolo (InSAR) registrati dell'area di Roma, sino al Raccordo anulare, nel decennio 1992-2002 (fig. 25).

I dati InSAR mostrano molti punti in subsi-denza con un maggiore infittimento nella fascia circostante il fiume Tevere, ovviamente dovuti al cedimento lento e graduale dei terreni alluvionali recenti (fig. 26).

I valori di subsidenza che si registrano nella fa-scia del Tevere (alta velocità di abbassamento) im-pediscono, tuttavia, di avere una visione puntuale delle aree della città in cui è stata riscontrata alta suscettibilità ai sinkholes antropogenici, ed in cui si registra una bassa velocità di subsidenza.

Si è scelto, dunque, di operare su di un *layer* con-tenente solo i punti in abbassamento, con esclu-sione della fascia corrispondente all'alveo del Tevere, concentrando gli studi, in particolare, sulla metà orientale di Roma dove gli eventi di sprofon-damento sono più numerosi (quadrante III).

È stata realizzata, così, per il quadrante III, una prima mappa degli abbassamenti del suolo (relativa al decennio 1992- 2002), dividendo i valori di subsi-

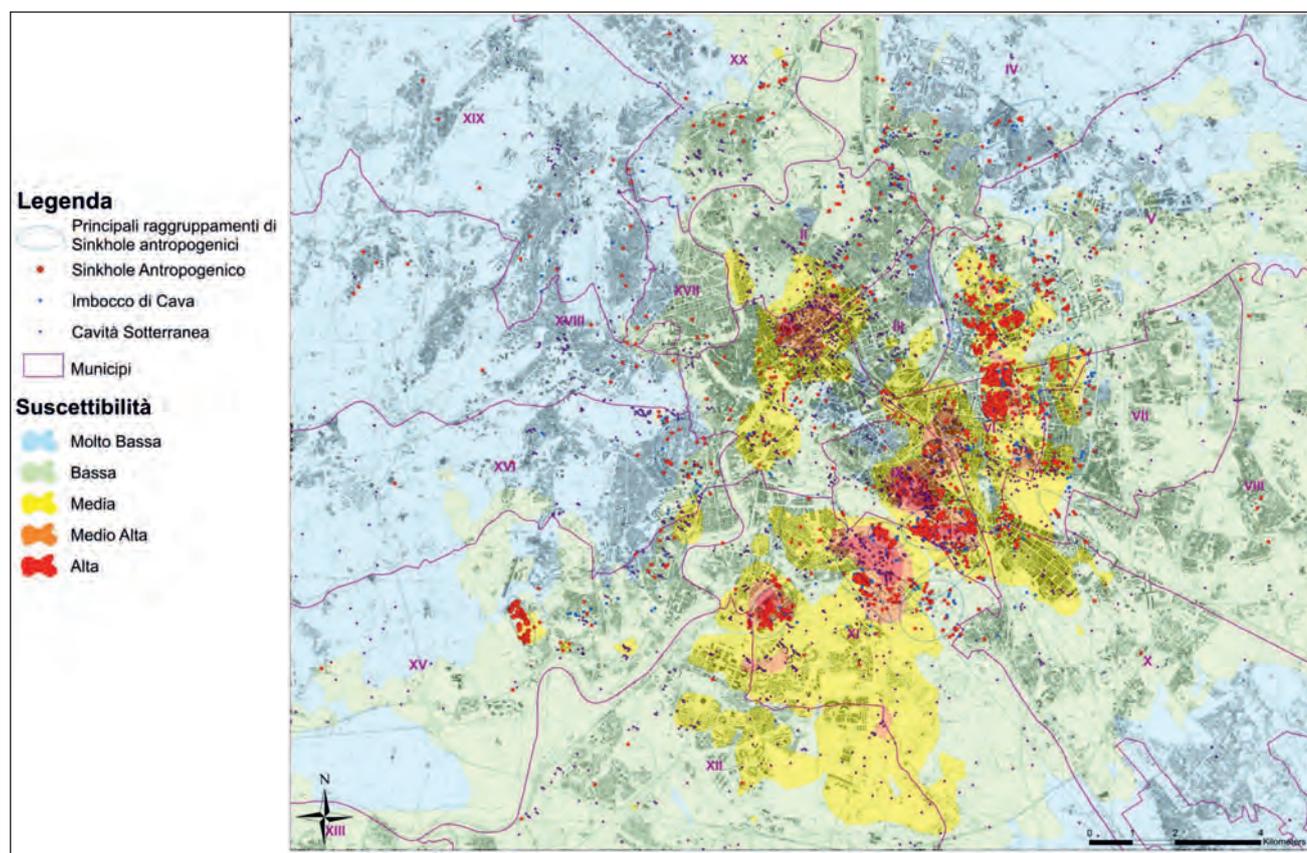


Fig. 23 - Mappa di suscettibilità ai sinkholes antropogenici ,realizzata con i dati dell'intervallo 1875 - 2013.
- Sinkhole Susceptibility Map; it is made with data from 1960 to 2014.

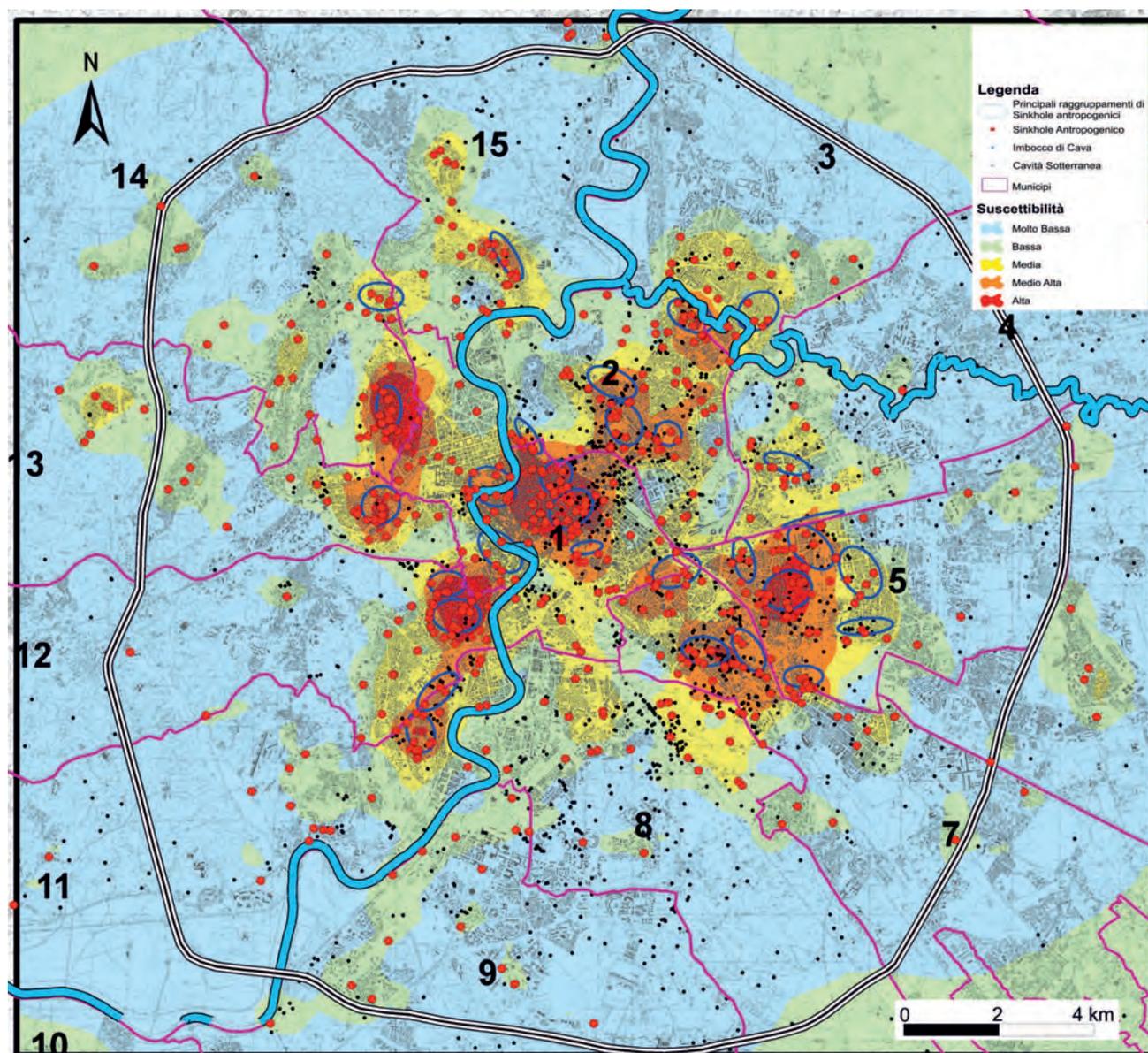


Fig. 24 - Mappa di suscettibilità ai sinkholes realizzata con i dati dal 1960 al 2014.
 - Map of susceptibility to anthropogenic sinkholes made from interval data from 1960 to 2014.

denza registrata in quattro classi di velocità (fig. 27).

Sulla mappa di abbassamento del suolo sono stati sovrapposti tutti i fenomeni di sinkholes censiti (dal 1888 al 2014) ed in seguito, scorporati i sinkholes originatisi nell'intervallo temporale della subsidenza, 1992-2002.

I risultati emersi sono interessanti. Si evidenziano nello specifico: aree di subsidenza puntuale su cui si sovrappongono eventi di sprofondamento e aree di subsidenza puntuale in cui non sono stati registrati eventi di sinkholes.

In tale ambito è stato possibile distinguere alcune tipologie di casi.

Nei casi di subsidenza in cui non vengono registrati eventi di sprofondamento è possibile distinguere tra aree in cui l'abbassamento al suolo è

dovuto, probabilmente alla presenza di alluvioni e di terreni, facilmente costipabili (es. area ad est di Roma, dove erano presenti antichi meandri del fiume Aniene). Successivamente sono identificabili aree in cui l'abbassamento al suolo è dovuto alla presenza di terreni di riporto di recente posizionamento, per la realizzazione di infrastrutture viarie.

Per quanto riguarda i casi in cui l'abbassamento al suolo corrisponde a un'area suscettibile ai fenomeni di sprofondamento, risulta una stretta corrispondenza tra subsidenza registrata dall'InSAR e la data di formazione del sinkhole successivo ad un episodio di subsidenza è stato un evento di sprofondamento.

Tale corrispondenza è registrabile nelle aree in cui è particolarmente sviluppata la suddetta rete di

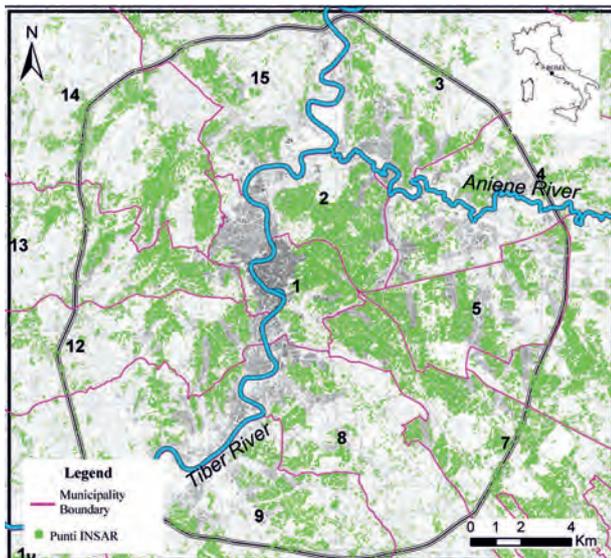


Fig. 25 - Punti di rilevazione da dati InSAR 1992-2001.
- InSAR Points Detection; subsidence an elevation data from 1992 to 2001.

cavità sotterranee, che fa ritenere il problema ancora attivo, in alcuni quartieri della città, per la mancata bonifica delle gallerie sotterranee.

Infine, si distinguono aree suscettibili agli sprofondamenti in cui non è stato evidenziato abbassamento al suolo nell'intervallo 1992-2002; in questi casi gli eventi di sinkholes risultano, per lo più, precedenti agli anni '90. È possibile spiegare il fenomeno con eventuale bonifica e stabilizzazione delle aree.

7. - CONCLUSIONI

La città di Roma sorge sopra una complessa rete di cavità sotterranee, ad oggi ancora sconosciuta, prodotta dalle attività umane a varie riprese, in più di duemila anni, dall'epoca romana agli inizi del 1900.

La presenza delle cavità sotterranee produce il crollo degli strati più superficiali del terreno con la formazione di voragini in superficie; queste ultime provocano da sempre problemi alla viabilità della città e danni ingenti alle infrastrutture viarie, al patrimonio edilizio, con ferimento o perdita, per fortuna raramente, di persone.

Ulteriore con-causa della formazione di tali *anthropogenic sinkholes* sono i guasti, le perdite e la disfunzione in genere della rete idraulica dei sottoservizi.

Negli ultimi dieci anni si è assistiti, nel centro urbano di Roma, all'incremento del fenomeno che ha determinato un rischio sempre maggiore, per la popolazione e per le infrastrutture, con danni alle strade e ai sottoservizi stessi (rete idrau-

lica, rete elettrica, del gas, dei telefoni etc.). Tale incremento, dovuto alla più fitta ed indiscriminata urbanizzazione del territorio, può anche essere connesso ad una variazione del regime pluviometrico che ha visto negli ultimi anni il susseguirsi di eventi piovosi molto intensi (bombe d'acqua): L'innesco dei fenomeni avviene, infatti, generalmente durante un evento piovoso inteso e/o in connessione, spesso, con la rottura di una tubatura idraulica.

I numerosi dati raccolti (cavità riscontrate in sondaggio, antichi imbocchi di cava, bunker, catacombe, ipogei privati) hanno consentito di rappresentare i risultati attraverso la realizzazione di una serie di mappe. La mappa di densità di cavità aggiornata al 2014 ha messo in evidenza che più di 20 km² di territorio romano sono interessati da cavità sotterranee.

I sinkholes censiti (più di 2600) hanno permesso di realizzare una mappa di densità di sinkhole da cui si evince che buona parte del territorio romano (più di 30 km²) è stata interessata da eventi di sprofondamento in più di 100 anni di sfruttamento del terreno urbano.

In questo scenario la determinazione del rischio indotto dal verificarsi di un sinkhole antropogenico è davvero difficoltoso, ma il concetto di rischio è stato sostituito con la suscettibilità, determinata come la probabilità che un evento di sprofondamento antropogenico si verifichi in un determinato spazio, con determinate caratteristiche geologiche-morfologiche al contorno, in un tempo infinito.

La sovrapposizione tra i vari strati informativi e il confronto con i dati geologico-geomorfologici e antropici hanno permesso di realizzare una carta di suscettibilità ai sinkholes aggiornata al 2014 (tavola fuori testo in tasca di copertina) in cui vengono rappresentate differenti classi di propensione al dissesto.

La carta è stata ottenuta mediante l'applicazione delle tecniche di analisi geospaziale (Regressione Geografica Pesata); dalla carta si può notare che i municipi maggiormente interessati al dissesto sono quelli del settore orientale della città, dove affiorano i depositi vulcanici, sottoposti in passato ad una massiccia estrazione mineraria (soprattutto il III quadrante e l'area al limite tra il II e il III quadrante).

I quartieri più interessati dallo sfruttamento minerario e di conseguenza dai sinkholes sono i quartieri, Tuscolano, Prenestino, Centocelle (Municipio V), Appia Antica (Municipio VII) e Tiburtino (Municipio IV); seguono i quartieri di S. Giovanni-Labicano e la zona Flaminia Cassia.

In definitiva le aree a più alta suscettibilità del territorio urbano (probabilità che un evento di sin-

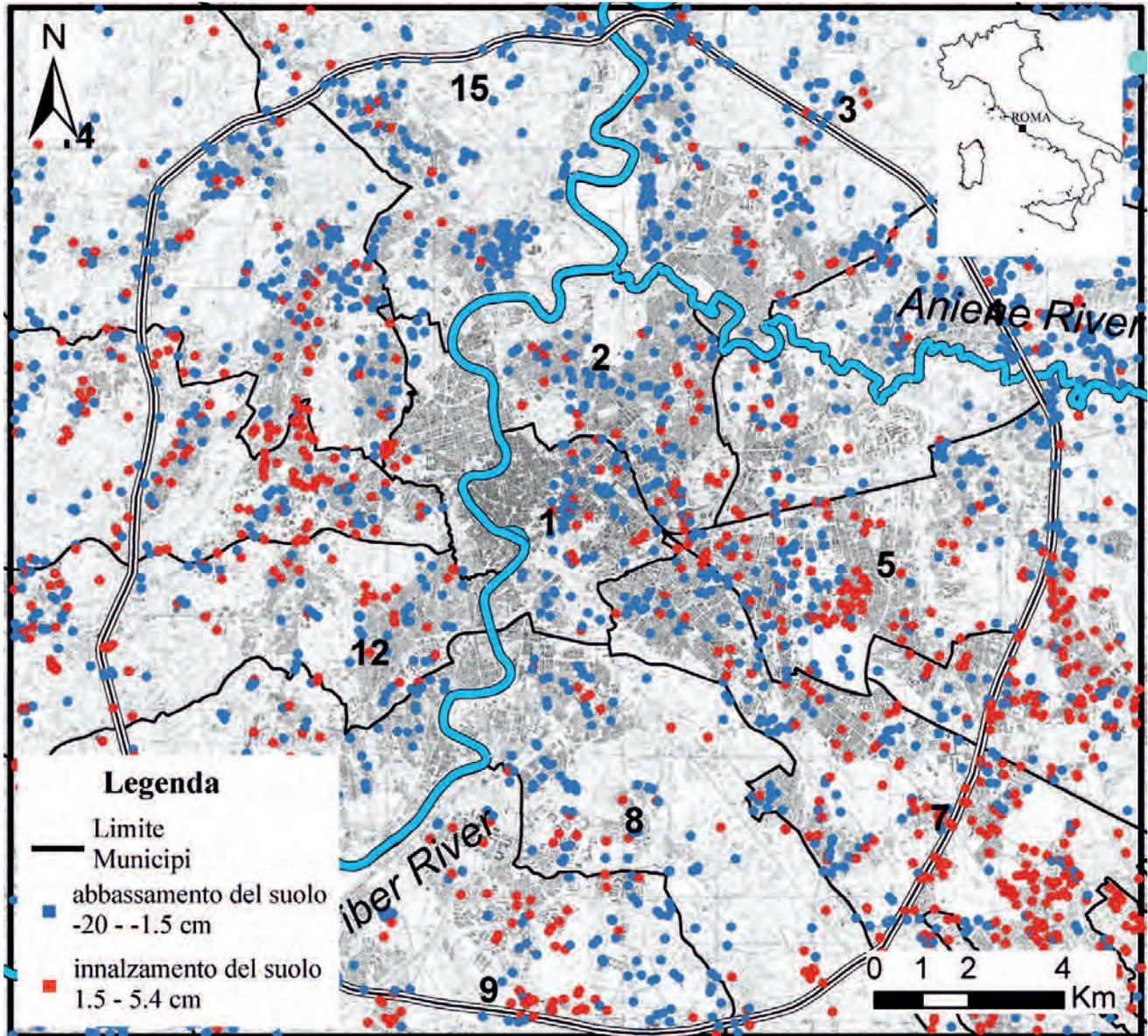


Fig. 26 - Punti di abbassamento al suolo da dati InSAR 1992-2002.
- InSAR subsidence points; data from 1992 to 2002.

khole si verifici pari al 95%) sono 6.76 km², le aree con probabilità di evento pari al 90% hanno estensione di 33.18 km². All'interno del Raccordo Anulare (estensione pari a 350 km²), in definitiva, 40 km² di territorio urbano hanno probabilità molto alta di innesco di un evento di sinkholes, circa il 11% del territorio cittadino.

Si è cercato, poi, di compiere uno *step* successivo per arrivare alla definizione di un modello previsionale per gli *anthropogenic sinkholes*: sono stati confrontati gli eventi di sinkholes censiti con i dati dell'abbassamento al suolo (InSAR anni 1992-2000). Le aree in subsidenza della fascia corrispondente all'alveo del fiume Tevere, in questa prima mappatura, preponderanti per i valori di subsidenza che vi si registrano hanno impedito di avere

una visione puntuale delle aree a più alta suscettibilità di sprofondamento.

Pertanto, è stata esclusa la fascia corrispondente all'alveo del Tevere; è stata realizzata una mappa con la suddivisione del territorio urbano in quattro classi di abbassamento al suolo, e su tale strato informativo sono stati sovrapposti tutti i fenomeni di sinkholes censiti (dal 1888 al 2014). Particolare rilievo è stato dato ai fenomeni originatisi nell'intervallo 1992-2002. I risultati emersi sono stati interessanti: escludendo le aree in cui la subsidenza può essere compatibile con altre problematiche (terreni alluvionali e costipabili, riporti antropici etc.) vi è una buona corrispondenza tra le aree in lenta subsidenza e gli eventi di sinkholes registrati.

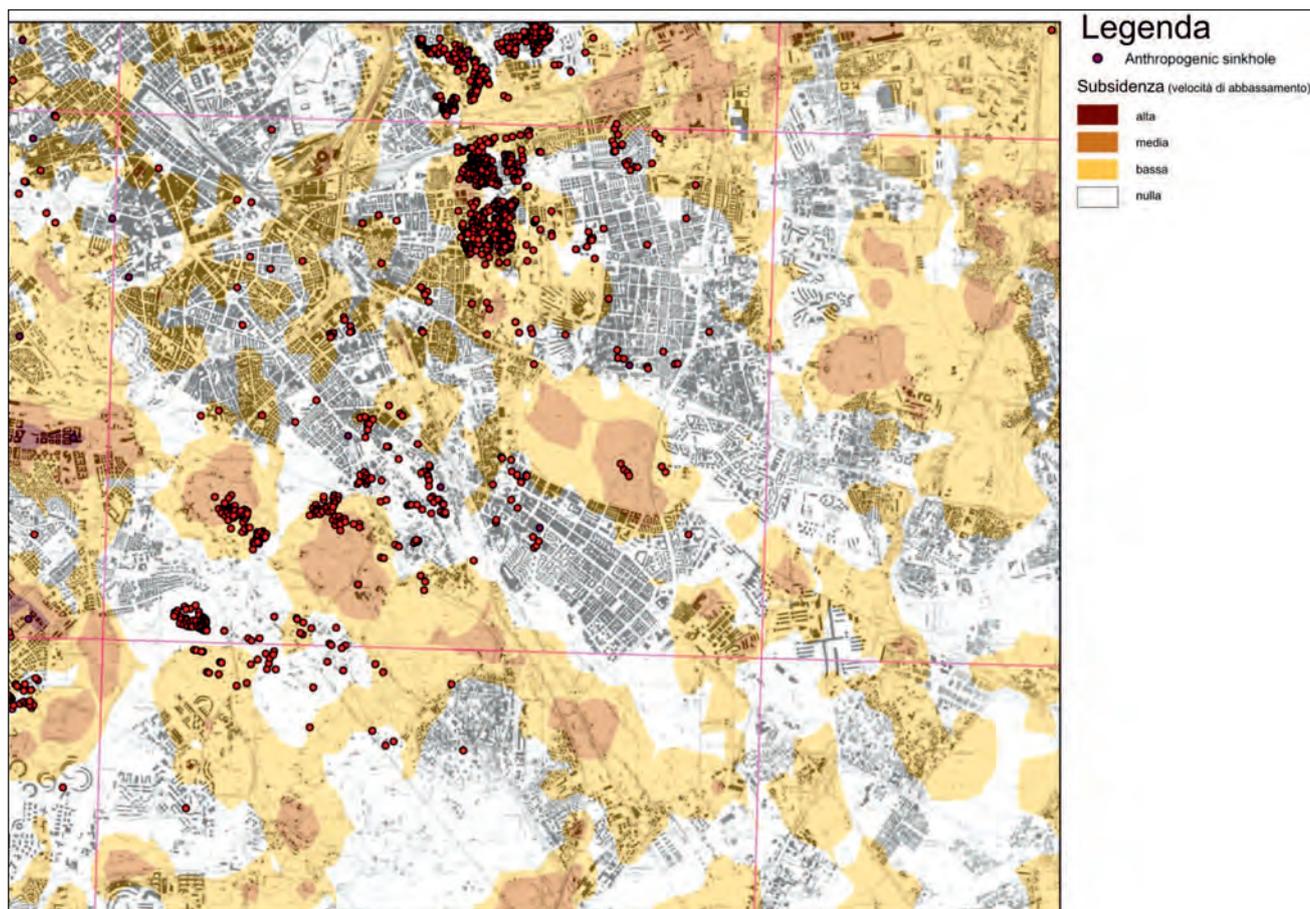


Fig. 27 - Schema degli abbassamenti al suolo per l'area Prenestina e confronto con i sinkholes censiti.
- Diagram of subsidence areas of the Prenestina district and comparison with censused sinkholes.

BIBLIOGRAFIA

- BASSO N., CIOTOLI G., FINOIA M.G., GUARINO P.M., MIRAGLINO P. & NISIO S., (2013) - *Gli sprofondamenti nella città di Napoli*. Mem. Descr. Carta Geol. D'It., **93**: 73-104.
- BERNABINI M., ESU F., MARTINETTI S. & RIBACCHI R. (1966) - *On the stability of the pillars in a underground quarry worked through soft pyroclastic rocks*, Proc. I Int. Cong. Rock Mech.: 285-291.
- CARDINALI M., GUZZETTI F. & REICHENBACH P. (1993) - *CNR Relazione di Sintesi del Progetto Speciale AVI*. CNR-GNDICI 1993, consultabile sul sito <http://avi.gndici.cnr.it/docs/lavori/sintesi.htm>.
- CATENACCI V. (1992) - *Il dissesto geologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **47**, IPZS, Roma.
- CHEN Z. & WANG J. (2007) - *Landslide hazard mapping using logistic regression model in Mackenzie Valley, Canada*. Natural Hazards, **42** (1): 75-89
- CIFANI G. (2008) - *Architettura romana arcaica: edilizia e società tra Monarchia e Repubblica*. L'Erma (Ed.), Roma.
- CIOTOLI G., CORAZZA A., FINOIA M.G. & NISIO S., SUCCHIARELLI C. (2013) - *Gli sprofondamenti antropogenici nell'aria urbana di Roma*. Mem. Descr. Carta Geol. D'It. **93**: 143-182.
- CIOTOLI G., FINOIA M.G., LIPERI L., MELONI F., NISIO S., TONELLI V. & ZIZZARI P. (2015) - *Sinkhole susceptibility map of the Lazio Region, Central Italy*. Journal of Maps 1/2015.
- CIOTOLI G., STIGLIANO F., MARCONI F., MOSCATELLI M., MANCINI M. & CAVINATO G.P. (2011) - *Mapping the Anthropogenic Backfill of the Historical Center of Rome (Italy) by Using Intrinsic Random Functions of Order k (IRF- k)* - Computational Science and Its Applications ICCSA 2011, International Conference Santander, Spain, June 20-23, 2011 Proceedings, Part I, Beniamino Murgante Osvaldo Gervasi Andrés Iglesias David Taniar Bernady O. Apduhan (Eds.), © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, DOI 10.1007/978-3-642-21928-3.
- COMUNE DI ROMA, RIPARTIZIONE V LAVORI PUBBLICI, GEOSONDA ITALCONSULT (1981) - *Studi e indagini geognostiche per il rilevamento delle gallerie esistenti in una zona del territorio della Circostrizione VI*. 3 relazioni e 21 elaborati grafici, Roma.
- COMUNE DI ROMA, RIPARTIZIONE X ANTICITÀ e BELLE ARTI, UFFICIO CARTA dell'AGRO (1988) - *Carta storica archeologica monumentale e paesistica del suburbio e dell'Agro Romano*. Scala 1:10.000, 38 fogli, Roma.
- CORAZZA A. (2004) - *Il rischio di fenomeni di sprofondamento in Italia: le attività del Dipartimento della Protezione Civile*. Atti 1° Seminario "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", Roma, 20-21 Maggio 2004, 319-330.
- CORAZZA A. (2010) - *Individuazione di movimenti precursori di sprofondamenti nell'area urbana di Roma attraverso l'utilizzo dell'interferometria differenziale*. Atti 2° Workshop internazionale: *I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato*, Roma 3-4 dicembre 2009, ISPRA: 685-702.

- CORAZZA A., MAZZA R. BERTUCCIOLI P. & PUTRINO P. (2002) – *Il Progetto “Cavità” – analisi del rischio dovuto a cavità sotterranee*. Atti dei Convegni Lincei, 19ª Giornata dell’Ambiente: “*Il dissesto idrogeologico. Inventario e prospettive*”, Roma 5 giugno 2001: 355-363.
- CRESCENZI, R., PIRO M. & VALLESI L. (1995) - *Le cavità sotterranee a Roma*. In: *La geologia di Roma. Il centro storico*, Mem. Descr. Carta Geol. d’It., **50**, 249-278.
- DAI F.C. & LEE C. F. (2002) - *Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong*. GEOMORPHOLOGY, 42(3-4): 213-228
- DE ANGELIS D’OSSAT G. (1943) - *La geologia delle catacombe romane*. Piac (Ed.), 312 pp., Roma.
- FIGLIORE A. & LANZINI M. (2007) - *Problematiche di valutazione del rischio di crollo di cavità sotterranee*. Geologi & Territorio, 4-2006/1-2007: 35-45.
- FOTHERINGHAM A.S., BRUNSDON C. & CHARLTON M.E. (2002) - *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*, WILEY, CHICHESTER.
- FOTHERINGHAM A.S., BRUNSDON C. & CHARLTON M.E. (1998) - *Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis*. Environ. Plann. A 30 (11), 1905-1927.
- FRANK T. (1924) - *Roman buildings of the Republic*. Roma, 1924.
- FUNICIELLO R., MARRA F. & ROSA C. (1995) - *I caratteri geologico-stratigrafici*. In: *L’ecosistema Roma: ambiente e territorio*: 29-39.
- FUNICIELLO F. & ROSA C. (1995) - *L’area romana e lo sviluppo delle ricerche geologiche*. Mem. Descr. Carta Geol. d’It., **50**: 23-30.
- FUNICIELLO R., PRATURLON A. & GIORDANO G. (a cura di) (2008) - *La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia*. Mem. Descr. Carta Geol. d’It., **80**.
- FUNICIELLO R., GIORDANO G. & MATTEI M. (2008) - *Carta Geologica del Comune di Roma*. Mem. Descr. Carta Geol. d’It., **80**.
- GIUDICI P. (2005) - *Data Mining: metodi informatici, statistici e applicazioni*. McGraw-Hill, Milano.
- GUZZETTI F., CARDINALI M. & REICHENBACH P. (1994) - *The AVI Project: A Bibliographical and Archive Inventory of Landslides and Floods in Italy*. Environmental Management, **18** (4): 623-633.
- LANCIANI R. (1918) – *Delle scoperte di antichità avvenute nelle fondazioni degli edifici per le F.S. nella ex Villa Patrizi*. Agosto-settembre-ottobre, 1918.
- LEE S. & SAMBATH T. (2006) - *Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models*. Environmental Geology, **50**(6): 847-855.
- LEMBO FAZIO A. & RIBACCHI R. (1990) – *Problemi di stabilità di scarpate e cavità sotterranee in rocce piroclastiche*, Politecnico di Torino, MIR, **11**: 1-13.
- LUGLI G. (1957) - *La tecnica edilizia romana: con particolare riguardo a Roma e Lazio*. **1**, Johnson Reprint Corporation.
- MARRA F., CARBONI M.G., DI BELLA L., FACCENNA C., FUNICIELLO R. & ROSA C. - *Il substrato plio-pleistocenico nell’area romana*, 1995, Boll. Soc. Geol. It., **114**: 195-214.
- MARRA F. & ROSA C. (1995) *Stratigrafia e assetto geologico-strutturale dell’area romana* Mem. Descr. Carta Geol. d’It., **50**: 49-118.
- MAZZA R., CAPELLI G. & LANZINI M. (2008) – *Rischio di crollo di cavità nel territorio del VI Municipio del Comune di Roma*. In: *La geologia di Roma. Dal Centro Storico alla periferia*, Mem. Descr. Carta Geol. d’It., **80** (2): 149-170.
- MCCULLAGH P. & NELDER J.A. (1989) - *Monographs on Statistics and Applied probability*. **37**, Chapman & Hall, London, pp. 511.
- MELONI F., NISIO S., LIPERI L., TONELLI V. & ZIZZARI P. (2013 a) - *Il Catalogo unificato dei sinkholes della regione Lazio*. Mem. Descr. Carta Geol. d’It., **93**: 321-354.
- MELONI F., NISIO S., LIPERI L., TONELLI V., ZIZZARI P. & CIOTOLI G. (2013 b) - *Carta dei sinkholes della Regione Lazio*. Mem. Descr. Carta Geol. d’It., **93**.
- MOLIN D., CASTENETTO S., DI LORETO E., GUIDOBONI E., LIPERI L., NARCISI B., PACIELLO A., RIGUZZI F., ROSSI A., TERTULLIANI A. & TRAINA G. (1995) - *Sismicità di Roma*. In: *La geologia di Roma. Il Centro Storico*, Mem. Descr. Carta Geol. d’It., **50**: 331-408.
- MOZCO P., ROVELLI A., LABAK P. & MALAGNINI L. (1995) - *Seismic response of the geologic structure underlying the Roman Colosseum and 2-D resonance of a sediment valley*. Ann. di Geof., **38** 5-6: 939-956.
- NISIO S. (2008) - *I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane*. Mem. Descr. Carta Geol. d’It., **85**, 475 pp.
- NISIO S. (2010 a) - *Fenomeni di sprofondamento in alcuni centri urbani*. Atti 2° Workshop internazionale: *I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell’ambiente naturale ed in quello antropizzato*. Roma 3-4 dicembre 2009, ISPRA: 845-864.
- NISIO S. (2010 b) - *Fenomeni di sprofondamento nell’ambiente urbano*. 6° Rapporto sulla qualità dell’ambiente urbano, ISPRA: 81-94.
- NISIO S. (2010 c) - *I sinkholes nelle aree di pianura italiane: i risultati del “Progetto Sinkhole”*. Atti 2° Workshop internazionale: *I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell’ambiente naturale ed in quello antropizzato*, Roma 3-4 dicembre 2009, ISPRA: 13-28.
- NISIO S. (2011) - *Fenomeni di sprofondamento in alcuni centri urbani*. 7° Rapporto sulla qualità dell’ambiente urbano, ISPRA.
- O’SULLIVAN D. & UNWIN J.D., 2003 - *Geographic information analysis*. Published by John Wiley and Sons, 436 pp.
- PRIGIOBBE V., SUCCHIARELLI C. & GIULIANELLI M. (2005) – *Valutazione dello stato strutturale di reti fognarie urbane mediante quantificazione delle exfiltrazioni ed infiltrazioni*. In: Atti dei Convegni Lincei, Convegno: “*Ecosistema Roma*”, Roma, 14-16 aprile 2004: 345-358, Bardi Editore, Roma.
- ROGERSON P.A. (2010) - *Statistical Methods for Geography: A Student’s Guide* SAGE Publications, 368 pp., ISBN 0761962875.
- SANTORO V.M. & FEDERICI V. (1999) – *Studi e indagini di un sistema di cavità sul Colle Aventino (Roma)*. In: Atti del Convegno: “*Le cavità sotterranee nell’area urbana di Roma e nella Provincia. Problemi di pericolosità e gestione*”, Provincia di Roma e Società Italiana di Geologia Ambientale: 39 – 72, Roma.
- SANTORO V. M. & FEDERICI V. (2002) – *Studio del sistema di cavità nella zona di via Giosafat, sul colle Aventino a Roma: valutazione del rischio potenziale e scelta degli interventi di consolidamento per il ripristino della viabilità*. In: Atti del 21° Convegno Nazionale di Geotecnica, A.G.I., l’Aquila: 595 – 602.
- TORO B. & DI FILIPPO (1999) – *Individuazione di cavità nel sottosuolo con metodi gravimetrici. Il caso di via Buie d’Istria*. In: Atti del Convegno: “*Le cavità sotterranee nell’area urbana di Roma e nella Provincia. Problemi di pericolosità e gestione*”, Provincia di Roma e Società Italiana di Geologia Ambientale: 73 – 82, Roma.
- SILVERMAN B.W. (1986) – *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. New York: Chapman and Hall.
- SCIOTTI M. (1982) – *Engineering Geological Problems Due to Old Underground Quarries in the Urban Area of Rome* – Proc. IV Int. Congress I.A.E.G., New Delhi.
- VENTRIGLIA U. (1971) - *La geologia della città di Roma*. Bardi Ed.
- VENTRIGLIA U. (2002) – *Geologia del territorio del Comune di Roma*. Editore Cerbone, Napoli.
- ZHOU W., BECK B.F. & ADAMS A.L. (2003) - *Application of Matrix Analysis in Delineating Sinkhole Risk Areas along Highway (I-70 near Fredrick, Maryland)*. Environmental Geology, **44**: 834-842.