

Sinkholes antropogenici nel territorio di Roma Capitale

Anthropogenic sinkholes in the territory of Roma Capitale

CIOTOLI G. (*), CORAZZA A. (**), FINOIA M.G. (***), NISIO S. (***),
SERAFINI R. (***), SUCCHIARELLI C. (****)

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

La presenza di tali cavità sotterranee produce il collasso degli strati più superficiali del terreno, a causa di crolli delle volte, con la formazione di voragini in superficie. Ulteriore causa della formazione di voragini è dovuta a guasti, perdite e alla disfunzione in genere della rete idraulica dei sottoservizi.

Negli ultimi dieci anni si è assistito 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 idraulica, rete elettrica, del gas, dei telefoni etc.). Bisogna tener conto, inoltre, per la città di Roma, che il fenomeno costituisce un problema per gli eventuali danni al patrimonio archeologico e per la preservazione dello stesso.

In questo scenario la determinazione del rischio indotto dal verificarsi di un sinkhole è davvero difficoltoso, ma il concetto di rischio può essere sostituito più facilmente con la suscettibilità, calcolata come la probabilità che un evento di sprofondamento si verifichi in un determinato spazio, con determinate caratteristiche geologiche-morfologiche al contorno, in un tempo infinito. In questo modo può essere realizzata una carta di suscettibilità ai sinkholes antropogenici per il territorio di Roma Capitale. Essa può essere ottenuta considerando i fattori geologici, morfologici, idrogeologici

predisponenti e valutando le caratteristiche dell'area in oggetto. Possono essere realizzati tre livelli nella metodologia: i) il primo livello prevede la possibilità di sprofondamento in un'area a grande scala; ii) il secondo livello può estrapolare il modello in un'area con le medesime caratteristiche; iii) il terzo livello consiste nella valutazione spazio-temporale dell'evoluzione del fenomeno per una data area.

Nel presente lavoro sono stati censiti più di 2000 sinkholes antropogenici ubicati nel territorio di Roma (dal 1875 al 2012) ed è stata proposta una metodologia per la realizzazione di un modello di suscettibilità basato sulla probabilità che l'evento di sprofondamento si verifichi indipendentemente dal tempo, mediante un sistema geo-statistico usando la regressione logistica (LR).

PAROLE CHIAVE: Sinkholes antropogenici, carta di suscettibilità, cavità sotterranee

ABSTRACT - Anthropogenic sinkholes in the urban area of Rome are mainly linked to the presence of a dense network of underground cavities, such as tunnels produced by historical mining activities, as well as drainage tunnels and catacombs linked to a history of more than two thousand years. 2011)

The presence of these cavities may easily trigger the collapse of the shallow or deeper layers from ground level. Subordinate causes are associated to the loose of soil below the road surface linked to run-off phenomena concurrently with intense rainfall.

(*) CNR- Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria (IGAG)

(**) Dipartimento di Protezione Civile

(***) ISPRA – Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico Nazionale - stefania.nisio@isprambiente.it

(****) Roma Capitale, Dipartimento alla Programmazione e Attuazione Urbanistica, U.O. – Pianificazione Urbanistica Generale – PR.G., via del Turismo, 30
00144 Roma - claudio.succhiarelli@comune.roma.it

Over the last decades an increase in the occurrence of these collapses in the urban center determines risk conditions to citizenship and disruption of roads and underground networks (sewers, water systems, electricity, telephone, etc.). Furthermore, the aspects related to the preservation of cultural heritage and of underground sites of historical and archaeological importance should be considered.

In this scenario the applicability of the concept of sinkhole risk is extremely difficult due to the lack of data about return times, and thus it is not possible to calculate probabilities of the event in a given time horizon. Then the concept of risk has been replaced with the most generic concept of susceptibility, which eliminates the probability term related to time, and defines the "risk" in spatial terms only: a collapse could occur in a certain area in an infinite time interval and a certain area has characteristics that facilitate a collapse. In this way collapse susceptibility maps can be produced identifying the areas with characteristics prone to the phenomenon. This could be obtained through three different levels of modeling: i) the first-level provides the potential of an area to the collapse occurrence at large scale; ii) the second-level creates a probabilistic model that can be extrapolated to similar areas; iii) the third-level tries to evaluate the space-time evolution of the phenomenon at site specific.

In this work more than 1800 anthropogenic sinkholes are censused in Rome (from 1875 to 2011) and a methodology has been proposed to individuate the susceptibility of the urban territory to the sinkholes.

It includes the construction of a probabilistic model based on the evaluation of the statistical relationships between the known collapses and a group of conditioning factors (i.e., presence of unfilled cavities, adequate hydrological conditions, sediments prone to subsidence) by using Logistic Regression (LR).

KEY WORDS: Anthropogenic sinkhole, sinkhole susceptibility map, Rome underground cavity

1. - INTRODUZIONE

Il territorio Italiano è tra le aree al mondo maggiormente interessate dai fenomeni di sprofondamento improvviso del terreno, sinkholes sia naturali che antropogenici. I sinkholes antropogenici si concentrano, per lo più, nelle aree urbane e periurbane delle città metropolitane. Tra queste ultime, negli ultimi anni, è stato registrato un aumento degli episodi nel territorio di Roma Capitale (ex Comune di Roma).

Gli sprofondamenti antropogenici a Roma sono riconducibili, per lo più, ai crolli delle volte o delle strutture di sostegno delle cavità artificiali di

interesse archeologico e, in misura minore, ma non meno frequenti, sono connessi a fenomeni erosivi sotterranei operati dai flussi idrici nei terreni sciolti, conseguenti ai dissesti delle reti fognarie e acquedottistiche.

Le cavità artificiali di interesse archeologico sono costituite principalmente da cave per materiali da costruzione e in misura minore, catacombe, cunicoli adibiti a vari usi (fognario, idraulico, di collegamento) pedonale, religioso e funerario.

Solo alla fine degli anni '60, in conseguenza dell'intensa espansione edilizia e delle implicazioni urbanistiche di rischio e di tutela archeologica, furono redatti i primi studi e le prime cartografie riguardanti il censimento delle cavità, che hanno consentito un'iniziale definizione localizzativa, e quindi una conoscenza generale, ai fini della prevenzione del rischio in relazione alla pianificazione del territorio (VENTRIGLIA & SCIOTTI, 1970; VENTRIGLIA, 1971; COMUNE DI ROMA, 1988).

Successivamente in seguito ad eventi di dissesto e con l'originarsi di condizioni di rischio (edifici realizzati con fondazioni dirette al di sopra di reti ipogee), per la sicurezza degli interventi edilizi e infrastrutturali, vennero svolti studi e ricerche metodologiche e conoscitive sulle cavità sotterranee sia dal punto di vista generale (BERNABINI *et alii*, 1966; SCIOTTI, 1982; LEMBO FAZIO & RIBACCHI, 1990; CRESCENZI *et alii* 1995; VENTRIGLIA, 2002; CORAZZA *et alii* 2002; FIORE & LANZINI, 2007; CORAZZA, 2010; NISIO, 2010) che locale (COMUNE DI ROMA, RIPARTIZIONE V LAVORI PUBBLICI, GEOSONDA ITALCONSULT, 1981; SANTORO & FEDERICI, 1999; SANTORO & FEDERICI, 2002; TORO & DI FILIPPO, 1999; SUCCHIARELLI, 2004; SUCCHIARELLI & DI STEFANO, 2004; MAZZA *et alii*, 2008; SUCCHIARELLI *et alii*, 2010).

Un primo censimento generale dei dissesti a Roma fu realizzato dal CNR (Progetto AVI, 1993), che portò all'individuazione, di un numero limitato di voragini (poco più di trenta). Successivamente il Dipartimento Nazionale di Protezione Civile nel 2004-2009 ha aggiornato gli eventi con il censimento di 96 fenomeni di sprofondamento avvenuti in città (CORAZZA, 2004; 2010).

Nel 2008, è stato avviato dal Dipartimento Difesa del Suolo dell'ISPRA il "Progetto sprofondamenti

nei centri urbani” che si occuperà, anche nei prossimi anni, di censire con maggior dettaglio, nonché aggiornare, gli sprofondamenti verificatesi nei principali centri urbani (NISIO, 2010).

In questa fase, per la città di Roma, è stato costituito di un gruppo di lavoro con rappresentanti dell'ISPRA (Dipartimento Difesa del Suolo), del Dipartimento Nazionale di Protezione Civile, del Dipartimento alla Programmazione e Attuazione Urbanistica di Roma Capitale (ex Comune di Roma) e del CNR-IGAG, per studiare in dettaglio il fenomeno e definire linee guida di prevenzione e intervento.

Il lavoro finora svolto è consistito in una prima fusione ed integrazione dei dati raccolti (geologici ed idrogeologici di caratterizzazione del territorio) e dei database di sprofondamenti pubblicati (CATENACCI, 1992; Progetto AVI, 1993; Database Protezione Civile, 2004, Database Progetto sinkhole-ISPRA).

Successivamente si è proceduto all'integrazione e aggiornamento delle informazioni, nonché a un primo studio riguardo la suscettibilità del territorio urbano agli sprofondamenti di tipo antropogenico.

Si riportano di seguito i primi risultati conseguiti.

2. - CARATTERI GEOLITOLOGICI DEL TERRITORIO DI ROMA CAPITALE

Il territorio di Roma Capitale si estende sulla bassa Valle del fiume Tevere in corrispondenza di un elemento tettonico che separa due settori ad evoluzione paleotettonica e neotettonica differente. Convergono, infatti, in quest'area, le strutture dell'Appennino umbro-marchigiano e quelle della piattaforma laziale-abruzzese, separate da una fascia di transizione (FUNICELLO & ROSA, 1995; FUNICELLO *et alii*, 1995; 2008 a b; MARRA *et alii*, 1995; MARRA & ROSA, 1995).

Inoltre Roma è compresa tra due distretti vulcanici generatisi più di 700.000 anni fa, con attività prevalentemente esplosiva e magmi di tipo alcalino-potas-sici: i Colli Albani e i Monti Sabatini.

L'area romana, fino a poco meno di un milione di anni fa, era caratterizzata da un ambiente di sedimentazione marino che ha portato alla forma-

zione di più formazioni sedimentarie, originate da più cicli principali avvenuti durante il Pliocene e il Pleistocene inferiore: *Formazione di Monte Vaticano*, *Formazione di Monte Mario*, *Formazione di Monte delle Picche* (FUNICIELLO *et alii*, 2008).

I terreni più antichi affioranti nell'area urbana di Roma sono le argille marine della *Formazione di Monte Vaticano* (*Argille azzurre Aucutt.*) ascrivibili al primo ciclo del Pliocene (Zancleano, parte alta – Gelasiano, parte bassa). Le testimonianze del ciclo marino, si riscontrano nelle parti più sollevate della Città: Monte Mario, Monte Vaticano fino alle pendici del Gianicolo.

Il secondo ciclo è costituito dalla *Formazione di Monte Mario* del Pleistocene inferiore (Santerniano p.p.). La *Formazione di Monte delle Picche*, anch'essa del Pleistocene inferiore (Emiliano p.p.), testimonia una facies di ambiente infralitorale con depositi argillosi e argilloso sabbiosi.

Successivamente il sollevamento generalizzato della regione ha portato, alla fine del Pleistocene inferiore, ad un cambiamento delle condizioni paleogeografiche e all'impostazione di un ambiente continentale in cui si depongono sedimenti di facies deltizia, fluviale e palustre riconducibili principalmente alle diverse fasi dell'evoluzione ambientale dell'antico corso del Tevere (*Paleotevere Aucutt.*): *Formazione di Ponte Galeria* e *Formazione del Fosso della Crescenza*.

La *Formazione di Ponte Galeria* (Pleistocene inferiore– Pleistocene medio), formata da conglomerati, sabbie e limi è la testimonianza dei depositi del Paleotevere in facies deltizia.

La *Formazione del Fosso della Crescenza* (Pleistocene medio p.p.) è costituita da ghiaie, sabbie e argille di ambiente fluviale e fluvio-lacustre. Si tratta dei sedimenti depositi dal Paleotevere quando il corso d'acqua, a seguito del sollevamento tettonico della dorsale di Monte Mario, è stato costretto a deviare il suo percorso originario verso SSE e a scorrere entro una valle in subsidenza situata tra la dorsale in questione e i Monti Sabini e Tiburtini.

A partire da 0.6 milioni di anni ha inizio l'attività del vulcanismo laziale, distinto in due principali Distretti: il Distretto vulcanico dei Monti Sabatini a nord-ovest, ed il Distretto vulcanico dei Colli Albani a sud-est.

L'attività che si è protratta per tutto il Pleistocene ha determinato ad ogni eruzione la messa in posto di un grande quantità di prodotti vulcanici, sia sotto forma di piroclastiti di ricaduta, sia sotto forma di depositi di colata piroclastica che vanno a concentrarsi nelle depressioni preesistenti, e che modificano radicalmente la topografia e l'idrografia originaria.

L'attività vulcanica del Pleistocene medio e superiore, con la ripetuta messa in posto di enormi volumi di materiali, insieme a numerose oscillazioni eustatiche del livello marino, sono i fattori che hanno maggiormente condizionato l'evoluzione geologica della città di Roma.

Pertanto, alle Formazioni sedimentarie, costituite prevalentemente da ghiaie, sabbie e limi di ambiente fluviale e fluvio-lacustre (*F. di Santa Cecilia, F. di Valle Giulia, F. del Torrino*), si sovrappongono e si intercalano terreni vulcanici appartenenti ai due citati distretti: *l'Unità di Tor dei Cenci, l'Unità del Palatino, l'Unità di Casale del Cavaliere, le Lave di Vallerano, le Pozzolane rosse, le Lave di Fosso Tre Rami, le Pozzolane nere, il Tufo lionato e le Pozzolanelle*, appartenenti alle fasi vulcaniche dei Colli Albani, *l'Unità di Prima Porta, i Tufo stratificati varicolori di Sacrofano, il Tufo rosso a scorie nere Sabatino, i Tufo stratificati varicolori di La Storta, il Tufo giallo di Sacrofano* appartenenti al vulcanismo di Sabatini; (FUNICIELLO *et alii*, 2008). Molte di tali litologie fu-

rono oggetto di coltivazione, in sotterraneo, ai fini edilizi e interessate da strutture catacombali (tab. 1).

I primi prodotti vulcanici che interessano il Centro storico di Roma si rinvencono sotto forma di piroclastiti rimaneggiate, all'interno della parte finale della *Formazione del Fosso della Crescenza*. Queste si presentano come sabbie ricche di cristalli di pirosseno, sanidino, biotite e piccole pomice.

Le colate piroclastiche invece sono caratterizzate da un'alternanza di livelli estremamente variabili come granulometria e consistenza, da mediamente consistenti a litoidi, costituiti da ceneri di colore variabile in cui si riscontrano piccole pomice e cristalli immersi in matrice cineritica.

Nella zona urbana della città al tetto delle vulcaniti, affiora un orizzonte di spessore limitato di depositi continentali fluvio-lacustri, costituito da argille, limi-sabbiosi e sabbie con locali livelli di diatomiti (*Formazione Aurelia*).

3. - CARATTERI GEOMORFOLOGICI

L'evoluzione geologica del territorio dell'area romana ha dato luogo dapprima alla formazione di un paesaggio costituito da morfologie prodotte dagli effetti delle attività plio-pleistoceniche tettoniche e deposizionali, sia clastiche (marine e continentali) che eruttive di tipo piroclastico dei Distretti vulcanici dei Monti Sabatini e dei Colli Albani.

Successivamente con l'esaurirsi delle attività vulcaniche costruttive di accumulo, a partire dal deterioramento climatico dell'ultima fase glaciale di 20.000 anni fa, i processi di erosione prodotti dalle forze esogene delle attività climatiche, prevalsero con la loro azione sul modellamento dei rilievi del territorio dando origine a quattro ambiti geomorfologici principali: la piana deltizia del fiume Tevere, i terrazzi dell'antica costa tirrenica, le valli fluviali e i rilievi collinari (ARNOLDUS HUYZENDVELD *et alii*, 1997; SUCCHIARELLI, 2003).

Quest'ultimo ambito morfologico può essere distinto, in base alle tipologie litologiche che lo costituiscono, in tre tipi di rilievi collinari: vulcanico, misto e clastico e sono le morfologie che sono state più interessate dalla presenza di aree di coltivazione mineraria per materiali da costruzione.

Tab. 1 – *Distribuzione in percentuale delle cavità sotterranee (cave e catacombe) nelle litologie delle unità stratigrafiche del territorio romano (da: CRESCENTI et alii, 1995, modificato).*

– Distribution of underground cavities (caves and catacombs) in the lithological units of the Roman territory (from: CRESCENTI *et alii*, 1995, modified).

Unità litostratigrafiche	Cave	Catacombe
Depositi alluvionali	-----	3%
Piroclastiti sabatine	60%	85%
Pozzolane rosse	32%	7%
Tufo litoide lionato	3%	1%
Paleotevere 2	1%	-----
Unità di Valle Giulia	3%	1%
Unità di Monte Mario	1%	3%

Questi rilievi sono parti della più estesa morfologia costituita da un vasto altopiano o plateau piroclastico che, in relazione ai processi erosivi evolutivi di gerarchizzazione del reticolo idrografico (affluenti nelle pianure alluvionali delle aste principali dei fiumi Tevere e Aniene), hanno dato origine a morfologie tabulari di varie forme ed estensione raccordate, con i sottostanti fondovalle torrentizi, da pendii e scarpate di varie acclività. Queste morfologie costituiscono il territorio delle parti di sinistra del Tevere e di destra e sinistra dell'Aniene.

I Rilievi collinari di tipo misto (costituiti nelle parti sommitali da depositi piroclastici del distretto vulcanico dei Sabatini e inferiormente da sedimenti clastici) formano le vaste aree collinari poste alla destra del tratto metropolitano del Tevere, dove ai primi del '900 sono state interessate da attività estrattive in sottoterraneo da cave di ghiaia e sabbia mentre i rilievi collinari, di tipo essenzialmente vulcanico, sono formati prevalentemente dalla deposizione delle piroclastiti del Distretto Vulcanico dei Colli Albani e costituiscono le morfologie storiche della parte sinistra del Tevere dei sette colli (Quirinale, Viminale, Esquilino, Celio, Campidoglio, Palatino e Aventino) su cui si sono maggiormente articolate le attività antropiche sotterranee sia storiche che contemporanee.

Per quanto riguarda i rilievi collinari di tipo clastico in relazione alla loro costituzione litologica si possono distinguere morfologie collinari prevalentemente sabbioso – ghiaiose e morfologie collinari prevalentemente argillose.

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 costituite dai livelli prevalentemente argillosi dell'unità stratigrafica del Monte Vaticano ed è rappresentata principalmente dall'alto strutturale della collina di Monte Mario-Vaticano-Gianicolo (140 m s.l.m. scendendo verso sud sino a 60 m). Questa dorsale, la quale si allunga in direzione meridiana, è caratterizzata da un rilievo dove il versante orientale mostra una serie di brevi e profonde incisioni trasversali che drenavano le acque superficiali e

quelle di piccole sorgenti poste alla base. L'area ha risentito in maniera sensibile dell'azione dell'uomo poiché, oltre all'intensa urbanizzazione, cui è stata oggetto, è stata interessata in passato da numerose cave per l'estrazione dell'argilla, utilizzata per la produzione di laterizi e manufatti in ceramica.

La coltivazione ha interessato le argille plioce-niche che affioravano presso Monte Mario e la Valle dell'Inferno (così denominata a causa degli impatti ambientali delle attività delle fornaci presenti) nonché i rilievi argillosi dei Monti della Creta.

4. - LE CAVITÀ SOTTERRANEE

Le cavità sotterranee presenti nel territorio dell'area romana si rinvencono prevalentemente nelle aree urbane e periurbane della riva sinistra del Tevere. Esse interessano i depositi piroclastici poz-zolanacei e tufacei di età pleistocenica del Distretto Vulcanico dei Colli Albani e, subordinatamente, in destra idrografica, le vulcaniti del Distretto Vulcanico dei Monti Sabatini e i depositi sabbiosi e ghiaiosi (VENTRIGLIA & SCIOTTI, 1970; VENTRIGLIA, 1971, CRESCENZI *et alii.* 1995; VENTRIGLIA 2002).

Le tipologie di cavità che si rinvencono possono essere riassunte in: *cave* per materiali da costruzione, *catacombe*, *acquedotti e opere idrauliche*, connesse all'approvvigionamento idrico, *cunicoli idraulici* per la regimazione delle acque meteoriche e incanalate del reticolo idrografico, *cunicoli di collegamento* per il transito pedonale, *infrastrutture fognarie*, *ambienti ad uso funerario*, religioso e idraulico.

A queste si devono aggiungere le cavità che si originano a causa di processi erosivi prodotti da esfiltrazioni e infiltrazioni idriche per dissesti di fognature e acquedotti di costruzione contemporanea.

Le cave relative ai depositi dei materiali vulcanici in sottoterraneo, hanno interessato principalmente le coltivazioni delle *Pozzolane Rosse Auct.* e subordinatamente quelle delle *Pozzolane Nere Auct.* e delle *Pozzolanelle Auct.*, mentre per quelle meno frequenti, riguardanti i materiali sedimentari delle ghiaie e sabbie, sono invece riferibili alle formazioni sedimentarie pleistoceniche (*Unità di Ponte*

Galeria e di Santa Cecilia), situate nella zona sud lungo gli altopiani prospicienti il fosso della Magliana (SUCCHIARELLI & DI STEFANO, 2004) e, in misura minore, in alcune zone limitate degli altopiani adiacenti la parte destra della valle alluvionale del fiume Tevere.

In merito alle cave dell'età arcaica i dati raccolti risalgono soprattutto alla fine del XIX sec. (LANCIANI, 1918; FRANK, 1924; LUGLI, 1957; CIFANI, 2008) dove, per quanto riguarda le cave di estrazione di piroclastiti, le cave si distinguevano in: *cave di estrazione intensiva e sistematica* e *cave di comodo*.

Le *cave di estrazione intensiva e sistematica* erano legate alla costante necessità di approvvigionamento di materiali da costruzione e l'ubicazione era legata alla ricerca del miglior materiale e alla minore distanza dalla città. Tali cave erano ubicate nel suburbio, a circa dal centro urbano dell'epoca (es. cave di Villa Patrizi presso la Nomentana, di Villa Querini presso la Tiburtina e alla Stazione Termini) ed erano costituite da gallerie con diametro di 3–4 m con altezza di 2,5–3 m. Sono state rinvenute a profondità di 3–4 m dal piano campagna con imbocchi sul fianco della collina e coltivazioni che avanzavano in senso orizzontale.

Esse erano comunque condizionate dal banco di tufo da cavare. L'attività estrattiva veniva condotta con piccozza ed ascia e il drenaggio all'interno era regimato da cunicoli di raccolta. A causa di eventuali difficoltà di scavo o esaurimento dell'orizzonte di cava, venivano aperti altri piani di galleria (fino a 4 livelli) con profondità massima 25 metri e nelle aree di coltivazione erano presenti pozzi esterni verticali.

Le *cave di comodo* avevano dimensioni ridotte e durata occasionale, in genere strettamente connesse alla costruzione di una struttura in particolare (es. una strada o un edificio). Sia per le *cave di estrazione intensiva e sistematica* che per le *cave di comodo*, la coltivazione in sotterraneo avveniva con tecniche di scavo "per camere e pilastri" (DE ANGELIS D'OSSAT, 1940; VENTRIGLIA, 1971; SCIOTTI, 1984;) che si sono protratte nel tempo mantenendosi quasi invariate.

Il metodo prevedeva lo scavo di gallerie secondarie (con andamento sub-rettangolare) rispetto a quella principale, che era stata scavata (a partire dal

suo imbocco sotterraneo) ortogonale alla base del pendio del rilievo interessato dalla litologia del materiale da estrarre. Gli imbocchi per gli accessi alle gallerie venivano realizzati anche attraverso 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 15 metri e da 8 a 6 metri di lato in ragione nel fatto che al momento di abbandonare la rete ipogea di coltivazione per esaurimento degli strati pozzolanacei, i pilastri venivano ulteriormente ridotti per ottenere ancora materiale (operazione di riquartatura).

Per ragioni di sicurezza elaborate su osservazioni empiriche, i cavaatori del passato tendevano a mantenere entro determinati limiti i rapporti dimensionali tra gallerie e pilastri: in genere si cercava di mantenere il rapporto areale di scavo (rapporto vuoti/pieni) inferiore al 40%. Dopo lo scavo originario della rete ipogea di coltivazione, le frequenti operazioni di riquartatura, l'insacco ai crolli per sgrottamenti, le erosioni ed alterazioni delle pareti e delle volte delle cavità, hanno portato all'aumento dei volumi delle gallerie con conseguente incremento del rapporto di scavo che è diventato sovente maggiore del 50%, con conseguente diminuzione dei coefficienti di sicurezza globali.

L'utilizzo delle cave di tufo come aree di culto e cimiteriali risale al I–III sec. d. C. e 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. La parola "catacomba", ormai usata per designare qualunque necropoli sotterranea, deriva infatti da un termine greco che significa "cavo". Tale toponimo indicava anticamente la zona di cave dell'Appia antica, nei pressi delle catacombe di S. Sebastiano. L'utilizzo delle aree di coltivazione come necropoli deriva da una legge dell'antica Roma che vietava, per motivi sanitari, di seppellire i defunti all'interno della città, così si decise di riutilizzare le aree di coltivazione mineraria, poste in suburbio. Le strade consolari erano fiancheggiate dai sepolcri dei patrizi, che avevano sepolture differenti, non all'interno delle aree di necropoli: in genere venivano cremati e le cui ceneri venivano conservate

Tab. 2 – *Relazioni tra le principali caratteristiche delle cavità sotterranee presenti nell'area romana e i fenomeni di sprofondamento (sinkholes antropogenici).*

- Relationships between the main characteristics of the underground cavities of the Roman area and of the subsidence phenomena (anthropogenic sinkholes).

Principali caratteristiche delle cavità sotterranee presenti nell'area romana che sono causa potenziale dei fenomeni di sprofondamento (sinkholes antropici)				
Tipologia		Sviluppo sotterraneo	Periodo storico	Litologie interessate
Cave per materiali da costruzione	Materiali vulcanici	Principalmente ramificato o a rete	Romano con eventuale riuso medioevale	Depositi piroclastici coerenti e incoerenti (pozzolane)
		Subordinatamente isolato		
		In qualche caso in ordini sovrapposti		
	Materiali sedimentari	Ramificato o in rete	Romano e prevalentemente contemporaneo	Depositi incoerenti (sabbie e ghiaie)
Catacombe		Ramificato e in qualche caso in ordini sovrapposti	Romano	Depositi piroclastici
Acquedotti e opere idrauliche connesse per l'approvvigionamento idrico		Lineare e puntiforme	Etrusco e Romano	Depositi piroclastici e sedimentari
Cunicoli idraulici per la regimazione delle acque meteoriche e incanalate del reticolo idrografico naturale				
Cunicoli di collegamento per comunicazione e transito pedonale				
Infrastrutture fognarie		Lineare e ramificato	Romano	Principalmente depositi alluvionali e terreni di riporto; subordinatamente depositi piroclastici
Ambienti ad uso funerario (camere sepolcrali, gallerie cimiteriali, colombari, sepolcreti)		Isolato o puntuale	Romano	Depositi piroclastici e sedimentari
Ambienti ad uso religioso (santuari)				
Ambienti ad uso idraulico (cisterne e pozzi)				
Cavità prodotte da processi erosivi indotti da exfiltrazioni e infiltrazioni idriche causate da dissesti delle reti fognarie e acquedottistiche		Puntuale	Prevalentemente contemporaneo	Terreni di riporto, depositi alluvionali e piroclastici

in urne. Cinque delle catacombe romane sono aperte al pubblico e hanno sviluppo di alcuni km di gallerie sotterranee (le catacombe di S. Callisto), che scendono fino a grande profondità e si diramano su quattro e a volte cinque livelli, fiancheggiate da nicchie scavate (“loculi”) disposte su due e perfino tre livelli l’uno sull’altro. A Roma esistevano inoltre sei catacombe ebraiche: di quattro non se ne conosce l’esatta ubicazione.

Nel IV sec. viene registrata una variazione dei locali sotterranei (allargamenti, aumenti della volta delle gallerie) a causa dell’esaurimento degli spazi delle necropoli: le aree di cava (utilizzate come luoghi di culto) in parte vengono rinforzate, per evitare gli sprofondamenti delle volte che già iniziavano a verificarsi e, allo scopo di rendere più facile l’accesso alle necropoli, furono creati cunicoli a scale a pendenza molto elevata detti *introitus ad martyres*. I numerosi resti ceramici ritrovati nelle aree di cava attestano che le aree vennero ancora sfruttate in epoca medioevale e successiva.

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 presentano dimensioni minori.

Le cavità che si originano per processi erosivi prodotti dai dissesti di fognature e acquedotti di costruzione contemporanea, trovano la loro causa nelle esfiltrazioni di acque reflue e potabili e nelle infiltrazioni idriche di acque di falda nella rete fognaria (GIULIANELLI *et alii*, 2004; PRIGIOBBE *et alii*, 2005). La progressiva riduzione di una tenuta idraulica tanto delle tubazioni quanto nei giunti, può condurre ad un dissesto locale che può ampliarsi e che, nel caso di fognature interagenti con flussi idrici sotterranei, può essere luogo preferenziale per il loro drenaggio all’interno della struttura stessa (acque parassite) con il trasporto del sedimento eroso dal flusso di infiltrazione, nella lesione strutturale della fogna. Questo processo, associato anche ai processi di exfiltrazione in pressione dalla rete acquedottistica, favorisce nel corso del tempo

l’estendersi dell’erosione terrigena e il progressivo ampliamento di cavità sotterranee fino a progredire esternamente in modo improvviso con l’apertura di voragini stradali.

Nell’ambito delle finalità del presente lavoro, la conoscenza della distribuzione sul territorio delle cavità sotterranee, rappresenta un contributo fondamentale attraverso la raccolta delle informazioni, dei dati di letteratura e l’unificazione dei censimenti esistenti (VENTRIGLIA & SCIOTTI, 1970; VENTRIGLIA, 1971, CRESCENZI *et alii*, 1995; VENTRIGLIA 2002; ISPRA, 2008). A tali dati sono stati aggiunti ulteriori informazioni provenienti da ispezioni dei Beni Culturali, da dati raccolti dalla U.O. Pianificazione Urbanistica Generale – P.R.G. del Dipartimento alla Programmazione e Attuazione Urbanistica di Roma Capitale e da sondaggi o scavi di nuova realizzazione (fig. 1). È stato realizzato così un unico database contenente le cavità, distinte, in una prima classificazione, in cave, cunicoli e catacombe.

È risultato interessante, anche localizzare, al fine di individuare la possibile estensione della rete di gallerie sotterranee, anche gli imbocchi di cava, spesso oblitterati dall’edificato.

5. - I FENOMENI DI SPROFONDAMENTO NEL TERRITORIO DI ROMA CAPITALE

Gli sprofondamenti nel territorio di Roma Capitale sono noti sin dall’antichità (NISIO, 2010) e connessi anche nelle epoche passate a crolli delle cavità e gallerie sotterranee realizzate in epoca romana a vario titolo.

A tal riguardo, AMIDEI (1741) riporta il seguente brano: “*Mi ricordo, da puerizia, di aver visto una buca, come una voragine sopra la Piazza di Campidoglio ed alcuni che vi entravano, nell’uscire dicevano esservi una femmina a cavallo di un Toro, ed un tempo dopo ragionando con Mastro Vincenzo de Rolli, mio maestro, mi disse di esservi disceso e di aver vista la favola di Giove e di Europa... ma s’è ripiena, non è meraviglia, perché le gran ruine del Campidoglio l’hanno ricoperta*”.

I fenomeni avvenuti in epoca successiva a quella romana ed in epoca recente nell’area urbana della città confermano che le cause del fenomeno, anche

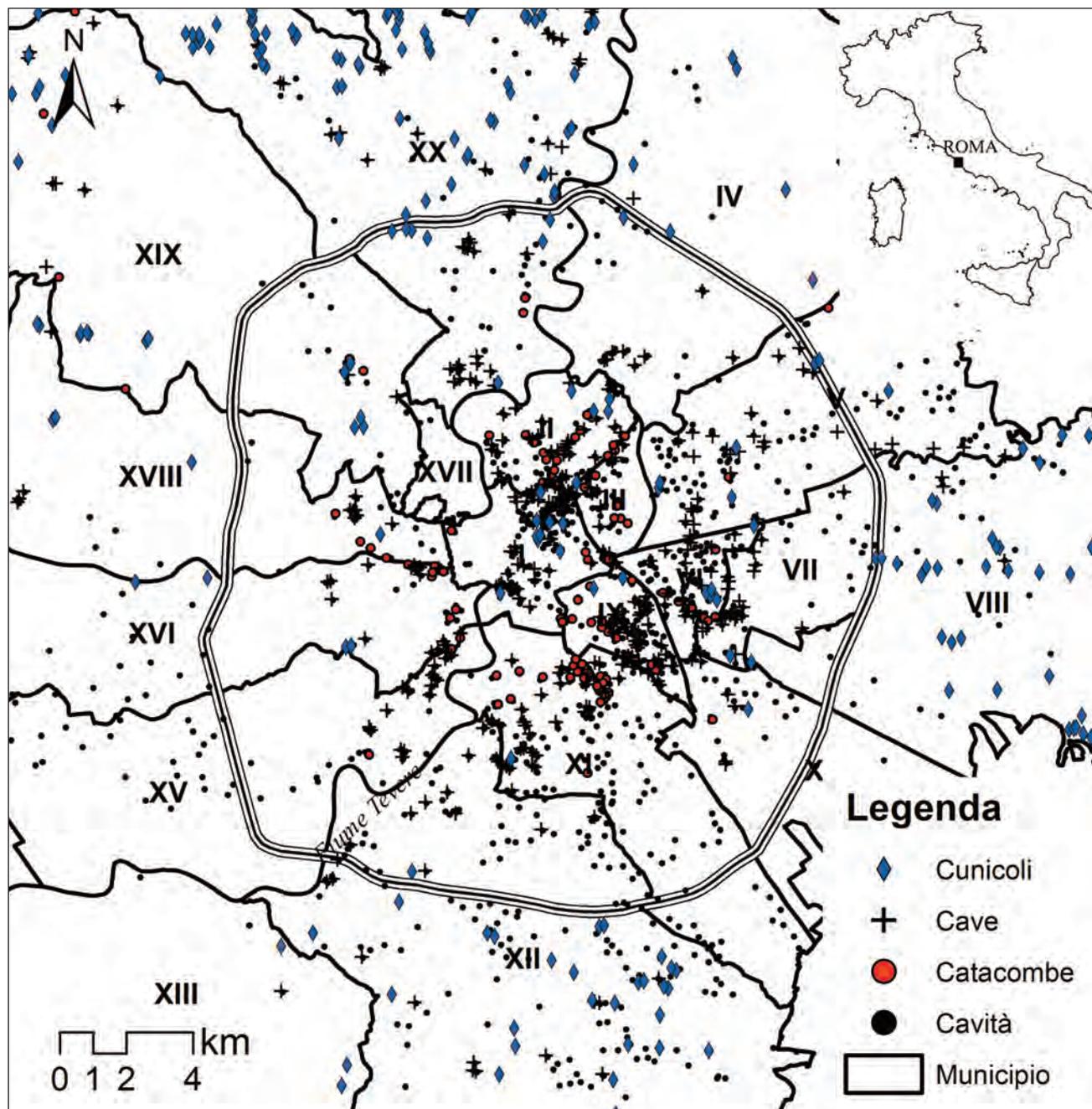


Fig. 1 – Ubicazione delle cavità sotterranee a Roma. Il censimento è stato realizzato con dati di letteratura e con integrazioni dovute a recenti ricerche. Le cavità sono state così suddivise: cave, catacombe, cunicoli e cavità generiche (che comprendono le altre tipologie nonché tutte le cavità di cui non se ne conosce un utilizzo).
 – Location of underground cavities in the Rome area. Census of the cavities has been carried out by using data from the literature integrated with information obtained by recent researches.
 The typologies of the cavities recognised in the Rome area are: caves, catacombs, tunnels and cavities (i.e., other types).

in passato, sono state essenzialmente le due già menzionate: il crollo di volte delle cavità, realizzate per lo più nei terreni vulcanici (e subordinatamente sabbiosi o ghiaiosi), per estrazione dei materiali da costruzione o per realizzazione di antichi luoghi di culto e l'asportazione dei terreni superficiali per dilavamento (MAZZA *et alii*, 2008; NISIO, 2010).

Un primo censimento di eventi di calamità natu-

rali (per lo più fenomeni franosi) avvenuti in città, tra cui gli sprofondamenti, è stato realizzato nel 1993, dal CNR (Progetto AVI; CARDINALI *et alii* 1993; GUZZETTI *et alii*, 1994), che ha portato all'individuazione, nella città di Roma, di un numero molto limitato di casi (28 eventi di sprofondamento).

Successivamente il Dipartimento Nazionale di Protezione Civile (DPC) nel 2010, tenendo conto delle

Tab. 3 – *Effetti dei fenomeni di sprofondamento del territorio (sinkholes antropici) nell'area romana sugli interventi di urbanizzazione infrastrutturale e insediativa e i beni culturali.*

– Effects of the subsidence phenomena (anthropogenic sinkholes) in the Rome area on the urbanization and settlement infrastructure, and cultural heritage.

Effetti dei fenomeni di sprofondamento del territorio (sinkholes antropici) sugli interventi di urbanizzazione e i beni culturali						
Interventi di urbanizzazione						Beni culturali
Primaria, infrastrutturale			Secondaria, insediativa			Aree archeologiche e monumentali
Strade e vie di comunicazione	Rete fognaria	Acquedottistica, telefonica ecc.	Residenziale	Industriale	Servizi	
<ul style="list-style-type: none"> • Cedimenti del terreno; • deformazione, lesione e rottura infrastruttura; • interruzione del servizio; • inaccessibilità territoriale; 			<ul style="list-style-type: none"> • Cedimenti del terreno; • lesioni strutturali; • deformazione e danneggiamento impiantistica; • inagibilità; • crollo 			
<ul style="list-style-type: none"> • Danno economico; • danno fisico alla persona 	<ul style="list-style-type: none"> • Danno economico; • danno ambientale (inquinamento del suolo e delle acque sotterranee) 	Danno economico	<ul style="list-style-type: none"> • Danno economico; • danno fisico alla persona 			<ul style="list-style-type: none"> • Danno al patrimonio storico e ambientale; • danno economico

voragini censite nel Progetto AVI, ha rilevato in totale 96 *anthropogenic sinkholes* avvenuti in città (CORAZZA, 2010).

L'indagine condotta dal Dipartimento Nazionale di Protezione Civile nella città di Roma ha preso in considerazione gli eventi avvenuti tra il 1915 e il 2004 tutti riconducibili a ex cave in sotterraneo di materiali da costruzione (CORAZZA, 2010). Il censimento ha riguardato esclusivamente i fenomeni che erano connessi con la presenza di reti caveali (escludendo quindi quelli connessi con fenomeni di dilavamento/cavitazione all'interno dei terreni di riporto) e che avevano determinato danni a persone e/o a cose, in superficie e/o in sotterraneo. In 14 su tali 96 casi, il dissesto è avvenuto in sotterraneo senza ripercussioni in superficie (CORAZZA, 2010). Si è trattato di crolli o lesioni nelle volte o nei pilastri delle cavità che hanno provocato la rottura di reti idriche o fognarie, danni a strutture sotterranee (gallerie etc.), pericoli per la fruibilità degli ambienti ipogei (catacombe etc.). In 82 casi il dissesto, invece, è stato provocato dall'instabilità delle cavità sotter-

ranee e si è manifestato in superficie con la formazione di voragini di forma generalmente circolare o ellittica che hanno raggiunto anche grandi dimensioni (fino a 700 m² di estensione) e profondità (oltre 10 dal piano campagna).

Parallelamente al lavoro svolto dal DPC, nel 2008, è stato avviato dal Dipartimento Difesa del Suolo dell'ISPRA il "Progetto sprofondamenti nei centri urbani" che si occuperà, anche nei prossimi anni, di censire con maggior dettaglio, nonché aggiornare, gli sprofondamenti verificatesi nei principali centri urbani.

Il lavoro di ricerca realizzato, in tale ambito, è stato quello di raccogliere tutte le informazioni dalla letteratura (CATENACCI *et alii*, 1992; CARDINALI *et alii*, 1993), integrare i dati con ulteriori ricerche che sono state condotte presso, archivi, emeroteche, cartoteche specifiche. Tali dati sono stati incrementati con le informazioni provenienti da cronache cittadine e da quotidiani *on line*, soprattutto per quanto concerne gli accadimenti degli ultimi anni.

La ricerca sulle fonti storiche e sulla cartografia di fine 800 inizi del 1900 è stata di fondamentale



Fig. 2 - Veduta panoramica di Monte delle Picche (Roma sud ovest tra Trullo e Magliana Vecchia) interessato, lungo il pendio di raccordo tra il ripiano sommitale e il sottostante fondovalle, da sprofondamenti del piano campagna, connessi con una rete caveale sotterranea estrattiva dei primi del 1900 di materiali ghiaiosi.

Nella parte destra della foto è situato il Fosso della Magliana (foto: Succhiarelli C.).

- Panoramic view of Monte delle Picche (southwest Rome between Trullo and Magliana Vecchia) where anthropogenic sinkhole occur linked to a network of underground mining caves during the early 1900. On the right side of the picture there is the Fosso della Magliana (photo: Succhiarelli C.).

importanza per l'individuazione di forme da sprofondamento per crolli in sotterraneo.

Lo “*sfornellamento*” o “*fornello*” è il nome con cui si indica la morfologia da sprofondamento antropico (fig. 2, 3). Tale forma è molto frequente nel territorio urbano di Roma sin dalla fine del 1800; si tratta di una morfologia depressa generalmente sub-circolare o irregolare più raramente gemellata, con diametro compreso tra 5 m e decine di metri e con profondità metriche, dovuta al crollo di volte delle suddette cavità in sotterraneo. Tale morfologia oggi si osserva solo nelle zone periferiche della città o non edificate (es. parco della Caffarella), ma agli inizi del 1900 gli sfornellamenti costituivano un elemento del paesaggio romano.

L'esame di tutto il territorio romano, attraverso la cartografia d'epoca nonché lo studio di foto aeree della metà del secolo scorso (fig. 4), ha portato al censimento di centinaia *sfornellamenti* (981 per l'esattezza) un tempo presenti verificatisi prima dell'urbanizzazione delle aree dove oggi è presente l'edificato (figg. 5-9).



Fig. 3 - Sinkhole originatosi nei primi mesi del 2004 presso Monte delle Picche. Lo sprofondamento presenta una forma subcircolare con una larghezza media di circa 6 metri per una profondità stimata di 4 m. Ricade in un'area territoriale interessata dalla realizzazione di un insediamento a carattere prevalentemente residenziale (A.T.O. R 72) (foto: Succhiarelli C.).

- Sinkhole originated in the early months of 2004 at Monte delle Picche. The sinkhole has a round shape with an average diameter of about 6 m and a depth of about 4 m. The sinkhole occurs in an area where residential settlement shall be constructed (A.T.O. R 72) (foto: Succhiarelli C.).



Fig. 4 – Stralci aerofotografie (S.A.R.A.-Nistri S.r.l. volo anno 1960) in cui si evidenziano nei riquadri (in giallo) le morfologie di sprofondamento del piano campagna: a) area adiacente la Muratella presso la confluenza del fosso della Magliana con il Tevere (cave sotterranee di ghiaia); b) Labaro (cave di materiali piroclastici); c, d) Appio Latino, Parco della Caffarella (cave di materiali piroclastici); (fonte: archivio U.O. – Pianificazione Urbanistica Generale-P.R.G. del Dipartimento alla Programmazione e Attuazione Urbanistica di Roma Capitale).

- Aerial photographs (SARA-flight Srl Nistri 1960) which highlight the morphologies of subsidence of the ground level (yellow squares): a) the area adjacent Muratella at the confluence of the Magliana ditch with the Tiber river (underground gravel quarries) b) Labaro (quarries of pyroclastic materials); c, d) Appio Latino, Parco della Caffarella (quarries of pyroclastic materials) (source: archive UO - General Urban Planning, Department of Programming and Implementation of Urban Planning of Rome).

Gli studi dimostrano come in aree interessate dagli *sfornellamenti* è stato edificato il tessuto urbano, probabilmente, a volte, effettuando una bonifica (rimozione preventiva delle cavità con livellamento del terreno) solo nella porzione di terreno immediatamente sottostante gli edifici.

Si mostrano nelle figure 7-9 alcuni esempi esplicativi, del fenomeno in tre settori della città; Appia antica, Prenestino, Tiburtino. La distribuzione degli *sfornellamenti* all'interno dei municipi romani è riportata in figura 10.

Lo studio svolto, ha portato alla realizzazione finale, di un *database* ISPRA con più di 1700 dati.

Si è così organizzato un *database* completo, integrato con i dati del Dipartimento di Protezione Civile, che contiene, sinora, 1839 voragini avvenute nel territorio di Roma sino al Raccordo Anulare (fig. 11).

Del totale dei sinkholes censiti (1839) 858 derivano da cronache storiche e recenti o da letteratura ed hanno provocato danni alle infrastrutture e/o edifici civili, i 981 derivanti da cartografia si sono originati in aree adibite alle coltivazioni di materiali

da costruzione e pertanto al momento della formazione non edificate (fig. 12).

Le analisi complessive mostrano che i fenomeni di sprofondamento si concentrano nel settore centrale dell'area urbana e risultano meno presenti nei settori occidentale e orientale.

I municipi maggiormente interessati dal fenomeno sono il V, VI e XI (Tiburtino, Prenestino, Appia Antica) nelle porzioni orientali e sud-orientali della città (fig. 13).

L'età dei fenomeni censiti è compresa nell'intervallo di tempo che va dal 1884 ad oggi, con un netto incremento di segnalazioni a partire dagli anni 60-70 del secolo scorso.

Gli sprofondamenti presentano di norma dimensioni contenute con diametro inferiore a 10 m



Fig. 5 – Stralci del foglio IGM, scala 1:25.000 anno 1884, dell'area Prenestino-Acqua Bullicante, in cui sono visibili le morfologie di sprofondamento. – IGM topographic map of 1884 (1:25000) of the Prenestino-Acqua Bullicante area that shows anthropogenic sinkhole paleo-morphology.

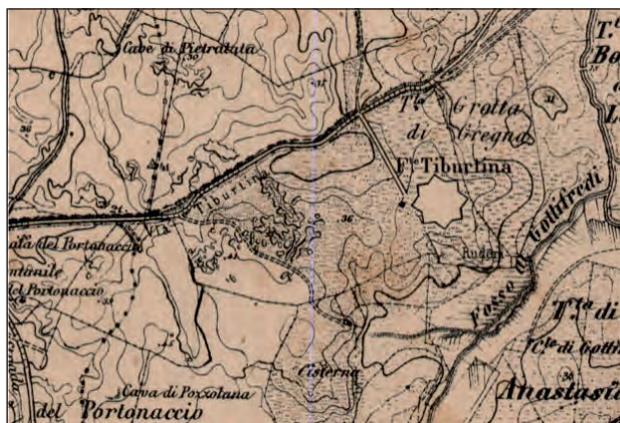


Fig. 6 – Stralci del foglio IGM, scala 1:25.000 anno 1884, dell'area Tiburtino-Portonaccio, in cui sono visibili le morfologie di sprofondamento. – IGM topographic map of 1884 (1:25000) of the Tiburtino-Portonaccio area that shows anthropogenic sinkhole paleo-morphology.

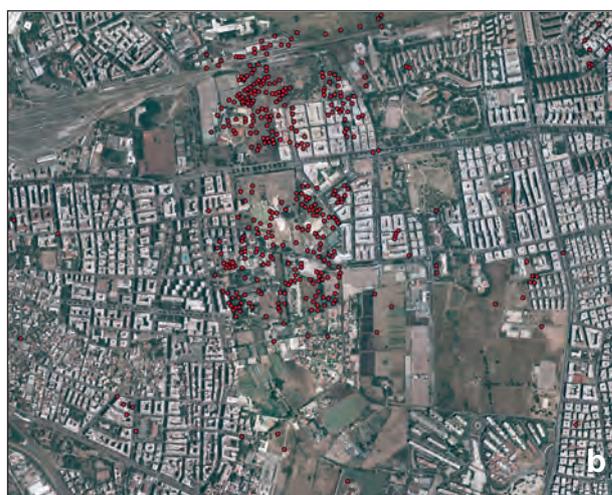
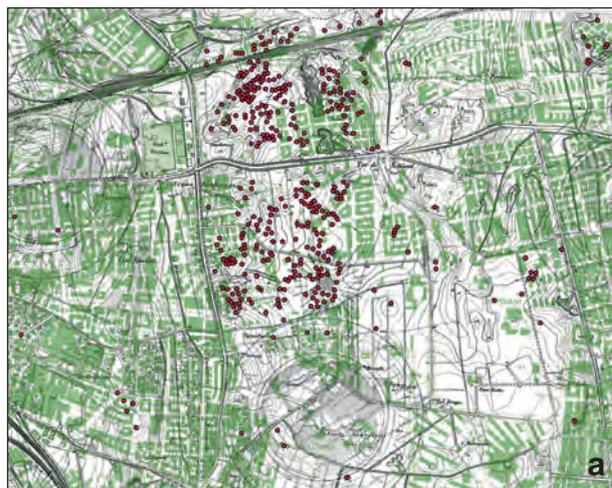


Fig. 7 – a) Ubicazione degli sfornamenti nell'area dell'Acqua Bullicante (quartiere Prenestino), in rosso, e dell'edificato attuale in verde; b) ortofoto attuale dell'area. – Locations of the anthropogenic sinkholes in the Acqua Bullicante district (in red) and recent buildings (in green)(a); aerial photo of the area (b).

e profondità di alcuni metri, e nella totalità dei casi ricadono nella categoria degli *anthropogenic sinkholes*.

Gli *anthropogenic sinkholes* censiti sono localizzati prevalentemente all'interno di aree della città a forte urbanizzazione, la genesi degli sprofondamenti appare legata all'esistenza della suddetta presenza rete caveale per estrazione di materiale. I dissesti, oltre a produrre danni materiali hanno coinvolto, per fortuna non frequentemente, anche delle persone. Nella porzione centrale della città le voragini sono frequentemente connesse con i dissesti del sistema di smaltimento fognario e delle acque di superficie. Il ruolo del fattore di innesco è svolto dagli eventi meteorici intensi e/o prolungati.

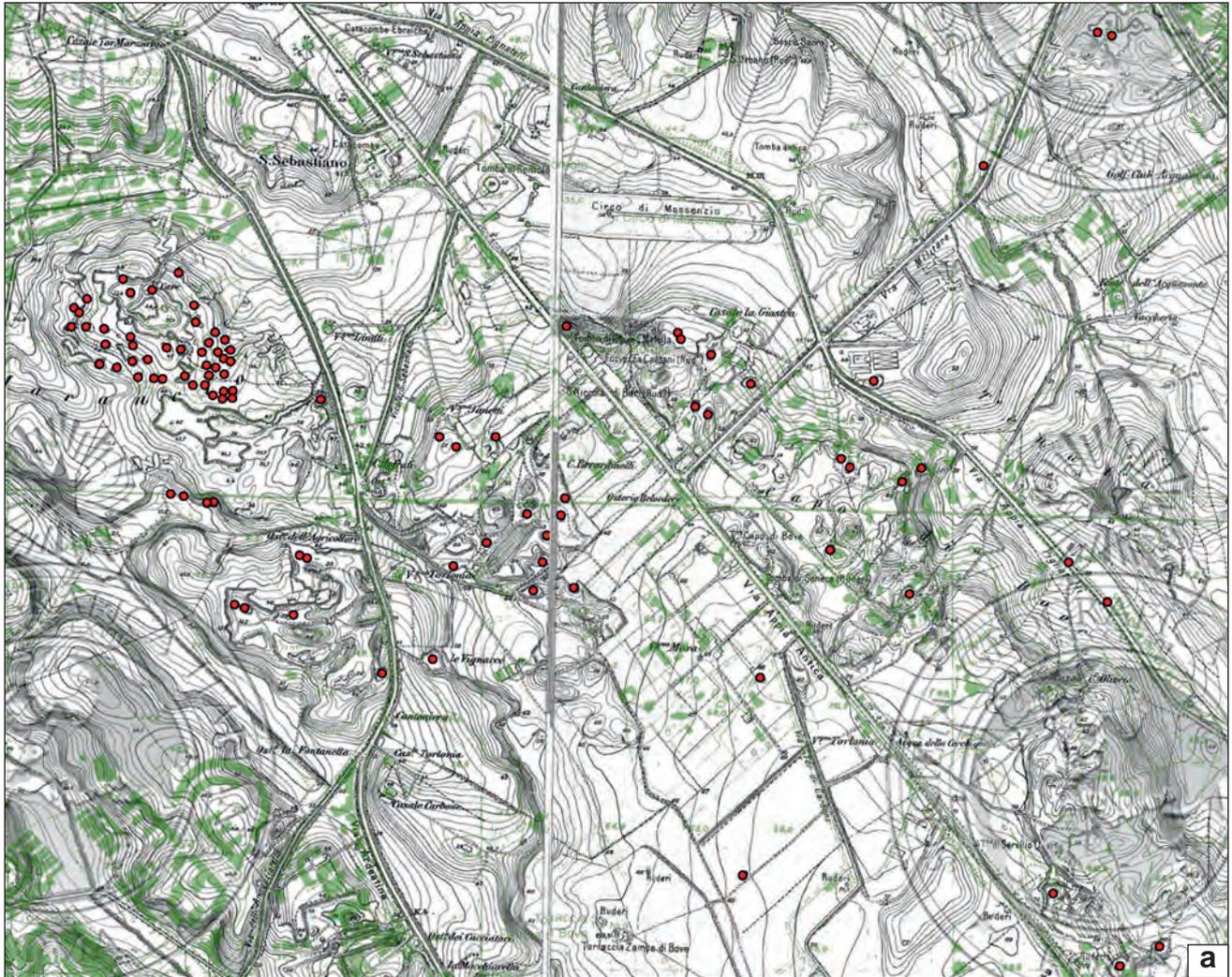


Fig. 8 – a) Ubicazione degli sfornellamenti nell'area dell'Appia Antica, in rosso, e dell'edificato attuale in verde; b) ortofoto attuale dell'area.

– Locations of the anthropogenic sinkholes in the Appia Antica district (in red) and recent buildings (in green)(a); aerial photo of the area (b).

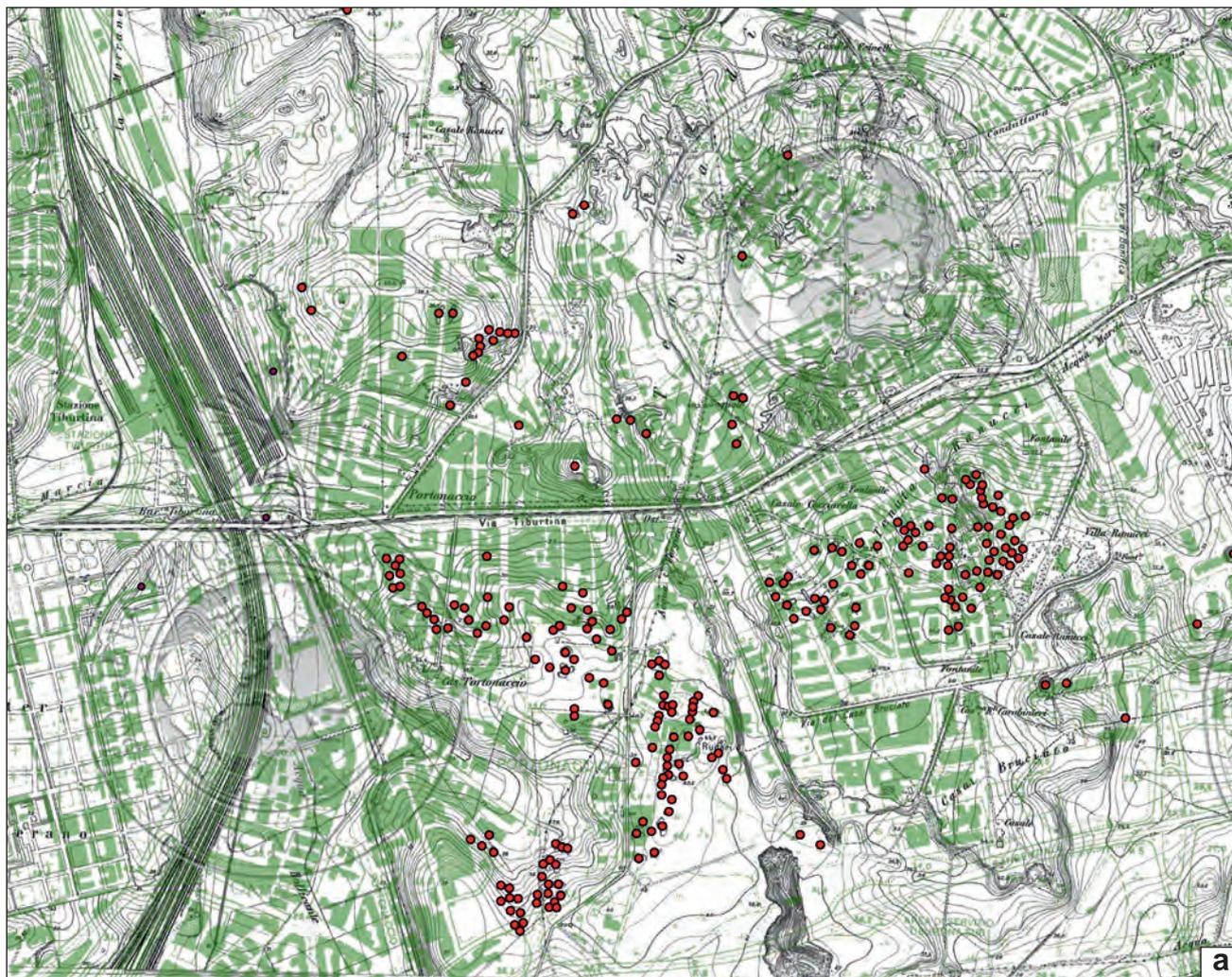


Fig. 9 – a) Ubicazione degli sfornellamenti nell'area del Portonaccio (quartiere Tiburtino), in rosso, e dell'edificato attuale in verde; b) ortofoto attuale dell'area.

– Locations of the anthropogenic sinkholes in the Portonaccio district (in red) and recent buildings (in green)(a); aerial photo of the area (b).

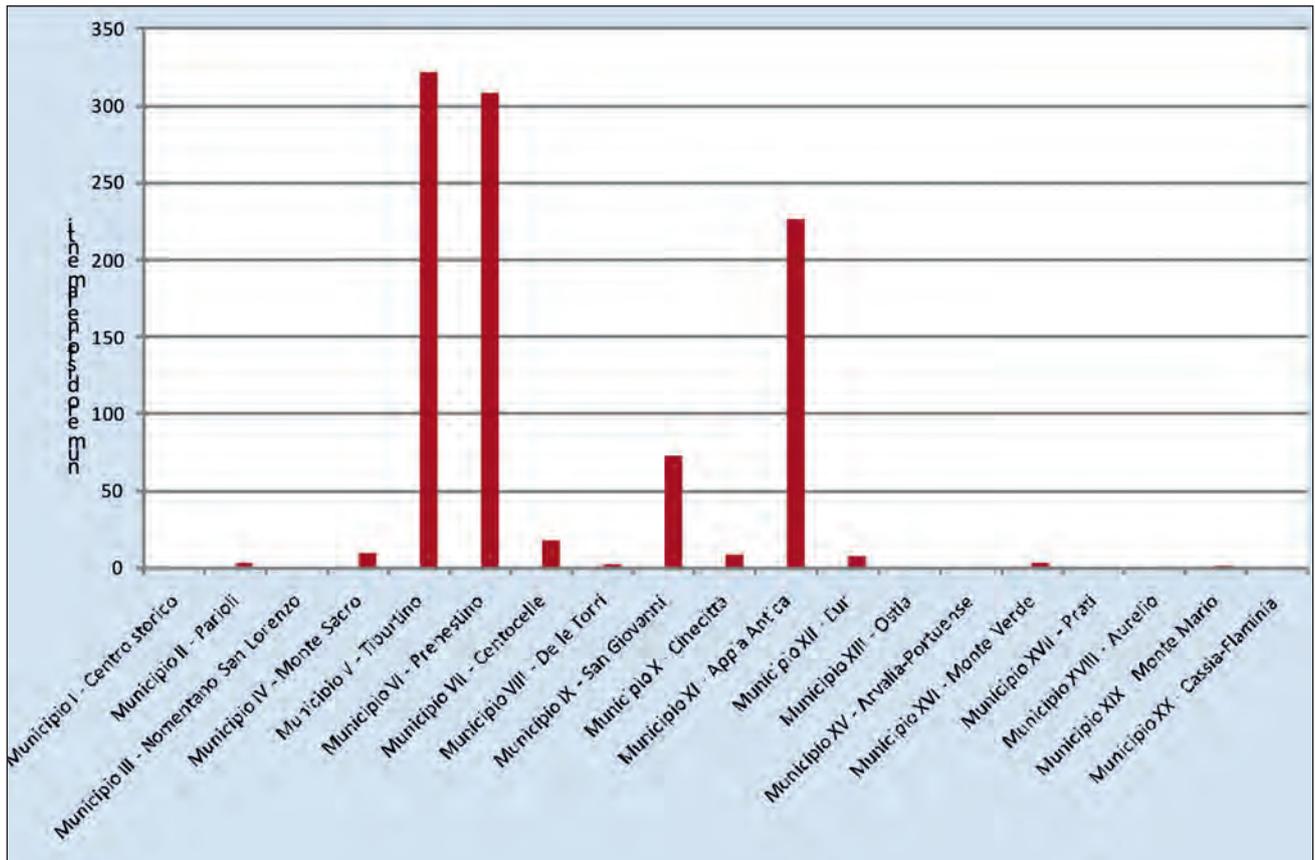


Fig. 10 – Distribuzione delle forme da sfornellamento, censite attraverso cartografia storica e foto aeree, negli ex municipi romani.
 – Distribution of anthropogenic sinkholes identified by historical maps and aerial photos in the Rome area.

5.1. - CRONACHE STORICHE

Si riporta, di seguito, un riepilogo di alcuni degli episodi più significativi accaduti a Roma nell'ultimo secolo, per dare idea della frequenza e dell'importanza del fenomeno, i dati completi di tutti gli episodi occorsi sono raccolti nel database ISPRA.

14 ottobre del 1928: un movimento franoso interessò il versante meridionale del rilievo di Monteverde dove erano presenti numerose cavità sotterranee che collassarono provocando ingenti danni agli edifici sovrastanti, uno dei quali, in via dell'Ongaro, crollò seppellendo tra le macerie un'anziana donna (PIPERNO, 1929; CORAZZA *et alii*, 2002).

1937: in via Ceccano (Municipio VII), in un'area urbana, il crollo di una cava sotterranea di pozzolana collegata ad una rete caveale caratterizzata da un'altezza di circa 3-4 m, e da una profondità minima dal piano campagna creò una voragine, avente un'area di circa 60-70 m², di forma circolare ed una profondità di circa 8 m.

La voragine provocò il crollo di un edificio e la morte di quattro persone (CERLESI, 1990).

1944: una voragine prodottasi nel giardino privato della palazzina provocò un ferito. La voragine, avente un'area di circa 15-20 m², di forma circolare ed una profondità di circa 12-20 m² si verificò in corrispondenza di un pozzo di accesso ad una rete caveale che era stato riempito negli anni '40 quando gli ipogei erano utilizzati come rifugio antiaereo.

7 giugno 1958: in località Vigna Clara nel Comune di Roma (Municipio XX) in area urbana una voragine, dovuta al crollo di un ipogeo antropico, scavato all'interno di depositi sabbiosi e ghiaiosi, provocò due feriti.

15 novembre 1976: via Formia, Torpignattara, si apre una voragine che coinvolge la sede stradale, larga e profonda 8 m, causata dal crollo di una delle numerose gallerie presenti nel sottosuolo. Un uomo di 79 anni resta appeso ad una tubatura del gas prima di essere soccorso dai vigili del fuoco.

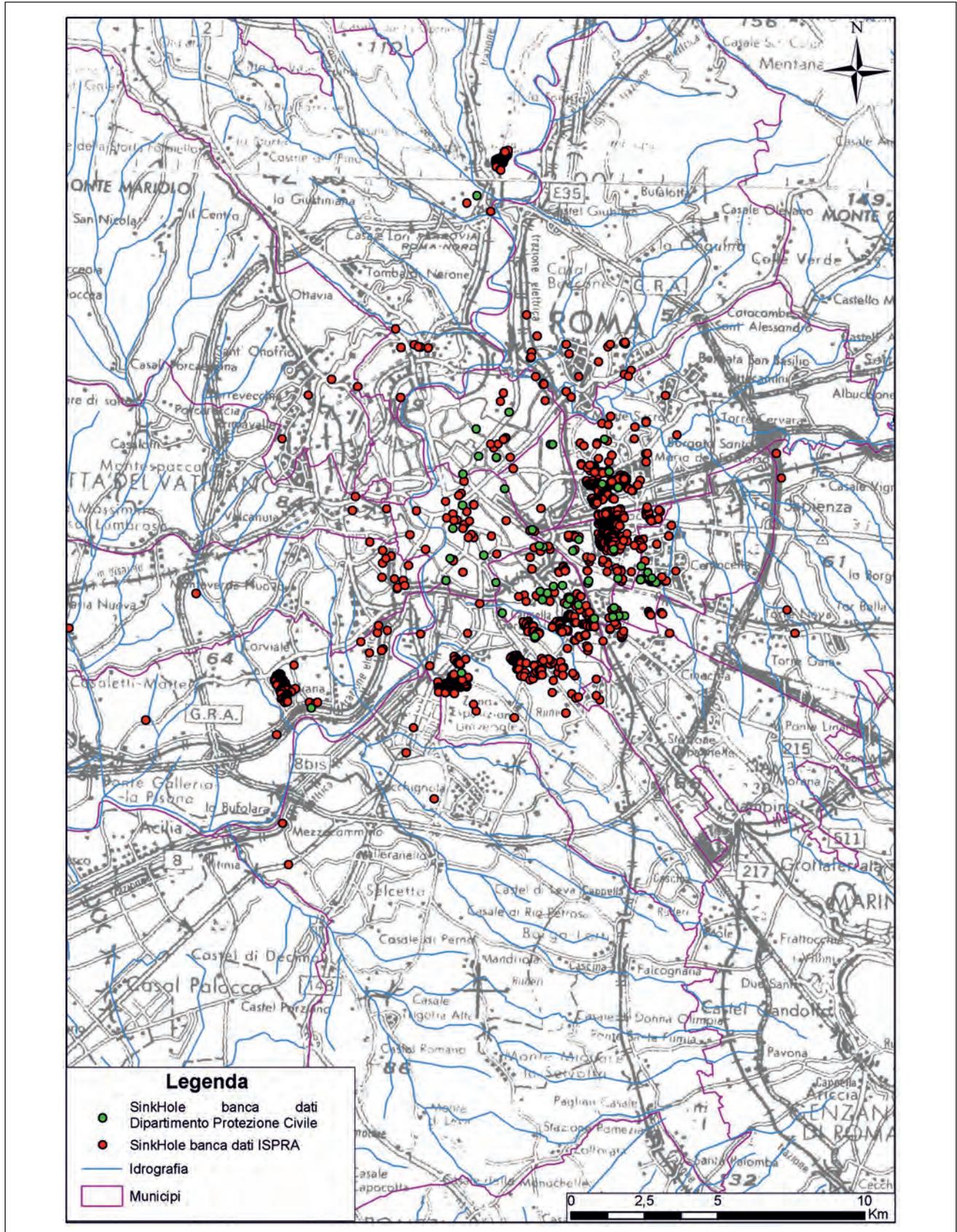


Fig. 11 – Ubicazione degli sprofondamenti nell'area di Roma sino al raccordo anulare. Sono stati messi in evidenza i sinkhole antropogenici censiti dall'Ispra e quelli censiti dal Dipartimento Nazionale di Protezione Civile.

– Location of anthropogenic sinkholes within the highway ring of the Rome area. The map shows the anthropogenic sinkholes of the ISPRA and Civil Protection of Italy database.

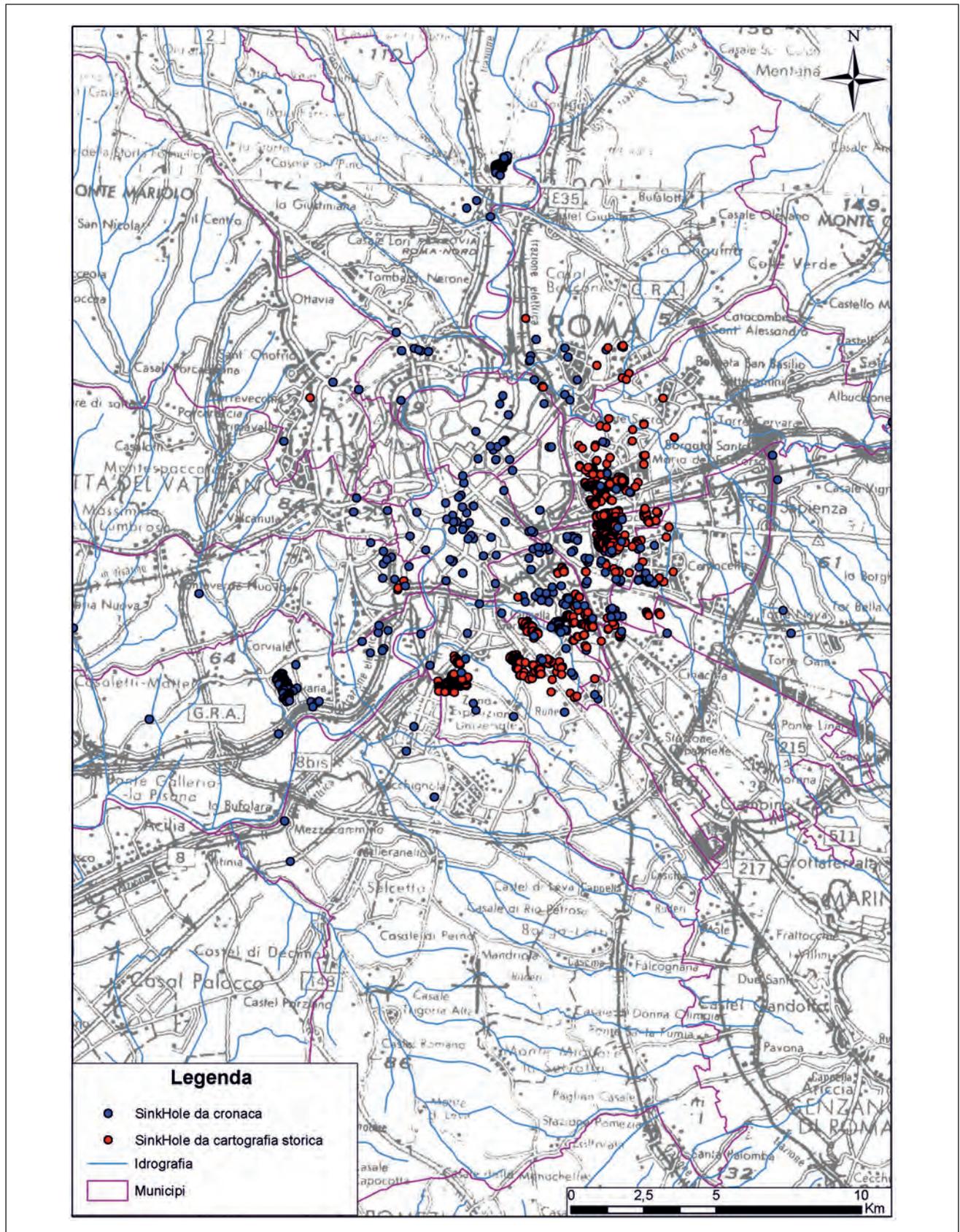


Fig. 12 – Ubicazione degli sprofondamenti nell'area di Roma sino al raccordo anulare. Sono stati distinti i sinkhole antropogenici censiti mediante cartografia storica da quelli censiti mediante le testimonianze scritte di cronaca.

– Location of anthropogenic sinkholes within the bigway ring of the Rome area. The map shows the anthropogenic sinkholes identified by using historical maps and those identified by chronicles.

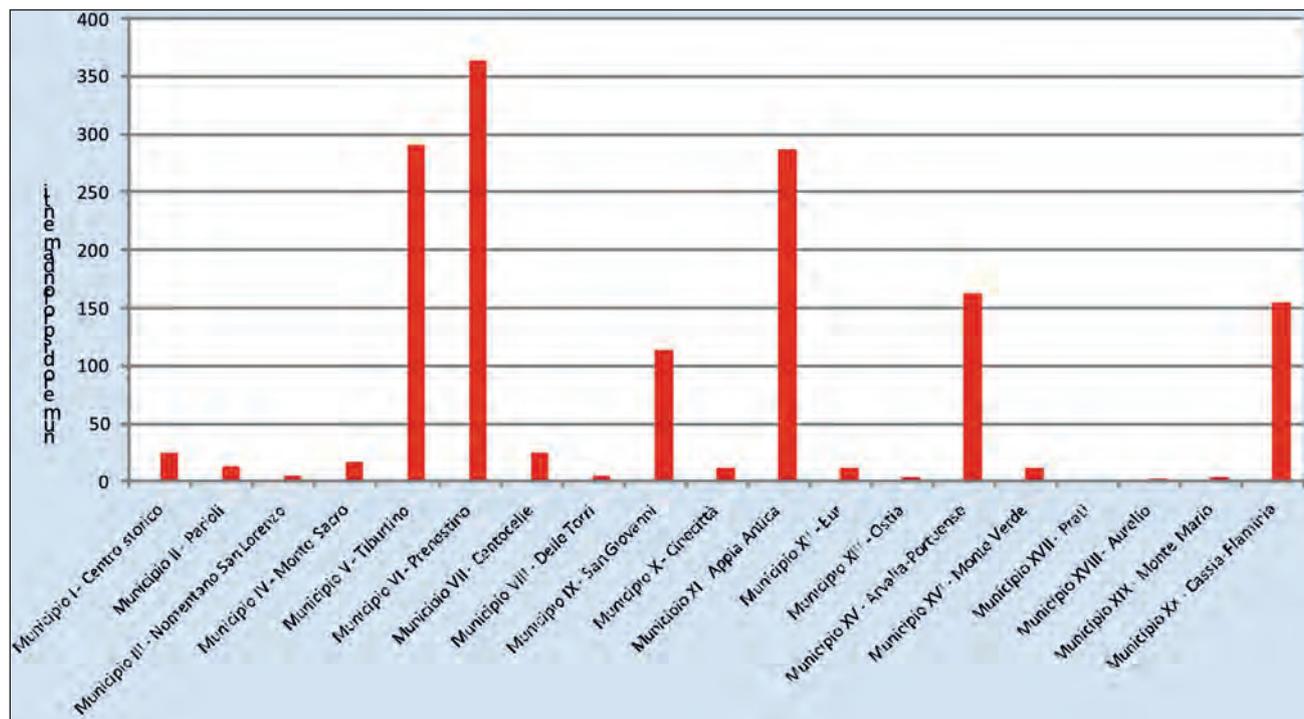


Fig. 13 – Distribuzione dei fenomeni di sprofondamento negli ex municipi romani.
– Distribution of anthropogenic sinkholes in the Rome area.

22 ottobre 1977: via Tortona, Appio Tuscolano, un uomo di 57 anni precipita in una voragine larga e profonda otto, apertasi a causa della rottura di una condotta dell'acqua. L'uomo muore nel fango.

9 ottobre 1978: via Gregorio VII, quartiere Aurelio, un autobus di linea resta in bilico su di una voragine apertasi all'altezza di una fermata per la rottura di un collettore fognario.

3 giugno 1984: via Sestio Menza, quartiere Tuscolano, una voragine, larga sette metri e profonda sei, si apre improvvisamente coinvolgendo tre automobili in sosta e provocando gravi danni a negozi e abitazioni.

20 luglio 1986: via Donna Olimpia, quartiere Monteverde, una voragine si apre durante un violento nubifragio che causa gravi danni in tutta la città.

27 settembre 1986: via Guareschi, quartiere Laurentino 38, si apre all'improvviso una voragine larga dieci metri e profonda otto. La cavità rivela resti di valore archeologico ricondotti ad una tomba di età romana.

26 ottobre 1987: via San Giosafat, quartiere Aventino, un'automobile cade in una voragine profonda quindici metri e larga dieci, causata da crolli di volta di cavità. Tre occupanti del veicolo restano feriti.

8 settembre 1994: in via Appia Pignatelli, crolla la volta di una galleria, perde la vita una persona.

15 giugno 1995: via Ludovico da Monreale, quartiere Monteverde, si apre una voragine dovuta a un allaccio fognario abusivo mal realizzato.

27 settembre 1995: a Pomezia, si apre una cavità con diametro di 15 m, nei pressi di piazza della Tecnica; lo sprofondamento danneggia sia una condotta fognante sia la tubatura dell'acquedotto regionale.

7 luglio 1997: in via dell'Almone, il crollo della volta di gallerie scavate in depositi pozzolanacci e utilizzate per la coltivazione di funghi, provocò la morte di un operaio dell'azienda che gestiva la fungaia.

1 marzo 2007: nel centro urbano di Roma si apre una voragine di alcuni metri di diametro e circa 1.5 di profondità, ne rimane coinvolto un camion (fig. 14).

9 maggio 2007: una voragine di tre metri di diametro si apre in via Tuscolana, una delle grandi arterie che attraversano il centro urbano, la causa è la rottura di una condotta.

21 gennaio 2008: una voragine di 80 metri e profonda 13 si è aperta lungo via Galatea (fig. 15), quartiere La Rustica. Circa 150 nuclei familiari sono rimasti per giorni senza luce e gas a causa della rottura delle reti dei sottoservizi. Lo sprofondamento



Fig. 14 – Voragine presso il centro urbano di Roma 1 marzo 2007 (foto da www.Repubblica.it).
– Anthropogenic sinkhole in the urban center of Rome, 1th March 2007 (by website www.Repubblica.it)

è stato causato dal crollo della volta di una cavità sotterranea scavata in terreni vulcanici facente parte di una più estesa rete caveale realizzata dall'uomo per l'estrazione di materiali da costruzione.

25 novembre 2008: voragine in via Fani (fig.16).

14 dicembre 2008: Quartiere Prenestino, via Teano, si apre una voragine di alcuni metri di diametro, non si registrano particolari danni.

22 dicembre 2008: si è formata una voragine nel centro di Roma, nei pressi del vaticano, in via Stazione di San Pietro, di alcuni metri di diametro e profondità, un autocarro finisce nella cavità.

15 febbraio 2009: si è originata una voragine in via Nemea, zona piazza Giuochi Delfici.

21 marzo 2009: via Leonardo Bufalini, nella zona di Tor Pignattara, si è aperta una voragine (fig. 17) profonda circa 3 m, e con diametro di circa 7, coinvolgendo il centro della carreggiata; un camion vi è sprofondato con la parte posteriore, coinvolte anche altre due macchine par-

cheggiate, non ci sono stati feriti. La voragine ha provocato la rottura di una condotta idrica.

5 maggio 2009: una voragine si è aperta in via Appia Nuova all'altezza di via di Tor del Fiscale, per la pioggia che si è abbattuta nella Capitale nel pomeriggio. Sono intervenuti i vigili del fuoco e i vigili urbani che hanno chiuso il tratto di strada.

10 luglio 2009: si è aperta una voragine nel quartiere Garbatella-Ostiense; la cavità presenta forma sub-circolare, diametro di circa 1,5 m e profondità di circa 1m.

Gli ultimi importanti fenomeni di sprofondamento relativi all'anno 2010 vengono di seguito descritti:

8 marzo 2010: una grossa voragine si è aperta, intorno alle 10 del mattino, in viale Serapide, nel parco di Colle Oppio, dove erano in corso degli scavi archeologici. La voragine aveva un diametro di almeno venti metri e si è aperta sopra il soffitto di una galleria della *Domus Aurea* (fig. 18), l'edificio voluto da Nerone dopo l'incendio che nel 64 d.C. distrusse gran parte di Roma. Il crollo ha interessato 60 m² della volta di una delle gallerie Traianee che si trovano all'interno del complesso conosciuta come la "Quindicesima stanza". Il crollo della volta ha coinvolto circa 130 m² dell'intera area archeologica.

19 marzo 2010: si è verificato uno sprofondamento improvviso del manto stradale in via Anastasio II, dove si apre una voragine in mezzo alla carreggiata, in genere molto trafficata, in direzione Angelo Emo (fig. 19). Un motociclista è rimasto ferito nel tentativo di evitare la voragine.

La voragine presentava dimensioni di 5 m per 3 e profondità di circa 12. Il terreno ha continuato a franare per molti giorni dopo l'accaduto. Il dilavamento prodotto dalle intense precipitazioni dei giorni precedenti e il dissesto della rete fognaria avrebbero favorito la formazione della voragine.

25 maggio, 6 giugno 2010: si aprono rispettivamente voragini in via Reti e sulla via Portuense, importante arteria di traffico, quest'ultima con piccolo diametro ma molto profonda che blocca la circolazione per mesi.

9 giugno 2010: si origina una voragine in via di Malagrotta con un'ampiezza di circa 6 m per 3 e una profondità di 4 m, la voragine è ubicata nei pressi di una raffineria.



Fig. 15 – Voragine di via Galatea causata da interventi fognari che hanno propiziato il crollo di volte di cavità sotterranee (Foto: Succhiarelli C.).
– Anthropogenic sinkhole at Galatea street caused by loss of the sewer network.



Fig. 16 – Voragine in via Fani, da Corriere della Sera.it.
– Anthropogenic sinkhole at Fani street, (by website www.Corriere della Sera.it).



Fig. 17 – Voragine a Roma presso il quartiere di Tor Pignattara, 21 marzo 2009
foto da www.Repubblica.it in cui è stato coinvolto un camion dell'AMA.
– Anthropogenic sinkhole in the Tor Pignattara district, 21th March 2009 (by website www.Repubblica.it).



Fig. 18 – Voragine a Roma presso la Domus Aurea avvenuta il 30 marzo 2010 (foto da viaggi.excite.it).
– Anthropogenic sinkhole in the in the urban center of Rome near the Domus Aurea, 30th March 2010 (by website www.Repubblica.it).

26 novembre 2010: si apre una voragine alle 11,30 nella sede dei binari della linea Roma-Giardinetti di via Giolitti, il servizio pubblico urbano di collegamento tra Porta Maggiore e via Prenestina.

9 dicembre 2010: si apre un'altra grande voragine in via Columella, area già interessata da sprofondamenti nell'anno 2005 dove un tir rimase coinvolto.

Inverno 2005: altre voragini si aprono nel corso dell'anno nel parco della Caffarella (fig. 20), dove sono presenti da epoca storica numerose cavità obliterate dalla vegetazione.

Nell'anno 2011 si sono aperte a Roma più di trenta voragini e questo è sicuramente un segnale di quanto sia ormai importante e frequente il fenomeno.

In via Aurelio Saffi, per esempio, angolo via Giovanni Pantaleo, nell'arco dell'anno 2011, una voragine si è aperta per tre volte nel medesimo punto.

3 gennaio 2011: via Carnaro, si apre una voragine in seguito ad un evento piovoso intenso.

3 gennaio 2011: via dei Maroniti, tra largo del Tritone e via della Panetteria, si è aperta una voragine che ha causato la chiusura al transito della strada per un mese.

16 gennaio 2011: via Monte Favino si apre una doppia voragine.

Nei primi giorni febbraio 2011: voragine presso via Gran Paradiso (fig. 21) (ex Municipio IV), dove è stata coinvolta una persona.



Fig. 19 – Voragine presso Via Anastasio II a Roma, del 19 marzo 2010 (da www.repubblica.it).
– Anthropogenic sinkhole at Anastasio II street, 19th March 2010 (by website www.Repubblica.it).



Fig. 20 – Voragini apertesi di recente nel Parco della Caffarella (a, b, panoramiche).
– Anthropogenic sinkhole at Caffarella park (a, b, views).

12 febbraio 2011: Ostia, lungomare Lutazio Cattullo, all'altezza dello stabilimento La Vecchia Pineta, un marciapiede ha ceduto e una grande voragine di tre metri di profondità, ed alcuni metri di diametro si è aperta creando problemi alla circolazione stradale (già nel novembre 2010, il marciapiede e parte della carreggiata avevano



Fig. 21 – Voragine presso Via Gran Paradiso (da www.repubblica.it).
– Anthropogenic sinkhole at Gran Paradiso street, (by website www.Repubblica.it).

mostrato i primi segni di cedimento strutturale, dovuti all'azione erosiva del mare che ha scavato per metri sotto il suolo dell'arteria).

16 febbraio 2011: via della Madonna dei Monti (ex Municipio I), a causa della pioggia intensa, si è aperta una voragine nel manto stradale, profonda circa un metro. La strada è stata chiusa al traffico dal civico 66 sino a via dei Serpenti.

2 marzo 2011: via dei Gelsi (a Centocelle, ex Municipio VII) un altro episodio di sprofonda-

mento, in seguito a piogge intense, nel tratto tra via dei Castani e via dei Ciclamini.

2 marzo 2011: via Atanasio Soldati si apre una voragine di alcuni metri di diametro.

12 marzo 2011: via beata vergine del Carmelo, Torrino, ex Municipio XII, si apre una voragine, per il maltempo, nel manto stradale all'altezza di via Ildebrando Vivanti. La cavità viene ricolmata rapidamente.

17 marzo 2011: via Giuseppe Saredo, ex Municipio Roma X, in seguito al maltempo si verifica uno sprofondamento sulla strada, che è stata immediatamente chiusa al traffico creando problemi di circolazione.

22 marzo 2011: si è aperta una voragine in via Crescenzo (quartiere Prati) per un danno alla rete idrica. La via è stata chiusa al traffico tra piazza Risorgimento e via Properzio su entrambe le carreggiate.

24 marzo 2011: si è aperta una voragine al centro di una carreggiata presso via Raffaele De Cesare (ex Municipio Roma IX).

12 aprile 2011: via Novella (ex Municipio Roma II), nei pressi di via di Priscilla, quartiere salario, dove sono ubicate le Catacombe di S. Priscilla, si è aperta una grande voragine provocata dal cedimento della rete fognaria. La strada è stata riaperta al traffico il 29 luglio 2011, oltre tre mesi dopo.

29 aprile 2011: via Aurelia (ex Municipio Roma XVIII) si è verificato un ulteriore episodio di sprofondamento, in corrispondenza del civico 208, in prossimità dell'incrocio con via Paolo III. I lavori di ripristino sono stati complessi a causa

della profondità della voragine, più di cinque metri, e delle interferenze con altri sottoservizi.

23 maggio 2011: via Antonino Bongiorno (ex Municipio Roma V) si è verificata la rottura di una conduttura idrica con apertura di una voragine e allagamento della sede stradale; la situazione è stata aggravata dal temporale che si è abbattuto sul quartiere di Colli Aniene (fig. 22).

1 luglio 2011: improvviso cedimento del terreno alla periferia di Roma. Una voragine di circa 6 metri per 3 e profonda 4 metri si è aperta in via di Malagrotta all'altezza della raffineria.

7 luglio 2011: via Boccea (ex Municipio Roma XVIII), all'altezza del civico 561, si è aperta una voragine, prontamente transennata, tuttavia la circolazione stradale è stata critica per molti giorni.

5 luglio 2011: via Bevagna (ex Municipio Roma XX) Dopo un forte temporale estivo si è aperta una voragine profonda circa due metri che, in assenza di interventi (tranne il transennamento), si è allargata sino ad occupare a fine settembre 2011 circa metà della carreggiata.

7 luglio 2011: piazza Orazio Marucchi/via Rodolfo Lanciani (ex Municipio Roma II) una voragine, profonda circa 6 metri, ma dal diametro piccolo circa un metro, si è aperta accanto alla recinzione del cantiere della Metro B1 (incrocio con via Costantin Corvisieri).

16 luglio 2011: via di Pietralata (ex Municipio Roma V) è stata chiusa al traffico all'altezza di via Piero Aloisi a causa di un improvviso sprofondamento del terreno. L'asfalto ha ceduto per problemi legati alle sottostanti condutture idrauliche.

22 luglio 2011: viale Etiopia (ex Municipio Roma II), per un guasto ad una conduttura idrica Acea, si è aperta una voragine nel parcheggio dello spartitraffico centrale all'altezza del civico 83. Un'auto in sosta vi è finita dentro.

Agosto 2011: via Antonio Silvani (ex Municipio Roma IV), per l'apertura di una voragine al centro della carreggiata, è stato istituito il senso unico di marcia tra via Angelo Baldassarri e via dei Prati Fiscali.

30 agosto 2011: via del Forte Braschi (ex Municipio Roma XVIII), divieto di transito e restringimento della carreggiata, dal civico 40 in poi, a causa di una voragine che si è formata al centro della carreggiata.



Fig. 22 – Voragine presso via Antonino Bongiorno avvenuta il 23 maggio 2011.
– Anthropogenic sinkhole at Antonino Bongiorno street, 23th May 2011.

1 settembre 2011: piazza Giovenale (ex Municipio Roma XIX) presso l'angolo con via Lattanzio, accanto all'edicola, si è aperta una voragine sul marciapiede.

1 ottobre 2011: via Lazzaro Spallanzani (ex Municipio Roma XVI) sul marciapiede, fra i numeri civici 24 e 26, si è aperta una voragine che ha coinvolto la condotta delle acque reflue.

7 ottobre 2011: piazzale della Radio (ex Municipio Roma XV) si è formata una voragine sul marciapiede adiacente l'inizio di via Oderisi da Gubbio per la rottura di una tubatura idrica.

11 ottobre 2011: si forma una voragine in via Prenestina, all'altezza di via Albimonte in direzione di marcia verso l'esterno (fig. 23).



Fig. 23 – Voragine sulla Via Prenestina, 11 ottobre 2011.
– *Anthropogenic sinkhole at Prenestina road, 11th October 2011.*

19 ottobre 2011: via Sebino (ex Municipio Roma II) si è verificato, al centro della carreggiata, all'incrocio con piazza Verbano, un ulteriore episodio di sprofondamento, questa volta di piccolo diametro, ma di elevata profondità (del diametro di 70 centimetri e profonda una ventina di metri), dovuto allo sbocco in superficie di un pozzetto di collegamento con la sottostante rete idrica.

20 ottobre 2011: Rione Monti (ex Municipio Roma I) in seguito ad un violento nubifragio che ha colpito la città, si sono verificati sprofondamenti del manto stradale in tre punti del quartiere presso via Madonna dei Monti, piazza Madonna dei Monti e Salita del Grillo.

20 ottobre 2011: via Andrea Mantegna (ex Municipio Roma XI), in seguito ad un intenso evento

piovoso, si è aperta una voragine sul marciapiede confinante con il parcheggio dell'Aran Hotel Mantegna, a poca distanza dall'incrocio con via Paolo Veronese. Dentro la cavità, di grande diametro ma poco profonda, è precipitato uno scooter.

21 ottobre 2011: Prima Porta (ex Municipio Roma XX), in seguito all'evento alluvionale che ha interessato Roma, si sono aperte due voragini. La prima presso via Dalmine, con dimensioni 4 m di diametro e 2 m di profondità (fig. 24). La seconda voragine si è aperta presso via Veientana Vetere con un diametro di 12 m.

26 ottobre 2011: via Magliano Sabina (ex Municipio Roma II), nei pressi di piazza Vescovio, si è aperta una voragine di piccolo diametro, ma molto profonda. Il cedimento è stato provocato da un problema alla sottostante rete fognaria. La strada è rimasta chiusa al traffico sino per circa un mese.

27 ottobre 2011: via Roverbella (ex Municipio Roma XX) una voragine si è aperta sulla carreggiata.

27 ottobre 2011: via Borgosesia (Municipio XVIII) la strada è stata chiusa per una voragine, con divieto di transito per i mezzi pubblici.

26 ottobre 2011: quartiere Monte Mario, via Festo Avieno, angolo via Ambrosio a causa del nubifragio si è aperta una voragine.

20 ottobre 2011: quella in via Sebino è solo l'ultima di una lunga serie di voragini: a Roma, da inizio anno, se ne sono aperte già sedici di grandi dimensioni, spesso con danni materiali e pesanti ricadute sulla città (forniture di servizi interrotte, strade chiuse e mezzi pubblici deviati).



Fig. 24 – Voragine a Prima Porta, 21 ottobre 2011.
– *Anthropogenic sinkhole at Prima Porta district, 21th October 2011.*

10 novembre 2011: via di San Michele (ex Municipio Roma I) per la rottura di una conduttura idrica si è aperta una voragine dentro la quale è precipitato un furgone.

16 novembre 2011: via Cinquefrondi (ex Municipio Roma X) si è aperta una voragine nel tratto compreso tra via Anagnina e via Ardore.

12 dicembre 2011: via del Torraccio di Torrenova (Municipio VIII) si è aperta una voragine all'altezza del civico 169.

Inoltre, presso Villa Certosa, sulla Casilina, si sono verificati anche nel corso dell'anno 2011 episodi di sprofondamento a causa delle cavità presenti nel sottosuolo. In alcune vie dell'area, dove le cavità sono ubicate ad un metro di profondità sotto le abitazioni, in seguito a tali ulteriori episodi di cedimento sono stati evacuati interi edifici. Inoltre in passato sono stati coinvolti negli episodi di sprofondamento alcuni veicoli e una persona ha perso la vita.

7 febbraio 2012: una voragine di circa 4 metri si è aperta in via Tarcento (fig. 25) nel quartiere Torpignattara a Roma. La voragine ha fatto sprofondare un marciapiede ed è stata evacuata una palazzina di sei piani con circa trenta famiglie.



Fig. 25 – Voragine a via Tarcento, 7 febbraio 2012.
– Anthropogenic sinkhole at Tarcento street.

6. - LO STUDIO DELLA SUSCETTIBILITÀ AGLI SPROFONDAMENTI

I dati pregressi sui fenomeni indotti dalla presenza di cavità ipogee hanno messo in luce che la loro valutazione è funzione sia della scala di indagine, sia di un certo numero di variabili che definiscono il grado di qualità della conoscenza geologica e della modellazione.

In particolare, nello studio di questo fenomeno è basilare costruire un modello concettuale di lavoro che vada ad “integrare” le conoscenze e le informazioni derivanti da differenti strati informativi (e.g. geologia, idrologia, geotecnica, inventari dei fenomeni, geofisica, ecc.). In generale, la formulazione di un modello concettuale relativo alla suscettibilità di un territorio al verificarsi di uno sprofondamento deve considerare:

1) l'analisi e la comprensione delle caratteristiche morfologico-fisiografiche e geologiche del territorio, ovvero l'individuazione dei fattori territoriali (recenti e passati) che predispongono il fenomeno;

2) la gerarchizzazione (“pesatura”) di tali fattori in base alla loro influenza sul fenomeno;

3) la schematizzazione del problema in fasi di lavoro secondo gli obiettivi definiti;

4) la creazione di un modello adeguato all'obiettivo e proporzionato alla quantità e alla qualità dei dati disponibili e/o acquisibili.

L'applicabilità del concetto di “rischio” al problema degli sprofondamenti in un'area come quella di Roma è estremamente difficile poiché 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:

1) il pericolo di crollo come la minore o maggiore possibilità che in una data area possano verificarsi voragini e/o subsidenze;

2) 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.

Tale assunzione è assimilabile alle valutazioni del rischio di frana nella quale non sono date indicazioni

temporali del probabile evento franoso. Pertanto, si rende possibile individuare situazioni di maggiore o minore pericolo attraverso l'analisi di una serie di "indicatori". Pertanto, l'importanza di produrre mappe tematiche che restituiscano una zonazione del pericolo di sprofondamento è giustificata dalla necessità di individuare zone con maggiori potenzialità allo sprofondamento e che, quindi, richiedono immediati interventi di risanamento.

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'insacco del fenomeno.

A tal fine è possibile procedere per fasi di lavoro che possono condurre ad una valutazione della suscettibilità di un'area al verificarsi di un certo fenomeno, e alla creazione di un modello spaziale di probabilità che possa essere estrapolato ad aree simili.

La prima fase prevede lo studio diretto della distribuzione degli eventi censiti mediante l'applicazione di alcune procedure e tecniche quantitative dell'analisi spaziale, normalmente implementate nei sistemi geografici informativi, rivolte all'analisi dei *pattern* di distribuzione di punti, linee, aree e superfici definiti dalle coordinate in uno spazio bi o tridimensionale. L'obiettivo è quello di produrre una cartografia tematica relativa alla zonazione del territorio mediante l'applicazione di dei dati raccolti con tematismi cartografici di base e/o di sintesi già disponibili.

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

In termini operativi la procedura seguita in questo lavoro può essere riassunta in due fasi di elaborazione.

Prima fase di elaborazione (*analisi spaziale del fenomeno*):

- 1) organizzazione e validazione dei dati di base (costruzione del database);
- 2) applicazione delle tecniche di analisi statistica spaziale per la valutazione del *pattern* di distribuzione degli eventi censiti (variabile dipendente);
- 3) selezione delle informazioni di input costituite dalle fattori (variabili indipendenti) che pre-dispongono il fenomeno;
- 4) pre-elaborazione (spazializzazione) delle variabili selezionate al fine di ottenere tematismi di base (in formato vettoriale e/o raster).

Seconda fase di elaborazione:

- 1) elaborazione di mappe tematiche intermedie (es., mappe di densità di evento, mappe di prossimità);
- 2) calcolo dei coefficienti per la gerarchizzazione (pesatura) dei tematismi considerati mediante l'applicazione di tecniche di analisi statistica multivariata (regressione logistica binaria, RL);
- 3) l'elaborazione di una mappa di suscettibilità attraverso tecniche di "map algebra";
- 4) l'elaborazione di una mappa delle probabilità spaziale di occorrenza del fenomeno.

6.1. - LA REGRESSIONE LOGISTICA (RL)

L'analisi della regressione logistica (RL) è un metodo per la stima della funzione di regressione che meglio collega la probabilità del possesso di un attributo dicotomico con un insieme di variabili esplicative. Supponiamo che l'attributo sia un determinato fenomeno le cui modalità sono presenza ed assenza: l'analisi della regressione logistica consente di individuare le determinanti della probabilità, o rischio che il fenomeno risulti presente ossia si verifichi. Quello della regressione logistica è, dunque, un caso particolare dell'analisi della regressione, che trova applicazione quando la variabile dipendente è dicotomica. Oltre che per la scala di misura della variabile dipendente, l'analisi della regressione logistica si distingue da quella lineare perché per questa s'ipotizza una distribuzione normale di Y, mentre se Y è dicotomica la sua distribuzione è, ovviamente, binomiale. Analogamente, nell'analisi della regressione lineare anche la stima di Y ot-

tenuta dalla regressione varia da $-\infty$ a $+\infty$, mentre nell'analisi della regressione logistica la stima di Y varia fra 0 e 1. La stima di Y nell'analisi della regressione logistica assume il significato di probabilità che Y sia uguale a 1: $P(Y=1 | x) = \pi(x)$.

La funzione di regressione logistica si presenta come segue:

$$\text{logit}(\pi(x)) = \beta_0 + \sum \beta_i x_i \quad (1)$$

dove $\text{logit}(\pi(x))$ denota il logaritmo naturale della probabilità di Y dato il vettore x composto da q variabili predittive:

$$\text{logit}(\pi(x)) = \ln \left[\frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)} \right] \quad (2)$$

$\pi(x)$ denota la probabilità che Y valga 1 in funzione delle variabili esplicative x . La scelta del logit per descrivere la funzione che lega la probabilità di Y alla combinazione delle variabili esplicative è determinata dalla constatazione che la probabilità si avvicina a zero e uno gradualmente e descrive una curva a forma di sigmoide che somiglia alla cumulata della distribuzione casuale degli errori detta "funzione logistica". La probabilità di Y si può, infatti, scrivere come una funzione logistica.

I contesti applicativi della regressione logistica sono molteplici alcuni sono analoghi a quelli della regressione lineare altri sono specifici dell'analisi di variabili dicotomiche.

L'analisi dei rischi è la ricerca delle determinanti dell'evento rappresentato da Y . Il concetto di rischio è applicabile a qualsiasi campo, dall'analisi dei fenomeni economici, demografici, sociali, ambientali, naturali.

Si definisce rischio relativo il rapporto fra due rischi al variare di X . Se si denotano con ${}_1R(Y/X)$ il rischio del fenomeno Y derivante dal fattore X nella popolazione 1 (evento verificato) e con ${}_0R(Y/X)$ l'analogo rischio in una popolazione di riferimento (evento non verificato), il rischio relativo è il rapporto fra i due rischi:

$$R_{1/0} = {}_1R(Y/X) / {}_0R(Y/X).$$

L'analisi di regressione permette anche la ricerca delle variabili che spiegano la variabilità di Y . Le variabili possono essere selezionate con un processo stepwise o con il metodo dei migliori sottoinsiemi. La ricerca di determinanti è, quindi più ampia di quella dei fattori di rischio. Mentre, infatti, la ricerca dei fattori di rischio è fondata su ipotesi

teoriche che restringono il campo della scelta delle variabili, la ricerca delle possibili determinanti è essenzialmente esplorativa e può riguardare anche fattori negativamente correlati con il fenomeno, detti "fattori di protezione".

Per applicare l'analisi di regressione logistica vanno effettuate alcune scelte. Innanzitutto, vanno selezionate le variabili che sono potenziali determinanti della variabile dipendente. Di queste variabili vanno esplicitate la scala e l'unità di misura. Le variabili esplicative possono avere natura dicotomica, natura nominale ed ordinale o quantitativa.

Come nella regressione lineare, nell'analisi della regressione logistica l'interpretazione della relazione tra variabili indipendenti e variabile dipendente avviene mediante la valutazione dei parametri del modello. Nella pratica i valori dei parametri della popolazione non sono noti, essi vengono stimati a partire da un numero finito di osservazioni: le osservazioni campionarie. La stima dei parametri della regressione logistica viene effettuata attraverso l'algoritmo di "massima verosimiglianza" che stima i parametri del modello in modo da massimizzare la funzione che indica quanto è probabile ottenere il valore atteso di Y dati i valori delle variabili indipendenti.

Nel metodo della massima verosimiglianza, la soluzione ottimale viene raggiunta partendo da dei valori di prova dei parametri (valori arbitrari) i quali, successivamente, vengono modificati per vedere se la funzione può essere migliorata. Il processo viene ripetuto per iterazioni successive fino a quando la capacità di miglioramento della funzione è infinitesimale (convergenza).

Nell'interpretazione del modello logistico ci si avvale di statistiche del tutto simili alle statistiche che esprimono l'adeguatezza del modello nel riprodurre i dati osservati nella regressione lineare (test F e R^2). Similmente alla somma dei quadrati, nella regressione logistica si utilizza il log likelihood come criterio per la scelta dei parametri del modello. In particolare, per ragioni matematiche, si utilizza il valore del log likelihood moltiplicato per -2 ($-2LL$). Valori grandi e positivi indicano una bassa capacità di previsione del modello.

Nel modello con la sola intercetta il valore della

statistica $-2LL$ rappresenta quello che nella regressione lineare corrisponde alla devianza e può essere indicata come D_0 . Nel modello che contiene sia l'intercetta sia le variabili indipendenti il valore della statistica $-2LL$ rappresenta la parte di variabilità dei dati che non viene spiegata dal modello (devianza dell'errore) e viene indicata come D_M . Lo scarto fra D_0 e D_M rappresenta la parte di variabilità spiegata dalle variabili indipendenti o variabilità spiegata dal modello e viene indicata con G_M . Tale quantità viene anche denominata Chi quadrato del modello ed indica la quantità di riduzione dell'errore dovuta al modello. Se G_M risulta statisticamente significativo la previsione ($Y=1$) può essere migliorata se consideriamo i predittori rispetto al modello con la sola costante.

Il motivo fondamentale per cui la tecnica della regressione logistica è largamente diffusa è che i coefficienti del modello hanno una naturale interpretazione in termini di odds ratio (nel seguito OR). Per semplificare il discorso si analizza la situazione in cui si ha un predittore x dicotomico a livelli 0 e 1. In questo caso l'odd che sia $y=1$ fra gli individui con $x=0$ è $\pi(0)/(1-\pi(0))$. Analogamente per i soggetti con $x=1$ l'odd che sia $y=1$ è $\pi(1)/(1-\pi(1))$. L'OR è definito come il rapporto fra gli odds per $x=1$ e $x=0$:

$$OR = \frac{\pi(1)/(1-\pi(1))}{\pi(0)/(1-\pi(0))}$$

Dato che: $\pi(1) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1}}$, $\pi(0) = \frac{e^{\beta_0}}{1 + e^{\beta_0}}$

Dopo alcuni passaggi si ottiene:

$$OR = e^{\beta_1}$$

La generalizzazione al caso in cui la variabile x sia discreta a k livelli è immediata. In questo caso, infatti, il fit del modello fa uso di $k-1$ variabili dummy e gli OR vengono calcolati rispetto al livello di riferimento della variabile x . Se la variabile x è continua, allora il coefficiente β è la stima del logaritmo di OR per l'aumento di una unità in x . Spesso è più appropriato o sensato esprimere l'OR per un aumento in x di c unità; in tal caso la stima di OR è semplicemente $OR = e^{c\beta_1}$.

7. - RISULTATI

7.1. - PRIMA FASE DI ELABORAZIONE: ANALISI DEI PATTERN

Il database dei fenomeni di sprofondamento comprende, al momento, n° 1837 casi censiti all'interno del Grande Raccordo anulare (circa 4 sprofondamenti/km²), dei quali più di mille sono localizzati nel settore orientale della area studiata in riva sinistra del fiume Tevere (circa 6 sprofondamenti/km²).

La carta dell'ubicazione degli sprofondamenti è stata realizzata integrando la topografia di base (CTR 1:10000) con i dati dell'archivio (fig. 26).

Nella prima fase di elaborazione la distribuzione degli eventi censiti è stata analizzata mediante tecniche di statistica spaziale afferenti alla "point pattern analysis" (O'SULLIVAN & UNWIN, 2003) con l'obiettivo di:

- 1) individuare il baricentro spaziale della distribuzione;
- 2) quantificare il grado di eterogeneità spaziale;
- 3) accertare la presenza di una qualche direzione spaziale nella struttura dei dati (isotropia/anisotropia);
- 4) acquisire informazioni sulla struttura (casuale, clusterizzata, uniforme) della distribuzione spaziale dei punti evento;
- 5) individuare, tramite la funzione di autocorrelazione spaziale, eventuali somiglianze tra località in funzione della loro vicinanza;
- 6) individuare cluster territoriali;
- 7) costruire, a partire da dati osservati su precise località mappe tematiche mediante tecniche di interpolazione spaziale.

Nell'ambito dei *software GIS* i risultati di queste analisi spaziali preliminari possono essere salvate in formato .shp e, proiettate sulla cartografia di base dell'area di studio (DAI & LEE, 2002). Questa possibilità permette di raggiungere il confronto della distribuzione degli eventi:

- 1) in funzione della distribuzione di altri fattori, quali ad esempio la distribuzione della rete caveale, catacombale, dei sottoservizi, ecc.;

- 2) in tempi diversi per valutare se esiste un ampliamento della dispersione degli eventi e/o se esiste

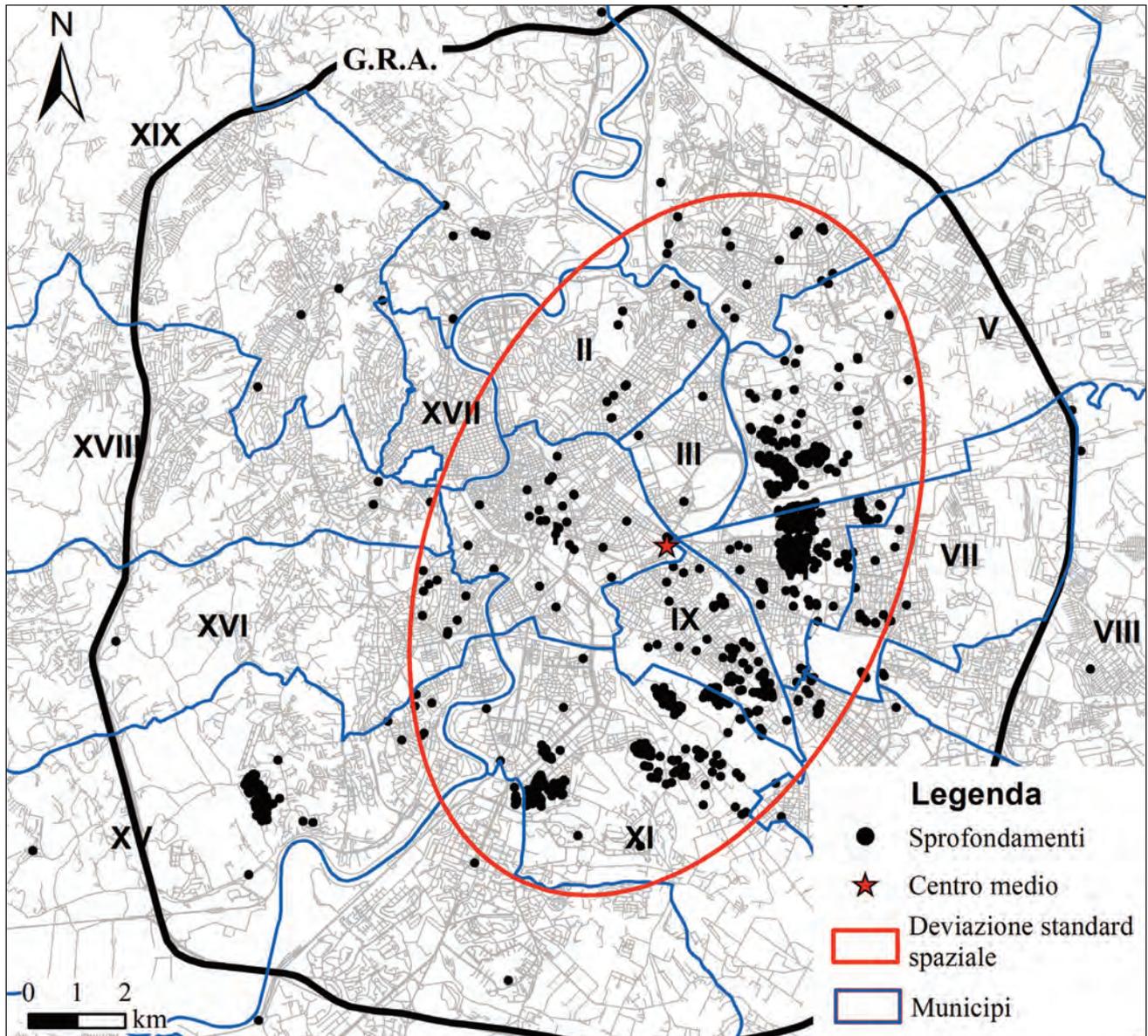


Fig. 26 – Ubicazione degli sprofondamenti nell'area di Roma presenti nel database ISPRA realizzato nel 2008 nell'ambito del progetto Sinkhole. La mappa mostra la posizione del centro medio e l'ellisse della deviazione standard della distribuzione dei punti. Il pattern di eventi ha un centro medio ubicato nella zona di Porta Maggiore (stella rossa). L'area con la maggior concentrazione di eventi si estende secondo un'ellisse di circa 15 x 9 km, orientata in direzione NNE. In particolare, essa si estende dalla zona di Tre Fontane/Laurentina (Municipio XI a sud) alla zona Montesacro/Tufello (Municipio IV a nord, e l'ungo l'asse minore da S. Pietro (Municipio XVI a ovest) alla zona Prenestino/aeroporto di Centocelle (Municipio VII a est).

– Location of the anthropogenic sinkholes in the Rome area collected in the ISPRA database constructed in the framework of the SINKHOLE project in 2008. The map shows the location of the mean center and of the standard deviation ellipse of the point pattern distribution. The point pattern of the anthropogenic sinkholes has a mean center located in the area of Porta Maggiore (red star). The highest density of anthropogenic sinkholes occur according to an elliptic area of about 15 x 9 km, with the major axis oriented along the NNE direction.

anche una direzionalità nell'ampliamento della dispersione collegabile con altri fattori, antropici e non.

In particolare, sono state applicate tecniche di analisi spaziali 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 distribu-

zione geografica (indice di vicinaggio), l'analisi dei raggruppamenti spaziali (*Cluster Analysis*) e l'analisi di densità.

Nell'ambito delle statistiche centrografiche è stata effettuata l'analisi della dispersione spaziale degli eventi mediante il calcolo dell'ellisse della deviazione standard che misura la compattezza di una distribuzione fornendo un singolo valore

che rappresenta la dispersione delle osservazioni intorno al baricentro della distribuzione (centro medio). Il risultato è una distanza, quindi la compattezza di un insieme di eventi può essere rappresentato su una carta mediante una circonferenza/ellisse con il raggio pari al valore della distanza standard. Nei sistemi geografici informativi il calcolo della distanza standard porta ad un output che mostra il poligono (circonferenza/ellisse) che rappresenta la dispersione degli eventi intorno

al suo centro medio geografico (fig. 27). Dalla figura si può notare che la maggior parte degli sprofondamenti censiti si sono formati in riva destra del Tevere ed hanno una dispersione spaziale che si sviluppa secondo un'ellisse della deviazione standard orientata in direzione N-NE, con asse maggiore di circa 15 km e asse minore di circa 9 km. L'ellisse si estende lungo l'asse maggiore (da sud verso nord) dal Municipio XI (zona di Tre Fontane/Laurentina) al Municipio IV (zona Montesa-

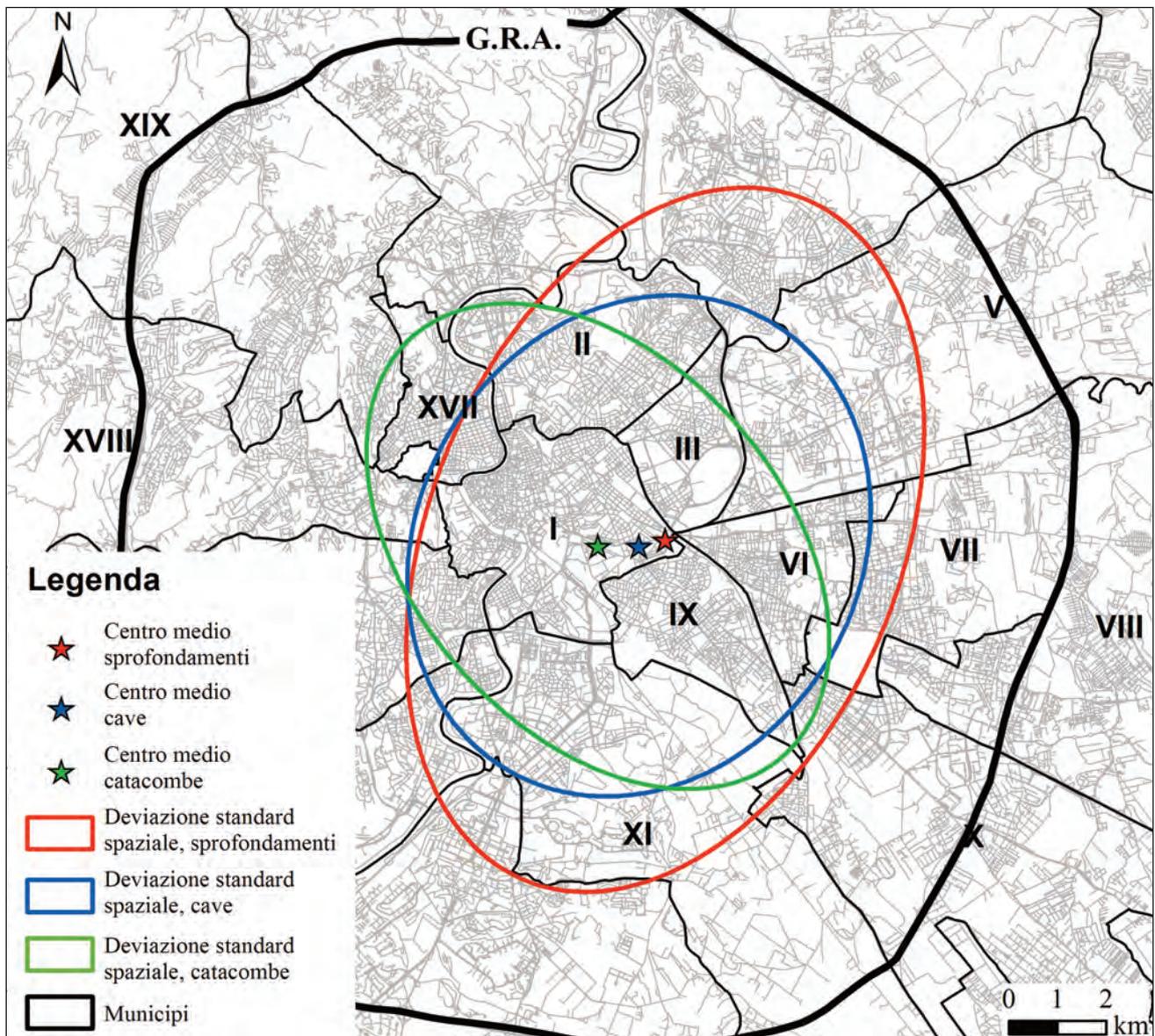


Fig. 27 – Mappa in cui sono state confrontate le ellissi di dispersione del pattern di distribuzione degli sprofondamenti (in colore rosso) con le distribuzioni della rete caveale (in colore blu) e delle catacombe (in colore verde). Il confronto mostra una chiara congruenza tra il pattern di distribuzione degli sprofondamenti con il pattern di distribuzione relativo alla rete caveale. Il centro medio della distribuzione delle catacombe (stella verde) è spostato verso ovest rispetto ai centri medi delle cave e degli sprofondamenti (localizzati nella stessa zona), ed inoltre l'ellisse di distribuzione è orientata in direzione NO-SE.

– The map shows the comparison of the standard deviation ellipses of the anthropogenic sinkholes (in red), of the cave network (in blue) and of the catacombs (in green). The map shows a clear correspondence between the distribution pattern of the anthropogenic sinkholes and the cave network.

cro/Tufello), e l'ungo l'asse minore (da ovest verso est) dal Municipio XVI (S. Pietro) al Municipio VII (zona Prenestino/aeroporto di Centocelle).

La figura 25 mostra quanto riportato nel punto 1. In particolare, è stata elaborata a titolo di esempio una mappa in cui sono state confrontate le ellissi di dispersione del *pattern* di distribuzione degli sprofondamenti (in colore rosso) con le distribuzioni della rete caveale (in colore blu) e delle catacombe (in colore verde). Il confronto mostra una chiara congruenza tra il *pattern* di distribuzione degli sprofondamenti con il *pattern* di distribuzione relativo alla rete caveale. Inoltre, si può notare come la distribuzione delle cavità ipogee relative alla catacombe ha un centro medio spostato verso ovest rispetto ai centri medi delle cave e degli sprofondamenti (localizzati nella stessa zona), ed una ellisse di distribuzione orientata in direzione NO-SE.

L'analisi dei "cluster" spaziali è importante per due motivi: 1) le attività antropiche non producono pattern di tipo casuale, e 2) spesso l'analisi visiva tende a vedere raggruppamenti dove in realtà non esistono, questo per l'abitudine della mente umana a voler organizzare le informazioni spaziali (ROGERSON, 2001). Una delle tecniche più comunemente utilizzate e normalmente implementate nei sistemi geografici informativi è il calcolo dell'Indice di Vicinaggio (*Nearest Neighbor Index*, NNI) che confronta la distribuzione dei punti (in questo caso degli sprofondamenti) con una distribuzione casuale tipo. L'indice di vicinaggio misura la distanza tra ogni evento e il suo più vicino e ne fa la media. Se la distanza media è inferiore a 1 (media per un ipotetica distribuzione casuale), la distribuzione degli eventi è raggruppata ("cluster"). Se la distanza media è maggiore di 1 la distribuzione degli eventi è dispersa. La conoscenza del tipo di pattern degli eventi permette oltre al calcolo di una distanza media, utilizzabile per altre elaborazioni spaziali, anche la formulazione di ipotesi sul possibile legame tra presenza di sprofondamenti e altri fattori predisponenti. La figura 26 mostra i risultati dell'analisi di vicinaggio effettuata sulla distribuzione degli sprofondamenti. Il pattern di distribuzione risulta significativamente differente da un pattern casuale (z-score negativo). Inoltre, la distanza media osservata tra gli eventi (84.55 m) è molto

minore di quella attesa per una distribuzione casuale di punti nella stessa area (323.97 m); le due informazioni restituiscono un Indice di Vicinaggio (NNI, *Nearest Neighbor Index*) minore di 1 (0.26, distanza osservata/distanza attesa) che indica una distribuzione raggruppata degli eventi (tipo *cluster*). L'informazione dell'indice di vicinaggio oltre a fornire una distanza media fra gli eventi è fondamentale per l'applicazione di ulteriori tecniche di analisi spaziale.

L'analisi di densità della distribuzione degli eventi costituisce una tecnica fondamentale e semplice per determinare l'area più incline alla presenza di sprofondamenti. Nelle zone in cui sono verificati eventi di collasso è più probabile che se ne verificano 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 (NNI). 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 conseguenza 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. 28). La figura mostra la densità di sprofondamento nell'area di Roma. 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.

Un'ulteriore analisi comunemente implementata nell'ambito dei sistemi geografici informativi è l'analisi di prossimità che in maniera simile alla costruzione di fasce di rispetto permette di osservare le relazioni di vicinanza tra set di dati differenti al fine di valutarne l'influenza reciproca. Ad esempio, applicando l'analisi di prossimità tra la distribuzione degli sprofondamenti e la distribuzione della

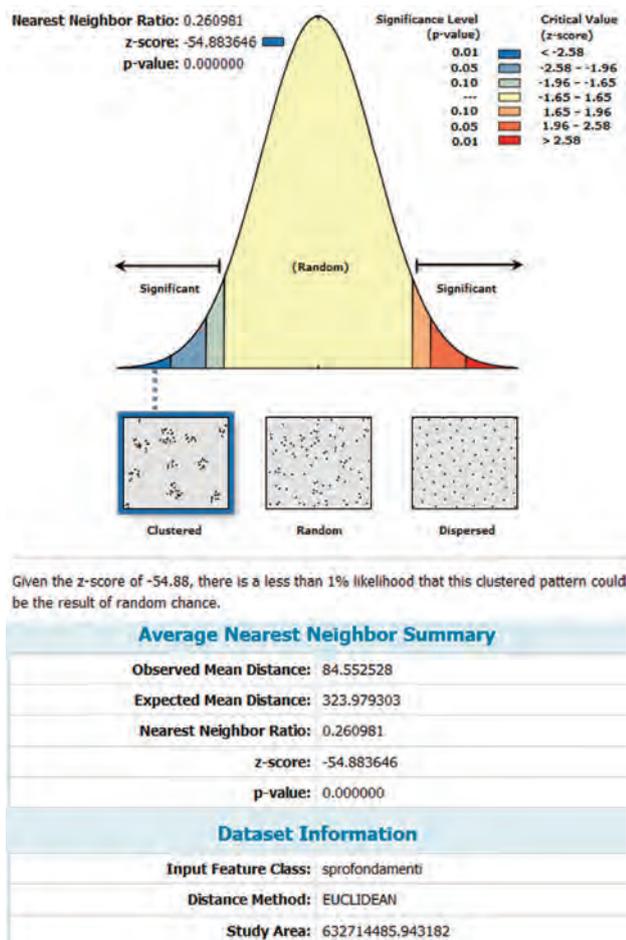


Fig. 28 – Risultati dell'analisi del vicinaggio effettuata sul pattern degli sprofondamenti. Il rapporto tra distanza osservata e distanza attesa restituisce un valore minore di 1 (0.26) che indica un pattern di distribuzione raggruppato (cluster).

– Results of the nearest neighbour analysis. The nearest neighbour ratio between the observed and the expected mean distance has a value lower than 1 (0.26), this indicate a clustered point pattern.

rete caveale è possibile stabilire se un determinato evento è localizzato più o meno vicino ad una cavità ipogea (fig. 29). La figura 30 mostra il risultato dell'analisi di prossimità tra la distribuzione degli sprofondamenti e la distribuzione delle cave ipogee. In questo modo gli eventi sono stati suddivisi per classi di distanza dalla cava più vicina. Un tale tipo di rappresentazione costituisce una prima analisi per la valutazione dell'influenza di altri fattori (presenza di cave ipogee, presenza di sottoservizi) sul verificarsi dell'evento. Allo stesso modo è possibile analizzare la vicinanza dello sprofondamento ad altri fattori predisponenti quali la rete dei sottoservizi, gli alvei sepolti, ecc. Ad esempio, mediante una semplice analisi di *overlay* tra il risultato

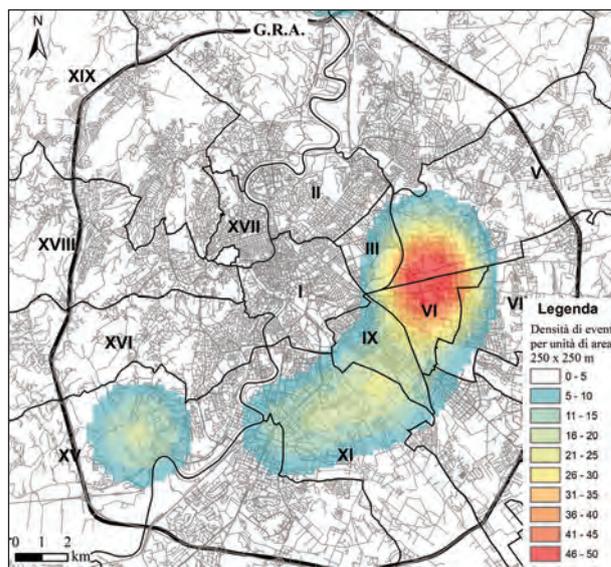


Fig. 29 – Mappa della densità di sprofondamento nell'area di Roma.
– Map of the anthropogenic sinkholes density in the Rome area.

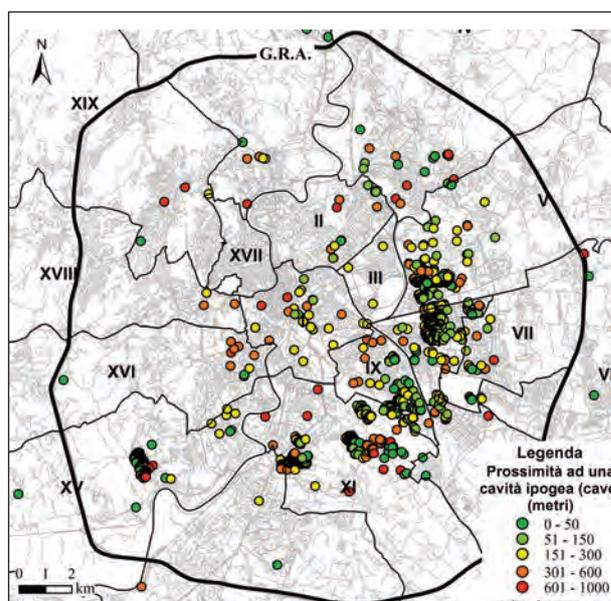


Fig. 30 – Mappa della prossimità degli sprofondamenti alle cave ipogee. La distanza è espressa in metri dall'elemento caveale più vicino.
– Map of the proximity of anthropogenic sinkholes to underground cavities. The map shows the distance (m) of each anthropogenic sinkhole from the nearest cavity.

dell'analisi di prossimità alla rete dei collettori e la mappa dello spessore dei riporti è possibile ottenere una informazione sulla tipologia di sprofondamento che può essere attribuito alla categoria degli "scavernamenti" (collapsi per dilavamento) per quegli gli eventi più vicini alla rete fognaria e contemporaneamente in zone con maggiore spessore del riporto (fig. 31).

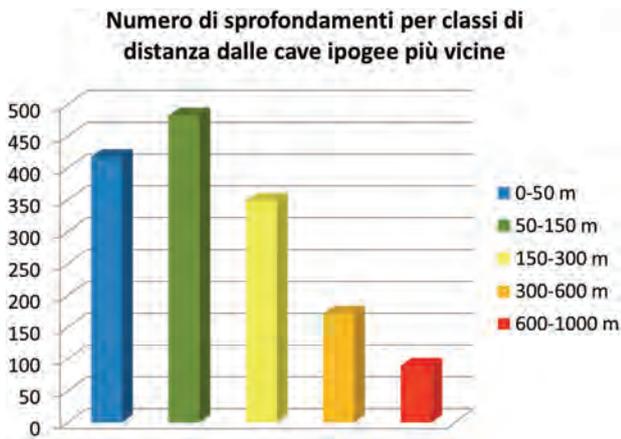


Fig. 31 – Il grafico a barre indica il numero di sprofondamenti relativo ad ogni classe di distanza. Si può notare come circa il 65% degli eventi è localizzato entro i 150 m dalla cavità ipogea più vicina, e circa 86% entro i 300 m.
 - The bar chart indicates the number of anthropogenic sinkholes occurring at a certain distance from the nearest cavity. The graph shows that about 65% of the events are local within 150 m from the nearest underground cavity, and about 86% within 300 m.

7.2. - SECONDA FASE DI ELABORAZIONE: REGRESSIONE LOGISTICA E MAPPA DI SUSCETTIBILITÀ

In questo paragrafo vengono descritte le metodologie per l'elaborazione di un modello probabilistico di suscettibilità agli sprofondamenti per l'area di Roma. Il geodatabase spaziale utilizzato comprende, oltre all'inventario degli sprofondamenti, informazioni relative ad una serie di strati informativi relazionabili a 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 200×200 m e sono stati analizzati mediante software GIS (ESRI® ArcMap™ 10). L'elaborazione di alcuni degli strati informativi di base ha prodotto altri strati informativi utilizzati per la costruzione del modello probabilistico di suscettibilità.

7.2.1. - 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") me-

dante 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.

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).

7.2.2. - 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.

7.2.3. - Fattori antropici

Tra i fattori predisponenti sono stati considerati: l'ubicazione delle cavità ipogee (raccolta di sintesi di dati letteratura), dalla quale sono state derivate la mappa di densità di cavità e la mappa delle distanze degli sprofondamenti dalla cavità più vicina; l'ubicazione della rete dei sottoservizi fognari (rete dei collettori) (fornite da Roma Capitale) che ha prodotto la carta della densità della rete fognaria e la carta delle distanze degli sprofondamenti dal collettore fognario più vicino.

La disponibilità di tali informazioni rende l'area

di Roma un sito idoneo per l'applicazione in via preliminare di un'analisi di tipo statistico-probabilistico per l'elaborazione di una mappa di suscettibilità basata sulla correlazione tra i fattori predisponenti l'evento e la distribuzione degli sprofondamenti. 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 dato dal relativo coefficiente della regressione logistica stimato attraverso il software statistico SPSS, dopo aver preparato opportunamente l'intero dataset di input. SPSS permette di gestire le variabili indipendenti in modo diverso in relazione alla tipologia: continua o discreta; nel caso delle variabili continue viene determinato un coefficiente per ciascun fattore; nel caso, invece, delle variabili categoriali vengono determinati per ogni fattore tanti coefficienti quante sono le classi. In questo caso specifico tutte le variabili considerate sono state inserite nel foglio di input come variabili continue. I valori delle variabili indipendenti (fattori predisponenti) e della variabile dipendente (presenza/assenza sprofondamento) sono stati ottenuti estraendo il centroide delle celle raster relative 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.

La tabella 4 riporta la matrice di classificazione calcolata dal modello logistico relativa alle celle codificate 0 (assenza di evento) e 1 (presenza di evento). In particolare è possibile osservare che il modello di regressione logistica classifica correttamente il 68% delle celle in cui sono presenti sprofondamenti.

Tab. 4 – *Matrice di classificazione del modello logistico.*
– Classification matrix of the logistic model.

Matrice del modello logistico				
Osservato		Previsto		
		Collasso		%
		0	1	
Collasso	0	4664	890	84.0
	1	73	153	67.7
Percentuale globale				83.3

L'analisi fornisce, inoltre, la stima dei parametri del modello logistico con l'errore standard e la significatività del parametro (tab. 5). L'analisi logistica di tipo "forward" elimina automaticamente le variabili non significative ai fini del modello; in particolare la variabile "riporti" e quella "collettori" non sono risultate significative ai fini classificativi.

Tab. 5 – *Coefficienti (B) dell'equazione del modello logistico per le variabili significative.*

– Coefficients (B) of the equation of the logistic model for the significant variables.

Coefficients						
	B	E.S.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
Soggiacenza	-.020	.006	9.871	1	.002	.980
Cavità	.112	.008	207.866	1	.000	1.118
Geologia	.162	.064	6.308	1	.012	1.175

Infine con analisi di regressione logistica è stato calcolato ed assegnato un valore della probabilità del verificarsi del fenomeno ad ogni cella. I valori di probabilità sono stati riportati nel GIS come strato informativo al fine di ottenere una mappa di suscettibilità al collasso (fig. 32).

I valori di probabilità sono stati raggruppati in 10 classi. L'analisi dei coefficienti poi mette in evidenza come alcuni fattori risultano fortemente significativi, vedi ad esempio la geologia e la presenza di cavità nel sottosuolo.

Molto interessante è notare come alcuni strati informativi presentano dei fattori significativamente

negativi (piezometria e soggiacenza), ad indicare come tali parametri siano “stabilizzanti” nei confronti del processo di collasso. La figura 32 mostra la mappa di suscettibilità al collasso nell'area di Roma all'interno del Grande Raccordo Anulare.

8. - CONCLUSIONI

I sinkholes antropogenici provocano e hanno da sempre provocato danni alle infrastrutture, al patrimonio edilizio di molti centri urbani italiani, con perdita, talvolta, di vite umane. Non è stato sinora

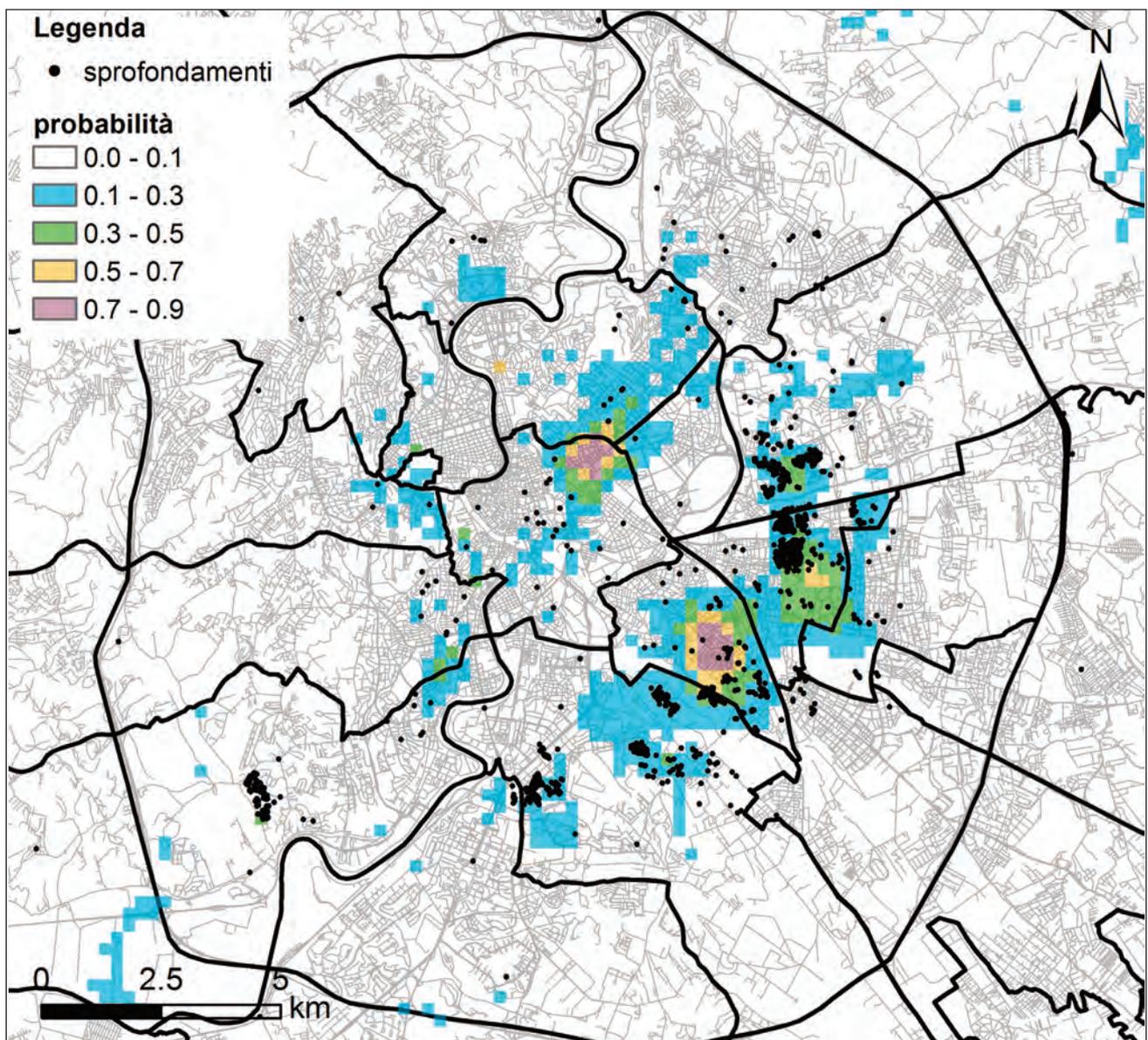


Fig. 32 – Mappa della suscettibilità allo sprofondamento nell'area di Roma.
– Map of the anthropogenic sinkholes susceptibility of the Rome area.

svolto uno studio integrato ed adeguato di questi fenomeni, gli unici tentativi risalgono agli ultimi anni in cui si è assistiti ad una sensibilizzazione al fenomeno per l'aumentata frequenza degli eventi.

Inoltre, la pianificazione urbanistica e, più in generale, la progettazione di strumenti urbanistici generali e particolareggiati necessitano imprescindibilmente, da parte degli enti locali, di una conoscenza geologica propedeutica per la valutazione dei rischi idrogeologici finalizzata alla “*verifica della compatibilità delle rispettive previsioni con le condizioni geomorfologiche del territorio*” secondo quanto previsto dall'art. 89 del D.P.R. 6 giugno 2001, n. 380 e, per quanto riguarda il territorio del Lazio, dalla delibera di Giunta Regionale 2649/1999 che definisce le linee guida da osservare per la stesura degli elaborati geologici tematici del territorio interessato da trasformazioni urbanistiche.

Nell'ambito dell'elaborazione del rischio geologico, i fenomeni di sprofondamento improvviso del suolo (*anthropogenic sinkholes*) riguardano in modo particolare l'area romana dove, negli ultimi anni, il fenomeno ha registrato un particolare aumento della frequenza degli eventi (più di trenta nell'anno 2011, più di 70 nel 2012) con prevalenza di accadimento in concomitanza con eventi pluviometrici di una certa entità.

La causa principale dei sinkholes antropogenici è dovuta a crolli principalmente di volte di ipogei artificiali e al collasso di cavità prodotte e ampliate in seguito ai processi erosivi delle acque di exfiltrazione e infiltrazione collegati ai dissesti (lesionamento e rottura) delle reti fognarie e acquedottistiche.

Il “Progetto sprofondamenti nei centri urbani”, avviato per il territorio di Roma Capitale nell'ambito di quello più ampio a livello nazionale riguardanti i sinkhole naturali e antropogenici (CAMPOBASSO *et alii*, 2004, NISIO, 2008), è stato articolato in:

1) acquisizione dei dati territoriali conoscitivi dei vari enti distinti per: cavità sotterranee, rete fognaria, censimento degli eventi di sprofondamento (rilevati dal 1800 al 2011);

2) individuazione di areali aventi diversa attitudine a “ospitare” cavità e per quanto riguarda la rete fognaria, le parti considerate critiche in relazione alla possibilità preferenziale di innesco di voragini;

3) definizione dei parametri significativi ai fini dell'elaborazione statistica finalizzata alla rappresentazione dei risultati in una mappatura del territorio romano che definisca le aree a diversa suscettibilità all'evento di sprofondamento (come probabilità di accadimento) e dunque di pericolosità.

Le informazioni sono state organizzate in un database, con GIS ad esso associato, e trattate con l'applicazione del metodo della statistica multivariata con particolare riferimento alla regressione logistica mediante la quale è stata valutata l'interazione e la dipendenza tra i diversi fattori che predispongono il fenomeno, nella loro combinazione simultanea.

La tecnica della regressione logistica rappresenta un metodo indiretto di tipo quantitativo attraverso cui il relativo coefficiente fornisce un peso (in relazione all'importanza) ad ogni fattore (o strato informativo) e quindi esprimere la probabilità del verificarsi dell'evento di sprofondamento, nonché definire la pericolosità per una determinata area territoriale.

I valori di probabilità sono stati raggruppati in 10 classi e l'analisi dei pesi dei coefficienti ha messo in evidenza che la litologia e le cavità presenti nel sottosuolo rappresentano fattori fortemente significativi, mentre la piezometria e la soggiacenza risultano essere parametri “stabilizzanti” nei confronti del processo di sprofondamento.

Ciò ha consentito di rappresentare i risultati dell'elaborazione geo-statistica del progetto attraverso la realizzazione di una prima mappa preliminare di suscettibilità del fenomeno nel territorio di Roma Capitale che ha messo in evidenza aree a pericolosità più elevata nei quartieri Prenestino, Tiburtino, Labicano-Appio e Esquilino.

Ai fini della pianificazione urbanistica e agli interventi diretti del territorio, mediante l'elaborazione finale dei dati del progetto, si potrà rendere disponibile all'amministrazione di Roma Capitale e alle altre amministrazioni competenti nell'area romana, un contributo tecnico conoscitivo dettagliato della pericolosità del fenomeno, dalle quali potranno scaturire precise prescrizioni indicazioni geologico - tecniche per il suo utilizzo edilizio. Ciò consentirà di contribuire alla mitigazione di quella presunta imprevedibilità che viene più volte

espressa, da parte delle amministrazioni locali, come giustificazione a seguito di eventi di dissesto idrogeologico ma che, quest'ultimi, risultano essere sempre collegati con l'assenza o l'inadeguatezza delle analisi e delle conoscenze riguardanti le situazioni di interazione tra l'intervento edilizio e le dinamiche geologiche del territorio.

BIBLIOGRAFIA

- AMIDEI F. (1741) - *Roma antica distinta per Regioni. Della Fondazione di Roma. A gloria dell'edificazione di Roma da quasi tutti gli Scrittori delle Romane Istorie*. Marchese Raggi (Ed.).
- 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.: pp. 285-291.
- CAMPOBASSO C., GRACIOTTI R., NISIO S. & VITA L. (2004) - *Il progetto sinkhole: le attività svolte dal Dipartimento Difesa del Suolo dell'APAT*. Atti Conv. "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio" 20-21 maggio 2004 Roma: 171-188.
- CARDINALI M., GUZZETTI F. & REICHENBACH P. (1993) - *CNR Relazione di Sintesi del Progetto Speciale AVI*. CNR-GNDICI 1993, consultabile sul sito <http://avi.gndci.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**.
- 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., 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, XIX 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.
- FIORE A. & LANZINI M. (2007) - *Problematiche di valutazione del rischio di crollo di cavità sotterranee*. Geologia & Territorio, **4**-2006/1-2007, 35-45.
- 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**.
- GIULIANELLI M., PRIGIOBBE V. & SUCCHIARELLI C. (2004) - *Nuovi metodi per quantificare infiltrazioni ed esfiltrazioni nelle fognature urbane*, Geologia dell'Ambiente n. 4, 21-26, Roma.
- 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, 1957.
- MARRA F., CARBONI M.G., DI BELLA L., FACCHENNA C., FUNICIELLO R. & ROSA C. (1995) - *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*. - 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, 511 pp., London.
- 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) - *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.
- O'SULLIVAN D. & UNWIN J.D. (2003) - *Geographic information analysis*, published by John Wiley & 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), pp. 345 - 358, Bardi (Ed.), 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, pp. 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 XXI 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, pp. 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.
- SUCCHIARELLI C. (2003) - *Lineamenti geomorfologici del territorio romano interessato dal Piano Stralcio 5 del Bacino del Tevere*. Rivista Tevere, anno VIII, n. 23-24, p. 27-34, Gangemi Editore, Roma.
- SUCCHIARELLI C. (2004) - *Rilevamento geomorfologico e carta di idoneità territoriale riguardante gli interventi pubblici n. 1, 1A, 2, 11 e 26 del Programma di Recupero Urbano "Corviale"*, Comune di Roma Dipartimento alle Politiche della Programmazione e Pianificazione del Territorio, U.O. n. 2 - Pianificazione e Progettazione Generale, S. C. Programmi Complessi, 1-11, Roma.
- SUCCHIARELLI C. & DI STEFANO V. (2004) - *Rilevamento di sinkholes di origine antropica e interventi urbanistici nel territorio di Monte delle piche (Roma sud-ovest)*. In: Atti Conv. "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", ISPRA, Roma 20-21 maggio 2004: 677-696.
- SUCCHIARELLI C., SCIACCA P., FUCCI F. & MARABOTTO F. (2010) - *Individuazione di un'area a rischio sinkholes interessata da un programma integrato di intervento urbanistico (pr.int. "prima porta", Roma)*. In: Atti 2° Workshop internazionale: "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", ISPRA, Roma 3-4 dicembre 2009:881-902.
- UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA "LA SAPIENZA", FACOLTÀ DI INGEGNERIA, DIPARTIMENTO DI IDRAULICA, TRASPORTI E STRADE - COMUNE DI ROMA, UFFICIO EXTRADIPARTIMENTALE PROTEZIONE CIVILE (CONTRATTO DI RICERCA) (2000) - *Il rischio cavità sotterranee nell'area del Comune di Roma*, Roma.
- VENTRIGLIA U. (1971) - *La geologia della città di Roma*. Bardi (Ed.).
- VENTRIGLIA U. (2002) - *Geologia del territorio del Comune di Roma*. Cerbone (Ed.), Napoli.
- VENTRIGLIA U. & SCIOTTI M. (1970) - *Cavità sotterranee* - Carta geologica della città di Roma. LAC, Firenze.
- 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.