

Analisi sulla predisposizione al dissesto sinkhole nella Conca di Camaiore (LU), di supporto all'aggiornamento del P.A.I. ed alla pianificazione urbanistica

Analisis of the sinkhole susceptibility in the Camaiore (LU) area to supporting the P.A.I. updating and urban planning

BUCHIGNANI V. (*), DALLE LUCHE G. (**),
GIANNECCHINI R. (***), PALLI V. (***), VAGLI R. (*)

RIASSUNTO - Le indagini sul fenomeno *sinkhole*, effettuate a partire dal 1995, hanno portato alla caratterizzazione di un ampio quadro conoscitivo della conca di Camaiore (LU). Utilizzando i dati derivati da tali studi è stato possibile individuare all'interno dell'area di studio almeno 7 fattori significativi e verosimilmente connessi con l'attivazione del *sinkhole* stesso. Sono state quindi prodotte altrettante carte tematiche, una per ogni singolo fattore, mediante l'utilizzo del *software* QuantumGIS.

Questo studio vuole essere un ulteriore approccio al problema, seppur preliminare, ponendo le basi di un metodo d'analisi fondato sull'attribuzione di punteggi e pesi ai fattori predisponenti o scatenanti il fenomeno *sinkhole*. Una volta attribuito a ciascun fattore un punteggio in funzione dell'influenza che si ritiene abbia sul fenomeno ed un peso moltiplicatore che amplifica il punteggio in funzione delle caratteristiche intrinseche al fattore considerato, la sovrapposizione dei fattori riportati in carta ha permesso di ottenere una zonazione dell'area di studio in base al risultato derivante dalla sommatoria dei punteggi per pesi di ogni fattore.

In conclusione, è stata redatta una carta della suscettibilità al verificarsi del fenomeno *sinkhole* individuando 3 classi rappresentative della bassa, media e alta propensione al dissesto. Attualmente, tuttavia, manca ancora una calibrazione del metodo; peraltro, si ritiene che questo possa rappresentare un primo importante passo per supportare il decisore nella pianificazione urbanistica di un fenomeno che, tra l'altro, non rientra ancora nelle carte tematiche dei Piani di Assetto Idrogeologico.

Il lavoro è stato oggetto di tesi presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pisa.

PAROLE CHIAVE: Camaiore, Sinkhole, Pianificazione urbanistica

ABSTRACT - Investigations into the sinkhole phenomenon, carried out since 1995, led to the characterization of a broad knowledge framework of the basin of Camaiore. The results

of such studies allowed to identify at least 7 and probably the most important factors associated with the activation of the sinkhole. These factors were then reproduced as several thematic maps, one for each single factor, through the use of the software QuantumGIS.

This study is intended as a further approach to the problem, laying the foundations of a method of analysis based on the attribution of scores and weights to the factors which predispose or activate the sinkhole phenomenon. Once assigned to each factor a score as a function of the influence that is believed to have on the phenomenon and a weight multiplier which amplifies the score according to the characteristics intrinsic to the factor considered, the overlap of the factor maps allowed to obtain a zoning of the study area based on the results derived from the sum of the scores for the weights of each factor.

In conclusion, we produced a map of the susceptibility to the occurrence of the phenomenon sinkhole by identifying 3 classes representing the low, medium and high propension to collapse. Naturally, a true calibration of the method lacks, which is undoubtedly desirable; however, it is believed that this may represent a first important step in order to support the decision maker in town planning.

The work was the subject of thesis at the Department of Earth Sciences of the University of Pisa.

KEY WORDS: Camaiore, Sinkhole, Urban planning

1. - PREMESSA

Nel complesso panorama legislativo che stabilisce la gestione del territorio, diversi sono gli strumenti urbanistici utilizzati al fine di raggiungere la sostenibilità sociale, economica ed

(*) Libero professionista

(**) Consigliere Comune di Camaiore

(***) Dipartimento Scienze della Terra-Università di Pisa

ambientale. Quest'ultima voce, un tempo alquanto ignorata, ha la finalità di garantire, precedentemente all'atto di elaborazione, di adozione ed approvazione di piani urbanistici, un elevato livello di salvaguardia dell'ambiente dall'impatto che i suddetti piani potrebbero avere sull'ambiente stesso. Alla luce delle calamità naturali che hanno colpito e segnato il territorio, sono state introdotte nel tempo, e progressivamente modificate, delle normative che dettano le regole per la corretta gestione del territorio medesimo. Tali regole comportano delle specifiche analisi e introducono prescrizioni e vincoli in funzione della fragilità del territorio analizzato, soprattutto in termini di dissesto idraulico e geomorfologico.

L'area in esame ricade nell'ambito territoriale del Bacino Toscana Nord; il relativo Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I. del Novembre 2004, aggiornato nel maggio 2010) ha valore di piano territoriale e stabilisce delle norme (Norme di Piano) che dettano disposizioni con finalità di salvaguardia dell'incolumità della popolazione nei confronti dei fenomeni di dissesto geomorfologico e idraulico in atto o potenziali. L'art. 25 del P.A.I. del Bacino Toscana Nord prevede l'approfondimento dei quadri conoscitivi e consente di aggiornare o di definire con maggior dettaglio la pericolosità idraulica e geomorfologica dei territori compresi nell'ambito geografico del Bacino stesso.

Attraverso il Settore Pianificazione Urbanistica del Comune di Camaiore è stato proposto l'aggiornamento e l'approfondimento del quadro conoscitivo relativo alle situazioni di rischio *sinkhole* sul proprio territorio comunale ed in particolare sulla zona del capoluogo, zona nella quale avvenne il crollo ipogeo del 1995; tali azioni sono state eseguite in ottemperanza ai programmi di lavoro proposti all'Amministrazione di Camaiore, tenendo conto degli obiettivi e delle azioni di tutela del territorio definite dal P.A.I. stesso, e sono state disposte facendo riferimento ai quadri normativi esistenti, con l'obiettivo di mettere in grado chi si propone per iniziative edilizie pubbliche o private, in funzione del grado di suscettibilità o propensione al dissesto dell'area d'intervento, di predisporre gli eventuali necessari approfondimenti di indagine a salvaguardia delle nuove opere.

Il presente atto costituisce un documento integrativo e descrittivo dei caratteri generali dell'area della conca camaiorese interessata dal rischio *sinkhole*; le specifiche valutazioni geomorfologiche sono esposte nei paragrafi successivi, nei quali si illustrano anche le metodologie utilizzate ed i risultati raggiunti per ottenere un quadro aggiornato sulle conoscenze acquisite in ordine al fenomeno di crollo ipogeo ed alle situazioni di fragilità idrogeologica caratteristiche della zona.

L'aggiornamento della cartografia relativa ai Quadri Conoscitivi del Piano di Assetto Idrogeologico del Bacino Toscana Nord si propone a seguito della revisione della cartografia suddetta prodotta nel maggio 2010. In particolare, nella Tav. 27 del P.A.I., si è osservato che le definizioni delle classi di pericolosità da *sinkhole* si sono basate prevalentemente sui dati di microgravimetria dello studio prodotto nel 2003 dai Proff.ri Beniamino Toro e Michele Di Filippo del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi "La Sapienza" di Roma. A questo studio ne è seguito successivamente uno più dettagliato e più esteso, effettuato nel 2009 e consegnato nel 2010 sempre dal Prof. Michele Di Filippo, che ha ampliato la zona dei rilievi a settori esterni all'abitato del capoluogo ed ha tenuto conto anche dei vari studi di microgravimetria eseguiti da privati cittadini a supporto di pratiche edilizie. Tale studio ha consentito di definire con maggiore dettaglio le zone di anomalia microgravimetrica negativa, corrispondenti a zone con deficit di massa nell'ambito della copertura alluvionale. Peraltro il deficit di massa è già di per sé un fenomeno che deriva dall'influenza di altri fattori che lo innescano.

Ma la microgravimetria è solo uno dei vari metodi di studio e di misura che sono stati applicati al caso di Camaiore: l'evento *sinkhole*, che si manifestò nell'ottobre 1995 con l'apertura di una grossa voragine, è stato infatti studiato attraverso una serie di indagini multidisciplinari, che hanno evidenziato quanto l'evento stesso sia un fenomeno molto complesso, legato sicuramente alle carenze di massa che si sono trovate nell'ambito della copertura alluvionale e nel *bedrock* carbonatico, ma anche alla particolare situazione tettonico-strutturale della zona, a quella piezometrica delle acque sotterranee ed al loro idrochimismo, alla presenza di contesti geochimici con anomalie in CO₂, Radon e altri gas di origine endogena.

Lo studio che si è pertanto basato non solo sui dati di microgravimetria, ma anche su dati derivanti da altre tecniche investigative e di monitoraggio, in modo da sovrapporre in maniera sistematica i vari elementi che contribuiscono alla potenziale destabilizzazione del sottosuolo.

Le zonazioni relative ai vari gradi di pericolosità idraulica e geomorfologica sono illustrate nelle relative Tavole, unitamente ai vari tematismi che hanno consentito di ottenere le carte di sintesi della suscettibilità o predisposizione al dissesto tipo *sinkhole*.

Il lavoro è stato eseguito in dettaglio sulle aree ad oggi interessate da studi e da monitoraggio, ovvero le aree maggiormente urbanizzate e prossime al centro storico del capoluogo; per questo è ovviamente aggiornabile e perfezionabile alla luce di eventuali approfondimenti di indagine e nuove conoscenze.

2. - INQUADRAMENTO MORFOLOGICO E GEOLOGICO DELLA PIANA DI CAMAIORE

2.1. - CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE GENERALI

Il territorio comunale di Camaiore si estende per circa 86 km², con morfologie variabili, dalla linea di costa della Versilia, ai rilievi meridionali apuani, fino quasi a raggiungere la piana di Lucca e la valle del Serchio (fig. 1).

Nell'ambito dei confini amministrativi del territorio sono riconoscibili due tipologie morfologiche nettamente distinte:

1. aree pianeggianti;
2. aree collinari-montuose.

Le aree pianeggianti di maggior rilievo sono ubicate nel settore centrale e occidentale dell'area comunale; esse sono rappresentate dalla conca di Camaiore e dalla piana costiera. In particolare:

- la pianura della conca di Camaiore, al centro del territorio comunale, si sviluppa lungo la parte terminale delle valli del T. Lucese e del T. Lombricese. Poco dopo la loro confluenza, ove ha origine il T. Camaiore, la piana si restringe e sbocca nella ampia pianura costiera in corrispondenza della strettoia di Ponte di Sasso;

- la pianura costiera, che si estende sulla fascia litoranea da Capezzano Pianore a Lido di Camaiore.

Le aree sopra indicate sono caratterizzate da morfologie piatte (pianura costiera) o da morfologie sub-pianeggianti, con deboli spiovenze verso gli impluvi principali. Le valli ad esse laterali, secondarie, sono spesso contraddistinte da pendenze assai più accentuate. Alcune tra le principali vallate secondarie sono state colmate, per alluvionamenti successivi, da depositi di conoidi di deiezione che attualmente, allo sbocco nelle valli principali, si presentano re-incisi e terrazzati; ne sono esempio tipico le grosse conoidi di deiezione laterali della valle del Lucese, le

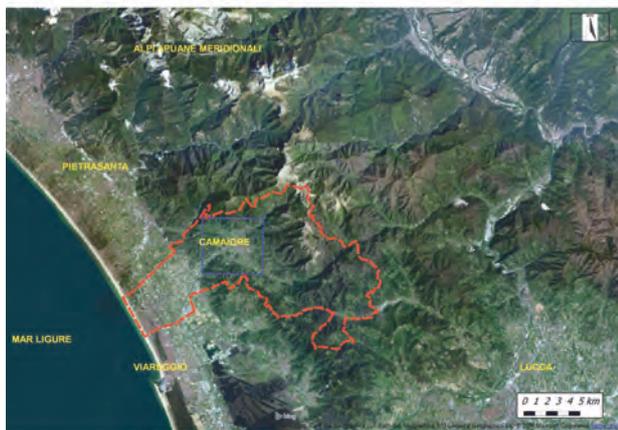


Fig. 1 - Inquadramento geografico.
- Geographical context.

cui scarpate presentano rispetto al fondovalle principale, dislivelli talora superiori ai 20 metri.

La fascia collinare-montuosa, che lambisce o contorna le aree di pianura, rappresenta la propaggine meridionale delle contigue Alpi Apuane e assume forme diverse nei rilievi che la costituiscono:

- forme più blande nel settore centro-meridionale, con quote massime che si aggirano intorno ai 500-600 m s.l.m., con versanti a medio-bassa acclività, raramente incisi da valli incassate e ripide;
- rilievi con asperità più accentuate nel settore settentrionale, circostanti la conca del capoluogo, culminanti in corrispondenza dei massicci prevalentemente carbonatici del M. Gabberi, del M. Prana e del M. Matanna (circa 1300 m s.l.m.). L'aspetto morfologico di questi ultimi massicci è tipico del paesaggio apuano, con presenza di valli incassate a "canyon" caratterizzate da scarso sviluppo di spianate ampie e piatte, con pendii dei versanti da mediamente acclivi a molto acclivi, con speroni rocciosi e doline, risultato di una evoluzione morfologica di tipo carsico.

I rilievi in questione, in buona parte di natura carbonatica, sono incisi da due principali sistemi idrografici, i cui assi di drenaggio sono costituiti dalle aste del T. Lucese e del T. Lombricese; il corso d'acqua che si origina dalla loro confluenza prende il nome di T. Camaiore che confluisce direttamente in mare.

La zona di interesse, nel caso specifico, è la pianura della conca di Camaiore, interessata da intensa urbanizzazione, con un carico di abitanti stimabili in circa 14.000 unità ed un conseguentemente grosso patrimonio edilizio, con varie infrastrutture a rete consolidate. A ciò è imputabile l'elevata vulnerabilità della zona e di danno atteso per effetto del manifestarsi di un eventuale nuovo crollo ipogeo.

2.2. - GEOLOGIA

I rilievi che ricadono all'interno dell'areale in esame sono caratterizzati da affioramenti di rocce che, in riferimento alle unità tettoniche di appartenenza, possono essere raggruppate come segue:

- rocce metamorfiche: indicate in letteratura geologica come appartenenti all'Unità di Massa ed alle Unità Stazzemesi, rappresentano la terminazione meridionale del nucleo metamorfico delle Alpi Apuane;
- rocce non metamorfiche: appartenenti alla Falda Toscana.

Al di sopra di queste unità si rileva la presenza di terreni incoerenti e pseudocoerenti post-orogonici, costituiti principalmente da depositi alluvionali quaternari, rappresentati da depositi alluvionali recenti e attuali, depositi terrazzati, conoidi di deiezione (fig. 2).

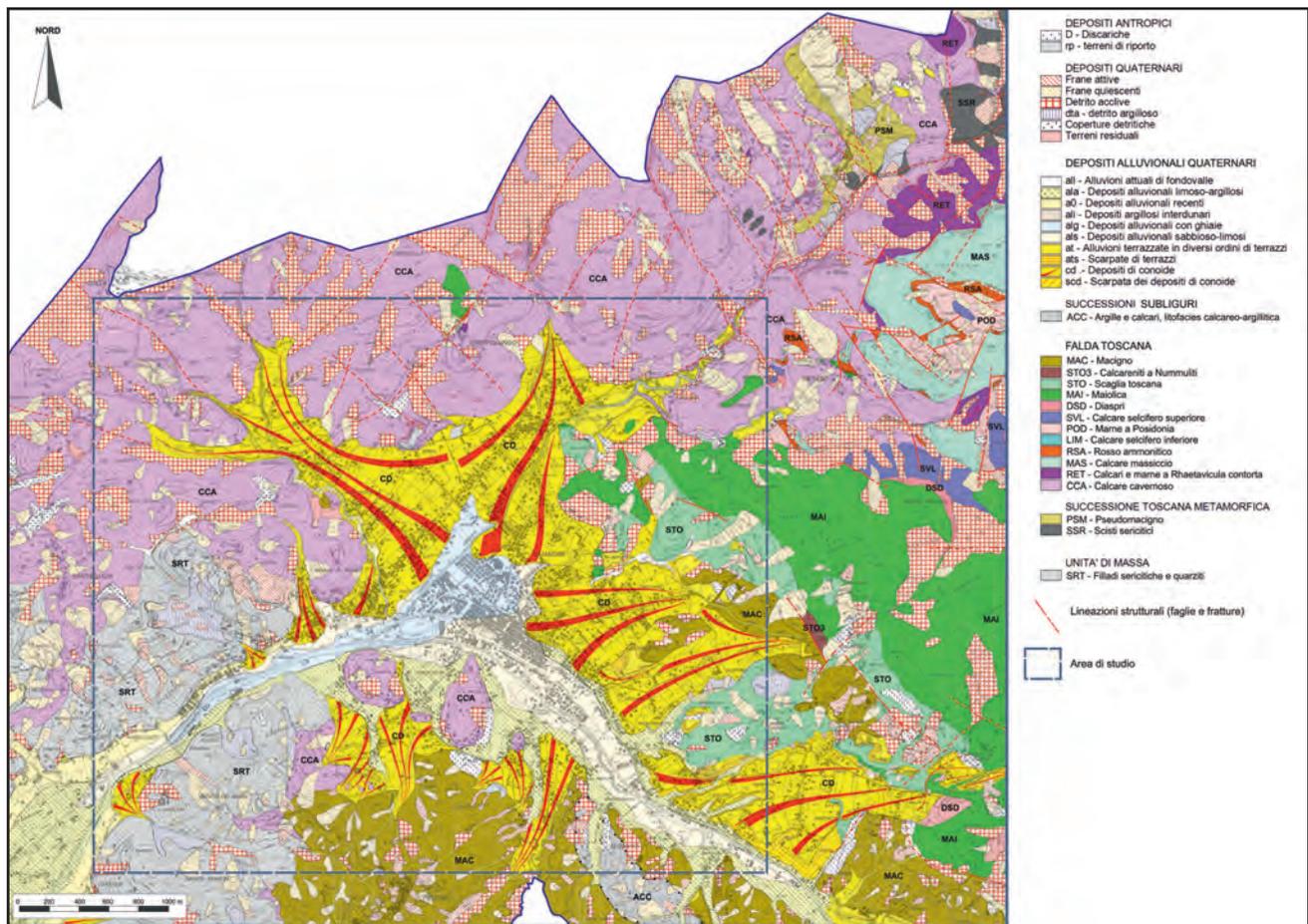


Fig. 2 - Schema geologico.
- Geological map.

Lo schema sintetico delle formazioni che entrano in gioco nell'areale interessante la conca camaiorese sono di seguito descritte, dal termine più profondo a quello superiore:

Verrucano s.l.

complesso di terreni scistosi, metamorfici, interposti tettonicamente tra le formazioni, anch'esse metamorfiche, del nucleo centrale delle Apuane e quelle basali della Falda Toscana. Affiora per larga parte del versante occidentale delle Alpi Apuane, da Carrara fino alle colline ad Est di Viareggio. Nella zona di Camaiore, si ritrova, nelle dorsali collinari a ridosso di Capezzano Pianore e lungo i fianchi della valle del Torrente Camaiore, dalla confluenza dei Torrenti Lucese e Lombricese fino allo sbocco nella pianura costiera. Tale formazione è rappresentata in prevalenza da filladi e scisti quarziticci con intercalazioni di quarziti micro-conglomeratiche.

Calcare cavernoso e breccie poligeniche associate calcari con da tessitura spugnosa e tipico aspetto "a cellette" derivanti, per idratazione superficiale, da

depositi dolomitico-anidritici di un'originaria serie evaporitica triassica; ad essi sono associate breccie poligeniche costituite sia da elementi metamorfici dell'Unità di Massa, che da elementi della Falda Toscana; in alcuni casi (La Culla, Greppolungo, Metato) si ritrovano interi pacchi di strati di rocce. Il Calcare cavernoso, caratterizzato da evidenti fenomeni di carsismo, costituisce il substrato roccioso di gran parte della conca di Camaiore ed ha uno spessore di circa 500-700 m, localmente ridotto per le laminazioni suddette; l'età è riconducibile al Trias medio-superiore. Le breccie associate possono essere riferite al Miocene (DALLAN, 1973).

Calcarei a Rhaetavicula contorta

calcari e calcari marnosi fini, da grigio scuri a neri, alternati con straterelli di marne grige e nerastre, alterate in giallo; lo spessore è dell'ordine dei 150-200 m e si trovano nella zona del Fosso Acqua Chiara e nella zona del Passo del Lucese.

Calcarei massicci

calcari massivi non stratificati, grigi e grigio scuri, con calcari dolomitici e dolomie nella parte

inferiore della formazione e calcari rosati, grossolanamente stratificati, nella parte superiore della formazione stessa; gli affioramenti più consistenti si rilevano nella zona del Monte Ciurlaglia; lo spessore è di alcune centinaia di metri.

Rosso ammonitico

calcari stratificati di colore da rosa a rosso cupo, più raramente grigio o nocciola, con struttura a tratti nodulare. Tipica la presenza di tracce e resti di ammoniti; lo spessore non supera quasi mai qualche decina di metri.

Calcari selciferi grigi a selci chiare

calcari stratificati leggermente marnosi, a grana fine, di colore dal grigio fino al giallastro; negli strati si trovano spesso liste e noduli irregolari di selce chiara; vi si possono rinvenire anche sottili interstrati di argilliti e marne fissili; lo spessore è valutabile intorno ai 50-100 m, localmente ridotto o assente (Metato, Falcigoli) per laminazioni tettoniche.

Marne a Posidonomya

marne e argilliti grigio-giallastre, talora con strati di radiolariti (sud-est del M. Prana); gli affioramenti più consistenti si rilevano nella valle del Torrente Lucese. Lo spessore massimo è di circa 150 m.

Calcari grigio scuri a selci nere

costituiti da calcareniti a grana generalmente fine di colore grigio scuro, con liste e noduli di selce nera; i principali affioramenti, con spessori che possono raggiungere i 200 m, si hanno nelle zone del M. Prana e del M. Riglione.

Diaspri

radiolariti e argilliti silicee in strati di pochi centimetri di spessore con fratturazione prismatica, colore variabile dal rosso, al verde, al grigio giallastro; lo spessore medio è di 50-100 m circa, ma frequentemente mostrano spessori molto esigui o risultano assenti in conseguenza di fenomeni di laminazione tettonica.

Maiolica

calcari stratificati, bianchi avorio o grigio chiaro, litografici, a frattura concoide, con rare liste e noduli di selce chiara nella parte basale della formazione, con selci più scure nella porzione superiore; in prossimità del contatto con la "scaglia rossa", la Maiolica può presentare bancate detritiche che la rendono a prima vista simile ai "calcari nummulitici"; in alcune zone (Torcigliano, Gombitelli) la Maiolica è visibilmente discordante sui Diaspri a causa di fenomeni di scollamento verificatisi per il diverso comportamento meccanico delle due formazioni. La Maiolica è tra le formazioni più rappresentate nel territorio comunale, con spessori valutabili in circa 350 m.

Scaglia rossa

argilliti e marne finemente stratificate, varicolori con prevalenza del rosso, caratterizzate da frattura aghiforme delle argilliti e sfaldatura delle marne, con intercalazioni di calcari, calcari marnosi, calcareniti e calcari silicei. Questa formazione, per la facile alterabilità che la contraddistingue, costituisce un litotipo con scadenti caratteristiche di stabilità. Lo spessore è valutabile intorno ai 150 m.

Calcareniti e microbreccie a Nummuliti

torbiditi calcaree, costituite da calcari grigi a grana fine, calcareniti e calciruditi a macroforamiferi terziari del genere *Nummulites*; si tratta di intercalazioni all'interno della Scaglia rossa o al tetto di questa. La formazione raggiunge, nella zona di Fibbiolla, spessori dell'ordine del centinaio di metri.

Macigno

depositi arenacei torbiditici a composizione quarzoso-feldspatico-micacea, generalmente in strati di notevole spessore (da 1 a 5 m), spesso intensamente fratturati, in cui è riconoscibile una gradazione nella granulometria dei clasti che passa da arenacea grossolana ad arenacea molto fine o siltitica spostandosi dalla base al tetto dei singoli strati; localmente si osservano intercalazioni di strati calcarenitici. La formazione raggiunge spessori fino a 1.000 m.

Nelle valli più interne, compresa quella del T. Camaiole, i depositi alluvionali sono notevolmente eterogenei e presentano frequenti alternanze di livelli molli, prevalentemente argilloso-limosi, e di livelli assai consistenti, ghiaioso-sabbiosi che spesso si rilevano a profondità modesta. Sui margini della valle e all'interno della conca di Camaiole sono presenti depositi terrazzati, più antichi di quelli precedentemente definiti recenti e attuali, coevi per qualche aspetto con le conoidi alluvionali. I depositi "alluvionali recenti e attuali" sono caratterizzati da notevole eterogeneità e sono rappresentati sinteticamente da depositi limoso-sabbiosi, localmente ghiaiosi in superficie sovrastanti depositi sabbioso-ciottolosi nel primo spessore di circa 50 metri; al di sotto si trovano depositi argillosi con ciottoli e, a seguire, depositi sabbiosi e sabbioso-limosi con livelli ciottolosi, alternati a livelli ghiaiosi in matrice argilloso-sabbiosa. Questa eterogeneità si riscontra anche lateralmente nell'ambito dei sedimenti alluvionali e denota una notevole varietà di fasi alluvionali a diversa energia che hanno contribuito a colmare la piana di Camaiole. Lo spessore dei depositi alluvionali raggiunge la massima ampiezza al centro della piana, dove si rileva un abbassamento del *bed-rock* fino a circa 120-140 metri di profondità, con forma allungata

in direzione NW-SE, ovvero in direzione appenninica; la struttura del *bed-rock* sottostante il materasso alluvionale è tale da far ragionevolmente supporre la presenza di uno sprofondamento progressivo, a gradinata, della valle a seguito dell'evoluzione tettonica della zona (struttura a *graben*).

I "conoidi di deiezione" sono anch'essi costituiti da depositi eterogenei, ed hanno spessori localmente superiori ai 50 metri.

2.3. - TETTONICA ED EVOLUZIONE PALEOGEOGRAFICA DEL TERRITORIO

L'Appennino Settentrionale e le Alpi Apuane, le cui ultime propaggini lambiscono la piana di Camaiore, possono essere interpretati come il risultato dell'evoluzione spazio-temporale di una tettonica a tratti compressiva, a tratti distensiva, che ha interessato i bacini sedimentari liguri s.l. e toscani s.l. La collisione con la microplacca Sardo-Corsa durante l'Oligocene può essere vista come la causa principale della formazione, in un regime tettonico compressivo, dell'edificio a falde di ricoprimento sovrapposte che caratterizza i suddetti rilievi (CARMIGNANI, KLIGFIELD, 1990; CONTI, LAZZAROTTO, 2004; CONTI *et alii*, 2004;).

A partire dal Miocene Superiore e sino a tutto il Messiniano le strutture compressive sono interessate da una tettonica distensiva a larga scala, collegata, molto probabilmente, al processo di retroarco che ha portato all'apertura del Mare Tirreno e che ha dato origine a strutture tipo *horst* e *graben* in tutta la Toscana.

La piana di Camaiore, interessata dall'evento di crollo ipogeo, è situata in una depressione tettonica compresa tra l'alto morfologico delle Apuane a Nord ed rilievi collinari dell'allineamento Monte Magno-Monte Moneta a Sud, formatasi in seguito alla suddetta fase deformativa distensiva. Tale struttura negativa, tipo *graben*, si realizza principalmente attraverso faglie dirette sottrattive, a geometria listrica, a direzione appenninica (NW-SE), in associazione a sistemi secondari di faglie a direzione antiappenninica e faglie con direzione E-W e N-S (pleistoceniche).

Il sistema di faglie dirette, che ha ribassato il substrato roccioso del margine occidentale dei rilievi apuani, ha determinato sia il rapido colmamento della pianura costiera con sedimenti terrigeni e costieri recenti (ghiaie, sabbie, argille e torbe), sia il ringiovanimento dei versanti nell'entroterra collinare e montano (Pleistocene Inferiore), con la formazione delle grandi conoidi di materiale alluvionale.

Gli studi effettuati sulla piana in esame indicano la presenza di una tettonica attualmente attiva, riconoscibile anche dalla particolare struttura pro-

fonda del *graben* della conca di Camaiore e confermata anche da un recente sciame sismico che seppur di debole intensità, era caratterizzato da ipocentri interni o leggermente esterni alla conca.

In base a quanto esposto, risulta un quadro della evoluzione paleogeografica e morfogenetica del territorio secondo lo schema sotto riportato.

Lo stile tettonico delle aree collinari e montuose del territorio comunale è essenzialmente plicativo, in contrapposizione allo stile della pianura costiera che è legato alla presenza di grosse faglie dirette che ribassano la pianura occidentale. La regione più sollevata è costituita dalla parte settentrionale del territorio comunale, da Monteggiori al Monte Gabberi, a Casoli e Bollogno, dove affiorano le rocce più profonde di tutto l'edificio geologico, che rappresentano la terminazione meridionale delle Alpi Apuane. La struttura di questa regione è costituita da una vasta monoclinale immergente verso Sud. Trasversalmente a questa ampia struttura, le formazioni, appartenenti principalmente alla Falda Toscana, sono ripetutamente piegate in anticlinali e sinclinali che nel loro insieme immergono verso SW. Pertanto la zona più sollevata tettonicamente è quella della porzione più orientale del territorio comunale che costituisce la struttura positiva incentrata sul Rio delle Campore e Monte Pedone, al cui nucleo affiora ampiamente la serie carbonatica della Falda Toscana. A questa struttura segue, in direzione Ovest, la sinclinale dei dintorni di Gombitelli con nucleo di Macigno; ancora più a Ovest segue una sinclinale con asse NW-SE, allungato dalla conca di Camaiore fino alla zona di Montemagno-Ricetro; a SSW si osserva invece un'anticlinale, fagliata su ambo i lati, con asse NW-SE e con nucleo di Diaspri e Maiolica, centrata sull'abitato di Migliano.

Attraverso l'analisi aerofotogrammetrica, l'esame dei sondaggi geognostici e dei sondaggi elettrici verticali eseguiti nel corso del primo studio sull'area della "voragine" verificatasi nell'ottobre 1995 in loc. "Le Funi", è stato possibile delineare le principali faglie e lineazioni che interessano la conca camaio-rese (BUCHIGNANI & CHINES, 1996, lavoro inedito). Successivamente, la campagna gravimetrica, l'analisi geochimica dei gas di origine profonda, i dati geofisici elaborati da sondaggi elettrici verticali, da prove sismiche tipo *cross-hole*, nonché da tomografie elettriche e sismiche, hanno permesso di delineare con maggior precisione l'andamento del tetto del substrato roccioso (prevalentemente carbonatico) e di ricostruire complessivamente l'intero reticolo di faglie e fratture che interessa la zona (UNIGEO, 1997, lavoro inedito).

La correlazione dei vari studi eseguiti ad oggi ha permesso di definire un quadro strutturale abbastanza complesso. Si deve premettere che nella bi-

biografia mondiale relativa agli eventi di crollo tipo quello di Camaiole, le specifiche pubblicazioni, analizzando una varia casistica, indicano nella fragilità litologico-strutturale in rocce carbonatiche, nella sollecitazione sismica, nelle variazioni piezometriche ed in altri vari fattori, le cause o meglio le concause che, con preponderanza dell'una o dell'altra a seconda dei casi osservati, hanno portato alla formazione dei *sinkholes*. Partendo da tali basi, sono stati impostati gli studi sul fenomeno *sinkhole* che tutt'oggi sono attivi. Vista la tipicità del fenomeno e dato il suo *trend* evolutivo, l'obiettivo principale è quello di tenere sotto controllo e quindi monitorare le zone ritenute a rischio, nonché di operare scelte urbanistiche e gestionali congruenti con il problema, dovendo obbligatoriamente imparare a convivere con il "rischio *sinkhole*".

Relativamente all'inquadramento strutturale, si osserva che nella piana di Camaiole si incrociano tre sistemi principali di faglie dirette, a direzione rispettivamente appenninica (NW-SE), antiappenninica (NE-SW) ed Est-Ovest. L'intersezione di queste faglie genera localmente forti ribassamenti di placche del substrato roccioso che raggiunge il massimo approfondimento quasi in corrispondenza del nucleo abitato centrale di Camaiole. L'analisi gravimetrica ha consentito di individuare e di ricostruire questo ribassamento che sembra svilupparsi "a fossa", in direzione NW-SE, dalla zona delle "Funi", dove si è manifestato il crollo, a Piazza Romboni. Lo "specchio" di faglia più evidente si trova in corrispondenza del lato SW della zona ribassata, ma altri decisi ribassamenti per faglia sono evidenti in altre parti della conca. L'analisi dei gas profondi (la cui risalita e concentrazione elevata indica forte fratturazione del substrato roccioso) ha permesso di rilevare diverse zone con anomalie in tenori di gas e quindi intensamente fratturate. Tra i gas analizzati è stata osservata anche la CO₂, la cui variazione di concentrazione può essere motivo di inversione di tendenza nella equazione di equilibrio carbonati-bicarbonati e quindi concorrere a fenomeni di dissoluzione di tipo carsico. Nelle zone dove si sommano le anomalie gravimetriche e dei tenori di gas sono state effettuate indagini geoelettriche tese a individuare anomalie indicanti presenza di elevata fratturazione o di abnormi valori dell'indice dei vuoti in roccia o nei depositi alluvionali.

Come precedentemente accennato, le aree nelle quali si sono riscontrati fenomeni di questo tipo sono caratterizzate da una morfogenesi evolutiva che non esclude l'ipotesi che, in tempi geologici, ma anche storici, possano verificarsi altri *sinkholes*. L'analisi complessiva effettuata, ma ancora in via di aggiornamento, si è basata quindi sullo studio e sull'interpretazione di un'ampia serie di fattori che costituiscono le concause del fenomeno.

3. - ANALISI SINTETICA DEGLI STUDI ESEGUITI IN ORDINE AL FENOMENO SINKHOLE

Il fenomeno *sinkhole*, identificato con lo sprofondamento improvviso del terreno, è riconosciuto in diverse parti del mondo ed è considerato come una calamità scarsamente prevedibile e dalla quale non è facile difendersi (NISIO 2003; NISIO *et alii* 2005; NISIO & SALVATI 2004; NISIO 2008)). Il dissesto verificatosi a Camaiole nell'ottobre 1995 è assimilabile a quelli già noti dell'alto Lazio, della Pianura Pontina e a quello di Grosseto del 1999. La maggior parte di questi fenomeni è caratterizzata dalla notevole profondità del *bed-rock* carbonatico (100 m ed oltre) e dal fatto che si trovano nella zona di "scarico" delle falde e non nella zona di ricarica. Secondo la terminologia e la classificazione tecnica degli sprofondamenti catastrofici, il fenomeno avvenuto a Camaiole è riconducibile ad un *piping sinkhole* (NISIO 2003; NISIO *et alii* 2005; NISIO & SALVATI 2004).

Le aree a rischio nelle quali i *piping sinkholes* si originano sono pianure alluvionali, pianure costiere, conche intermontane, su strette valli fluviali generalmente di origine tettonica in corrispondenza di successioni carbonatiche massicce carsificate o di altre litologie comunque solubili, sedi di falde acquifere di grande potenza, a cui si sovrappongono depositi fluvio-lacustri, lagunari, vulcanici o marini di potenza variabile.

Le aree caratterizzate da questi fenomeni, fortemente a rischio di sprofondamento, vengono definite *sinkhole prone areas*.

Esempi di aree simili si riscontrano principalmente nelle conche intramontane e nelle pianure costiere dell'Appennino Centrale e Settentrionale, dove Lazio e Toscana risultano le regioni a più alta pericolosità da *sinkhole* (CAPELLI & PETITTA, 1998; CENTAMORE *et alii*, 1999; CENTAMORE & NISIO, 2002, 2003; CAPELLI *et alii*, 2000, 2001; COLOMBI *et alii*, 2001; BERSANI & CASTELLANO, 2002; BERTI, 2002; BUCHIGNANI, 2002; BUCHIGNANI & CHINES, 2002; CENSINI & COSTANTINI, 2002; D'AMATO AVANZI *et alii*, 2004; BUCHIGNANI *et alii*, 2007; BUCHIGNANI *et alii*, 2008), dove sono ricorrenti tutte le condizioni al contorno, ISPRA – Atti 1° Convegno Sinkhole – Roma, 20-21 maggio 2004 ISPRA – Atti 2° Convegno Sinkhole – Roma, 3-4 dicembre 2009, NISIO S. (2003).

I *piping sinkholes* si originano in contesti di complesse situazioni geologico-strutturali ed idrogeologiche del territorio che ne costituiscono le condizioni essenziali. Vengono innescati per motivi di diversa natura quali sismi, grandi variazioni, più o meno rapide, del livello piezometrico associate anche a mutamenti dell'idrochimismo delle

acque stesse (BIGI *et alii*, 1999; CIOTOLI *et alii*, 2000; NISIO, 2003; ANNUNZIATELLIS *et alii*, 2004; CAPELLI *et alii*, 2004; LAZZARI, 2004).

Definire quale sia la causa principale è sempre alquanto difficile, poiché esse sono molteplici e generalmente concomitanti; queste possono essere distinte in predisponenti e scatenanti (NISIO, 2003; NISIO, 2004).

L'evento di Camaiole è avvenuto nella notte tra il 14 ed il 15 ottobre 1995, con sprofondamento di un'area urbanizzata ed apertura di una voragine del diametro di circa 35 metri. A partire dal momento dell'evento, sono state eseguite, in più fasi, indagini multidisciplinari che hanno consentito di raccogliere una notevole mole di dati geologici, stratigrafici, idrogeologici, geofisici e geochimici, nonché di esaminare una serie di misure relative ai punti di controllo dislocati sul territorio.

Dopo la prima serie di indagini, prevalentemente localizzate nei dintorni dell'area del dissesto, fu sostanzialmente scartata, come causa scatenante, l'influenza degli emungimenti dal campo pozzi distante circa 900 m dalla zona del crollo; non fu comunque totalmente esclusa, come concausa, l'incidenza del pompaggio di rilevante entità (circa 360 l/s, con massimi di circa 500 l/s nei periodi estivi di massima utenza, coincidenti con quelli di minima ricarica). Dalle indagini eseguite emersero invece, come cause sostanziali, la fragilità del substrato carbonatico (interessato da paleo-carismo), la collocazione della zona del crollo in area tettonicamente attiva (con un evento sismico di magnitudo 5,5 Richter verificatosi circa 8 giorni prima in Lunigiana), la presenza e l'intersezione di grosse lineazioni strutturali in corrispondenza dell'area del dissesto.

In una seconda fase di studio, sull'area del dissesto ma estesa anche sulla conca camaiolese, furono eseguite indagini mediante prospezioni geofisiche (micro-gravimetria, geoelettrica, sismica) e geochimiche (analisi dei gas endogeni). Le indagini consentirono di elaborare una cartografia nella quale sono evidenziate zone con anomalie gravimetriche (zone di rapido ribassamento del substrato e di carenze di massa nella copertura alluvionale) e zone con tenori anomali di gas endogeni. Anche i profili tomografici geoelettrici fecero rilevare anomalie elettriche in profondità. Così come vennero osservate evidenti anomalie nei tenori di CO₂ e Radon endogeni. I due elementi presenti nel sottosuolo in fase gassosa sono significativi di attività tettonica in essere: in qualità di fluidi sono in grado di passare attraverso i pori del terreno e, come l'acqua, hanno tendenza a diffondersi con maggiore rapidità e quantità laddove la permeabilità è maggiore. In particolare, quindi, circolano nelle zone di faglia o di lineazione tettonica in genere; 2 peraltro è il motore

che trascina il Radon più pesante. Dove in superficie vengono rilevati in tenori superiori alla media, ovvero con anomalie positive, tracciano aree corrispondenti a fratture tettonico-strutturali del substrato. Il confronto con le lineazioni rilevate da foto aerea o satellitare ha evidenziato una buona corrispondenza di tali aree anomale con proiezioni verticali di faglie o lineazioni.

L'analisi integrata dei dati strutturali, geognostici, sismici, idrogeologici, geochimici, geoelettrici e gravimetrici raccolti nel corso delle varie fasi di indagine condotte nel sottosuolo di Camaiole dall'ottobre 1995 ad oggi, fa osservare una convergenza di indizi relativi ad anomalie più o meno profonde. Si è avvalorata l'ipotesi riguardo alla presenza di zone nel substrato roccioso con anomalie elettriche evidenti, attribuibili ad una maggiore percentuale di indice dei vuoti nel complesso carbonatico, verosimilmente connesse con cavità o grosse fratture riempite con materiale fine, sature. La loro sovrapposizione con le anomalie microgravimetriche, vista la distribuzione in zona urbanizzata, fa osservare una situazione a rischio per quanto concerne la possibilità d'innescio di *sinkhole* più o meno profondi.

La sintesi dei dati acquisiti, confrontata con il quadro dei controlli meteorologici e idrogeologici, mette in evidenza che anche la piezometria gioca un ruolo fondamentale nell'equilibrio della zona di per sé fisiologicamente fragile per motivi litologici e tettonico-strutturali. In particolare, nelle zone di intersezione delle principali lineazioni, in corrispondenza delle quali potrebbero peraltro svilupparsi cavità, avvengono le restituzioni più importanti di acqua in pressione durante la ricarica.

A fronte di quanto esposto, appare chiaro che i fattori che concorrono al disequilibrio del sistema sono molteplici e notevolmente complesso appare il processo con cui evolvono i potenziali *sinkhole*. Fermo restando il fatto che appare ancora improbabile un intervento strutturale di messa in sicurezza dei suoli e delle aree edificate a pericolosità elevata, per mitigare il rischio di crolli nel sottosuolo di Camaiole occorre agire sul fronte della prevenzione e cioè sul monitoraggio in funzione di allerta nelle aree in cui si ritiene maggiore il rischio *sinkhole*. Nel caso in oggetto, l'ipotesi del monitoraggio in continuo è la sola risorsa che consente la predisposizione di piani di sicurezza a tutela dell'incolumità pubblica nei confronti del ripetersi di un evento simile. Per questo è stato predisposto un progetto, in parte eseguito ma non ancora ultimato, che prevede il controllo degli elementi e dei fattori in gioco che caratterizzano l'evolvere di un *sinkhole* ed in particolare dei precursori del fenomeno. Il monitoraggio integrato comprende il controllo di suolo, sottosuolo, acque sotterranee, gas endogeni, fattori meteo-climatici.

I più manifesti tra i vari precursori appaiono comunque le micro-deformazioni del suolo, per cui il Comune di Camaiole, nell'ottica di porre sotto controllo tali precursori, ha disposto di realizzare e mantenere nel tempo il sistema di monitoraggio integrato in grado di analizzare con continuità spaziale e temporale le deformazioni del suolo e, in caso di anomalie significative, di garantire un servizio di allertamento. Il componente principale di tale sistema di monitoraggio è costituito dall'interferometro radar da terra conosciuto come sistema GBInSAR LiSALab, sviluppato e gestito dalla società Ellegi s.r.l. La strumentazione GBInSAR LiSALab è utilizzata efficacemente da quasi dieci anni per l'analisi del rischio dei fenomeni franosi che, come gli sprofondamenti, rappresentano sempre movimenti di massa che tuttavia non si sviluppano necessariamente in aree pianeggianti ma di solito lungo un versante.

Il sistema GBInSAR LiSALab è stato installato alla fine del mese di Gennaio 2007 e dal Febbraio 2007 monitora H24 per trecentosessantacinque giorni l'anno la piana di Camaiole. In questi anni di osservazione sono stati ottenuti interessanti risultati dall'analisi del campo micro-deformativo che interessa la piana, risultati che hanno permesso di evidenziare i particolari comportamenti che si manifestano in maniera diversa nelle varie parti della conca di Camaiole. A seguito delle intense e prolungate precipitazioni degli ultimi anni, sono stati registrati i dati più significativi del periodo di controllo. In particolare, si può osservare che, mentre alcune regioni hanno presentato dei movimenti di innalzamento ed abbassamento con periodicità stagionale, altre zone hanno mostrato un netto trend costante in determinata direzione di movimento. Nell'ambito delle aree caratterizzate da oscillazioni periodiche (sinusoidali) si possono ulteriormente distinguere settori che reagiscono in maniera impulsiva ed in tempi assai rapidi alle piogge, ma con comportamenti differenziali che si esauriscono in pochi giorni. Più in dettaglio, si rilevano aree che tendono a mostrare un andamento periodico degli abbassamenti-innalzamenti del suolo sincrono con le fasi rispettivamente di magra e di ricarica della falda sotterranea (in diretta connessione con la piovosità), in contrapposizione ad aree che mostrano un andamento delle micro-deformazioni opposto a quello della piovosità, con abbassamenti del suolo successivi a fasi di intensa precipitazione. L'entità dei movimenti risulta ad oggi dell'ordine massimo di circa 2-4 centimetri. Il differenziale che si manifesta quindi tra aree contigue a diverso comportamento può raggiungere pertanto valori di oltre , tali da giustificare un quadro fessurativo assai diffuso sulle strutture murarie presenti nella piana.

La seconda componente del sistema integrato di monitoraggio per le analisi del comportamento del suolo è rappresentata da una rete locale di postazioni GPS per il controllo in continuo delle micro-deformazioni morfologiche di punti significativi (attualmente in corso di ristrutturazione).

4. - METODO DI VALUTAZIONE DEL GRADO DI SUSCETTIBILITÀ DA SINKHOLE

La notevole mole di dati, ottenuta dagli studi eseguiti e dal monitoraggio in atto, consente di impostare una valutazione della predisposizione o suscettibilità al dissesto, basata sull'interfacciamento di più elementi che possono ragionevolmente essere considerati fattori predisponenti o scatenanti dell'evento.

La valutazione così articolata appare senza dubbio più ponderata e attendibile della classificazione della pericolosità basata su un solo, pur se importante, elemento. Rimane tuttavia una valutazione in evoluzione, passibile di modifiche nel caso in cui, ad esempio, si dovessero manifestare delle criticità anomale in uno o più fattori, anche in aree che, allo stato delle attuali conoscenze, non dovessero essere considerate a potenziale rischio *sinkhole*.

L'obiettivo del presente studio è quindi quello di elaborare una cartografia sulla quale riportare una zonazione calcolata in base alla sovrapposizione dei vari fattori predisponenti. Lo studio prende a modello il metodo parametrico a punteggi e pesi S.I.N.T.A.C.S. introdotto in Italia negli anni '90 (CIVITA, DE MAIO, 1997) al fine di stimare la vulnerabilità di una falda acquifera.

Anche in questo caso, ai vari fattori è stato attribuito un valore di rilevanza, in base all'importanza intrinseca del fattore stesso, ed un peso in relazione all'importanza che si ritiene essi abbiano nei confronti dell'insorgere del *sinkhole*. Per alcuni di questi fattori è stato possibile inoltre creare una gradazione dei valori di rilevanza, funzione dell'entità del problema che essi rappresentano. Il prodotto dei valori di rilevanza per i pesi attribuiti rappresenta il grado di predisposizione al rischio specifico del fattore considerato. Nella zona sulla quale si ha sovrapposizione o concentrazione di vari fattori, i relativi punteggi vengono sommati. Alla fine, attraverso un'analisi spaziale, si ottiene una sommatoria di punteggi pesati che rappresentano, dal più basso al più alto, una minore o maggiore predisposizione di dissesto.

L'attribuzione dei punteggi e dei pesi è in questo caso ancora soggettiva e si basa, come già detto, sull'esperienza maturata nel corso degli studi e delle indagini effettuate a Camaiole, sugli appro-

fondimenti disponibili sul tema in letteratura e sulle nozioni scambiate con esperti nazionali e internazionali sul tema *sinkhole*. Nonostante ciò, si ritiene che possa costituire comunque un punto di inizio di discussione, nell'ambito di un fenomeno non ancora previsto a livello normativo nelle carte tematiche di riferimento in merito alla pericolosità dei fenomeni naturali, e può essere ulteriormente affinata e migliorata sulla base di nuove conoscenze, teorie ed interpretazioni.

I fattori predisponenti e/o scatenanti dell'evento considerati sono i seguenti: situazione sismica attiva, presenza di substrato carbonatico, intersezione di lineazioni strutturali, anomalie elettriche, anomalie micro-gravimetriche, presenza di CO₂ e Radon, entità e tipologia delle micro-deformazioni del suolo; alcuni fattori, quali ad esempio la situazione sismica attiva, sono comuni e distribuiti su tutta l'area o quasi e vengono comunque considerati nell'attribuzione dei valori e dei pesi.

4.1. - SITUAZIONE SISMICA

Al fine di comprendere le condizioni sismiche del territorio comunale camaiorese sono stati acquisiti dati dall'Osservatorio Sismico Apuano

(<http://www.osservatorioapuano.org/>), il quale riporta una sequenza sismica, già citata in precedenza, temporalmente compresa tra Maggio 2007 e Novembre 2009.

Gli ipocentri dei 40 eventi registrati sono situati tra 1 e 8 Km di profondità e la loro magnitudo è inferiore al 2.7 Richter.

Dato che in termini di coordinate geografiche si riscontra una precisione limitata nell'individuazione spaziale degli ipocentri (vengono di fatto omesse le ultime quattro cifre nelle suddette coordinate), che determina spesso la sovrapposizione di diversi sismi, sono state definite convenzionalmente delle aree di tolleranza nella individuazione degli epicentri e, attraverso l'utilizzo di Quantum-GIS, in particolare mediante lo strumento di *geoprocessing* denominato *buffer*, sono state delimitate due distinte aree (fig. 3). Gli ipocentri sono stati riportati in carta utilizzando quale sistema di riferimento Monte Mario/Italy zone 1, EPSG:3003.

Nel caso della situazione di attività sismica, il peso attribuito è basso (valore 1); l'attività sismica viene poi riconsiderata sia nella valutazione delle intersezioni di lineazioni strutturali, sia nella considerazione della presenza di CO₂ e Radon, verosimilmente sintomatica di attività in essere delle

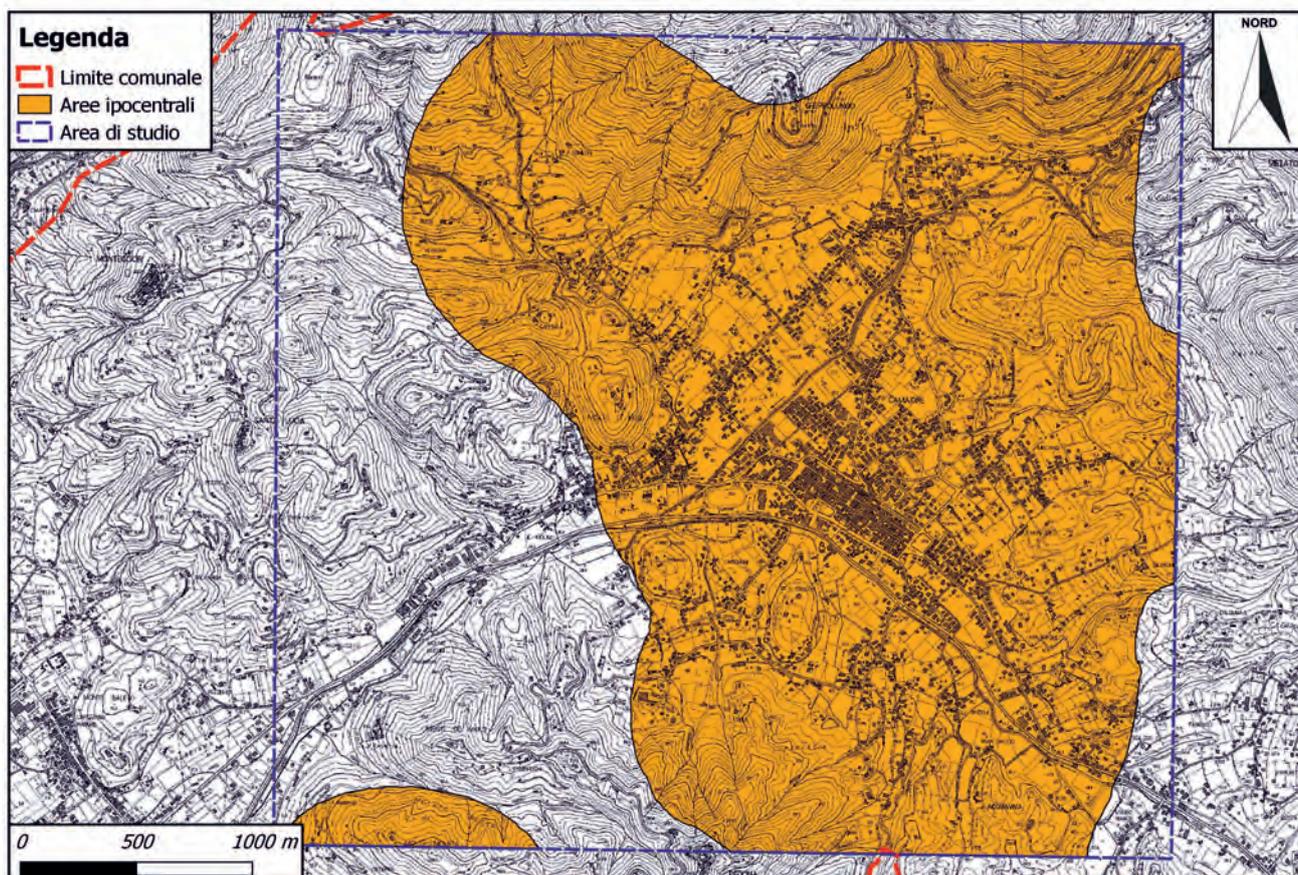


Fig. 3 - Distribuzione areale degli ipocentri (sequenza 2007-2009).
- Areal distribution of hypocenters (sequence 2007-2009).

faglie e fratture profonde. I due valori attribuiti, ovvero 1 e 2 (v. tab. 1), si riferiscono rispettivamente a fasce sulle quali non sono stati individuati ipocentri di terremoti e a zone di territorio entro le quali si è concentrata la sequenza sismica del 2007-2009 presa a riferimento.

Tab. 1 – *Classi di rilevanza.*
- Classes of relevance.

1	Situazione sismica attiva	1	no ipocentri	con ipocentri
			1	2

4.2. - PRESENZA DI SUBSTRATO CARBONATICO

Sulla base della cartografia geologica esistente (BUCHIGNANI, 2007) è stata riportata l'estensione del substrato carbonatico all'interno dell'area di studio (tab. 2). Come si può osservare nella figura 4, il substrato lambisce la totalità della zona Nord dell'area di studio propagandosi verso Sud in corrispondenza della confluenza dei torrenti Lucese e Lombricese.

Tab. 2 - *Classi relative alla presenza di substrato carbonatico.*

- Classes related to the presence of carbonate bedrock.

2	Presenza di substrato carbonatico	2	assenza	presenza
			1	3

4.3. - INTERSEZIONI DI LINEAZIONI STRUTTURALI

Attraverso l'analisi di foto da satellite, sono state individuate numerose lineazioni strutturali nell'area della conca camaiorese. In base alle loro intersezioni, sono state predisposte tre classi distinte per numero di lineazioni intersecate; mediante *geoprocessing* si è determinata l'area di interesse dei punti in cui si intersecavano due o tre e più lineazioni, stimando ipotizzando cautelativamente un raggio di *buffer* di 50 m per la prima classe e per la seconda, rispettivamente. La scelta del raggio di *buffer* è stata impostata considerando la predisposizione alla disgregazione del bed-rock carbonatico presente nella conca di Camaiole (Calcere Cavernoso). La scelta del raggio del *buffer* è stata anche effettuata considerando le ricognizioni effettuate sui rilievi sui quali affiora tale formazione; queste hanno infatti consentito di accertare effettivamente quanto le principali fratture tendano a disgregare o rendere molto fratturato l'ammasso roccioso

nel suo intorno, per almeno 15 m per lato della singola lineazione. Sono stati quindi creati dei poligoni che delimitano le aree ottenute grazie al *buffer* in maniera tale da evidenziare le zone più suscettibili (fig. 5).

Per quanto riguarda i punteggi attribuiti alle intersezione delle lineazioni, si attribuisce un valore 3 quando le lineazioni che si intersecano sono meno di 3; un valore 4 quando le lineazioni interessate sono 3 o più. Per il fattore "intersezione delle lineazioni strutturali" si considera un peso rilevante, pari a 4 (v. tab. 3). Il valore di questo fattore viene ulteriormente aggravato dalla presenza di gas endogeni, che indica attività intensa delle lineazioni sottostanti.

Tab. 3 – *Classi di intersezione.*

- Classes for the number of intersections of faults.

3	Intersezione di lineazioni strutturali	4	>3 lineazioni	<3 lineazioni
			3	4

La sintesi degli studi effettuati (BUCHIGNANI, CHINES, 1997; BUCHIGNANI, 2000), confrontata con il quadro dei controlli meteorologici e idrogeologici, mette in evidenza che anche la piezometria gioca un ruolo fondamentale nell'equilibrio della zona di per sé fisiologicamente fragile per motivi litologici e tettonico-strutturali. In particolare, nelle zone di intersezione delle principali lineazioni, in corrispondenza delle quali potrebbero peraltro svilupparsi cavità, soprattutto quando si ha la restituzione più importante di acqua in pressione durante la ricarica. Il controllo delle acque sotterranee avviene in piezometri attrezzati con trasduttori di pressione per il monitoraggio in continuo delle variazioni del livello di falda.

4.4. - PRESENZA DI CO₂ E RADON

Sulla base dei risultati del lavoro di Lombardi (1996), è stata ricavata l'estensione delle evidenti anomalie nei tenori di CO₂ e Radon endogeni (fig. 6). Questi elementi, presenti nel sottosuolo in fase gassosa, sono significativi di attività tettonica in essere: in qualità di fluidi sono in grado di passare attraverso i pori del terreno e, come l'acqua, hanno tendenza a diffondersi con maggiore rapidità e quantità laddove la permeabilità è maggiore; con estrema facilità circolano nelle zone di faglia o di lineazione tettonica.

Laddove in superficie vengono rilevati tenori superiori alla media, ovvero con anomalie positive, questi due fluidi tracciano aree corrispondenti a fratture tettonico-strutturali del substrato.

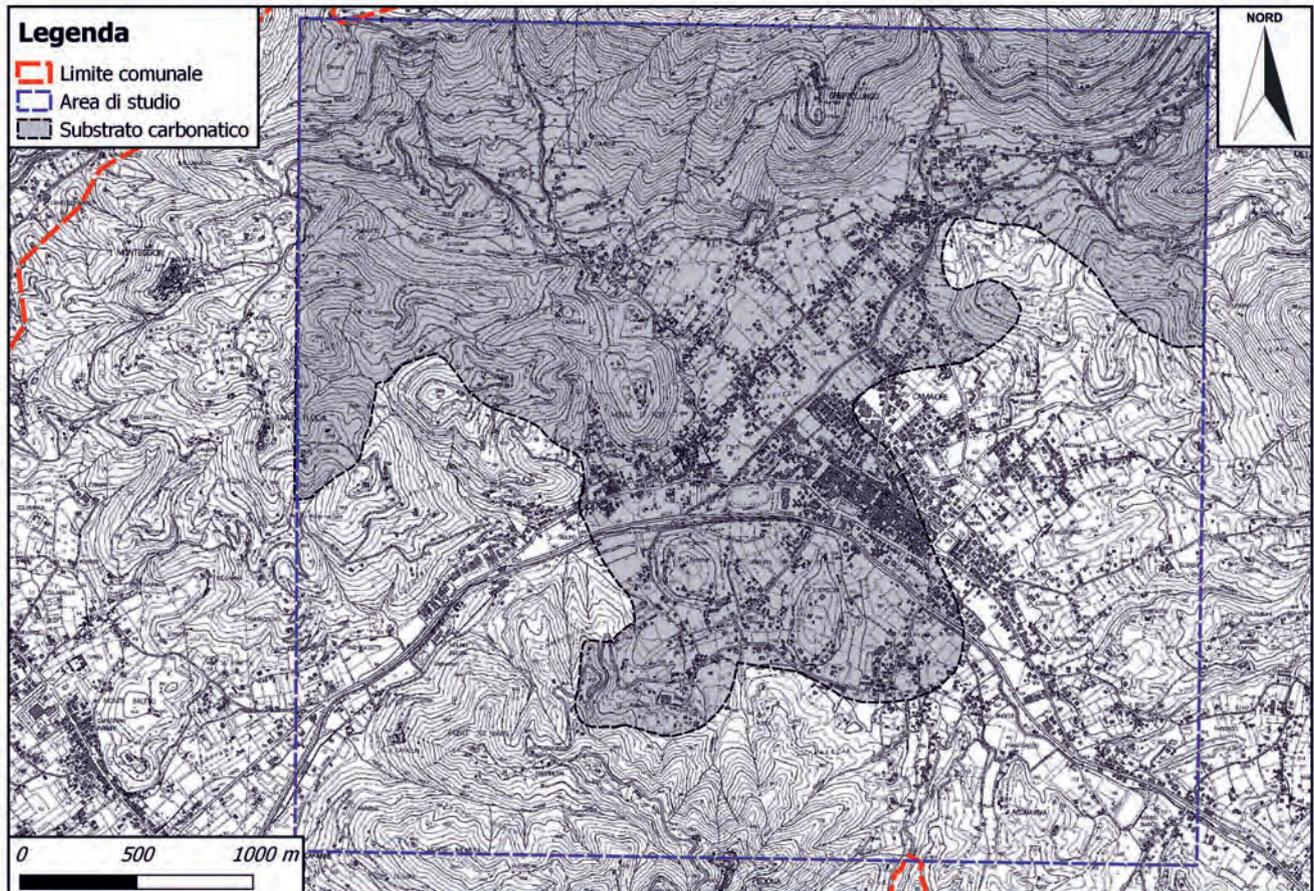


Fig. 4 - Areale di distribuzione del substrato carbonatico.
 - Geographical distribution of the carbonate bedrock.

Il confronto con le lineazioni rilevate da foto aerea o satellitare ha evidenziato una buona corrispondenza di tali anomalie con proiezioni verticali di faglie o lineazioni (BUCHIGNANI *et alii*, 1996; LOMBARDI, 1997; BUCHIGNANI, 2000, lavori inediti).

La presenza di gas endogeni (CO₂ e Radon) è verosimilmente indice di attività tettonica in atto lungo le faglie dalle quali tali gas provengono e dalle quali risalgono verso la superficie; la CO₂ è particolarmente interessante e incidente sul fenomeno *sinkhole* per la sua caratteristica di acidificare le acque di circolazione sotterranea e quindi aumentare il potere di dissoluzione del calcare o della frazione carbonatica dei sedimenti alluvionali.

In tabella 4 sono riportati i punteggi associati alla presenza o meno di gas endogeni.

Tab. 4 – *Classi relative alla presenza di gas endogeni.*
 - Classes related to the presence of endogenous gases.

4	Presenza di CO ₂ e Radon	3	assenza	presenza
			1	3

4.5. - ANOMALIE ELETTRICHE

L'analisi del lavoro RIZZO (2003) fa osservare una convergenza di indizi relativi ad anomalie più o meno profonde. Grazie ai profili tomografici geoelettrici si è avvalorata l'ipotesi riguardo alla presenza di zone nel substrato roccioso con anomalie elettriche evidenti (fig. 7), attribuibili ad una maggiore percentuale di indice dei vuoti nel substrato carbonatico e quindi probabilmente connesse a cavità o grosse fratture riempite con materiale fine, sature. In tabella 5 sono riportati i rispettivi punteggi.

Tab. 5 – *Classi relative alla presenza di anomalie elettriche.*
 - Classes related to the presence of electrical anomalies.

5	Anomalie elettriche	3	assenza	presenza
			1	3

4.6. - ANOMALIE MICROGRAVIMETRICHE

Le indagini svolte da DI FILIPPO (2010) hanno permesso di individuare le anomalie micro-gravi-

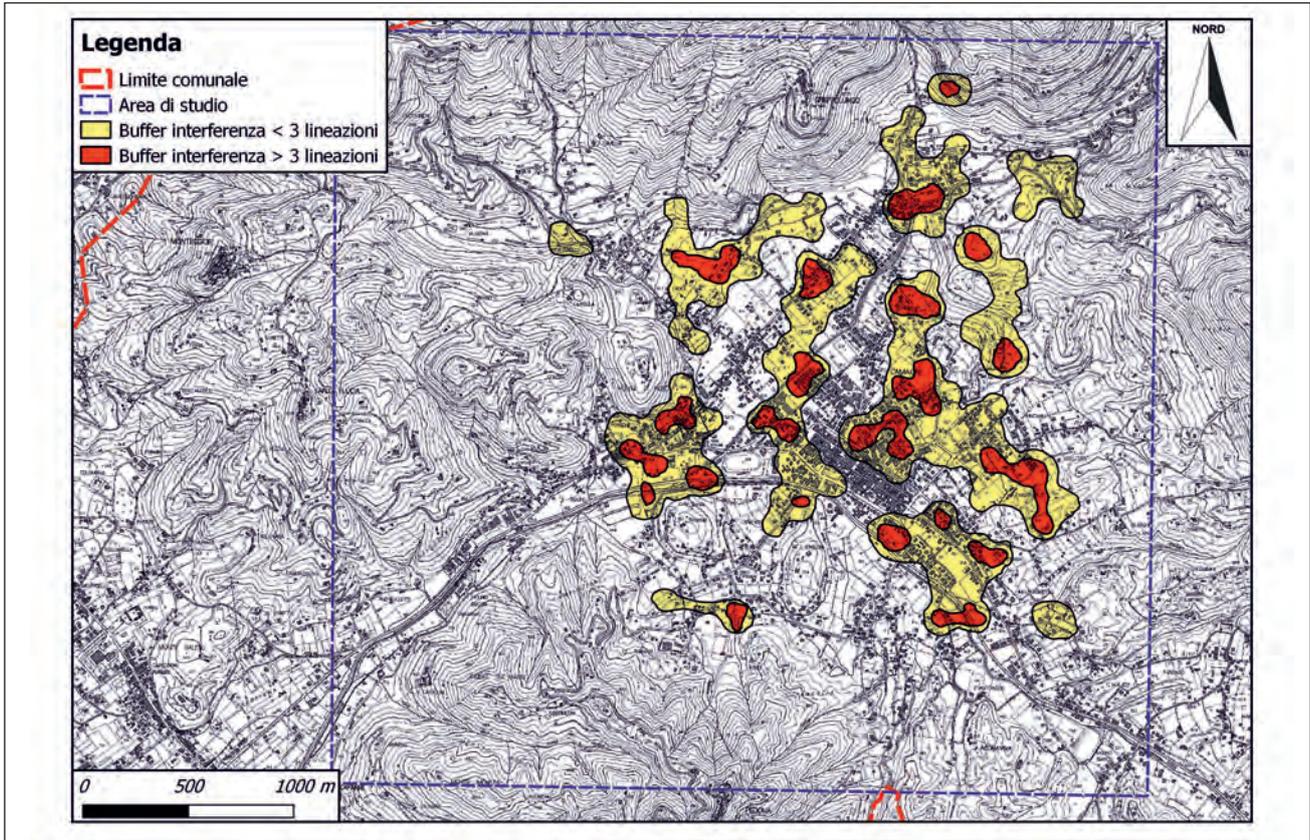


Fig. 5 - Intersezione delle lineazioni strutturali.
- Intersection of Structural lineations.

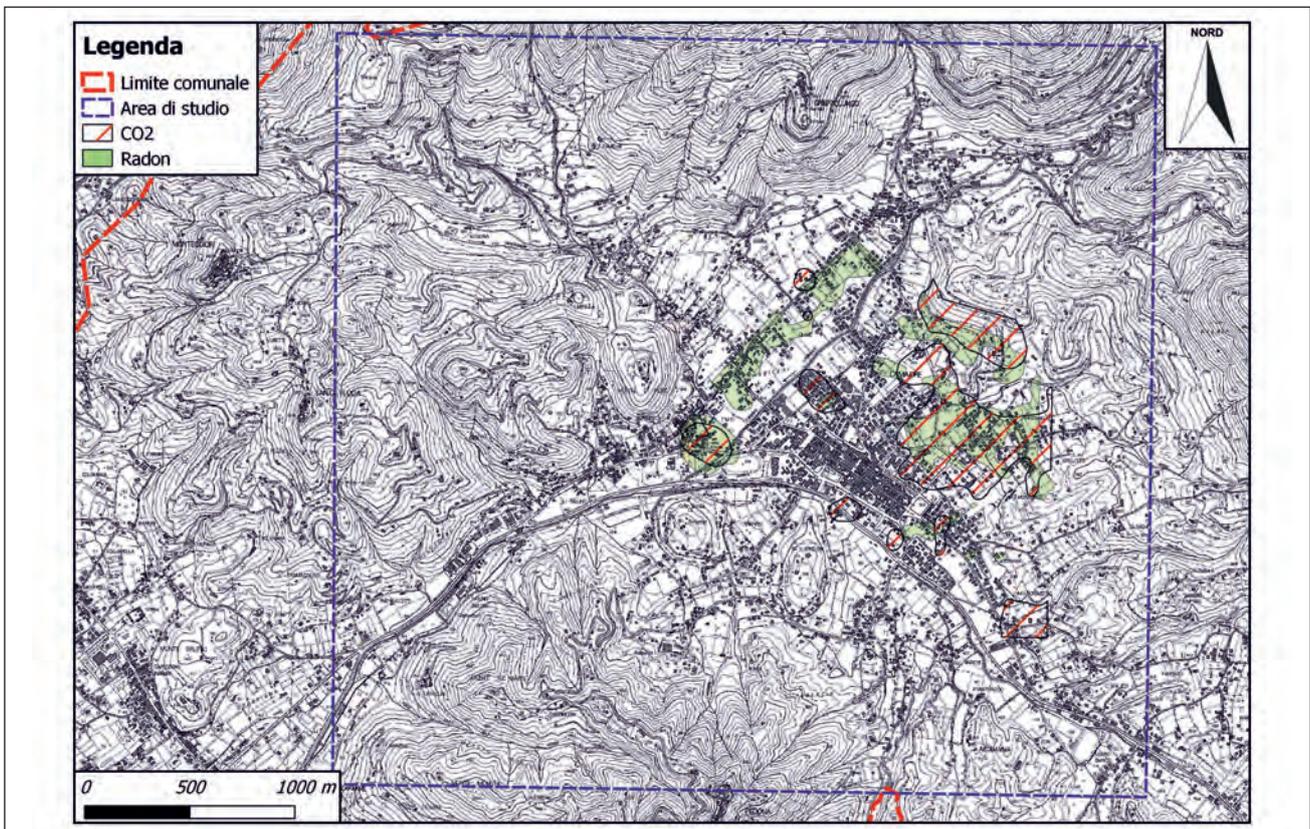


Fig. 6 - Anomalie dei gas endogeni CO₂ e Radon.
- Abnormalities of endogenous gases CO₂ and Radon.

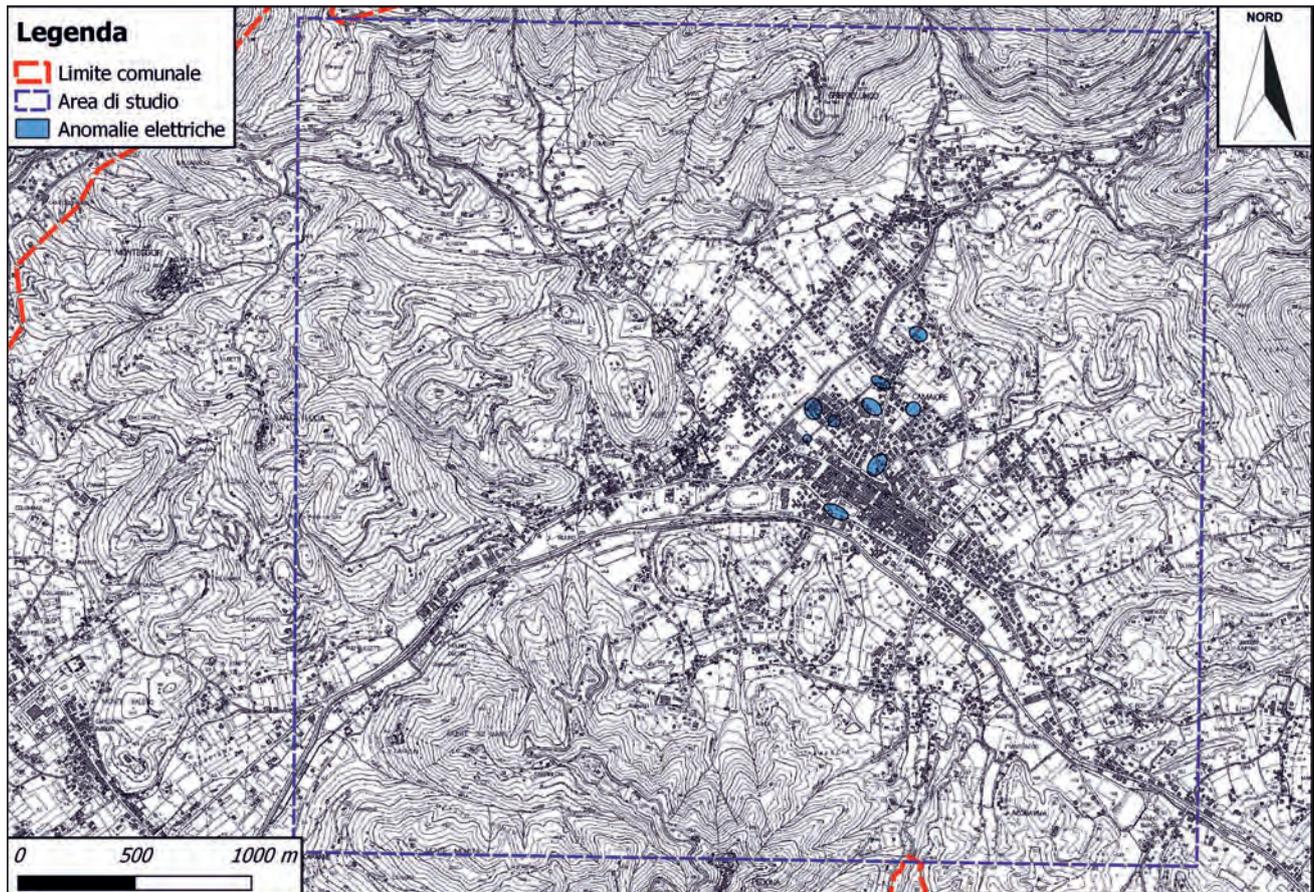


Fig. 7 - Anomalie geoelettriche.
- *Geoelectric abnormalities.*

metriche presenti nella conca camaiolese (fig. 8). Attraverso l'analisi delle variazioni di densità nel sottosuolo, tale indagine è da considerarsi più che rilevante nella individuazione delle zone maggiormente suscettibili alla possibilità che si verifichi il dissesto. Le anomalie sono divise in tre classi in funzione della fascia di anomalia negativa (espressa in mGal) riportate nella tabella 6, alle quali corrisponde un valore di rilevanza crescente con l'aumentare del deficit. Il peso delle anomalie negative, traducibili in prima approssimazione in carenza di massa, è elevato, pari a 4.

Tab. 6 – Classi relative alla presenza di anomalie microgravimetriche.
- *Classes related to the presence of microgravimetric anomalies.*

6	Anomalie microgravimetriche	4	mGal		
			0,04-0,1	0,1-0,2	<0,2
		3	4	5	

4.7. - MICRODEFORMAZIONI DEL SUOLO

I più manifesti tra i vari precursori appaiono comunque le micro-deformazioni del suolo, per cui il Comune di Camaione, con l'intento di porre sotto controllo tale precursore, ha disposto un sistema di monitoraggio integrato in grado di analizzare con continuità spaziale e temporale le deformazioni del suolo e, in caso di anomalie significative, di garantire un servizio di allertamento.

Il componente principale di tale sistema di monitoraggio è costituito dall'interferometro radar da terra conosciuto come sistema GBInSAR LiSALab, sviluppato e gestito dalla società Ellegi s.r.l.; è stato installato alla fine del mese di Gennaio 2007 e dal Febbraio 2007 controlla H24 per trecentosessantacinque giorni all'anno la piana di Camaione.

In questi anni di osservazione sono stati ottenuti interessanti risultati dall'analisi del campo micro-deformativo che interessa la piana, risultati che hanno permesso di evidenziare i particolari comportamenti che si manifestano in maniera diversa nelle varie parti della conca di Camaione.

Visionando, confrontando e verificando un certo grado di correlazione tra le diverse immagini inter-

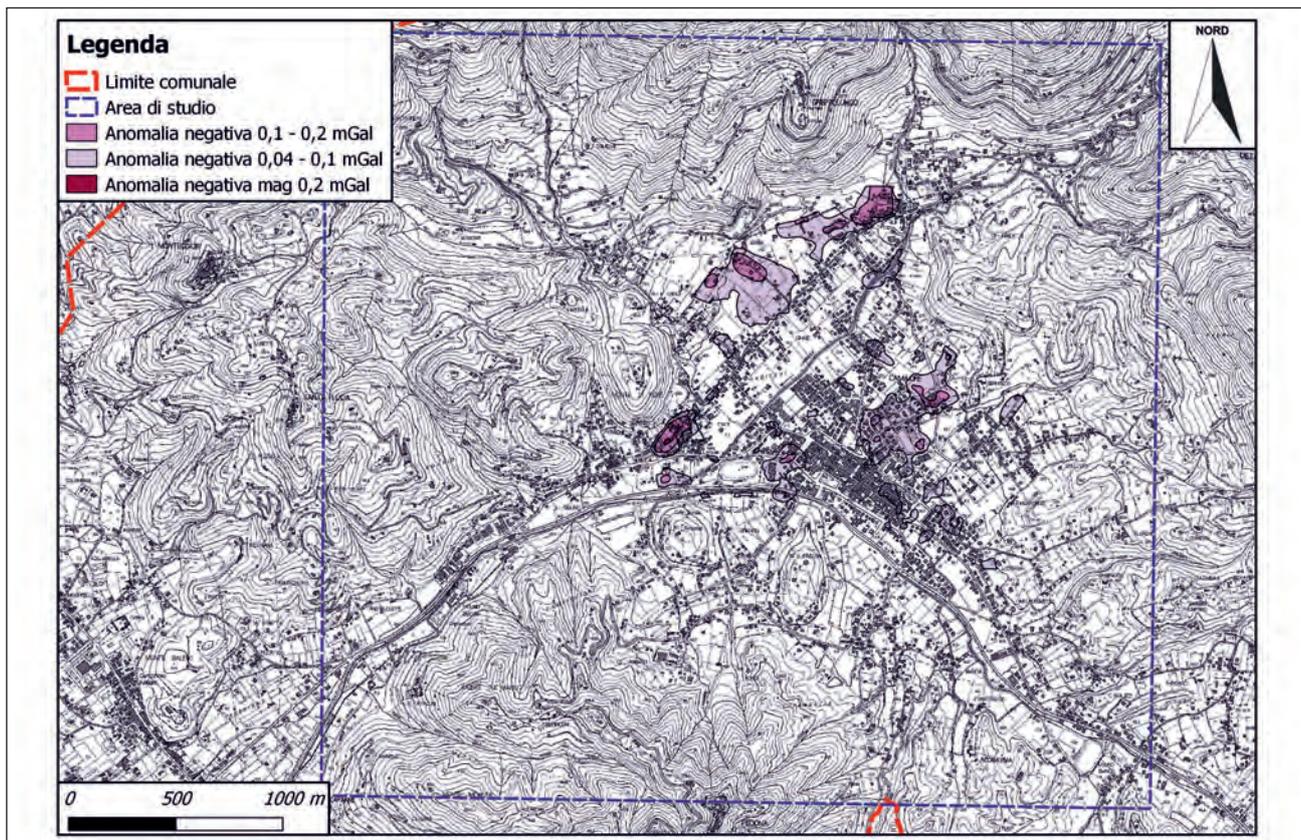


Fig. 8 - Anomalie micro-gravimetriche negative.
 - Abnormal micro-gravimetric negative.

ferometriche ottenute dai report progressivi della società Ellegi, si sono prese in considerazione le aree che presentano abbassamenti assoluti, quindi con andamenti negativi costanti e unidirezionali.

Lo scenario considerato è rappresentato dal confronto tra immagine interferometrica iniziale, risalente al Febbraio 2007, mese dal quale ha avuto inizio il monitoraggio continuo, e l'immagine interferometrica del Settembre 2013.

Le aree messe in evidenza all'interno dell'area di studio nella figura 9, rappresentano zone che nel periodo sopra considerato si sono sostanzialmente abbassate di un'entità compresa tra 3 e 4 cm; non si sono considerati i *pixel* isolati ma gli addensamenti o nuclei degli stessi aventi un analogo abbassamento areale dell'ordine dei 20-40 m².

Tab. 7 - Classi relative alle entità delle deformazioni del suolo.
 - Classes related to the extent of the ground deformation.

7	Micro-deformazioni del suolo	3	entità spostamento (cm)		
			<i>trend</i> sinuoidale		assoluto
			da 3 a -3	da -3 a -6	>8
			0	3	9

Nel caso delle micro-deformazioni del suolo, sono stati attribuiti valori di rilevanza crescenti a seconda che il differenziale assoluto degli spostamenti verticali sia inferiore a o compreso tra 3 e 6 cm o sia di tipo sinusoidale, ovvero con abbassamenti e recuperi nell'arco delle stagioni; nel caso in cui il trend degli abbassamenti sia unidirezionale, ovvero non ci siano che irrilevanti recuperi ed il valore assoluto superi i 9 cm si ha il massimo valore, pari a 9. Il peso del fattore micro-deformazioni è alto, ma non massimo, ed è pari a 3.

5. - ELABORAZIONE DELLA CARTA DI SUCCETTIBILITÀ DA SINKHOLE

L'analisi spaziale in ambito GIS di tutti i fattori sovrapposti ha permesso di risalire ad una zonazione basata su fasce di punteggi.

Tutto ciò ad esclusione della zona oggetto del collasso del 1995 in quanto tale area è stata perimetrata a parte ed inserita nella classe delle "Aree a pericolosità geomorfologica (da *sinkhole*) molto elevata", secondo quanto definito nell'art. 12 delle Norme di Piano del P.A.I., ove si legge:

Aree a pericolosità geomorfologica molto elevata (P.F.M.E.): aree interessate da fenomeni...[omissis]...

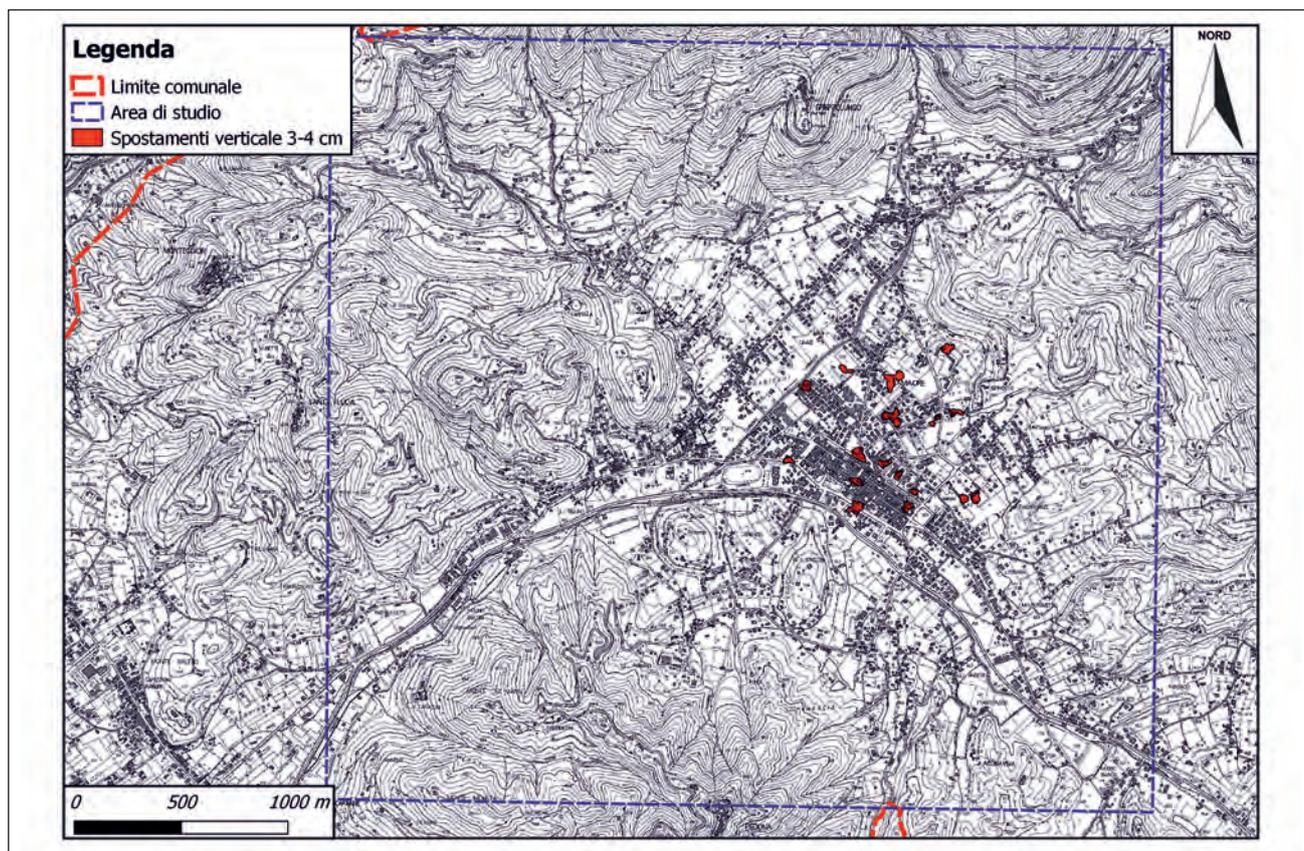


Fig. 9 - Distribuzione delle micro-deformazioni del suolo.
- Distribution of ground deformation.

attivi individuate e perimetrare ai sensi degli atti di indirizzo e coordinamento emanati a seguito della Legge 183/89 e del D.L. 180/1998. All'art. 24 si specifica ulteriormente: "Sono da considerare come aree a pericolosità geomorfologica molto elevata tutte le aree...[omissis]... che possono essere interessate da accertate voragini per fenomeni carsici".

Nel caso specifico, l'unica area che si può considerare interessata da fenomeno attivo ed accertato è quella dove si è verificato il *sinkhole* nel 1995. Tale perimetrazione era stata proposta anche nello studio relativo ad una Variante al R.U. (BUCHIGNANI, 2008).

Ad una più attenta osservazione della definizione delle classi di pericolosità in ordine ai principi del P.A.I., si osserva che, mentre per la classe PFME esiste una specifica menzione all'art. 24, comma c) in merito alle "voragini", per la classe PFE appare molto forzata la corretta corrispondenza tra pericolosità da frana e pericolosità da *sinkhole*. L'unico fenomeno che può avvicinarsi al problema in essere a Camaiore è la subsidenza; ma tale fenomeno, inteso nel suo vero significato, ossia un abbassamento del suolo legato alla compressibilità/costipazione dei sedimenti ed all'abbassamento della piezometria, è assai diverso dal fenomeno *sinkhole* e di tutt'altre origini. Per questo, nella stesura dell'aggiornamento, si

è ritenuto più corretto e pertinente alla classificazione del P.A.I., individuare l'area da considerare in P.F.M.E., ovvero l'area interessata da accertata voragine per fenomeni carsici.

Sulla rimanente porzione di conca valliva camaiorese, interessata dagli studi e dal monitoraggio H24 ad oggi completati, si è cercato di proporre una zonazione tematica distinguendo aree a diversa predisposizione al crollo ipogeo, ovvero di mettere in evidenza i vari gradi di potenziale pericolosità da *sinkhole*.

Il risultato è rappresentato dalla nuova *Carta della predisposizione al dissesto sinkhole*, laddove si rilevano una classe di pericolosità molto elevata (PSME, assimilabile alla classe PFME) come da normativa P.A.I., ed aree dove si possono ulteriormente riconoscere ambiti di potenziale suscettibilità al dissesto, crescenti con il valore ottenuto. Tale mappa non ha assolutamente pretese di essere definitiva ma, al contrario, in continuo aggiornamento ed evoluzione conoscitiva; ulteriori indagini e prospezioni geofisiche e geognostiche che verranno eventualmente svolte sul territorio potranno migliorare ancora il quadro delle conoscenze, consentendo, nel tempo, di perfezionare la zonazione tematica, che rappresenta quindi un documento in continuo adeguamento secondo la logica del P.A.I.

6. - SCHEMA DELLE NORME TECNICHE DI ATTUAZIONE

La zonazione della piana camaiorese in funzione della potenziale predisposizione al dissesto *sinkhole* appare uno strumento fondamentale in sede di programmazione urbanistica, laddove è possibile localizzare le previsioni di piano tenendo conto del grado di fragilità e/o di pericolosità del territorio comunale stesso.

Di seguito si riportano i criteri in base ai quali è stata predisposta tale zonazione nell'ambito delle aree maggiormente indagate con varie metodologie. E' opportuno infatti ricordare che alcune zone della conca camaiorese non hanno una adeguata copertura di misure micro-gravimetriche o geoelettriche o geognostiche in quanto ricadenti in aree a verde e comunque a bassa densità abitativa o prive di particolari previsioni urbanistiche, quindi non investigate in dettaglio. Con i finanziamenti ricevuti si sono infatti privilegiate quelle zone densamente antropizzate ovvero i nuclei abitati consolidati.

Al di fuori dell'area ricadente nella PSME si riconoscono comunque altre zone che possono essere suscettibili a diversi gradi di potenziale rischio di crollo ipogeo. La figura 10 individua vari gradi di propensione al rischio in funzione del punteggio ot-

tenuto con il confronto e la sovrapposizione dei vari fattori predisponenti o scatenanti il fenomeno, utilizzando il metodo di analisi spaziale. La sommatoria dei punteggi ottenuta varia da un minimo di 2 ad un massimo di 57. Le due classi (**M** e **A** ovvero **Media** ed **Alta** propensione al rischio di crollo ipogeo) inglobano le aree con i punteggi maggiori e contraddistinguono quelle nelle quali la somma dei punteggi ottenuta è superiore alla media di punti 20, valore che può essere considerato rappresentativo del limite di sicurezza, valutato su base delle esperienze maturate e ponderate e ritenuto di accettabile cautela ai fini di una ragionevole salvaguardia dell'incolumità pubblica. Tale valore corrisponde alla somma di più fattori a basso punteggio, oppure alla somma di pochi fattori a punteggio elevato. I casi limite che potrebbero da soli fornire il valore 20 sono rappresentati da aree con anomalie micro-gravimetriche maggiori di 0,2 mGal (indice di grave carenza di massa: 20 punti) oppure aree con abbassamenti progressivi maggiori di 9 cm (limite critico di deformazione individuato mediante interferometria da satellite nell'evento del 1995: punti 27). La classe **A** è individuata da quelle aree che hanno raggiunto un punteggio complessivo maggiore o uguale a 35, che rappresenta sostanzialmente il valore minimo raggiunto con la somma dei vari fattori nell'area PSME.

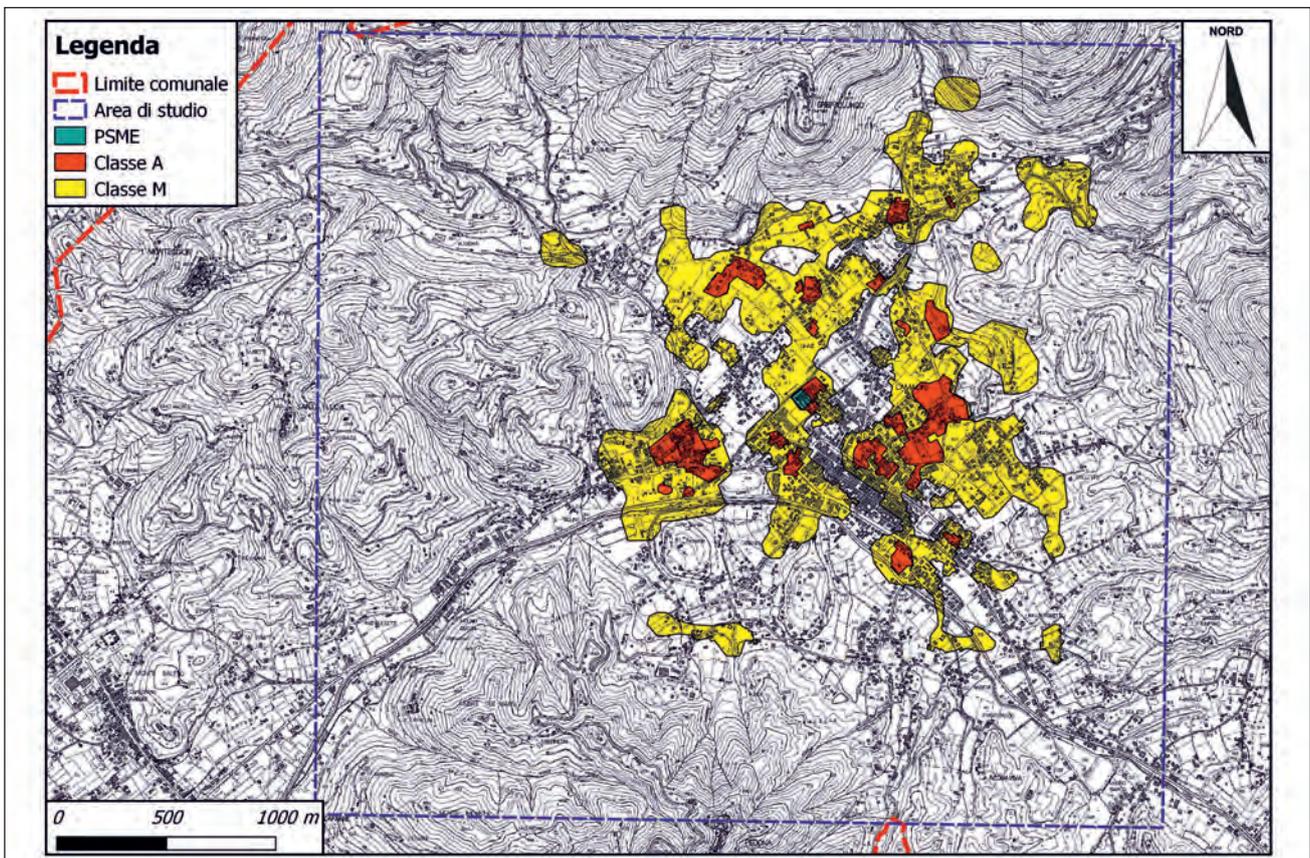


Fig. 10 - Carta della suscettibilità al dissesto sinkhole. - *Map of sinkhole susceptibility.*

Un dettaglio in scala 1:10000 della carta di suscettibilità al dissesto sinkhole è illustrato in figura 11.

6.1. - NORME TECNICHE

Nell'area classificata come PSME gli interventi di tipo edilizio sono inammissibili.

Per la nuova pianificazione urbanistica, tutte le classi individuate possono essere regolamentate come da tabella 8.

Nel caso in cui eventuali interventi edificatori non siano diversamente localizzabili oppure nel caso di interventi previsti dai vigenti strumenti di governo del territorio alla data di entrata in vigore del presente atto, le sottoclassi **A** e **M** possono essere regolamentate come riportato di seguito. Si fa osservare che la distinzione tra la classe **Alta** e la classe **Media** si basa sostanzialmente sulla differenziazione delle indagini, ed in particolare: nella classe **A** sono richiesti tutti gli approfondimenti d'indagine; nella classe **M** le indagini dovranno essere condotte progressivamente, valutando la situazione locale per gradi.

A Pianificazione territoriale: gli atti di pianificazione urbanistica previsti dal R.U. (Variante, Piano attuativo, Piano di recupero) che ricadano in aree a bassa densità di punti di controllo micro-gravi-

Tab. 8 – Classi di suscettibilità al dissesto sinkhole.
- *Classes of susceptibility to collapse sinkhole.*

PSME	Non sono ammessi interventi edificatori. Sono ammesse solo la destinazione a verde e ad attrezzature per usi tecnologici finalizzati al controllo remoto del suolo e sottosuolo.
Classe A	Nelle aree ricadenti in questa classe le previsioni di nuove edificazioni pubbliche o private sono fortemente condizionate; non è ammissibile la previsione di edifici pubblici strategici e sensibili, sempre che non siano diversamente localizzabili. Le nuove destinazioni possibili sono a verde pubblico e privato e a tutte le altre destinazioni che non prevedano incrementi di carico urbanistico (ovvero aumento di nuclei familiari o aumento in genere di insediamenti dove si attenda la presenza costante e significativa di persone).
Classe M	Le previsioni di nuove edificazioni pubbliche o private sono ammissibili ma condizionate alla esecuzione di specifiche indagini di approfondimento. Nel caso in cui tali indagini facessero rilevare stati di scarso addensamento del sottosuolo, dovranno essere effettuate indagini geognostiche profonde, tali da intercettare e riconoscere il bed-rock geologico. Nel caso in cui le indagini individuino situazioni di vuoti o stati di addensamento bassi e molto bassi nell'ambito della roccia e/o della porzione alluvionale, le previsioni urbanistico/edilizie non saranno realizzabili.

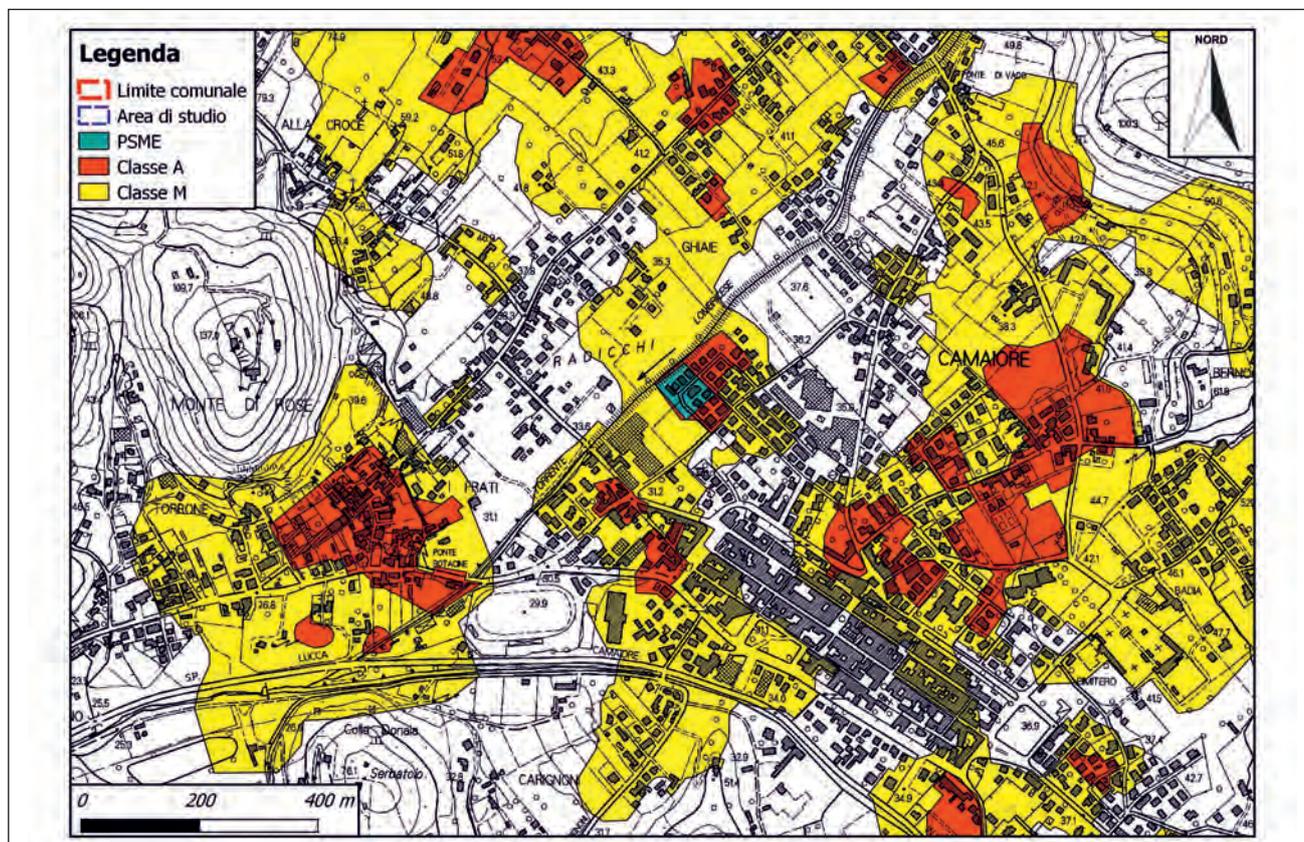


Fig. 11 - Particolare della carta di suscettibilità.
- *Detailed map of sinkhole susceptibility.*

metrici, dovranno essere preventivamente studiati mediante specifiche indagini (microgravimetriche, sismiche e geognostiche profonde) che consentano la valutazione del rischio effettivo.

Nelle aree già investigate con densità di misure microgravimetriche adeguata, gli atti di pianificazione urbanistica dovranno includere una idonea valutazione del rischio che dovrà basarsi su specifiche indagini sismiche e geognostiche profonde oltre che sull'analisi dei documenti esistenti. La densità di punti di indagine geognostica e la tipologia delle indagini sismiche sarà conseguenza dell'importanza dell'intervento previsto; nel caso di interventi strategici dovrà essere messa in atto una indagine con elevata frequenza di punti di esplorazione. Nel caso in cui le indagini individuino situazioni di vuoti o stati di addensamento bassi nell'ambito della roccia e/o della porzione alluvionale, non saranno possibili interventi edificatori.

Edilizia privata: gli interventi di manutenzione, di restauro e ristrutturazione edilizia, con esclusione di ampliamenti e adeguamenti funzionali sono consentiti senza alcuna indagine di approfondimento.

Qualsiasi nuova edificazione e trasformazione fisica di edifici esistenti o eventuale aumento di carico urbanistico sono subordinati alla preliminare esecuzione di approfondite indagini di dettaglio che potranno essere sismiche e geognostiche profonde nelle zone ad alta densità di rilievi microgravimetrici. Saranno necessarie indagini microgravimetriche, sismiche e geognostiche profonde nelle zone di bassa densità di rilievi. Tali indagini dovranno escludere la presenza di elementi predisponenti al dissesto e consentire la valutazione ponderata del rischio effettivo. Nel caso in cui le indagini individuino invece situazioni di vuoti o stati di addensamento bassi o molto bassi nell'ambito della roccia e/o della porzione alluvionale, non saranno possibili interventi edificatori.

Pozzi: progetti di nuovi emungimenti di acque sotterranee approvabili soltanto se corredati da valutazioni sulla compatibilità del prelievo basate sulla verifica degli effetti a lungo termine (in condizioni di magra della falda), tenuto conto delle condizioni locali stratigrafiche e di soggiacenza piezometrica in fase di minima ricarica. Le caratteristiche degli elementi filtranti dei pozzi dovranno avere dimensioni tali da non consentire l'aspirazione e l'asportazione di materiale fine.

M *Pianificazione territoriale:* qualsiasi atto di pianificazione urbanistica previsti dal vigente R.U. (Variante, Piano attuativo, Piano di recupero) che ricada in aree a bassa densità di punti di controllo microgravimetrici dovrà essere preventivamente indagato mediante specifiche indagini microgravimetriche e, nel caso dovessero essere rilevate anomalie superiori a 0.06 mGal, dovranno essere previste indagini sismiche e, permanendo il dubbio, proseguire con indagini geognostiche

profonde; tali indagini devono consentire la valutazione del rischio effettivo, escludendo la presenza di stati di addensamento anomali nel sottosuolo.

Nelle aree già investigate con densità di misure microgravimetriche adeguata, gli atti di pianificazione urbanistica dovranno includere una idonea valutazione del rischio sulla base di ulteriori indagini sismiche e, in caso di permanenza di dubbio, anche di indagini geognostiche profonde che escludano la presenza di cavità/vuoti o stati di addensamento bassi nell'ambito della roccia e/o della porzione alluvionale.

Le valutazioni relative a interventi di tipo strategico dovranno sempre contenere indagini sismiche e geognostiche profonde, commisurate all'estensione dell'intervento stesso.

Edilizia privata: sugli edifici esistenti sono consentiti gli interventi di manutenzione, di restauro e ristrutturazione edilizia, con esclusione di ampliamenti e adeguamenti funzionali. Per questi interventi non è necessaria alcuna valutazione tecnica sul rischio *sinkhole*.

Interventi di nuova edificazione ed ampliamenti sono consentiti soltanto se corredati di approfondimenti mediante una valutazione adeguata del rischio che si dovrà basare, nel caso di alta densità di rilievi microgravimetrici, su indagini integrative sismiche o geognostiche profonde che escludano situazioni di scarso addensamento del sottosuolo. Laddove la densità di rilievi microgravimetrici è bassa, dovrà essere integrata con specifiche indagini microgravimetriche e, nel caso dovessero essere rilevate anomalie superiori a 0.06 mGal, dovranno essere previste indagini sismiche e, permanendo il dubbio, proseguire con indagini geognostiche profonde che consentano la valutazione del rischio effettivo ed escludano situazioni di scarso addensamento del sottosuolo.

Sia nel caso di pianificazione territoriale, sia nel caso di interventi di edilizia privata, se le indagini dovessero individuare situazioni di vuoti o stati di addensamento bassi nell'ambito della roccia e/o della porzione alluvionale, non saranno comunque possibili interventi edificatori.

Pozzi: progetti di nuovi emungimenti di acque sotterranee approvabili soltanto se corredati da valutazioni sulla compatibilità del prelievo basate sulla verifica degli effetti a lungo termine (in condizioni di magra della falda), tenuto conto delle condizioni stratigrafiche locali e di soggiacenza piezometrica in fase di minima ricarica. Le caratteristiche degli elementi filtranti dei pozzi dovranno avere dimensioni tali da non consentire l'aspirazione e l'asportazione di materiale fine.

Fanno eccezione alle presenti regolamentazioni le pertinenze, come definite dal R.U. comunale. Tali interventi potranno essere realizzati in aree **A**

e M a condizione che non sia per essi prevista la presenza costante e significativa di persone; per tali pertinenze rimarrà il vincolo di destinazione d'uso, che non potrà variare una volta realizzate.

BIBLIOGRAFIA

- AUTORITÀ DI BACINO DELLA PUGLIA (2006) – *Atto di indirizzo per la messa in sicurezza dei territori a rischio cavità sotterranee*.
- AUTORITÀ DI BACINO TOSCANA NORD (2010) – *Piano stralcio Assetto Idrogeologico: Relazione*. Piano degli interventi- Norme di Piano.
- BORGATTI L., BIANCHI E., BONAGA G., GOTTARDI G., LANDUZZI A., MARCHI G., MASTRANGELO A., RODRIGO S., VICO G. & VITTIARI L. (2004) - *Fenomeni di sprofondamento del piano di campagna in Pianura Padana: il ruolo del contesto geologico, geomorfologico e geotecnico*. Atti del Convegno: “*Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato*”.
- BUCHIGNANI V. & NOLLEDI G. (1996) – *Indagini geologiche di supporto al Piano Strutturale comunale*. Relazione inedita per il Comune di Camaione.
- BUCHIGNANI V. & CHINES C. (1996) – *Indagini geologico-tecniche sull'area della voragine verificatasi il 15/10/95 in loc. “Le Funi”, Camaione capoluogo (LU)*. Relazione inedita per il Comune di Camaione.
- BUCHIGNANI V., D'AMATO AVANZI G., GIANNECCHINI R. & PUCCINELLI A. (2007) - *Evaporite karst and sinkholes: a synthesis on the case of Camaione (Italy)*. *Environ. Geol.* (2008) 53:1037–1044.
- BUCHIGNANI V. (2008) - *Variante di assestamento del R.U. finalizzata alla realizzazione della prima casa, alla razionalizzazione del patrimonio alberghiero, all'adeguamento della normativa ed all'attuazione delle previsioni contenute nel vigente strumento di governo del territorio*. Lavoro commissionato da Comune di Camaione, inedito.
- BUCHIGNANI V., LEVA D., RIVOLTA C., DI FILIPPO M., LOMBARDI S. & RIZZO S. (2010) - *Monitoraggio integrato in aree a rischio sinkhole: l'esempio di Camaione in Toscana*. Convegno di Altamura (BA).
- BUCHIGNANI V., BINDA ROSSETTI I., LEVA D. & RIVOLTA C. (2011) - *Monitoraggio interferometrico con radar da terra per il monitoraggio di area a rischio sinkhole*. L'esempio di Camaione, Geo-Italia, VIII Forum di Scienze della Terra, Torino.
- CARAMANNA G., NISIO S. & VITA L. (2004). *Fenomeni di annegamento dei sinkholes: casi di studio su alcuni laghetti di origine incerta*. In: *Proceedings of the Workshop ‘State of the art on the Study of Sinkholes, and the role of National and Local Authorities in the Management of the Territory’*, Rome, 20–21 May 2004, 229–248. APAT, Rome.
- CARMIGNANI L. & KLIGFIELD (1990) - *Crustal extension in the northern Apennines: The transition from compression to extension in the Alpi Apuane Core Complex, Tectonics*. **9**, Issue 6, pp. 1275–1303.
- CIOTOLI G., DI FILIPPO M., NISIO S. & ROMAGNOLI C. (2001) - *La Piana di S. Vittorino: dati preliminari sugli studi geologici, geomorfologici, geofisici e geochimici*. *Memorie della Società Geologica Italiana*, **56**: 297-308.
- CIVITA M. & DE MAIO M. (1997) – *SINTACS. Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento*. Metodologia e automazione, Pitagora (Ed.), Bologna.
- COOPER A.H. (1998) - *Subsidence hazards caused by the dissolution of Permian gypsum in England: geology, investigation and remediation*. In: MAUND J.G. & EDDLESTON M. (Eds.), *Geohazards in Engineering Geology*. Geological Society, Engineering Special Publications, 15, 265- 275.
- CONTI P. & LAZZAROTTO A. (2004) - *Geology of Tuscany: evolution of the state-of-knowledge presented by geological maps and the new geological map of Tuscany, 1:250,000 scale*. In: MORINI D. & BRUNI P. (Eds.), *The ‘Regione Toscana’ project of geological mapping*, Spec. vol for the 32nd IGC, pp 25–50
- CONTI P., CARMIGNANI L., GIGLIA G., MECCHERI M. & FANTOZZI P.L. (2004) - *Evolution of geological interpretations in the Alpi Apuane metamorphic complex, and their relevance for geology of the Northern Apennines*. In: MORINI D. & BRUNI P. (Eds.), *The ‘Regione Toscana’ project of geological mapping*, Spec. vol for the 32nd IGC, pp 241–262.
- D'AMATO AVANZI G., GIANNECCHINI R., PUCCINELLI A. & VERANI M. (2004) - *Assetto geologico e pericolosità da sinkhole in aree urbane: il caso di Camaione (Toscana, Italia)*. In: APAT (Ed.), *Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkhole e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio*.
- DEL PRETE S., GIULIVO I. & SANTO A. (2008) - *Nuove ipotesi sulla formazione dei piping sinkhole in aree alluvionali: il caso della Piana di Forino (Avellino, Campania)*. *Il Quaternario*, 21, 395-408.
- DI FILIPPO M. (2010) - *Fenomeno “voragine” in località Le Funi*. Estensione delle indagini geologiche finalizzate all'individuazione di eventuali aree a rischio analogo (lavoro inedito).
- ISPRA - *Atti 1° Convegno Sinkhole*. Roma, 20-21 maggio 2004.
- ISPRA - *Atti 2° Convegno Sinkhole*. Roma, 3-4 dicembre 2009.
- LIPERI L., MELONI F., TONELLI V. & ZIZZARI P. (2004) - *Catálogo in progress dei sinkhole del Lazio*. Revisione ed implementazione del catalogo. Approccio ecosistemico per la valorizzazione dei siti. Normativa e pianificazione territoriale, Atti del Convegno: “*Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato*”.
- LOMBARDI S. (1996) - *Indagini geochimiche sulla piana di Camaione in ordine al rischio sinkhole*. (Lavoro inedito)
- MELONI F. (2004) - *Terremoti e sprofondamenti*. Similitudine dei percorsi di ricerca storica, tra casi di sostituzione, effetti nel suolo e liquefazioni, Atti del Convegno: “*Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato*”.
- NISIO S. (2003) - *I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia Centrale*. *Il Quaternario*, 16, 121–132.
- NISIO S. & SALVATI R. (2004) - *Fenomeni di sprofondamento catastrofico*. Proposta di classificazione applicata alla casistica italiana. Atti del Convegno: “*Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkhole e ruolo delle Amministrazioni statali e locali nel governo del territorio*”, 20-21 maggio 2004, APAT, Roma, 573-583.
- NISIO S., GRACIOTTI R. & VITA L. (2004) - *I fenomeni di sinkhole in Italia: terminologia, meccanismi genetici e problematiche aperte*. Atti Conv.: “*Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkhole e ruolo delle Amministrazioni statali e locali nel governo del territorio*”, 20-21 maggio 2004, APAT, Roma, 557-571.
- NISIO S. & SCAPOLA F. (2005) – *Individuazione di aree a rischio sinkhole: nuovi casi nel Lazio meridionale*. *Il quaternario, Italian journal of Quaternary Sciences*, 18 (2), 223-239.
- NISIO S. (2008) - *I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane*. *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.*, **85**, 475 pp.
- PARISE M. & FLOREA L.J. (2008) - *I sinkholes nella letteratura scientifica internazionale: una breve rassegna, con particolare riferimento agli Stati Uniti d'America*. *Mem. Descr. Carta. Geol. d'It.*, **85**, 427–450.
- PRANZINI G. & BUCHIGNANI V. (2004) - *Bilancio Idrogeologico della Conca di Camaione (Lucca), in relazione alla voragine del 1995*. Pubblicazione con i fondi MURST, resp. G. Pranzini.
- RIZZO S. (2003) - *Indagini geofisiche finalizzate al completamento del quadro conoscitivo della situazione strutturale profonda ed all'individuazione di aree a rischio di crollo*. (Lavoro inedito).
- TEOLI P., CAPELLI G., & MAZZA R. (2004) - *Metodologie per la definizione della pericolosità da sinkhole nella Piana Pontina*. Atti del Convegno: “*Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato*”.
- WALTHAM T., BELL F. & CULSHAW M. (2005) - *Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Springer, 382 pp., 2005.
- WALTHAM T. & FOOKES P.G. (2003) - *Engineering classification of karst with respect to the role and influence of caves*. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 36, 101–118.