

Fenomeni di sprofondamento nella Piana di Enemonzo (UD)

Sinkhole phenomena in the Tagliamento alluvial Plain (UD)

ZINI L. (*), CALLIGARIS C. (*), DEVOTO S. (*), ZAVAGNO E. (*),
FORTE E. (*), BOCCALI C. (*), PETRONIO L. (**),
CUCCHI F. (*)

RIASSUNTO - Le rocce carbonatiche rappresentano circa il 24% dei 7.858 chilometri quadrati che compongono il Friuli Venezia Giulia, al contrario le rocce evaporitiche non superano l'1%. La maggior parte di queste rocce sono ampiamente carsificate e sono soggette a numerosi fenomeni di sprofondamento. I *sinkholes* sono diffusi in tutte quelle aree in cui affiorano o subaffiorano rocce evaporitiche, e provocano talora gravi danni alle infrastrutture quali strade ed abitazioni. Già da fine Ottocento numerosi *sinkholes* sono stati identificati nella valle del Tagliamento, dove le rocce evaporitiche sono ampiamente diffuse. In particolare una delle situazioni più problematiche è rappresentata dal Comune di Enemonzo, dove già dallo scorso secolo si sono verificati diversi fenomeni di subsidenza causando gravi danni a diversi edifici.

La frazione di Quinis, sita in Comune di Enemonzo, dove sono stati registrati negli ultimi anni i fenomeni più importanti, è stata studiata tramite un approccio di tipo multidisciplinare che ha utilizzato diverse tecniche investigative e analitiche, dal rilevamento geologico tradizionale, alle analisi idrogeologiche, passando per le tecniche geofisiche.

L'integrazione dei risultati ha permesso di ricostruire un modello concettuale del substrato roccioso e la potenza dei depositi quaternari sovrastanti. Le indagini idrogeologiche, strumento cruciale per lo studio della variazione dei livelli della falda freatica, hanno aiutato a comprendere la genesi e l'evoluzione dei fenomeni di sprofondamento. L'approccio multidisciplinare adottato e le nozioni assimilate possono essere esportati in altre aree di studio, soggette a fenomeni di subsidenza analoghi.

PAROLE CHIAVE: sinkholes, evaporiti, idrogeologia, Regione Friuli Venezia Giulia

ABSTRACT - In the 7,858 square kilometers composing the Friuli Venezia Giulia Region, limestones and dolostones represent approximately 24% of the area, whereas evaporites do not exceed 1%. Majority of these rocks are widely karstified and display several sinkhole phenomena. In all those areas, where evaporitic rocks outcrop or are capped by quaternary deposits or other rock formations, sinkholes are widespread and can cause damages to the infrastructures. Since the early nineties, hundreds of the above-mentioned phenomena have been recognized in the Tagliamento Valley. In particular, one of the most hazardous situation is represented by Quinis Village, a hamlet of Enemonzo Municipality, where in the last century several phenomena occurred causing damages to various buildings.

In this framework, a multidisciplinary approach was applied at Quinis. The approach used integrates geomorphological activities, hydrogeological and geophysical analyses and is recognized worldwide as a valid technique to study this type of phenomena. Geological and geomorphological surveys jointly with the stratigraphic data and geophysical outputs, derived by seismic, ERT and GPR techniques, permitted to investigate the site and to reconstruct the bedrock and the overlying Quaternary deposits. Hydrogeological investigations, known to be a powerful tool to define ground-water table variation, helped in understanding the genesis and the evolution of the phenomena. The results of the in-depth knowledge in the Quinis village can be adopted to other areas affected by similar phenomena.

KEY WORDS: sinkholes, evaporites, hydrogeology, Friuli Venezia Giulia Region

(*)Dipartimento di Matematica e Geoscienze – University of Trieste

(**) Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale Università degli Studi di Trieste – OGS Trieste

1. - INTRODUZIONE

Il termine *sinkhole* viene utilizzato dai geomorfologi per indicare una depressione naturale di forma circolare e legata alla presenza di un sistema, talora complesso, di drenaggio sotterraneo. Tali forme possono raggiungere profondità di decine di metri ed estensioni superiori alle centinaia. La scuola ingegneristica americana (BECK, 2005; WALTHAM *et alii*, 2005) estende il termine *sinkhole* anche alle depressioni di origine antropica, tralasciando la naturalità del fenomeno e concentrandosi maggiormente sull'aspetto di ripristino.

Fenomeni di subsidenza legati alla presenza di rocce evaporitiche sono ampiamente diffusi e storicamente segnalati in Europa, come per esempio nel settore centrale e settentrionale dell'Inghilterra (COOPER, 2008), in Lituania (TAMISKAS & MARCINKEVICIUS, 2002), nella Spagna nord-orientale (GUTIÉRREZ, 1996; GUTIÉRREZ & COOPER, 2002; GUERRERO *et alii*, 2004; GUTIÉRREZ *et alii*, 2008a), in Albania (PARISE *et alii*, 2004; PARISE *et alii*, 2008).

Come riportato da NISIO (2008) e da CARAMANNA *et alii* (2008), anche in Italia sono rinvenibili tali tipologie di fenomeni, presenti perlopiù in Sicilia, in Alto Adige, in Puglia, in Friuli Venezia Giulia e in tutte quelle aree in cui affiorano o subaffiorano litologie evaporitiche.

I *sinkholes* presenti nel settore nord-occidentale del Friuli Venezia Giulia sono legati dalla presenza di evaporiti originatesi per effetto degli episodi deposizionali avvenuti rispettivamente alla fine del Permiano (Formazione a Bellerophon) e nel Carnico (Formazione di Raibl) (VENTURINI, 2009).

La specificità di tali fenomeni in questo contesto è legata innanzitutto allo spessore (in media alcune centinaia di metri) e all'estensione dei livelli evaporitici, nonché al fatto che tali rocce sono spesso posizionate a poche decine di metri di profondità, al di sotto di altre unità litostratigrafiche quali la Formazione di Werfen, i Conglomerati del Tagliamento o le alluvioni quaternarie. Laddove affiorano in superficie, invece, sono tipicamente effetto della tettonica compressiva alpina, durante la quale hanno svolto il ruolo di lubrificante tettonico, come testimoniato dalle tipiche giaciture rovesciate.

Nell'Alta Valle del Tagliamento i primi studi in merito ai fenomeni di *sinkhole* risalgono alla fine del 1800 e riguardano eventi avvenuti nei depositi alluvionali e descritti da MARINELLI (1897) e successivamente da GORTANI (1965).

Quest'ultimo lavoro descrive in particolare un episodio di recrudescenza di tale fenomeno avvenuto negli anni '60, in seguito alla sottrazione delle acque dovuta alla realizzazione di sbarramenti a scopo idroelettrico, lungo gli affluenti del Tagliamento. La perdita di carico idrostatico fece sì che

si verificassero degli sprofondamenti improvvisi profondi più di 20 m e di diametro fino a 30 m.

Negli ultimi anni, anche in seguito all'intensificarsi di eventi meteorologici caratterizzati da precipitazioni sempre più brevi ed intense, si è avuta una riacutizzazione nell'accadimento dei fenomeni di sprofondamento, in particolare in località Quinis. L'elaborazione dei dati climatici registrati dalla stazione meteorologica di Enemonzo per il periodo 1995-2013 evidenzia che non di rado il quantitativo di precipitazione annua supera i 2500 mm, come accaduto nel 1996, 2000 e 2002. Le precipitazioni sono molto abbondanti nei mesi autunnali e a fine primavera, al contrario durante i mesi di Febbraio e Gennaio non si superano in media i 100 mm.

In un'area così complessa, da un punto di vista geologico-strutturale, è stato adottato un approccio multidisciplinare per l'identificazione e la caratterizzazione dei fenomeni, coinvolgendo diversi settori delle scienze della terra, dalla geologia in senso stretto, alla geomorfologia, passando per la geofisica, la geochemica e non da ultima l'idrogeologia. I risultati hanno permesso di ricostruire un modello idrogeologico del sottosuolo e di meglio comprendere la genesi e le caratteristiche dei *sinkholes*.

2. - AREA DI STUDIO

L'area di studio è ubicata nel settore nord-occidentale del Friuli Venezia Giulia, lungo l'Alta Valle del fiume Tagliamento (fig. 1) in località Quinis (Comune di Enemonzo).

Nella zona la genesi e l'evoluzione dei fenomeni di sprofondamento, risultano fortemente influenzati dalla geologia e dall'assetto strutturale.

La valle è condizionata da una serie di linee tettoniche di importanza regionale a direzione prevalente E-W e sudvergenti, tra cui è possibile ricordare la Linea dell'Alto Tagliamento che porta unità stratigrafiche medio triassiche a sovrascorrere su quelle tardo triassiche. Tale struttura, pur essendo ben nota in letteratura (VAI *et alii*, 2002; VENTURINI, 2009), nell'area in esame non è mai esposta. Retaggio della seconda fase dell'orogenesi Neoalpina, la linea è impostata in corrispondenza delle litologie evaporitiche subaffioranti, che nell'area hanno costituito un livello di scollamento per i litotipi meno plastici. Le unità litostratigrafiche riconosciute nella zona oggetto del presente elaborato sono le seguenti: la Formazione di Raibl (Carnico Superiore), la Formazione di Monticello (Carnico Superiore – Norico Inferiore), i Conglomerati fluviali e deltizi (Pleistocene), il Till di alloggiamento o più comunemente la morena di fondo (Pleistocene Superiore), le ghiaie e le sabbie fluviali

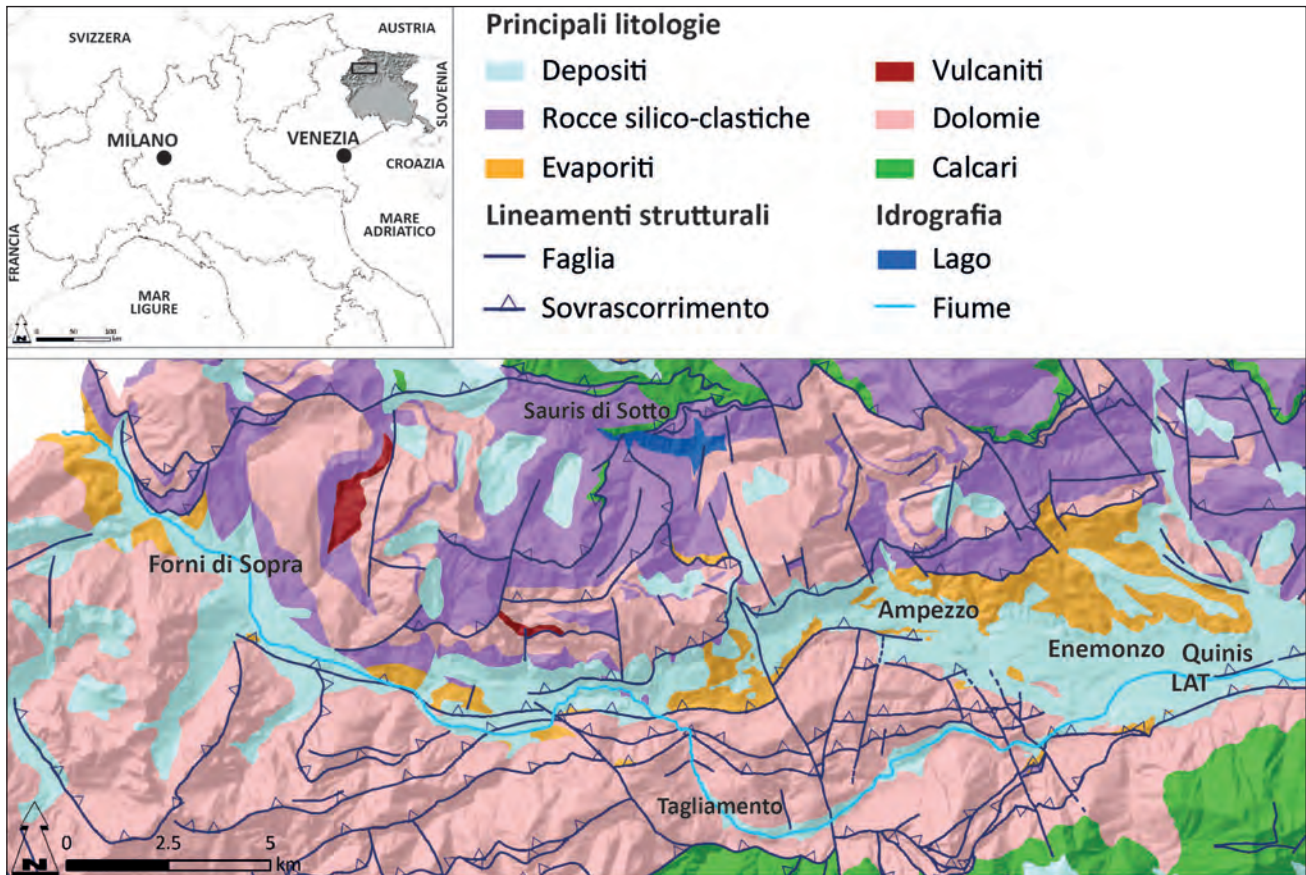


Fig. 1 - Carta geologica semplificata dell'Alta Valle del Tagliamento (modificata da CARULLI, 2006).
 - Simplified geological map of the High Valley of Tagliamento (modified after CARULLI, 2006).

oloceniche, nonché i conoidi clastici attuali costituiti da prevalente detrito di versante e/o alluvionale.

La Formazione di Raibl è suddivisa in tre membri eterogenei sia dal punto di vista litologico che in termini di spessori. Il Membro a peliti rosse è costituito da siltiti e argilliti rosse. Quello che maggiormente caratterizza l'area di Quinis è il Membro a gessi e dolomie grigie, in cui si rinvencono gessi saccaroidi con impurità marnose, dolomie e breccie cariate. Le dolomie spesso appaiono cataclastiche e quasi polverizzate, presentando un'ampia eterometria. In successione stratigrafica, è presente anche il Membro a dolomie e marne caratterizzato da dolomie grigie spesso vacuolari e cataclastiche, marne ed argille varicolori. In sinistra idrografica del Fiume Tagliamento, in parte obliterata dai Conglomerati del Tagliamento e dalle alluvioni recenti, è presente la Formazione di Monticello, caratterizzata da dolomicriti grigio scure massicce e laminate. Nell'area affiora il Conglomerato del Tagliamento, un conglomerato poligenico ed eterometrico a matrice sabbiosa, corrispondente alle antiche alluvioni del Fiume. Nella parte N dell'abitato di Quinis, i membri della Formazione di Raibl sono in parte ricoperti dai depositi morenici, nei quali prevale il materiale sciolto con disposizione

interna caotica. Il fondovalle è caratterizzato dalla presenza delle alluvioni recenti (ghiaie e sabbie oloceniche poligeniche ed eterometriche, talora addensate), che vanno a costituire i terrazzi del Tagliamento. In corrispondenza dei rilievi sono rinvenibili delle estese fasce di detrito di versante, talora interdigerate con i depositi alluvionali derivati dal sovralluvionamento dei torrenti.

3. - METODI

Nell'area attorno agli abitati di Enemonzo e Quinis sono stati condotti rilievi geologici e geomorfologici delle aree interessate dai *sinkholes* finalizzati a definirne il loro sviluppo areale, la forma nonché la profondità. Innumerevoli sono le classificazioni disponibili in letteratura che identificano la tipologia di fenomeno (GUTIÉRREZ *et alii*, 2014; NISIO *et alii*, 2004; NISIO *et alii*, 2007). Per il presente lavoro, ogni fenomeno di sprofondamento è stato classificato secondo quanto proposto da GUTIÉRREZ *et alii*, (2008b) definendo i materiali coinvolti e ed il tipo di processo (fig. 2).

Allo scopo di caratterizzare il sottosuolo dal punto di vista geologico-geotecnico e di definire il ruolo delle acque al suo interno sono stati effet-

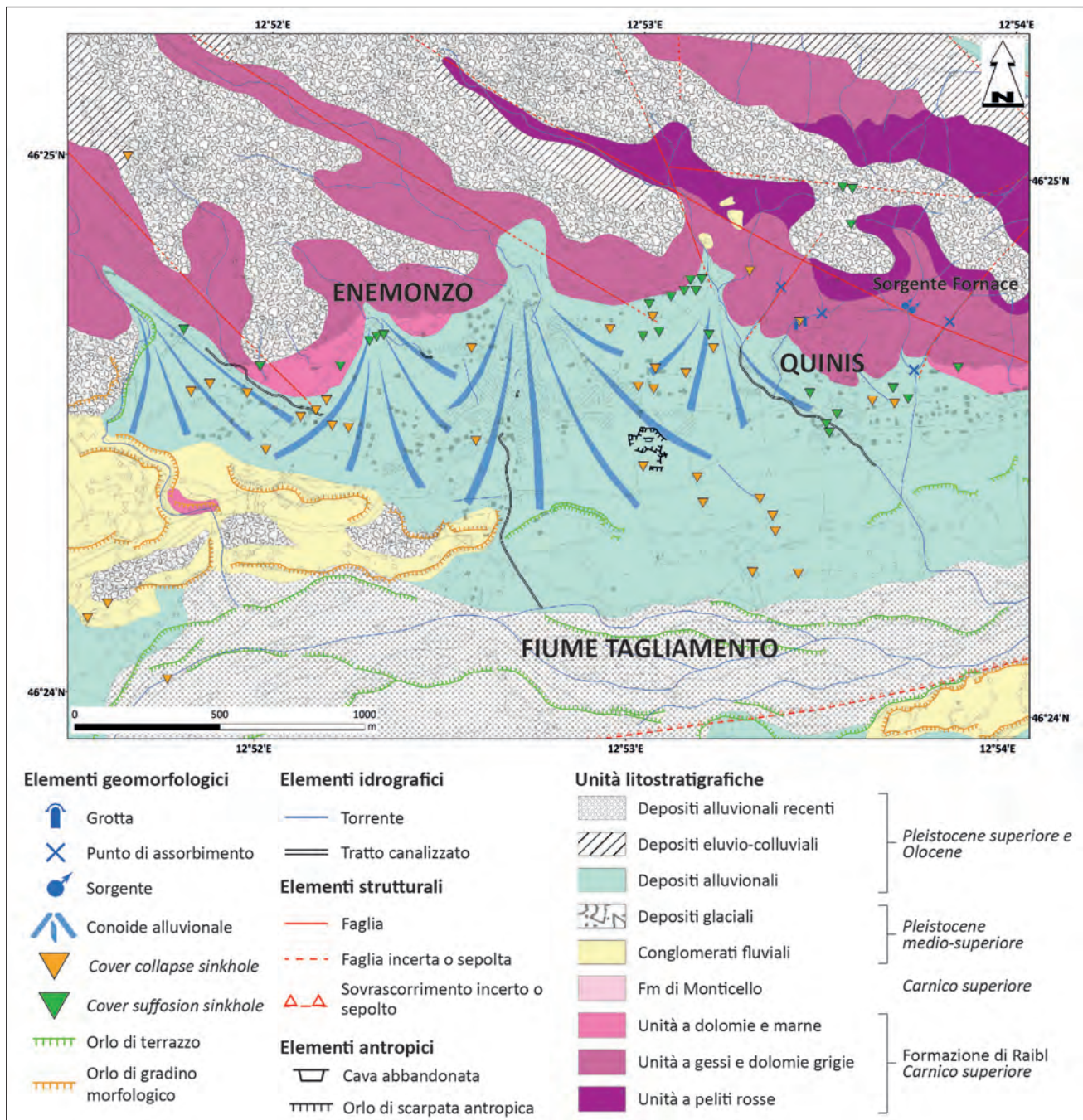


Fig. 2 - Carta geologica e geomorfologica dell'area di studio.
- Geological and geomorphological map of the study area.

tuati 25 sondaggi meccanici (di cui 5 a distruzione di nucleo) ed installati 22 piezometri, i primi realizzati nell'aprile del 2006, l'ultimo completato a dicembre 2013 (fig. 3). Durante la terebrazione dei sondaggi sono state eseguite diverse prove SPT (Standard Penetration Test) per la caratterizzazione geotecnica dei sedimenti. Due sondaggi meccanici sono stati attrezzati con assestimetri ad anelli magnetici di tipo BRS (A12 e A13), mentre un sondaggio è stato destinato alla realizzazione di indagini geofisiche (PZ19).

Il monitoraggio assestimetrico, per la definizione degli spostamenti verticali (WANG *et alii*, 2009) è stato effettuato con cadenza bimensile.

Ad integrazione delle prove dirette si è svolta una campagna di rilievi geofisici volti a correlare le informazioni puntuali ottenute grazie ai sondaggi e ricostruire la morfologia del substrato evaporitico, cercando di evidenziare l'eventuale presenza di cavità di ampie dimensioni. Sono state in particolare applicate sia metodologie basate su campi di potenziali, come la tomografia elettrica, sia metodi

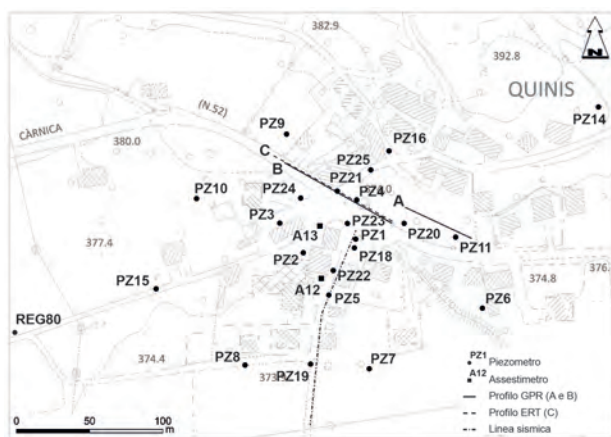


Fig. 3 - Ubicazione delle indagini dirette ed indirette.
- Location of direct and indirect surveys.

basati su campi d'onda, quali il Georadar (FORTE *et alii*, 2012; ZHAO *et alii*, 2013) e la sismica a riflessione. Le diverse metodologie integrate tra loro hanno permesso di effettuare indagini a diversa scala e focalizzare l'attenzione a diverse profondità, da pochi fino a svariate decine di metri.

Da Gennaio 2012 ad Ottobre 2014 si sono tenute sotto monitoraggio le acque di falda attraverso misure manuali dei livelli e l'installazione di sonde multiparametriche (livello, temperatura e conducibilità) nei piezometri ed in una sorgente. Sono stati eseguiti sette campionamenti delle acque sotterranee e superficiali per la loro caratterizzazione geochimica (ioni maggiori) e quindici campionamenti per quella isotopica (^{18}O e D). Durante diversi regimi idrogeologici sono stati effettuati profili verticali di conducibilità elettrica all'interno dei piezometri. Sono state eseguite due prove con traccianti per determinare la direzione e la velocità delle acque sotterranee. Inoltre, per determinare la conducibilità idraulica dei volumi di acquifero interessati dai tratti filtrati dei piezometri sono stati realizzati degli *slug test* e delle prove di permeabilità a carico costante.

4. - DISCUSSIONE DEI RISULTATI

4.1. - CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA E GEOTECNICA DEL SOTTOSUOLO

L'analisi delle stratigrafie, integrata dai dati geofisici, ha permesso di definire un modello geologico del sottosuolo dell'abitato di Quinis, individuando l'andamento del substrato gessoso e gli spessori dei depositi sciolti. Il substrato si presenta particolarmente articolato con un alto in corrispondenza dell'abitato che si approfondisce velocemente verso Ovest, Sud ed Est.

Tramite le indagini sismiche a riflessione è stato possibile individuare avvallamenti e variazioni repentine di profondità del *bedrock* con approfondimenti anche di oltre 20 m su distanze lineari di soli 20-30 m. Questo avviene in particolare nell'area immediatamente a Sud dell'abitato dove il substrato passa da una profondità di circa 25 m ad oltre 50 m e poco a Sud della piazza del paese dove si rileva una depressione con profondità massima attorno ai 40 m.

Ad una scala molto più di dettaglio e con profondità massime fino a circa 2 m, sono risultati molto interessanti i rilievi GPR grazie ai quali è stato possibile identificare zone in subsidenza, estese lateralmente da pochi metri a circa 15, che segnalano la presenza di deformazioni progressivamente crescenti andando dalla superficie, spesso indeformata, verso gli strati più profondi.

Al di sopra della formazione gessosa si rinvennero depositi alluvionali fortemente eterogenei, con alternanze di livelli ghiaiosi molto permeabili e lenti argilloso-limose pressoché impermeabili. Lo studio dei parametri geotecnici, ricavati dalle prove SPT, fa emergere una generale diminuzione delle caratteristiche meccaniche con la profondità; la completa perdita di competenza meccanica, in particolare, si registra all'interno dei depositi alluvionali posti sopra allo strato di alterazione della formazione gessosa e nello strato di alterazione stesso (CANZIANI, 2012).

Le misure assestometriche rilevano una sostanziale differenza di comportamento tra i due punti di monitoraggio. L'assestometro A12 non presenta spostamenti verticali significativi; mentre nell'assestometro A13 (fig. 4) il monitoraggio ha evidenziato due orizzonti con movimenti differenziali: un primo livello superficiale, fino alla profondità di circa 12 metri dal piano campagna, risulta stabile o presenta entità di abbassamento inferiori a 5 cm. Il livello sottostante, a partire da circa 18 metri di profondità, risulta in netto abbassamento con valori massimi che superano i 40 cm in tre anni di monitoraggio. Tra i due livelli è presente un livello intermedio che, in particolare nel corso dell'ultimo anno di monitoraggio, sta subendo l'effetto dello strato sottostante in cedimento e il cui tasso di abbassamento sta visibilmente aumentando.

È interessante osservare che i valori massimi di abbassamento si rilevano in corrispondenza di livelli prevalentemente limosi e/o sabbiosi sovrastanti lo strato di alterazione del substrato roccioso (da 21 a 26.6 metri dal piano campagna). A sua volta lo strato di alterazione (da 27.5 a 29 metri di profondità) risulta in cedimento, sebbene in misura minore. Gli anelli magnetici fissati nella porzione al passaggio con il substrato gessoso integro (da 29 m a fondo foro) mostrano entità di abbassamento decisamente inferiori.



Fig. 4 - Cedimenti nell'abitato di Quinis. Sono evidenti tre diversi riporti di materiale bituminoso.
- Subsidence in Quinis Village. Three different asphalt layers were reported within the years.

4.2. - CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA

Il monitoraggio idrogeologico ha permesso di caratterizzare il sistema di falde presente nei depositi sciolti e nei gessi. L'alimentazione dell'acquifero proviene da due diversi apporti: le infiltrazioni e le perdite dei rii (del settore collinare a settentrione dell'abitato di Quinis) e quelle in alveo del Fiume Tagliamento. Durante i periodi di magra l'apporto del Tagliamento è molto ridotto e di conseguenza il livello della falda nel fondovalle si abbassa di diversi metri. L'alimentazione dal settore settentrionale diventa preponderante e la falda segue la morfologia del substrato: i livelli maggiori si rilevano nell'area dell'alto strutturale di Quinis e da qui si raccordano con i livelli del fondovalle. Durante i periodi di piena invece la falda freatica dei depositi sciolti è sostenuta dalle perdite del Tagliamento e i livelli tra i piezometri del centro dell'abitato e quelli posti nelle zone marginali sono comparabili. Alle

fasi prodromiche degli eventi di piena, corrispondono innalzamenti repentini della falda in cui le velocità di risalita superano i 0.4 m/h.

Gli abitanti del paese riferiscono che, durante le precipitazioni più intense, i coperchi in ghisa dei piezometri vibrano per la fuoriuscita di aria dovuta alla veloce ricarica che caratterizza l'acquifero poroso.

In figura 5 sono riportati gli andamenti dei livelli freaticometrici in relazione alle precipitazioni giornaliere, rilevate dal pluviometro sito ad Ene-monzo: è possibile osservare che le massime escursioni registrate (15 metri) sono relative ai piezometri posti nella parte meridionale dell'abitato e filtrati nei depositi alluvionali. Anche nell'acquifero fratturato-carsico sono state registrate significative variazioni del livello di falda: ad esempio nel piezometro 22 in soli 3 giorni (26-29 Dicembre 2013) sono stati misurati 12 metri di dislivello.

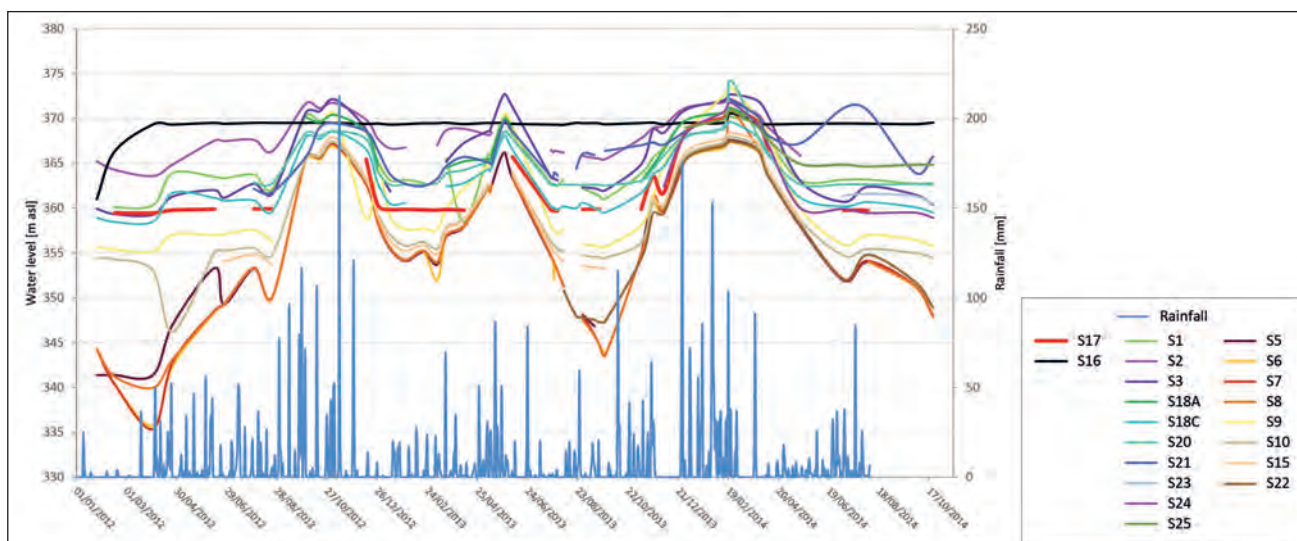


Fig. 5 - Andamento dei livelli freaticometrici e delle precipitazioni giornaliere nel periodo Gennaio 2012 – Ottobre 2014.
- Water level trends and daily rainfalls within the period: January 2012 - October 2014.

Gli *Slug Test* e le prove di permeabilità effettuate in pozzo hanno evidenziato che in generale l'acquifero poroso mostra valori di conducibilità idraulica elevati ($10^{-3} - 10^{-4}$ m/s), mentre le misure effettuate all'interno della formazione gessosa hanno evidenziato comportamenti diversi: alcuni punti a bassissima conducibilità idraulica (10^{-8} m/s), altri a media conducibilità idraulica ($10^{-5} - 10^{-6}$ m/s). Questo comportamento bivalente dell'acquifero evaporitico è confermato anche dal monitoraggio in continuo. Esiste infatti una rete di condotti ad alta permeabilità che drena velocemente le acque di neoinfiltrazione. È l'esempio della sorgente del Rio della Fornace (fig. 6) che, in concomitanza con l'aumento della portata, fa registrare una brusca diminuzione della conducibilità elettrica, comportamento tipico di un sistema a dreno dominante (GALLEANI *et alii*, 2011). Simile comportamento si registra anche nel piezometro PZ10 che intercetta un'area intensamente carsificata dell'acquifero. In questo punto all'aumento del livello corrisponde un immediato e importante aumento della mineralizzazione, dovuto alla fuoriuscita di acque di riserva (effetto pistone), seguito da una brusca diminuzione della mineralizzazione per l'arrivo di acque di neoinfiltrazione.

Diverso è il contesto degli altri punti di misura inseriti in settori a bassa permeabilità, dove i valori

di conducibilità elettrica diminuiscono più lentamente per il lento arrivo delle acque di pioggia poco conduttive (si riportano come esempi i piezometri PZ1 e PZ18 in figura 6).

Per quanto riguarda la geochimica isotopica ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e D/H), i dati a disposizione non hanno mostrato evidenti differenze fra i campioni prelevati nei due acquiferi (poroso e fratturato - carsico), in diverse condizioni di impingimento della falda e nelle diverse stagioni, confermando l'origine comune delle acque e la stretta connessione fra i due acquiferi.

Estremamente diversi sono invece i valori di mineralizzazione, dedotti dalle misure di conducibilità elettrica, sia analizzando i profili verticali di ciascun piezometro, che considerando gli acquiferi nel complesso. La mineralizzazione delle acque dipende dal tipo di acquifero intercettato e dal tipo di circolazione che lo caratterizza (CIVITA, 2005). Le acque più mineralizzate si trovano all'interno dei piezometri che intercettano i gessi e che hanno una minore conducibilità idraulica. I profili verticali di conducibilità elettrica hanno evidenziato come vi sia una netta variazione di questo parametro sulla verticale all'interno dei piezometri (fig. 7). Questi profili di EC variano nel tempo come risposta alle diverse condizioni di impingimento della falda che caratterizzano l'acquifero (FRANCO, 2013).

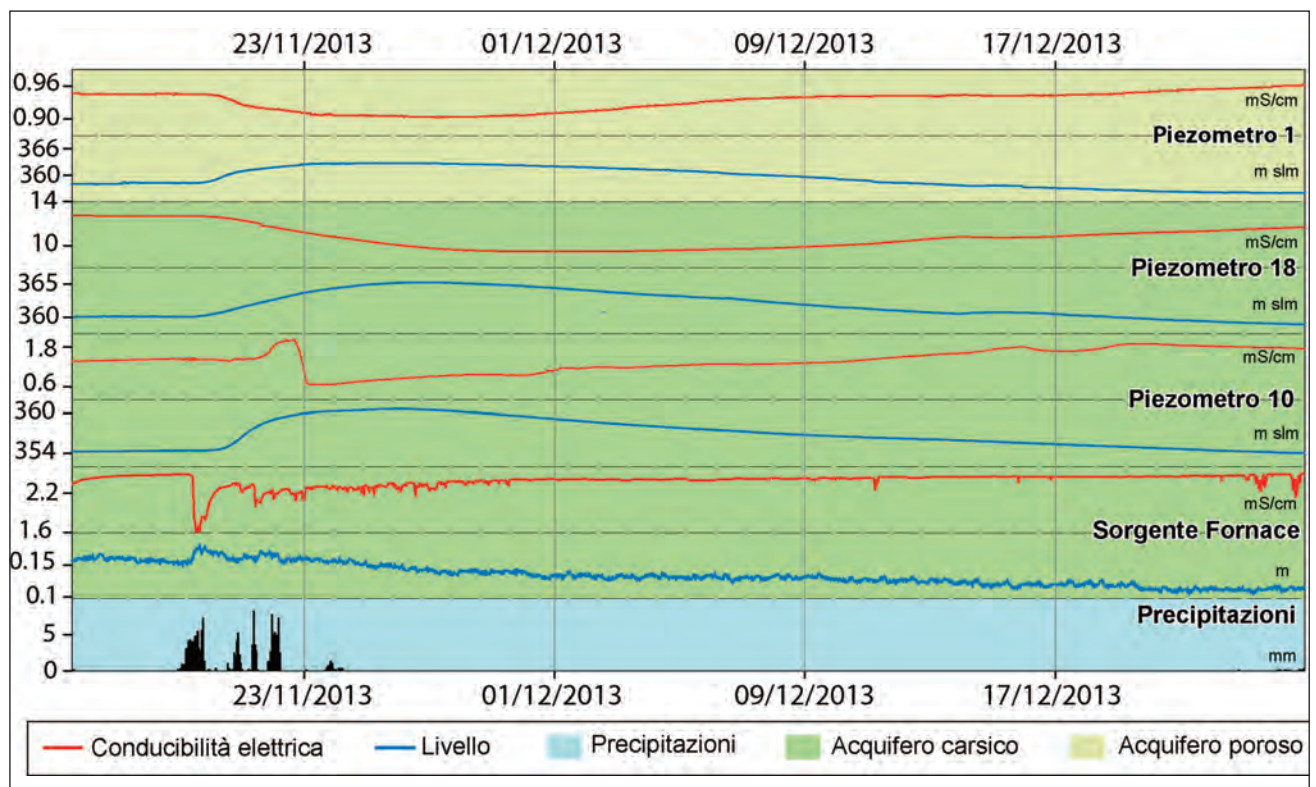


Fig. 6 - Misurazioni dei parametri in continuo nei piezometri 1, 18 e 10 e della sorgente Fornace: andamento della conducibilità elettrica e del livello freaticometrico in correlazione con le precipitazioni.

- Water levels and electrical conductivity (EC) measurements for the piezometers 1, 18 and 10 and the Fornace spring correlated with the precipitations.

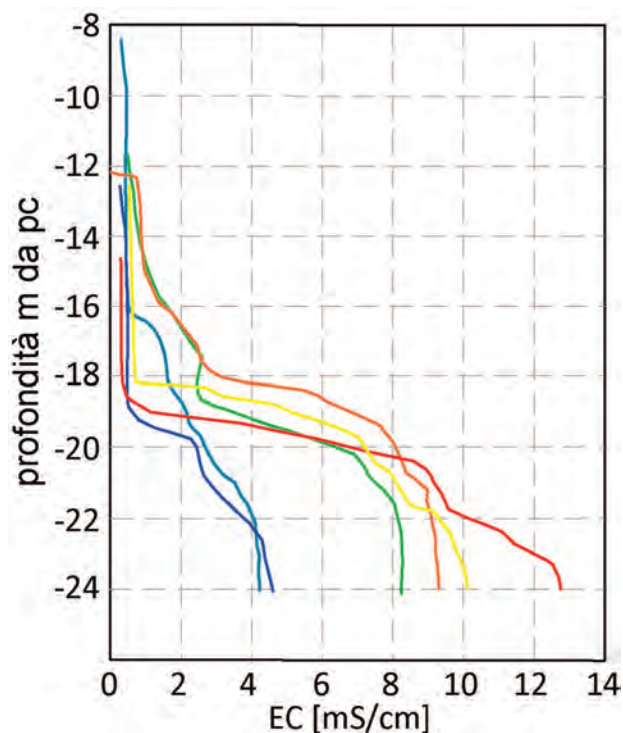


Fig. 7 - Profili verticali di conducibilità elettrica.
- Vertical profiles of the electrical conductivity.

Grazie ai numerosi campionamenti delle acque sotterranee e superficiali è stato possibile definire dei valori massimi, minimi e medi della conducibilità elettrica nei singoli punti di monitoraggio (tab. 1). Questi dati hanno confermato la presenza di zone dello stesso acquifero con caratteristiche idrogeologiche differenti, soprattutto per quanto riguarda l'acquifero presente nei gessi.

Dal punto di vista geochimico l'analisi degli ioni maggiori ha evidenziato la presenza di acque con diversa mineralizzazione legate al tipo di acquifero da cui derivano (fig. 8). La maggior parte delle acque campionate, sia superficiali che profonde, presentano una facies di tipo solfato-calcica, tipica di acque che hanno circolato in formazioni evaporitiche. Il PZ1 costituisce un'eccezione in quanto le sue acque sono di tipo bicarbonato-calcico. Le acque di questo piezometro sono le uniche che si differenziano, ma potrebbero essere contaminate dall'apporto diretto di acqua piovana per la mancanza di un corretto sistema di isolamento della bocca pozzo.

Nel settembre 2006 e nel maggio 2013 sono stati effettuati due test di tracciamento il primo utilizzando uranina ed il secondo con il cloruro di

Tab. 1 - Valori di conducibilità elettrica medi, massimi e minimi per ciascun piezometro monitorato ed identificazione del tipo di acquifero.

- Mean, maximum and minimum values of the electrical conductivity for each piezometer and identification of the aquifer type.

| | EC max [μ S/cm] | EC min [μ S/cm] | EC media [μ S/cm] | Numero di misure | Tipo di acquifero |
|------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|
| PZ1 | 840 | 354 | 570 | 17 | Poroso |
| PZ2 | 838 | 552 | 751 | 7 | Poroso |
| PZ3 | 998 | 841 | 927 | 14 | Poroso |
| PZ4 | 1720 | 721 | 1352 | 11 | Poroso |
| PZ5 | 2110 | 792 | 1535 | 12 | Poroso |
| PZ6 | 2220 | 647 | 1211 | 7 | Poroso |
| PZ7 | 2150 | 779 | 1595 | 15 | Poroso |
| PZ8 | 2150 | 695 | 1383 | 10 | Poroso |
| PZ9 | 1345 | 732 | 938 | 16 | Misto |
| PZ10 | 1943 | 777 | 1345 | 16 | Misto |
| PZ11 | 2550 | 1323 | 2208 | 16 | Misto |
| PZ14 | 2920 | 2560 | 2780 | 9 | fratturato - carsico |
| PZ15 | 1768 | 1095 | 1432 | 2 | fratturato - carsico |
| PZ16 | 3240 | 2300 | 2674 | 8 | fratturato - carsico |
| PZ17 | 1096 | 712 | 912 | 12 | Poroso |
| PZ18a | 834 | 739 | 789 | 4 | Poroso |
| PZ18b | 8220 | 475 | 3084 | 14 | fratturato - carsico |
| PZ18c | 16430 | 9255 | 8677 | 14 | fratturato - carsico |
| PZ20 | 4870 | 1400 | 3084 | 12 | fratturato - carsico |
| PZ21 | 3510 | 1028 | 2449 | 14 | fratturato - carsico |
| PZ22 | 6570 | 1460 | 2371 | 9 | fratturato - carsico |
| PZ23 | 1990 | 1140 | 1481 | 3 | fratturato - carsico |
| PZ24 | 3520 | 1019 | 1899 | 7 | fratturato - carsico |
| PZ25 | 3530 | 2620 | 3043 | 6 | fratturato - carsico |
| Rio Quinis | 1940 | 1021 | 1508 | 18 | acque superficiali |
| Sorgente Fornace | 2544 | 2210 | 2434 | 10 | acque superficiali |

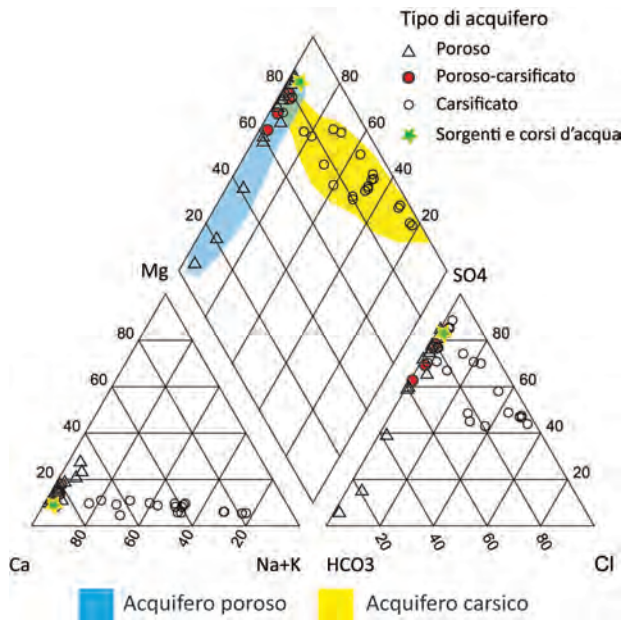


Fig. 8 - Diagramma di Piper per la definizione delle facies geochimiche.
- *Geochemical facies defined through Piper diagram.*

sodio. All'epoca del primo tracciamento erano disponibili per il monitoraggio solo i piezometri da PZ1 a PZ10. L'uranina è stata iniettata all'interno del PZ9 (filtrato per un tratto nei gessi e per un'altra parte nelle alluvioni) ed è stata rilevata nei piezometri 5, 7, 8 e 10 con tempistiche diverse da 2 a 4 giorni dopo l'iniezione. Il tracciante è stato rilevato in tracce dopo 8 giorni anche all'interno del piezometro 6. Nel piezometro 10 è stata rilevata la massima concentrazione di uranina pari a 1066 ppb. Il cloruro di sodio è stato iniettato nel piezometro PZ16 che filtra i gessi ed il tracciante è stato rilevato in elevate concentrazioni nei piezometri 18, 21, 22, 24 (v. fig. 7), ma non è stato riscontrato in nessuno dei piezometri che filtrano l'acquifero poroso.

5. - CONCLUSIONI

L'approccio multidisciplinare adottato per lo studio dell'area di Quinis ha portato ad una prima identificazione dei fenomeni insistenti sull'abitato e nelle immediate vicinanze, alla ricostruzione di un modello del substrato roccioso, alla caratterizzazione idrogeologica dell'area e, quindi, all'integrazione delle conoscenze acquisite ottenendo un quadro completo della situazione di vulnerabilità a cui è soggetto l'abitato.

In primo luogo sono stati rilevati e classificati gli sprofondamenti riconoscibili in base all'analisi geomorfologica congiunta alle indagini geofisiche: in totale nell'area di Enemonzo e Quinis sono stati

individuati e classificati 64 *sinkholes*, la maggior parte dei quali è rappresentata da *cover collapse sinkhole* (38) e si rinviene nella zona meridionale dell'area di studio, mentre nel settore più settentrionale dell'area, in prossimità dei rilievi, risultano più frequenti i *cover suffosion sinkhole* (26), la cui distribuzione talvolta segue l'orientamento delle principali linee strutturali. Nella zona dell'abitato l'individuazione delle aree soggette a sprofondamento risulta maggiormente difficoltosa in quanto le attività antropiche presenti tendono a mascherare immediatamente ogni effetto sul territorio. In tale contesto le prospezioni geofisiche (tecniche non invasive) si sono dimostrate un ottimo ausilio per la mappatura delle aree in dissesto. Se da un lato la tomografia elettrica è risultata di difficile interpretazione per le interferenze connesse alle variazioni dei materiali superficiali ed ai numerosi sottoservizi presenti, la sismica a riflessione ha permesso di individuare solo in maniera approssimativa l'andamento del substrato per l'assenza di una transizione netta tra sedimenti e substrato gessoso. Particolarmente efficace è risultato l'utilizzo del GPR; molti dei livelli individuati con tale tecnica di indagine sono correlabili ad attività antropiche (riporti, conglomerati bituminosi, sottofondi stradali) condotte in tempi diversi, spesso per mitigare gli effetti della subsidenza stessa. La loro morfologia del tutto analoga a un depocentro geologico (anche se a scala totalmente diversa) dimostra che i movimenti in atto perdurano nel tempo. Questi fenomeni, anche se evidenziabili con il GPR solo fino a piccola profondità, suggeriscono l'esistenza di movimenti più profondi e generalizzati.

Unendo le informazioni puntuali, ricavate dai sondaggi meccanici e dal monitoraggio con gli assestimetri, con quelle lineari derivate dalle indagini geofisiche, è stato ricostruito l'andamento del substrato roccioso al di sotto dell'abitato di Quinis. La superficie identificata si presenta particolarmente irregolare e indica quindi un grado di carsificabilità elevato, impostatosi su un substrato già caratterizzato da importanti disturbi tettonici. È stato pertanto possibile identificare quattro aree soggette a *sinkhole*: il piazzale a Nord della strada statale, il settore tra l'assestimento A13 e il piezometro PZ24, le aree in prossimità del campanile (PZ1 e PZ18) e tra i piezometri PZ18 e PZ22.

La loro evoluzione è legata sia alla dissoluzione del *bedrock* gessoso che all'erosione e al dilavamento della copertura quaternaria dovuti ai fenomeni di *piping* tipici dalla complessa situazione idrogeologica che determina veloci ed ampie escursioni del livello della falda. Tali escursioni sono state amplificate, negli ultimi 20 anni, dalla congiunta influenza degli invasi sul Tagliamento e dell'intensificarsi dei singoli eventi piovosi.

Si sono generati pertanto dei fenomeni complessi tipo *cover sagging and suffosion sinkholes* nella zona dell'abitato di Quinis, mentre nelle aree più prossime al Tagliamento, dove i sedimenti si presentano più grossolani con orizzonti cementati, si sviluppano maggiormente i *cover collapse sinkhole*.

L'utilizzo integrato di tecniche di indagine dirette ed indirette ha permesso pertanto di costruire un modello geologico ed idrogeologico concettuale del sottosuolo anche in un'area antropizzata, come l'abitato di Quinis, identificando i settori a maggiore criticità.

BIBLIOGRAFIA

- BECK B.F. (2005) – *Soil piping and sinkhole failures*. In: CULVER D.C. & WHITE W.B. (Eds.): «*Encyclopedia of caves*». Elsevier: 521-526.
- CANZIANI F. (2012) – *Caratterizzazione geotecnica dell'area interessata da fenomeni di dissesto nell'abitato di Quinis (Enemonzo-Udine)*. Tesi di Laurea Triennale, Università di Trieste, pp. 121.
- CARAMANNA G., CIOTOLI G. & NISIO S. (2008) - *A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas*. *Natural Hazards*, **45**: 145-172.
- CARULLI G.B. (2006) – *Carta Geologica del Friuli Venezia Giulia (scala 1:150.000, con Note ill.)*. Regione A. Friuli Venezia Giulia, Direz. Ambiente LL.PP., SE.L.CA. Firenze.
- CIVITA M. (2005) – *Idrogeologia Applicata e Ambientale*. Ambrosiana Editore, 177-223.
- COOPER A.H. (2008) – *The GIS approach to evaporite-karst geohazards in Great Britain*. *Environmental Geology*, **53**: 981-992.
- FORTE E., PIPAN M., CASABIANCA D., DI CUIA R. & RIVA A. (2012) - *Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes*. *Journal of Applied Geophysics, Special Issue: Recent, Relevant and advanced GPR studies in Applied Geophysics*, **81**: 76-87.
- FRANCO A. (2013) – *Idrogeologia di Quinis (Comune di Enemonzo)*. Tesi di Laurea Triennale, Università di Trieste, pp. 167.
- GALLEANI L., VIGNA B., BANZATO C. & LO RUSSO S. (2011) – *Validation of a vulnerability estimator for spring protection areas: the VESPA index*. *J. Hydr.*, **396**: 233-245.
- GORTANI M. (1965) – *Le doline alluvionali*. *Natura e Montagna*, **3**: 120-128.
- GUERRERO J., GUTIÉRREZ F. & LUCHA P. (2004) – *Paleosubsideance and active subsidence due to evaporite dissolution in Zaragoza city area (Huerva River valley, NE Spain): processes, spatial distribution and protection measures for transport routes*. *Engineering Geology*, **72**: 309-329.
- GUTIÉRREZ F. (1996) – *Gypsum karstification induced subsidence: effects on alluvial systems and derived geohazards (Calatayud Graben, Iberian Range, Spain)*. *Geomorphology*, **16**: 277-293.
- GUTIÉRREZ F. & COOPER A.H. (2002) – *Evaporite dissolution subsidence in the historical city of Calatayud, Spain: damage appraisal and prevention*. *Natural Hazards*, **25**: 259-288.
- GUTIÉRREZ F., CALAFORRA J.M., CARDONNA F., ORTI F., DURAN J.J. & GARAY P. (2008a) – *Geological and environmental implications of the evaporite karst in Spain*. *Environmental Geology*, **53**: 951-965.
- GUTIÉRREZ F., GUERRERO J. & LUCHA P. (2008b) – *A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain*. *Environmental Geology*, **53**: 993-1006.
- GUTIÉRREZ F., PARISE M., DE WAELE J. & JOURDE H. (2014) - *A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst*. *Earth-science Reviews*, **138**, 61-88.
- MARINELLI O. (1897) – *Fenomeni di tipo carsico nei terrazzi alluvionali della Valle del Tagliamento*, *Mem. Soc. Geogr. It.*, **8** (2): 415-419.
- NISIO S. (2008) – *I sinkholes nelle altre regioni*. *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.*, **85**: 419-426.
- NISIO S., CARAMANNA G. & CIOTOLI G. (2007) - *Sinkholes hazard in Italy: first results on the inventory and analysis of some case studies*. In: PARISE & GUNN (Eds.): *Natural and Anthropogenic Hazards in Karst areas: Recognition, Analysis and Mitigation*. Geological Society, London, Special Publications, **279**, 23-45.
- 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 sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio"*, Roma 20-21 maggio 2004, 557-572.
- PARISE G., QIRIAZI P. & SALA S. (2004) – *Natural and anthropogenic hazards in karst areas of Albania*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **4**: 569-581.
- PARISE G., QIRIAZI P. & SALA S. (2008) – *Evaporite karst of Albania: main feature and cases of environmental degradation*. *Environmental Geology*, **53**: 967-974.
- TAMISKAS J. & MARCINKEVICIUS V. (2002) – *Karst geoindicators of environmental change: the case of Lithuania*. *Environmental Geology*, **42**: 757-766.
- VAI G.B., VENTURINI C., CARULLI G.B. & ZANFERRARI A. (2002) – *Alpi e Prealpi Carniche e Giulie (Friuli Venezia Giulia)*. Pp. 389, BE-MA editrice, Milano.
- VENTURINI C. (2009) – *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50000, Foglio 031 Ampezzo*. *Serv. Geol. D'It.*: pp. 232.
- WALTHAM T., BELL F. & CULSHAW M. (2005) – *Sinkholes and subsidence, Karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Pp. 404, Springer, Berlino.
- WANG G.Y., YOU G., SHI B., YU J. & TUCK M. (2009), *Long-term land subsidence and strata compression in Changzhou, China*. *Eng. Geol.*, **104**: 109-118.
- ZHAO W.K., FORTE E., PIPAN M. & TIAN G. (2013) *Ground Penetrating Radar (GPR) attribute analysis for archaeological prospection*. *J. of Applied Geophysics*, **97**: 107-117.