



Società Autostrada Tirrenica p.A.
GRUPPO AUTOSTRADALE PER L'ITALIA S.p.A.

AUTOSTRADA (A12) : ROSIGNANO – CIVITAVECCHIA
LOTTO 5B

TRATTO: FONTEBLANDA – ANSEDONIA
PROGETTO DEFINITIVO

INFRASTRUTTURA STRATEGICA DI PREMINENTE INTERESSE NAZIONALE

DOCUMENTAZIONE GENERALE

GEOLOGIA E IDROGEOLOGIA D'INQUADRAMENTO

**NOTA METODOLOGICA PER LA DEFINIZIONE
DELLE INDAGINI PER LO STUDIO DI AREE
A RISCHIO SINKHOLE**

IL GEOLOGO Dott. Vittorio Boerio Ord. Geo. Lombardia N. 794 RESPONSABILE UFFICIO GEO	IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE Ing. Alessandro Alfì Ord. Ingg. Milano N. 20015 CAPO PROGETTO	IL DIRETTORE TECNICO Ing. Massimiliano Giacobbi Ord. Ingg. Milano N. 20746
---	--	---

WBS	RIFERIMENTO ELABORATO							DATA:	REVISIONE	
	DIRETTORIO			FILE					n.	data
—	codice	commessa	N.Prog.	unita'	ufficio argomento	n. progressivo	Rev.	OCTOBRE 2016		
—	1	2	1	2	1	4	0	9	—	—
									SCALA:	—

 	COORDINATORE GENERALE INIZIATIVA SAT Ing. Massimiliano Giacobbi Ord. Ingg. Milano N. 20746 CAPO COMMessa	ELABORAZIONE GRAFICA A CURA DI :	
	CONSULENZA A CURA DI :	ELABORAZIONE PROGETTUALE A CURA DI :	Dott. Geol. Barbara Tognala
		IL RESPONSABILE UNITA' :	

VISTO DEL COMMITTENTE 	VISTO DEL CONCEDENTE Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti <small>DIPARTIMENTO PER LE INFRASTRUTTURE, GLI AFFARI GENERALI ED IL PERSONALE STRUTTURA DI VIGILANZA SULLE CONCESSIONARIE AUTOSTRADALI</small>
--------------------------------------	---



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DST
DIPARTIMENTO DI
SCIENZE DELLA TERRA

“Relazione metodologica” per la definizione
delle indagini e delle prospezioni per lo
studio di aree a rischio *sinkhole* nell’ambito
della Progettazione Definitiva del Tratto
Fonteblanda - Ansedonia

Rapporto finale - Fase I “Attività preliminare”



Ente committente: SPEA Engineering S.p.A.

Firenze, 21 Giugno 2016



Responsabile del progetto

Prof. Nicola Casagli

Gruppo di lavoro

Prof. Riccardo Fanti

Dott. Emanuele Intriari

Dott.ssa Federica Bardi

Dott. Federico Marini

Dott. Giovanni Gigli

Dott.ssa Veronica Pazzi

TAVOLA DEI CONTENUTI

1	INTRODUZIONE	6
2	I <i>SINKHOLES</i>	7
3	INQUADRAMENTO DELL'AREA	10
3.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO	10
3.2	<i>SINKHOLES</i> NELL'AREA DI STUDIO	13
3.3	DATI INTERFEROMETRICI SATELLITARI STORICI	18
3.4	MECCANISMI DI INNESCO PRESUNTI	26
4	SOPRALLUOGO	27
5	PROGRAMMA DI INDAGINI	30
5.1	INDAGINE IDROGEOLOGICA	30
5.2	INDAGINI SISMICHE A RIFLESSIONE	31
5.3	INDAGINI GEORADAR	33
5.4	SONDAGGI GEOGNOSTICI.....	34
5.5	PROVE GEOTECNICHE.....	35
5.6	STUDIO DI DATI INTERFEROMETRICI SATELLITARI RECENTI	35
5.7	MONITORAGGIO INTERFEROMETRICO DA TERRA	41
6	ZONAZIONE DELLA PREDISPOSIZIONE AL RISCHIO <i>SINKHOLE</i>	43
7	CONCLUSIONI	45
8	BIBLIOGRAFIA	47
9	INTRODUZIONE	51
10	ELENCO DEGLI ELABORATI	51

ALLEGATO 1: Elenco degli elaborati finalizzati allo “Studio specialistico” nell’ambito della Progettazione Definitiva del Tratto Fonteblanda - Ansedonia

1 Introduzione

Il presente documento costituisce il rapporto finale per l'attività di "Studio propedeutico", la prima delle due fasi previste all'interno del Disciplinare Tecnico definite da SPEA Engineering S.p.A. (di seguito SPEA) relativamente alla Richiesta d'Offerta n. 310001382 per affidare al Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze (DST-UNIFI) lo studio di aree a rischio di voragini di sprofondamento (*sinkhole*) nell'ambito della Progettazione Definitiva del Tratto Fonteblanda - Ansedonia.

Nell'area compresa tra il torrente Osa ed il fiume Albegna, nel Comune di Orbetello (GR), sono in corso gli studi per la costruzione dell'Autostrada A12 Livorno Rosignano – Civitavecchia, tratto Fonteblanda – Ansedonia (Lotto 5b). A tale proposito risulta di particolare criticità il rischio rappresentato da improvvise voragini di sprofondamento (*sinkhole*) che si possono verificare nell'area che, per motivi geologici, è predisposta a tali tipi di fenomeno.

All'interno della presente relazione metodologica vengono sintetizzate le informazioni raccolte per inquadrare la problematica nell'area di studio, comprensiva di una valutazione preliminare del rischio *sinkhole* lungo il tracciato in progetto. Viene inoltre presentato un progetto di indagini e sondaggi da eseguire per la definizione definitiva del rischio *sinkhole*, nonché un sistema di monitoraggio volto ad individuare possibili deformazioni precursori di sprofondamenti.

2 I sinkholes

Sinkhole è un termine introdotto per la prima volta da Fairbridge (1968) per descrivere depressioni superficiali o collassi sub-circolari formati per il crollo di piccole cavità carsiche sotterranee. Con il tempo questa definizione si è estesa fino a comprendere voragini superficiali indipendentemente dalla loro forma e dalla loro genesi (naturale o antropica) (Kaufmann and Quinif, 1999; Brinkmann et al., 2008; Caramanna et al., 2008; Guarino and Nisio, 2012; Krawczyk et al., 2012). Nonostante tali fenomeni siano conosciuti sin da tempi antichi, non esistono molti studi che li analizzino in termini di rischi naturali e non vi è nemmeno un'unica classificazione universalmente riconosciuta (Cramer, 1941; Beck and Sinclair, 1986; White, 1988; Williams, 2003; Waltham et al., 2005; Gutiérrez and Guerrero, 2008).

L'evoluzione tipica di un *sinkhole* prevede la formazione di una cavità sotterranea che nel tempo si propaga verso la superficie andando a costituire una cavità a sviluppo verticale di forma approssimativamente cilindrica. Questa fase può durare anche anni. Quando la cavità è prossima alla superficie, a seconda del tipo di materiale affiorante, è possibile individuare le prime deformazioni del terreno, segnali precursori del collasso. A seguito del collasso in genere si assiste al cosiddetto "annegamento", ovvero sia al riempimento d'acqua nella cavità, spesso favorito dall'acqua di falda o da fluidi idrotermali profondi intercettati durante la propagazione verso l'alto del fenomeno.

L'Italia è uno dei pochi Paesi al mondo a disporre di un inventario cartografico a scala nazionale per il censimento dei *sinkholes*, derivante dal Progetto *Sinkhole*, realizzato e coordinato dal Servizio Geologia Applicata ed Idrogeologia dell'ISPRA a partire dal 2002 (ISPRA, 2016). Poiché tale *database*, a cui si fa riferimento anche nel presente rapporto, è stato redatto dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), per mantenere una maggiore coerenza terminologica verrà adottata la classificazione utilizzata anche da ISPRA (Nisio, 2008a) per una breve descrizione dei fenomeni oggetto di questo studio (Figura 1).

- *Anthropic sinkholes*: collassi di volte originate da cavità prodotte dall'attività umana (cave, miniere, catacombe, gallerie sotterranee, metropolitane ecc.), con formazione di collassi di morfologia non necessariamente sub-circolare. Questa categoria comprende solamente quei fenomeni interamente causati dall'uomo; tuttavia alcune tipologie di *sinkhole* di seguito descritte, pur trovando i fattori predisponenti in caratteristiche naturali del terreno (come ad esempio la presenza di cavità naturali preesistenti), possono poi essere innescate dall'attività umana (come pompaggi, scavi ecc.).
- *Solution sinkholes*: conca chiusa originata per dissoluzione della roccia da parte dell'acqua di ruscellamento superficiale. Questa tipologia carsica si verifica nei casi in cui il substrato carbonatico sia affiorante o sub-affiorante, tipica nelle aree di altopiano o dorsale carbonatica. È possibile che sia presente un esiguo spessore del materiale di copertura o terre rosse che comunque consente l'attacco diretto da parte dell'acqua di ruscellamento.
- *Cover subsidence sinkholes*: si formano in presenza di spessori di sedimenti non coesivi (sabbie, ghiaie) in seguito all'originarsi, in rocce solubili sottostanti, di cavità carsiche formatesi a loro volta per dissoluzione o crollo. I meccanismi di innesco di tale morfologia sono dovuti a processi di natura gravitativa e di filtrazione (*raveling*) che fa sì che i materiali incoerenti al di sopra delle cavità del substrato vengano drenati all'interno di esse. L'evoluzione di questa tipologia avviene in maniera piuttosto graduale, anche se le dimensioni e le profondità possono arrivare ad alcune decine di metri.
- *Rock subsidence sinkholes*: cavità formatesi su rocce coerenti e permeabili ma non solubili, poggiate su rocce solubili per crollo di volta. La formazione della cavità avviene per movimenti successivi e assestamenti graduali dei litotipi con comportamento rigido, con formazione di un reticolo di fratture.

- *Cover collapse sinkhole*: cavità con forma cilindrica o troncoconica sviluppata su coperture terrigene poste al di sopra di substrato carbonatico formatesi per il crollo della volta. Al tetto della cavità carsica è necessario che vi sia materiale terrigeno permeabile o semipermeabile di spessore modesto. La cavità viene generata dal progressivo assottigliamento del materiale costituente la volta. I meccanismi che producono il crollo sono prevalentemente controllati dall'infiltrazione dall'alto (suffosione o *raveling*) e da collassi che procedono dal basso verso l'alto. Fenomeni di suffosione sono favoriti da forti variazioni del livello piezometrico, spesso causate da precipitazioni intense, pompaggi, scavi. Tale tipologia di *sinkhole* appare molto simile al *sinkhole* per *piping* profondo, le sole caratteristiche distintive sono lo spessore della copertura, che in questo caso è più esiguo (<30 m), mancanza di processi di liquefazione e mancanza di fluidi aggressivi in pressione. La formazione di cavità di questo tipo dà spesso luogo a collassi repentini.
- *Cave collapse sinkhole*: cavità con forma a pozzo nei calcari e in rocce solubili formatesi per il crollo del soffitto di grotte. La cavità viene generata dal progressivo assottigliamento del materiale costituente la volta. L'attivarsi della dolina di crollo può generare spesso, sia per le dimensioni sia per la repentinità dei fenomeni, conseguenze catastrofiche. La forma della cavità originatasi secondo questo processo tende ad allargarsi verso il basso con pareti non perfettamente verticali ma inclinate secondo un profilo tronco-conico.
- Cavità di evorsione: sono relative a processi erosivi provocati da turbolenze ad asse verticale che si verificano generalmente in grandi pianure alluvionali (Pianura Padana) in seguito a rotte arginali, o in ambienti lagunari e deltizi in relazione ad ingressioni marine. Le forme risultanti da tali processi sono laghetti sub-circolari in aree di pianura (gorghi o laghetti di rotta), con diametri variabili da 30 a 100 m e profondità fino a un massimo di 13-15 m. Tali laghetti risultano collocati ove si può ritenere che si sia prodotta la confluenza di notevoli quantità d'acqua; sono ubicati ai piedi di un argine fluviale in corrispondenza di una rotta, o in un territorio depresso nel luogo di convogliamento di acque tracimate, oppure in punti in cui queste hanno dovuto attraversare strutture lineari come argini, dossi, cordoni litoranei. Queste cavità si formano su terreni in cui è presente una grande percentuale di sabbia. In tali condizioni possono giocare un ruolo determinante i processi di suffosione superficiale e il sifonamento; infatti in condizioni di elevata pressione idrostatica, in tali ambienti, è frequente la formazione di "fontanazzi", che possono costituirne il punto di innesco.
- Cavità di suffosione: si tratta di cavità di forma circolare che si realizzano in terreni sciolti (generalmente in coperture eluviali e colluviali) per fenomeni di erosione dal basso con formazione di condotti verticali e sub-orizzontali che interessano soltanto i primi metri della copertura. Sedimenti predisposti a questo tipo di fenomeni possono essere ad esempio quelli che costituiscono paleo meandri o dune costiere sepolte. In questi materiali permeabili l'acqua sub-superficiale trova una via preferenziale in cui scorre relativamente ad alta velocità, favorendo la formazione di canali erosivi; ciò innesca una retroazione positiva, nel senso che l'ampliamento di tali canali aumenta la velocità del flusso che a sua volta causa un ulteriore allargamento degli spazi interstiziali. In questi casi fratture e cavità nel substrato possono essere il luogo dove i sedimenti asportati possono accumularsi.
- *Deep-piping sinkholes*: caratteristica distintiva è un meccanismo profondo di erosione dal basso che investe spessori notevoli di copertura. Questa classe è rappresentata da cavità spesso colmate d'acqua, attraverso il processo di annegamento, che si aprono su coperture a granulometrie variabili ma prevalentemente fini (argille siltose o limi con spessori superiori ai 100 metri) impermeabili o semipermeabili, in cui è improbabile una filtrazione verso il basso. Ciò che distingue questi *sinkholes* è il fatto che l'acqua di riempimento, mineralizzata e con risalita di gas, deriva da falde in pressione che, nel caso di falde artesiane, possono persino generare delle sorgenti. Il modello geologico concettuale affinché si verifichi un *sinkhole* di questo tipo prevede la presenza, al di sopra del *bedrock* carbonatico carsificato, di un potente pacco (50-200 m) di depositi di copertura. Le dimensioni granulometriche degli elementi della copertura possono essere variabili; generalmente si tratta di depositi alluvionali che presentano frequenti variazioni granulometriche

in senso verticale e laterale, dalle argille-sabbiose, ai limi, alle sabbie, alle ghiaie. Associazioni sedimentarie di questo tipo determinano nell'intero pacco un certo grado di coesione e una portanza naturale. Appare molto improbabile, per lo spessore notevole dei materiali di copertura (fino a 200 m), un risentimento in superficie di un processo di crollo a partire da una cavità profonda, mediante processi di *raveling* (scorrimento di materiale verso il basso), soprattutto per la presenza all'interno di tali sedimenti di depositi argillosi impermeabili o scarsamente permeabili in grado di assorbire le deformazioni che si sono generate in profondità. Le caratteristiche dei fluidi, acidi e in pressione, favoriscono la dissoluzione della roccia e possono provocare, in terreni non consolidati, fenomeni di liquefazione.

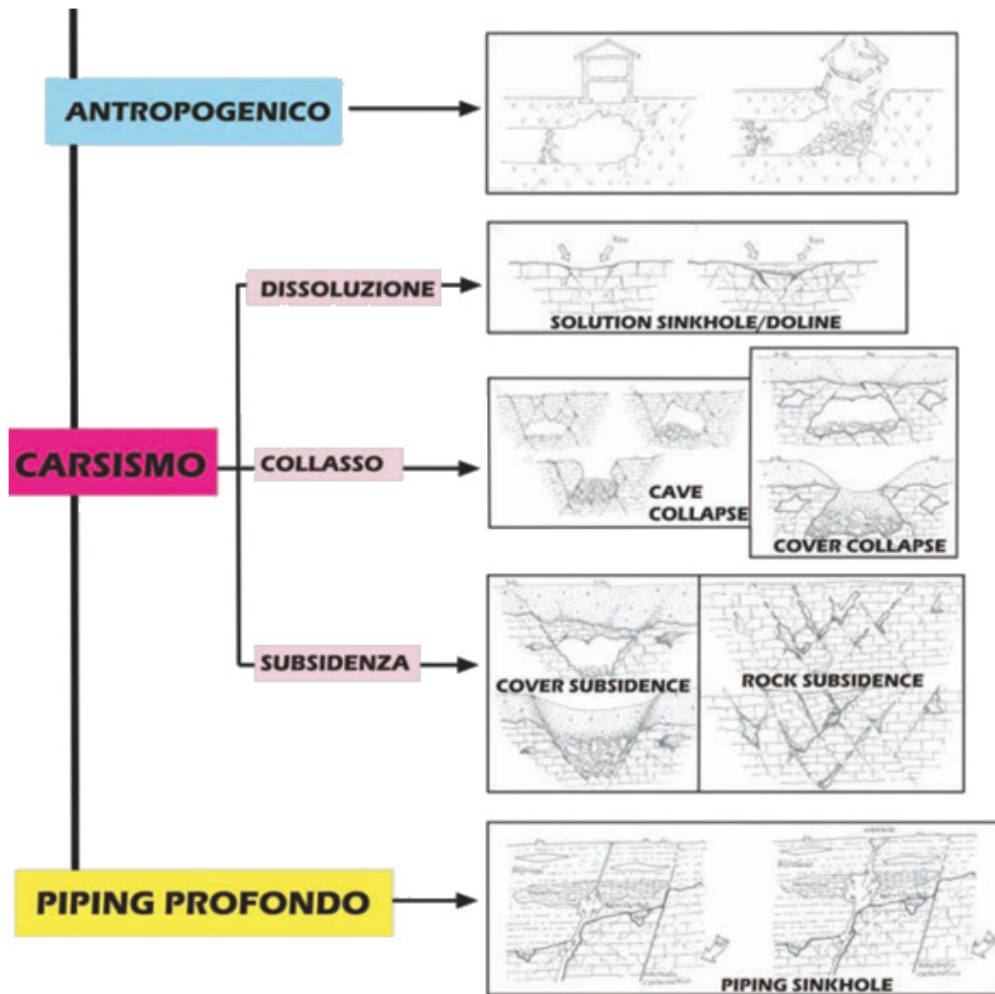


Figura 1 – Schema dei principali tipi di *sinkhole* (Nisio, 2008).

3 Inquadramento dell'area

3.1 Inquadramento geologico e geomorfologico

L'area oggetto del presente studio si colloca lungo la fascia costiera della Toscana meridionale posta tra il torrente Osa e il fiume Albegna, entro il territorio del Comune di Orbetello (GR), ricadente tra le sezioni 342030 Fonteblanda e 342070 Albinia del Foglio 342 Orbetello del progetto Regionale CARG 1:10.000.

A nord l'area raggiunge il blando rilievo alle cui pendici settentrionali sorge l'abitato di Fonteblanda, mentre a sud comprende il paese di Albinia e termina in corrispondenza del limite settentrionale della Laguna di Ponente. L'area è in gran parte pianeggiante e gli unici rilievi sono situati a N del torrente Osa e sono costituiti dai contrafforti di Poggio Ospedaletto (102 m s.l.m.), Poggio Talamonaccio (101 m s.l.m.) e Poggio Civitella (86 m s.l.m.).

La pianura presenta quote inferiori ai 5 m nelle zone più prossime al torrente Osa ed al fiume Albegna e nella fascia compresa tra i due corsi d'acqua nella porzione che ricade tra il cordone sabbioso dunale attuale e quello della paleo-costata, situato circa 1 km nell'entroterra, dove malgrado le bonifiche localmente sussistono zone umide. È presente una stretta fascia rilevata costituita da sabbie che corre parallela alla linea di costa, da cui dista circa 1 km, ascrivibile ad un paleo cordone costiero.

L'idrografia è fortemente influenzata dalle opere di bonifica della pianura costiera e di rettifica del torrente Osa e del fiume Albegna. La bonifica integrale, avvenuta in due fasi, durante il fascismo e nel secondo dopoguerra (Legge stralcio n. 841 del 1950), ha infatti in parte obliterato le preesistenti evidenze morfologiche della pianura e modificato l'idrografia, come evidenziato dal confronto delle carte topografiche recenti con le mappe del 1831 del cosiddetto "catasto leopoldino" realizzato durante l'epoca del Granducato di Toscana (Figura 2).

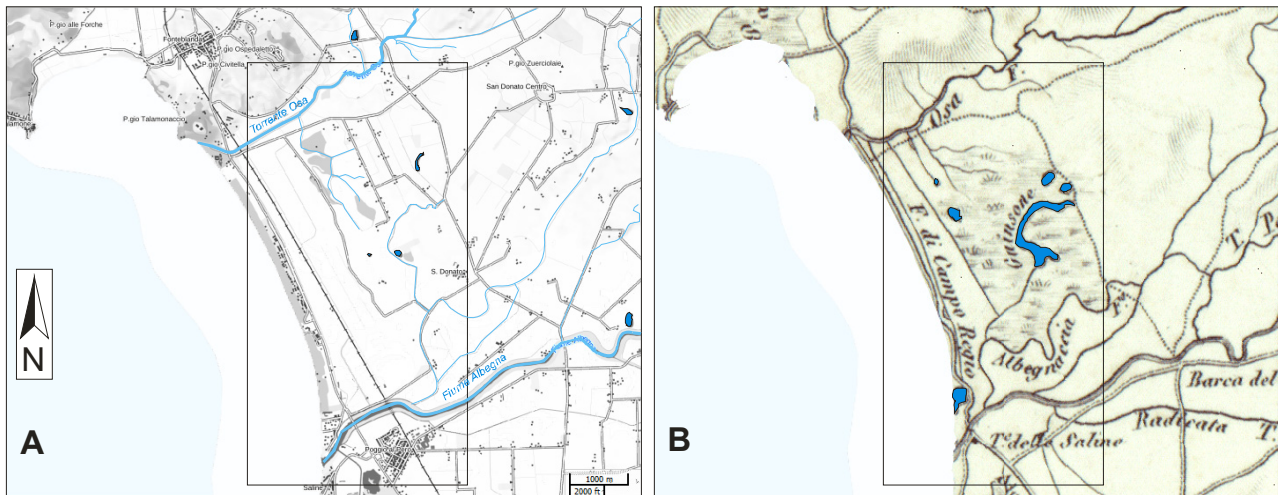


Figura 2 – Confronto tra la carta topografica della Regione Toscana (2010) (A) e la mappa del catasto leopoldino del 1831 disegnata da Giovanni Inghirami (B) (Progetto CASTORE, 2016).

Dal punto di vista litologico, nella zona sono affioranti o subaffioranti formazioni appartenenti alle Liguridi e alla Falda Toscana, quest'ultima sovrastante per contatto tettonico (Figura 3). Ai fini del presente studio non verrà descritta l'evoluzione geologica della regione le cui formazioni, in estrema sintesi, rappresentano l'apertura e l'approfondimento dell'oceano Ligure-Piemontese e la sua successiva chiusura con formazione dell'orogene appenninico.

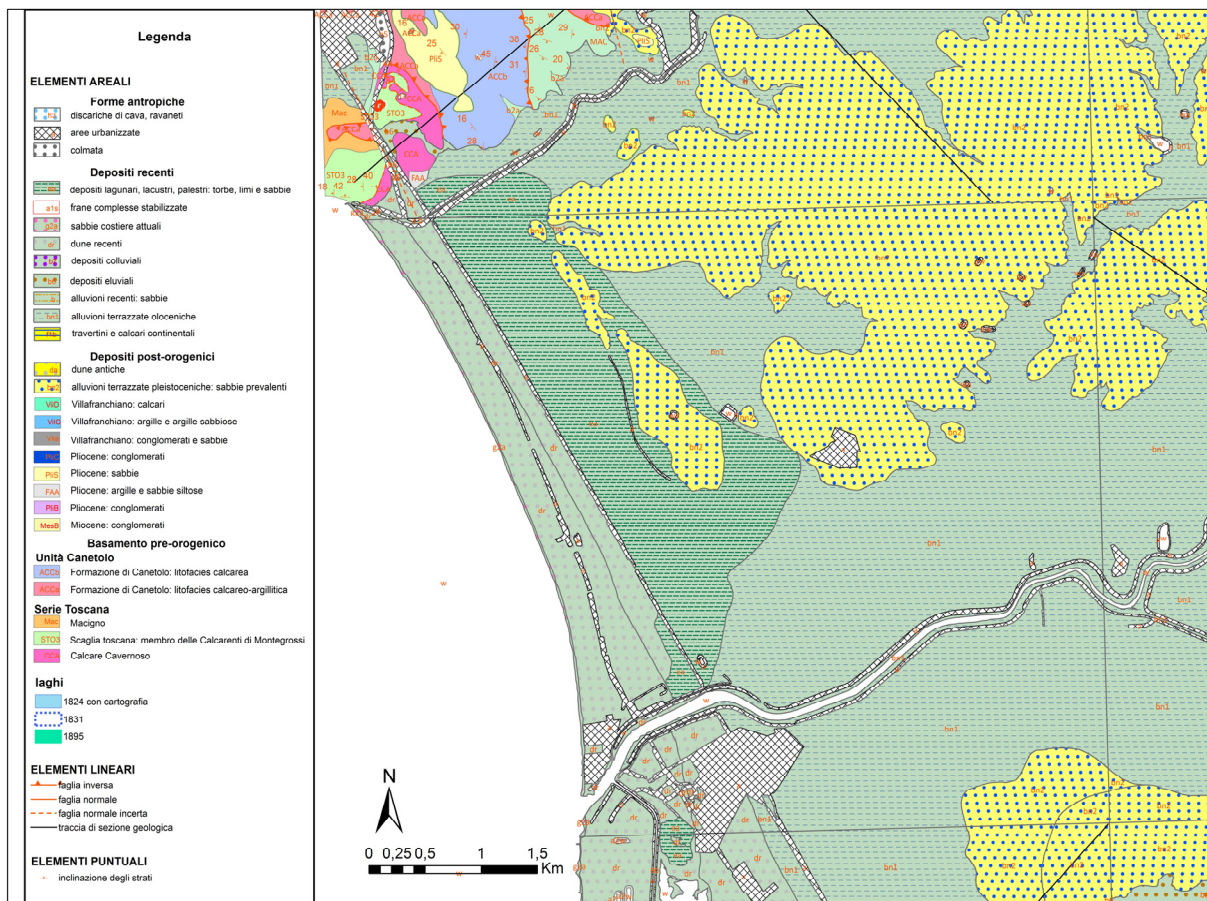


Figura 3 – Stralcio della carta geologica della Toscana, scala 1:10.000 sez. 342070 - Orbetello.

Di queste formazioni risulta di particolare interesse quella del Calcare Cavernoso, affiorante ai piedi del Poggio Talamonaccio e nell'entroterra di Orbetello e sub-affiorante nell'area di studio. L'importanza di questa formazione, come rivelato dal nome stesso, risiede anche nel fatto che è tipicamente affetta da processi di carsismo e quindi associata a *sinkholes*.

Nell'area sono presenti affioramenti di depositi pliocenici marini costituiti da sabbie ed argille in destra orografica dell'alto corso del torrente Osa e sulla sommità di Poggio Civitella. La presenza di depositi pliocenici marini tiltati ed a quote superiori rispetto all'altitudine massima dell'oscillazione eustatica interglaciale testimonia la persistenza di una sensibile attività tettonica successiva al Pliocene. Gran parte della pianura del torrente Osa e del fiume Albegna è ricoperta da alluvioni terrazzate costituite da ghiaie, sabbie e limi datati dalle carte del Progetto Regionale CARG al Pleistocene medio-superiore. Questi depositi affiorano verso l'entroterra fino ad una distanza minima di 1.5 km dalla linea di costa lungo una fascia parallela all'attuale cordone sabbioso costiero. La fascia compresa tra il cordone sabbioso costiero attuale ed i depositi terrazzati del Pleistocene e limitate aree verso l'entroterra rispetto al cordone sabbioso pleistocenico presso la località Tre Piscine sono infine riempite da depositi di ambiente lagunare e di colmata.

Lo spessore di questi depositi è, allo stato attuale delle conoscenze, difficilmente valutabile con sicurezza. Nell'area in esame sono stati effettuati almeno 15 sondaggi indicati nel Progetto Banca Dati del Sottosuolo della Regione Toscana, la cui localizzazione e le cui profondità sono illustrate in Figura 4. Stando alla sintetica descrizione delle stratigrafie, in nessuna delle perforazioni si incontrano livelli calcarei. Questo dato porterebbe ad ipotizzare che almeno in alcuni punti dell'area oggetto del presente studio il Calcare Cavernoso si trovi ad una quota inferiore rispetto a quella raggiunta dal sondaggio più profondo nella zona (-94 m) e che negli spessori interessati non vi siano livelli travertinosi, che invece affiorano diffusamente 5-

10 km verso l'entroterra rispetto all'area in esame, al tetto sia dei terreni pliocenici e villafranchiani che delle alluvioni recenti.

Sono state inoltre consultati i dati delle stratigrafie di altri sondaggi effettuati nelle aree circostanti a quella di studio, dai quali è emerso che nelle aree esterne all'area di studio (sondaggi 21001822, 21002390, 21002395, 21003499, 21003543, 21003544, 21003550, 21003642 e 21003675 in verde in Figura 4) il Calcere Cavernoso giace ad una profondità dal piano di campagna variabile ed in progressivo approfondimento fino a -44 m in corrispondenza del sondaggio 21001822 nelle aree più distanti rispetto ai Monti di Orbetello, costituiti interamente da Calcere Cavernoso. In corrispondenza del sondaggio 21003546 sono stati descritti livelli calcarei tra la profondità di -38.5 m dal piano di campagna e fondo pozzo, non attribuiti da un punto di vista formazionale. Si riporta infine che la stratigrafia del sondaggio 21002387 presenta argilloscisti, marne e arenarie tra la profondità di -105 m e -145 m (corrispondente con il fondo pozzo).

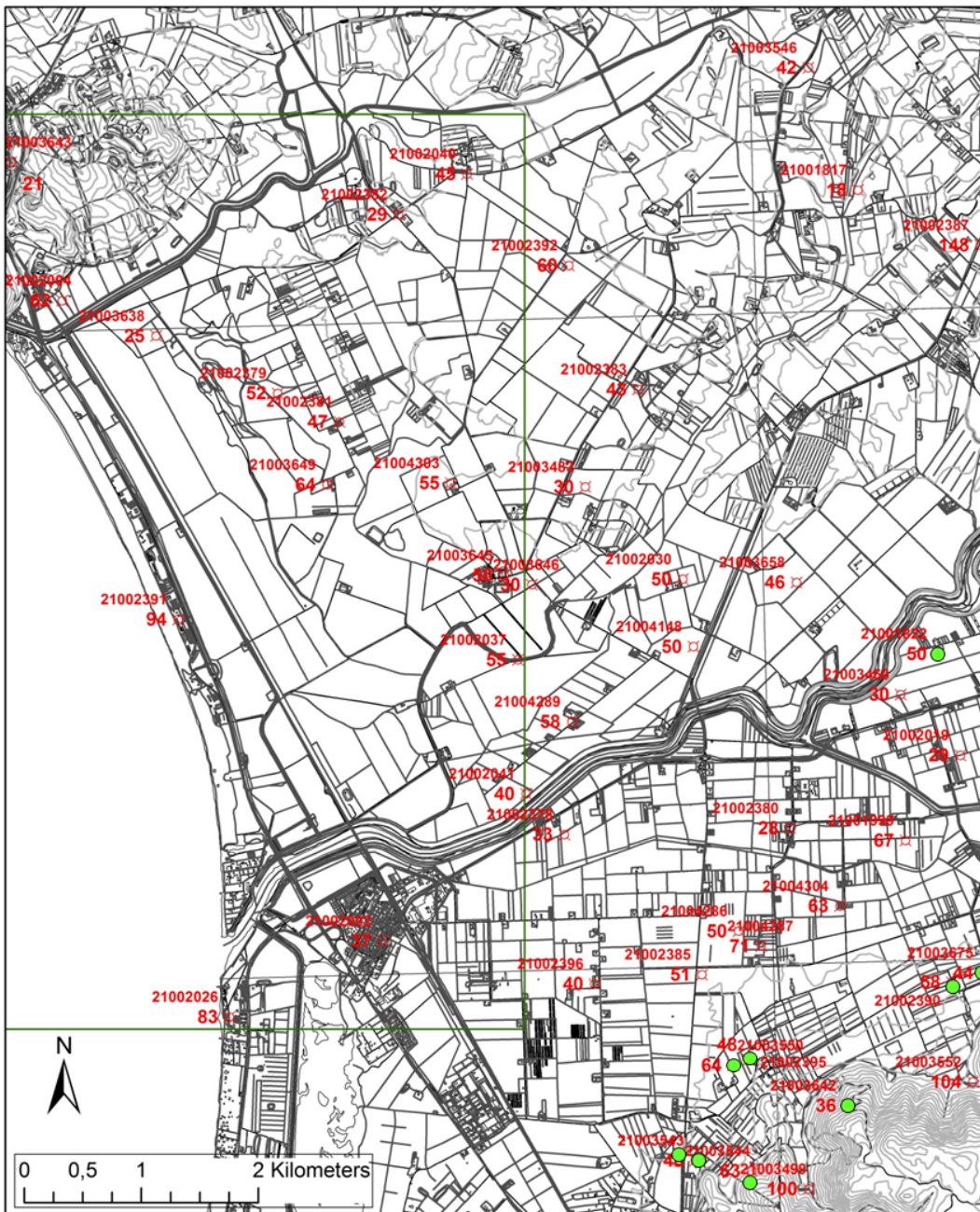


Figura 4 – Area in esame con localizzazione, profondità di fondo pozzo e codice identificativo dei sondaggi presenti sul database del Progetto Banca Dati del sottosuolo della Regione Toscana. In verde sono indicati i sondaggi esterni all'area di studio, ma ugualmente oggetto della presente relazione.

3.2 Sinkholes nell'area di studio

Uno studio di dettaglio è stato svolto sia nel tratto compreso tra il Torrente Osa e il Fiume Albegna, sia nelle zone limitrofe dove siano presenti caratteristiche geologiche analoghe.

Nelle vicinanze dell'area di indagine, nell'areale delimitato dalla piana dell'Albegna, dal Torrente Radicata e dalla valle del Giardino dove affiora il Calcere Cavernoso è presente un noto sistema di grotte carsiche appartenenti alle cosiddette "aree carsiche minori" della Toscana (Fallani e Magazzini, 2002). Qui sono state rilevate 26 cavità superficiali e profonde, generalmente legate a fenomeni non più in atto e risalenti probabilmente all'ultima ingressione marina plio-pleistocenica. Localmente vengono chiamate "bottini" le cavità verticali che talora possono presentare un proseguimento sotterraneo, "grandi caverne" le evoluzioni dei "bottini" che presentino ingressi ampi e profondi che proseguono in gallerie inclinate, ed infine le "pescine" (o "piscine") le doline a fondo piatto più superficiali che possono riempirsi d'acqua dopo le piogge e che venivano impiegate come abbeveratoi per il bestiame. I fenomeni maggiori hanno un diametro di alcune decine di metri ed una profondità di circa 50 m.

Alcuni laghetti nell'area di Capalbio, circa 15 km a ESE dall'area di indagine (Mori, 1932), sono stati identificati come *sinkholes*; le acque dei laghi sono caratterizzate da chimismo carbonatico, e da rive con depositi di travertino la cui origine può essere ricondotta a fenomenologie di collasso carsiche (Nisio, 2008b). Questi laghi, per alcuni dei quali fonti rinascimentali testimonierebbero una formazione improvvisa e catastrofica (Nisio, 2008b), sono il Lago di S. Floriano, i laghi di Marruchetone, il Lago di Cutignolo, il Lago di Acquato, il Lago Scuro presso Manciano.

Il fenomeno accertato più importante e più recente si individua nella piana di Grosseto, circa 20 km a NNO dall'area di studio, in località Bottegone (Berti et al., 2002; Nisio, 2008b). Qui il 19 gennaio 1999 si verificò un *sinkhole* del diametro di 188 m e profondità 17 m sviluppatosi in un contesto geologico analogo a quello della piana tra Torrente Osa e Fiume Albegna: depositi sedimentari di spessore che, tramite indagini sismiche, è stato presunto pari a 200-250 m; un substrato costituito da Calcere Cavernoso; la presenza di tre sorgenti idrotermali (38 °C) nelle vicinanze. L'assenza di possibili inneschi antropici, la formazione di vulcanelli di fango e l'incremento del livello piezometrico permettono di ipotizzare che l'origine del *sinkhole* sia legata al crollo di una cavità nel substrato o a un processo di *deep-piping* (Nisio et al., 2008b).

Concentrandosi sull'area oggetto dello studio, la mappatura effettuata da ISPRA individua 8 *sinkholes* (Tabella 2 e Figura 5); il *database* relativo al Progetto *Sinkhole* riporta inoltre come incerto il fenomeno indicato come "Podere 34", mentre per "Podere 55" riporta la possibilità che possano essere presenti travertini nel sottosuolo. La formazione di tali fenomeni è riportata come sconosciuta e comunque antecedente al 1950.

ID	Nome	Latitudine	Longitudine	Diametro
53028	Ceppaie 1	42°31'50"	11°12'17"	80 m
53029	Ceppaie 2	42°31'58"	11°12'11"	75 m
53030	Ceppaie 3	42°32'7"	11°12'10"	35 m
53031	Podere 34	42°33'37"	11°12'27"	190 m
53032	Podere 55	42°32'47"	11°14'25"	130 m
53033	Tre piscine 1	42°32'32"	11°13'2"	123 m
53034	Tre piscine 2	42°32'36"	11°12'56"	110 m
53035	Tre piscine 3	42°32'37"	11°13'4"	50 m

Tabella 1 – *Sinkholes* individuati dal Progetto *Sinkhole* (ISPRA, 2016) all'interno dell'area di studio.



Figura 5 – Localizzazione dei *sinkholes* cartografati nell’ambito del Progetto *Sinkhole* (ISPRA, 2016).

Oltre al sopralluogo volto a verificarne eventuali evidenze geomorfologiche (paragrafo 4), sono state eseguite analisi basate sullo studio di foto aeree e di cartografie storiche. Sono stati analizzati i voli degli anni 1954, 1985, 1989, 1996, 1997. In tutti questi casi, anche a causa della scala delle foto (variabile da 1:33.000 a 1:40.000) che non sempre consente l’individuazione di corpi di piccole dimensioni, non è stata riscontrata la presenza di depressioni o corpi d’acqua che possano essere ricondotti a *sinkholes*.

L’immagine ottica Landsat del 22 agosto 2013 mostra la presenza di un laghetto quadrangolare di 40x50 m in corrispondenza di “Ceppaie 2” (Figura 6); la stagionalità di tale corpo d’acqua è testimoniata dal fatto che risultasse asciutto nelle immagini Landsat del 26 agosto 2003 e del 3 settembre 2004.



Figura 6 – Immagini satellitari multitemporali che mostrano il laghetto in corrispondenza di “Ceppaie 2” (da Google Earth).

L’assenza di ulteriori conferme sulla presenza dei *sinkholes* dall’osservazione di foto aeree e immagini satellitari nell’area di studio è probabilmente anche dovuta al fatto che gli eventi in questione possono essere stati ricolmati con una delle bonifiche effettuate in Maremma, l’ultima delle quali risale al 1950; nel database di ISPRA l’ipotesi della colmata è fornita solo per i *sinkholes* in località Tre piscine, della cui esistenza è comunque rimasto il toponimo come testimonianza.

Ulteriori informazioni sulla presenza di corpi d’acqua riconducibili a sprofondamenti sono state ricercate nelle cartografie storiche (Figura 2, Figura 7 e Figura 8). La carta del 1824 (Figura 7) riporta diversi laghetti di forma sub-circolare che non corrispondono a nessuno dei fenomeni individuati nel *database* di ISPRA. Di interesse è anche un lago di forma allungata (Lago Guinzoni o Guinsone), posto al centro della carta, il cui proseguimento settentrionale è andato perduto ma che può essere ritrovato nella carta del 1831 (Figura 2); la forma del lago è riconducibile a quella di un paleomeandro. In quest’ultima carta, per via della minore scala, vengono rappresentati solo i laghi di maggiori dimensioni, due dei quali, in località Tre piscine, vengono individuati anche nella carta del 1895 (Figura 8), seppur in una localizzazione leggermente diversa. Quest’ultima mappa mostra che il lago Guinzone (indicato in località Cerpaje, l’odierna Ceppaie) si è ridotto di dimensioni rispetto ai rilievi precedenti e che i due laghi individuati presso le Tre piscine coincidono con i *sinkholes* “Tre piscine 1” e “Tre piscine 2” del *database* di ISPRA. Una carta di sintesi che mostri le caratteristiche litologiche, i laghi delle cartografie storiche e i *sinkholes* del *database* di ISPRA è riportata in Figura 9.

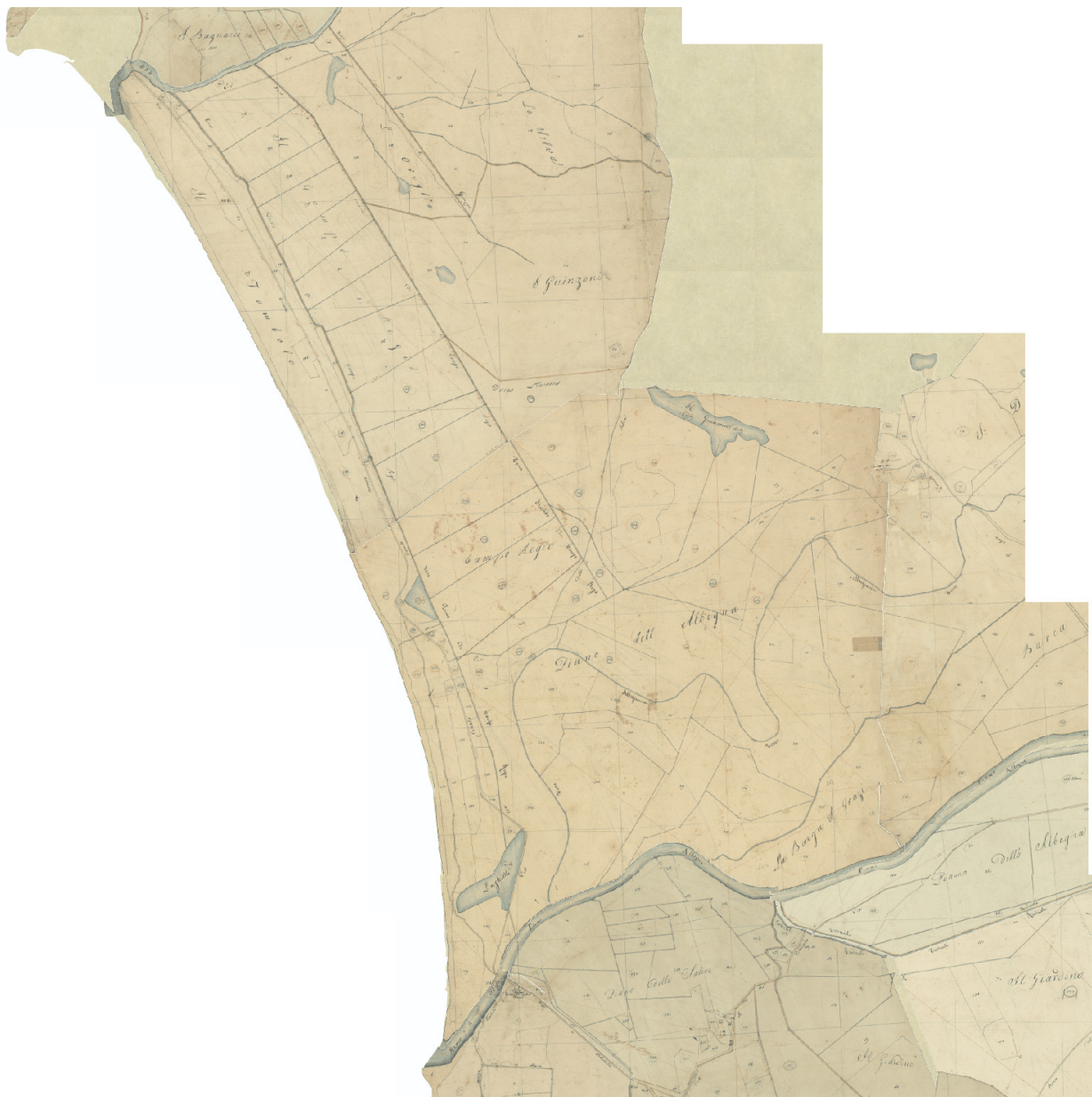


Figura 7 – Stralcio del catasto leopoldino relativo all'area di studio (Progetto CASTORE, 2016).

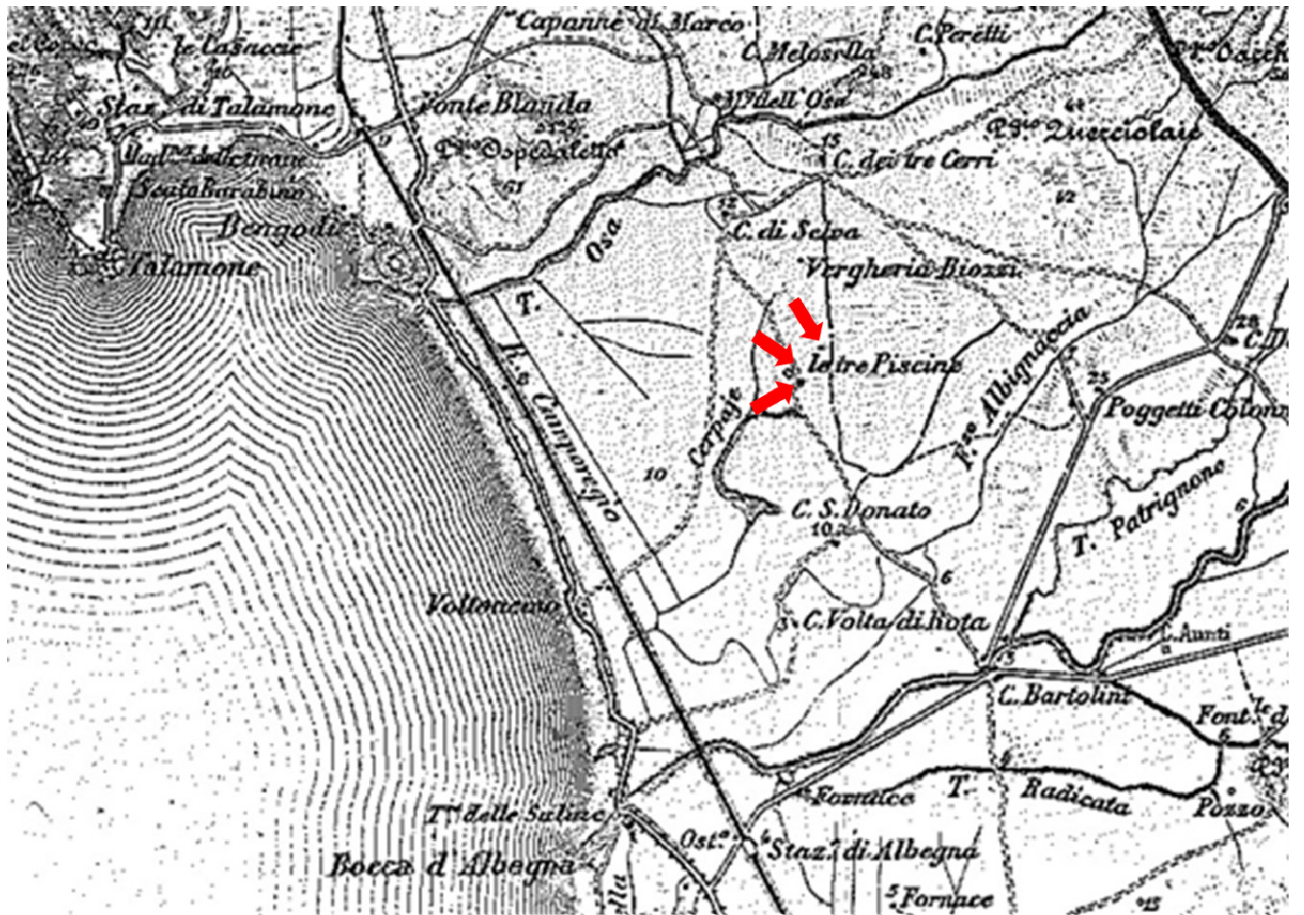


Figura 8 – Stralcio della carta 1:100.000 (Foglio 342 Orbetello) risalente al 1895 (IGM, 2016).

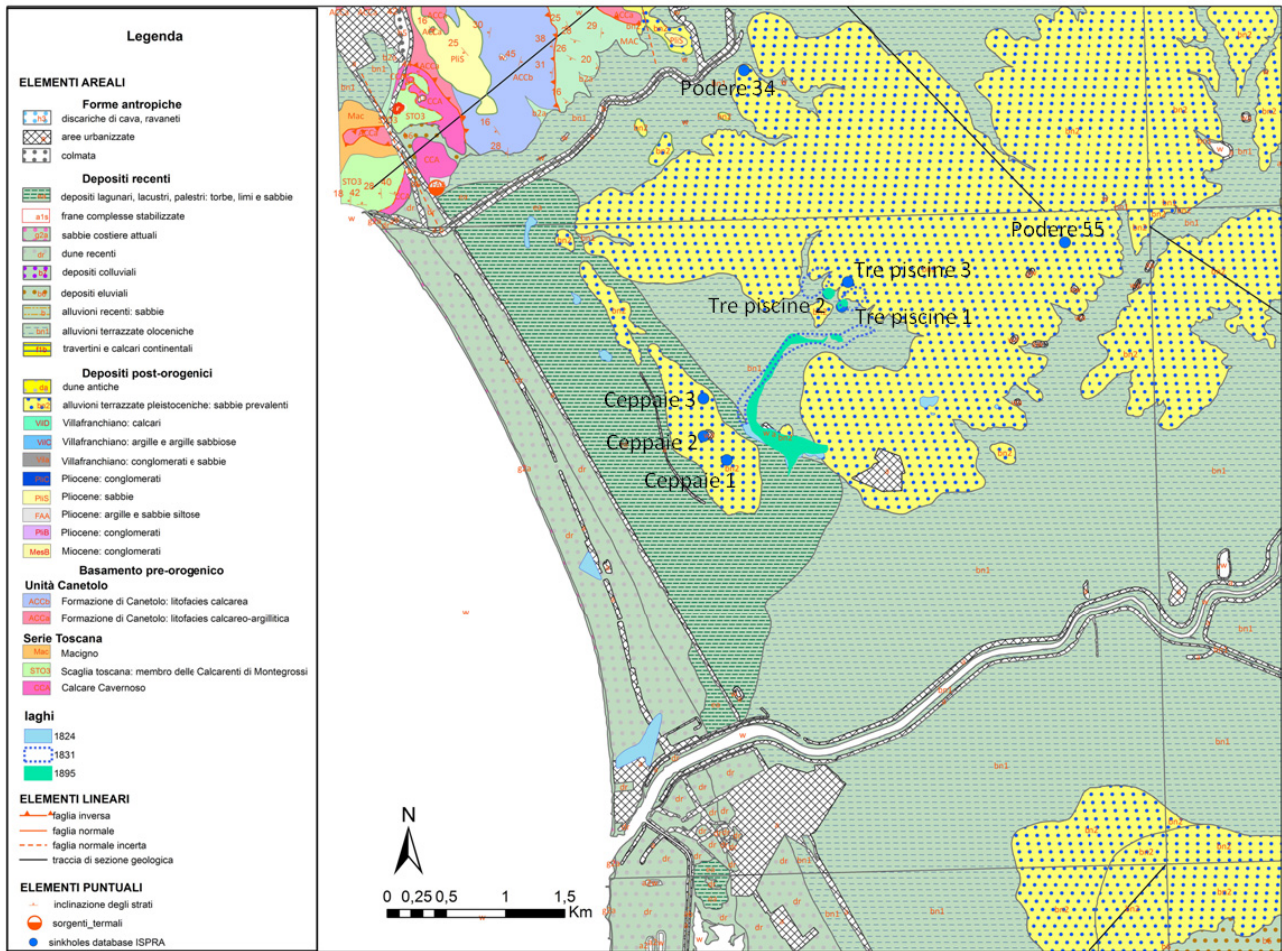


Figura 9 – Mappa di sintesi che mostra le caratteristiche litologiche, i laghi individuati dalle cartografie storiche ed i sinkholes del database di ISPRA (base: stralcio della carta geologica della Toscana, scala 1:10.000 sez. 342070-Orbetello).

3.3 Dati interferometrici satellitari storici

L'interferometria radar rappresenta una tecnica diffusa particolarmente nell'ultimo ventennio ed ampiamente utilizzata per il monitoraggio di fenomeni franosi. Implementata inizialmente su sensori aerei e satellitari, questa tecnologia ha poi avuto rapida diffusione anche su sensori *ground based* (Monserrat et al., 2014; Crosetto et al., 2015).

Con il termine RADAR (acronimo di *RA*dio *DE*tectio*N* *AN*d *R*ang*I*ng) si indicano tutti quei sistemi di telerilevamento attivi, che utilizzano le radiazioni elettromagnetiche appartenenti al dominio delle microonde, ossia aventi lunghezze d'onda comprese tra 1 mm ed 1 m, per rilevare la presenza di un oggetto, la sua distanza e la sua posizione rispetto ad un sensore.

A differenza dei sistemi di telerilevamento passivi, i *radar* inviano attivamente onde elettromagnetiche verso lo scenario osservato, registrandone coerentemente il segnale retrodiffuso da parte dei riflettori presenti sulla scena. In base al calcolo del ritardo temporale tra l'onda inviata e l'eco retrodiffuso, il sistema è in grado di valutare la distanza tra sensore e bersaglio e, quindi, di valutare la posizione relativa di quest'ultimo.

Tramite il confronto tra immagini *radar* della stessa area, acquisite in tempi differenti, è possibile, sfruttando il principio fisico dell'interferenza tra onde, valutare l'eventuale deformazione dell'area osservata, avvenuta tra un'acquisizione e la successiva. In altre parole, questa tecnica, definita interferometria, consiste nel comparare quantitativamente le due immagini acquisite in tempi diversi, ottenendo così degli interferogrammi, ossia delle mappe che rappresentano, *pixel per pixel*, la differenza di

fase delle onde retrodiffuse nelle due acquisizioni. Dallo sfasamento è poi possibile, grazie ad opportune elaborazioni, risalire alla deformazione della scena osservata.

Con dati satellitari, per superare le limitazioni della tecnica legate alla decorrelazione del segnale e al disturbo atmosferico, sono state sviluppate tecniche multi-interferogramma (*Persistent Scatterers Interferometry* PSI); in particolare sono state brevettate dal Politecnico di Milano e dalla sua società di *spin-off* Telerilevamento Europa (TRE) le tecniche dei *Permanent Scatterer* (PS) e *Distributed Scatterer* (DS) basate sull'elaborazione interferometrica di sequenze di immagini SAR, tramite gli approcci di tipo PSInSAR™ e SqueeSAR™ (Ferretti et al., 2001; 2011). Queste tecniche consentono di misurare, con precisione millimetrica e su vaste aree della superficie terrestre, le deformazioni del suolo su singoli punti identificati come riflettori stabili e permanenti (normalmente coincidenti con manufatti o con affioramenti rocciosi). Particolare importanza assumono i risultati di questa tecnica ottenuti in zone ad elevata densità di urbanizzazione, dove risulta possibile monitorare il movimento di singoli edifici.

In via del tutto preliminare, per l'analisi delle deformazioni pregresse nell'area d'interesse relative ai periodi 1992-2000 e 2003-2010, sono stati utilizzati i dati elaborati da T.R.E. (TeleRilevamento Europa) nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST). Il PST è un Accordo di Programma varato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), che ha come principale obiettivo la fornitura e la condivisione di un *database* nazionale contenente misure di movimenti del suolo ottenute tramite interferometria satellitare.

Lo scopo è di creare una visione sinottica dei fenomeni d'instabilità sul territorio italiano, come supporto alle autorità coinvolte in strategie di pianificazione territoriale e gestione dei rischi idrogeologici. L'accordo è stato stipulato tra diversi livelli di governo al fine di generare e rendere disponibili e condivisibili, all'intero comparto della Pubblica Amministrazione, informazioni territoriali ad alto valore aggiunto.

La visualizzazione di tale *database* di movimenti del terreno avviene attraverso il caricamento di servizi *web-cartografici* di tipo WMS (*Web Map Service*) del Portale Cartografico Nazionale (A.A.V.V., MATTM, 2009), sul *software* applicativo *Adb-Toolbox*, sviluppato dal MATTM per l'elaborazione e l'analisi di dati territoriali ed ambientali.

Nell'ambito del progetto PST è stata elaborata una notevole mole di dati satellitari ERS1/2 ed ENVISAT dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) acquisiti negli archi temporali 1992-2002 (scenario storico, ERS) e 2003-2010 (scenario recente, ENVISAT) sull'intero territorio nazionale (analisi *standard* di tipo *regional*), fornendo informazioni di supporto nella formulazione di un quadro sinottico dei fenomeni di dissesto potenziali o in atto sull'intero territorio nazionale. I dati riportati in Tabella 2 sono stati acquisiti e analizzati per la valutazione della stabilità dell'area oggetto di indagine.

Satellite	Geometria	Periodo monitorato
ERS	Discendente	24/04/1992 – 13/12/2000
ENVISAT	Ascendente	26/08/2003 – 11/05/2010
ENVISAT	Discendente	07/05/2003 – 26/11/2008

Tabella 2 – Specifiche dei *datasets* analizzati per il presente studio.

Il satellite ERS-1 è stato lanciato nel 1991 dall'ESA; nel 1995 venne lanciato ERS-2, gemello di ERS-1 e posto sulla stessa orbita ma con un ritardo di un giorno. Nel 2002 ESA ha lanciato il satellite ENVISAT, che orbitava intorno alla terra con un periodo di 100 minuti. Questi satelliti percorrevano orbite elio-sincrone lievemente inclinate rispetto ai meridiani, illuminando, da una quota intorno a 780 km, una striscia di terreno larga circa 100 km con un sistema SAR operante nel dominio delle microonde alla frequenza di circa 5.3 GHz, ovvero con una lunghezza d'onda di circa 5.6 cm, caratteristica fondamentale per poter apprezzare movimenti millimetrici. L'angolo di incidenza locale dell'onda elettromagnetica, per entrambi i casi, risulta mediamente di circa 23° rispetto alla verticale.

La visualizzazione dei *Permanent Scatterers*, classificati in funzione della velocità media annuale registrata durante l'intero periodo di monitoraggio (ottenuta mediante un *fitting* lineare), sull'ortofoto permette di effettuare una preliminare zonazione cinematica dell'area.

Nelle immagini seguenti, la velocità dei PS (espressa in mm/anno) è rappresentata tramite una scala di colori: con il giallo, arancione e rosso si indicano allontanamenti del bersaglio rispetto al satellite lungo la direzione di LOS (segno negativo dello spostamento), con il verde punti sostanzialmente stabili (valori di velocità compresi tra -1,5 e 1,5 mm/anno) e con varie tonalità di blu gli spostamenti in avvicinamento al sensore sempre lungo la direzione sensore-bersaglio (segno positivo dello spostamento).

Dall'osservazione dei dati interferometrici da satellite relativa alla zona compresa tra le frazioni di Fonteblanda ed Ansedonia e, con maggiore dettaglio, alla zona compresa tra le valli del Torrente Osa e del Fiume Albegna, i punti di misura individuati mostrano una sostanziale stabilità con sporadici movimenti locali, dell'ordine di 3 mm/anno.

I PS sono perlopiù localizzati in corrispondenza dei centri abitati e delle principali vie di comunicazione, tra le quali la più importante corrisponde al tracciato della ferrovia. Le aree interessate dai *sinkholes* individuati dal catalogo nazionale redatto da ISPRA (Figura 5) ricadono sostanzialmente in zone interessate da campi coltivati, prive di riflettori permanenti. Ad ogni modo, i pochi PS presenti nelle vicinanze dei suddetti *sinkholes* mostrano una generale stabilità nel periodo di riferimento (1992-2003).

In particolare, in Figura 10 ed in Figura 11 è possibile osservare la distribuzione dei PS ERS discendenti. L'area risulta sostanzialmente stabile, eccetto per alcuni punti localizzati lungo il tracciato dell'Aurelia, i cui spostamenti mostrano un *trend* lineare crescente, come osservabile dalla serie storica riportata a scopo esemplificativo in Figura 11.

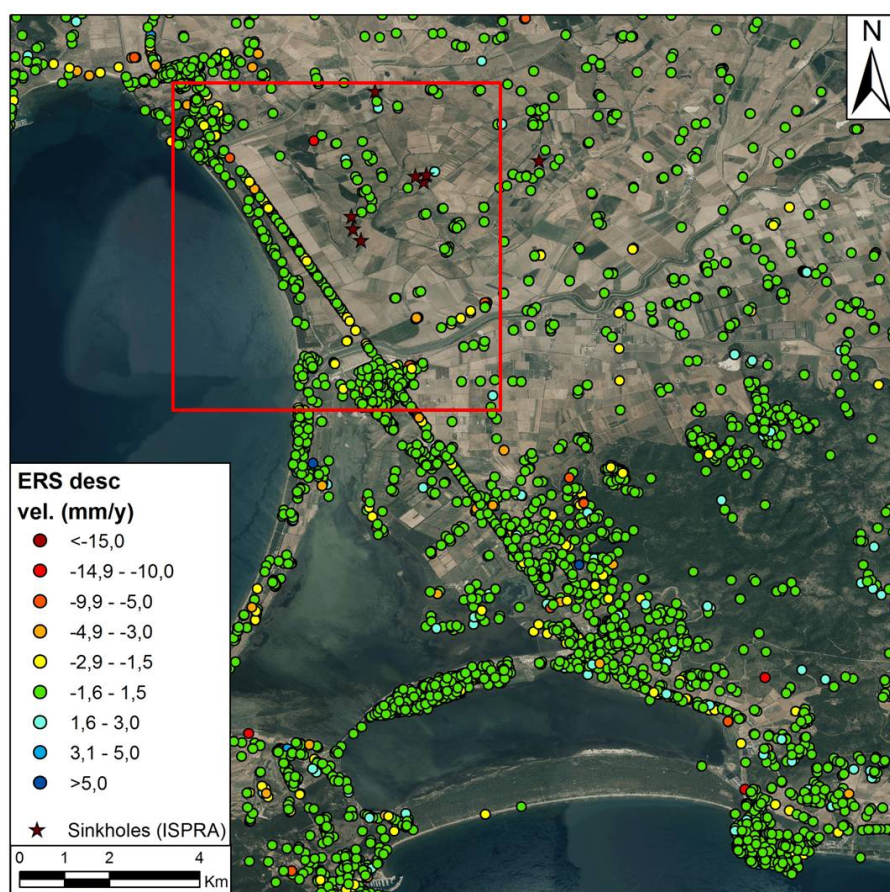


Figura 10 – Distribuzione dei dati PS ERS discendenti, sovrapposti su ortofoto per l'area compresa tra le frazioni di Fonteblanda a Nord ed Ansedonia a Sud, nel comune di Orbetello (GR). Le stelle rosse indicano i *sinkholes* cartografati da ISPRA; il quadrato rosso indica l'area compresa tra le valli dell'Osa e dell'Albegna.

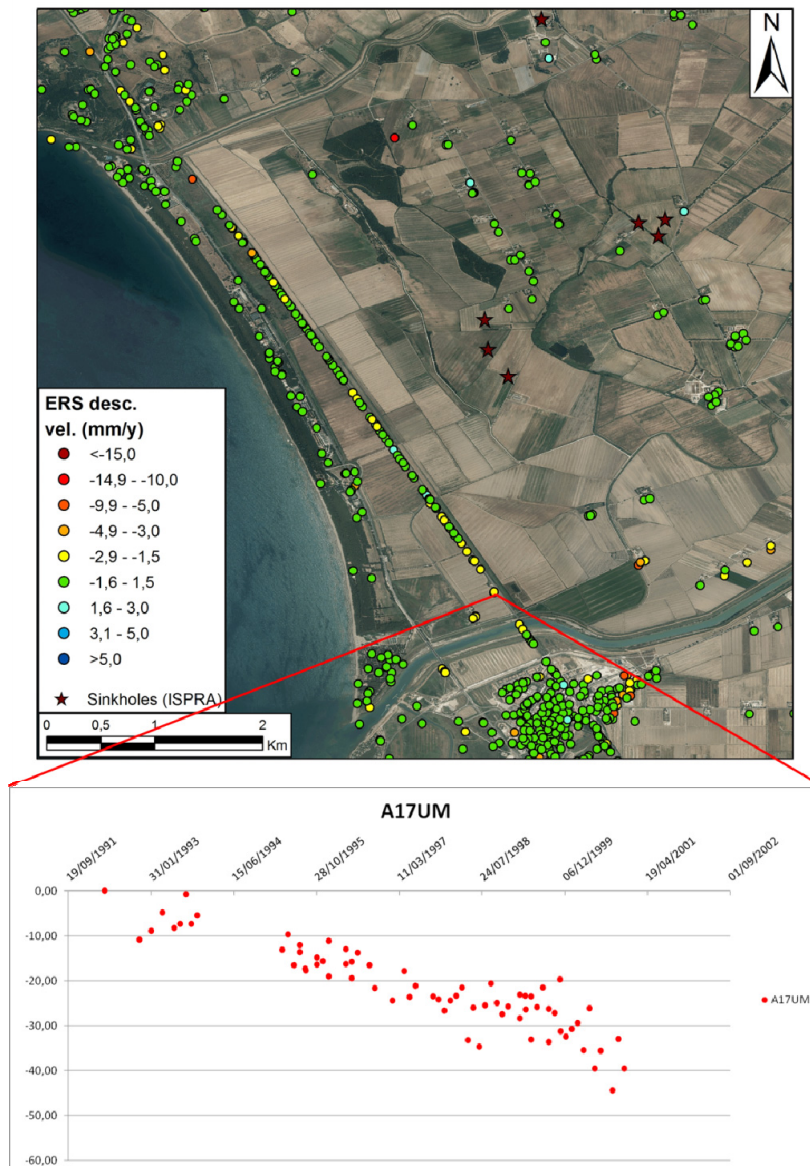


Figura 11 – Distribuzione dei dati PS ERS discendenti relativi all'area compresa tra le valli del Torrente Osa (a Nord) e del Fiume Albegna (a Sud) ed esempio di serie storica di uno dei punti ritenuti più significativi. Le stelle rosse indicano i *sinkholes* cartografati da ISPRA.

Le immagini successive riguardano la distribuzione dei PS Envisat, disponibili sia in orbita ascendente (Figura 12 e Figura 13), sia in orbita discendente (Figura 14 e Figura 15).

La sostanziale stabilità dell'area osservabile dall'analisi dei dati ERS è confermata dai dati Envisat. Localmente è possibile osservare spostamenti dell'ordine dei 3 mm/anno, in particolare in corrispondenza della porzione più orientale dell'abitato di Albinia (serie storica esemplificativa in Figura 13) e lungo il tracciato dell'Aurelia (serie storica esemplificativa in Figura 15).

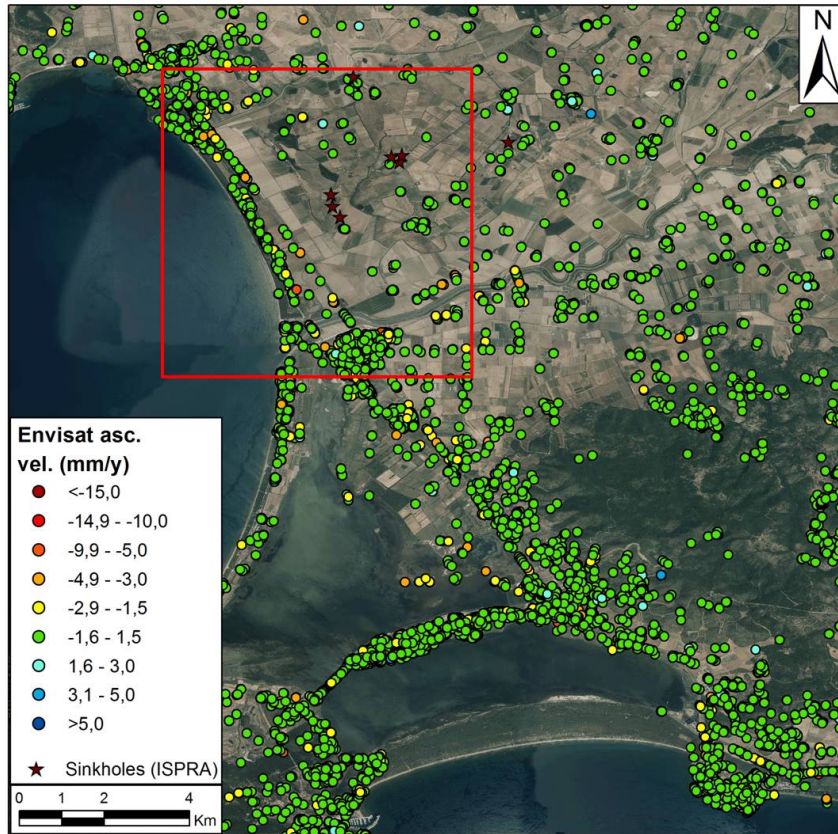


Figura 12 – Distribuzione dei dati PS Envisat ascendenti, sovrapposti su ortofoto per l'area compresa tra le frazioni di Fonteblanda a Nord ed Ansedonia a Sud, nel comune di Orbetello (GR). Le stelle rosse indicano i *sinkholes* cartografati da ISPRA; il quadrato rosso indica l'area compresa tra le valli dell'Osa e dell'Albegna.

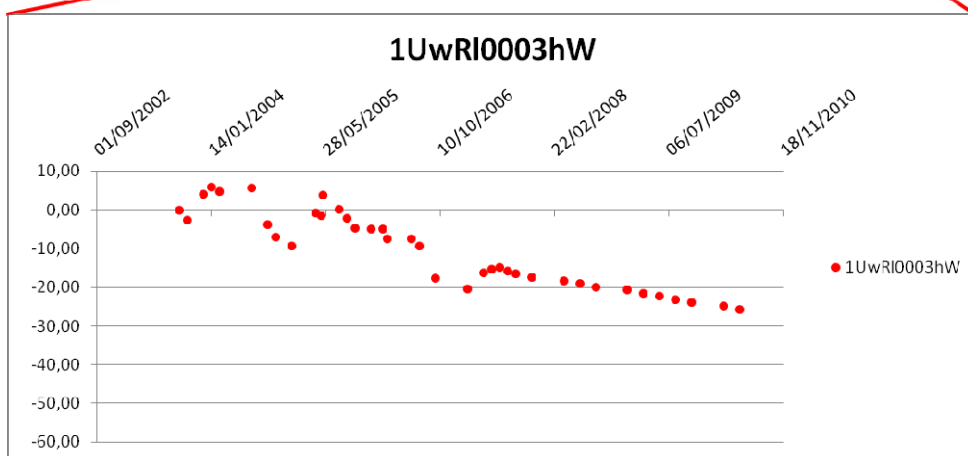


Figura 13 – Distribuzione dei dati PS Envisat ascendenti relativi all'area compresa tra le valli del Torrente Osa (a Nord) e del Fiume Albegna (a Sud) ed esempio di serie storica di uno dei punti ritenuti più significativi. Le stelle rosse indicano i *sinkholes* cartografati da ISPRA.

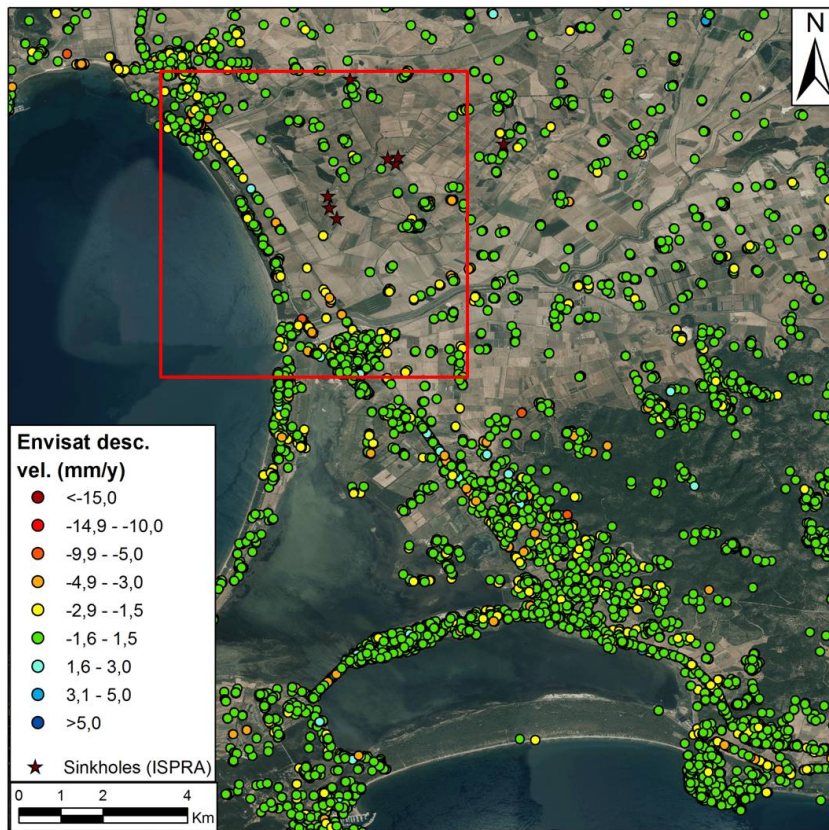


Figura 14 – Distribuzione dei dati PS Envisat discendenti, sovrapposti su ortofoto per l'area compresa tra le frazioni di Fonteblanda a Nord ed Ansedonia a Sud, nel comune di Orbetello (GR). Le stelle rosse indicano i *sinkholes* cartografati da ISPRA; il quadrato rosso indica l'area compresa tra le valli dell'Osa e dell'Albegna.

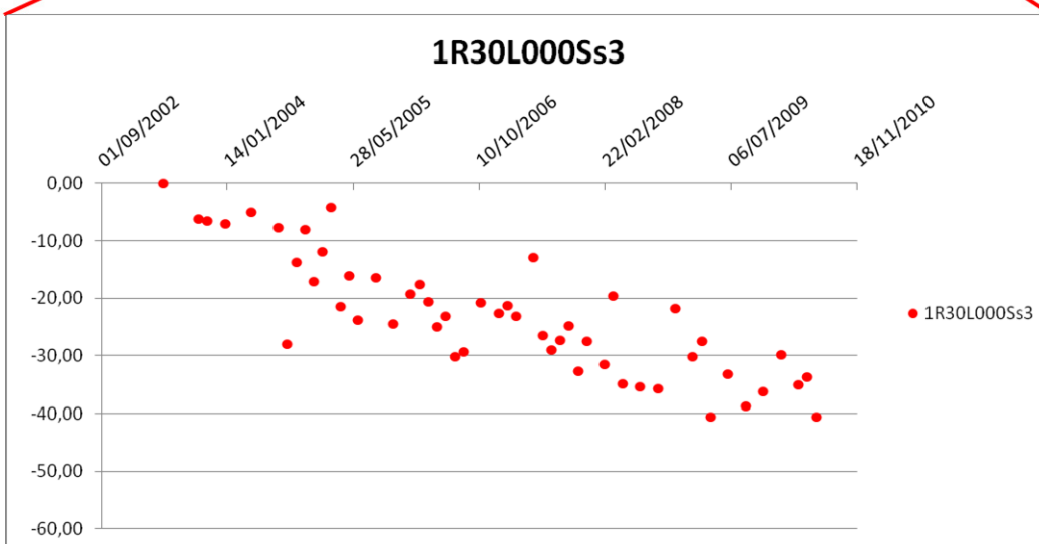
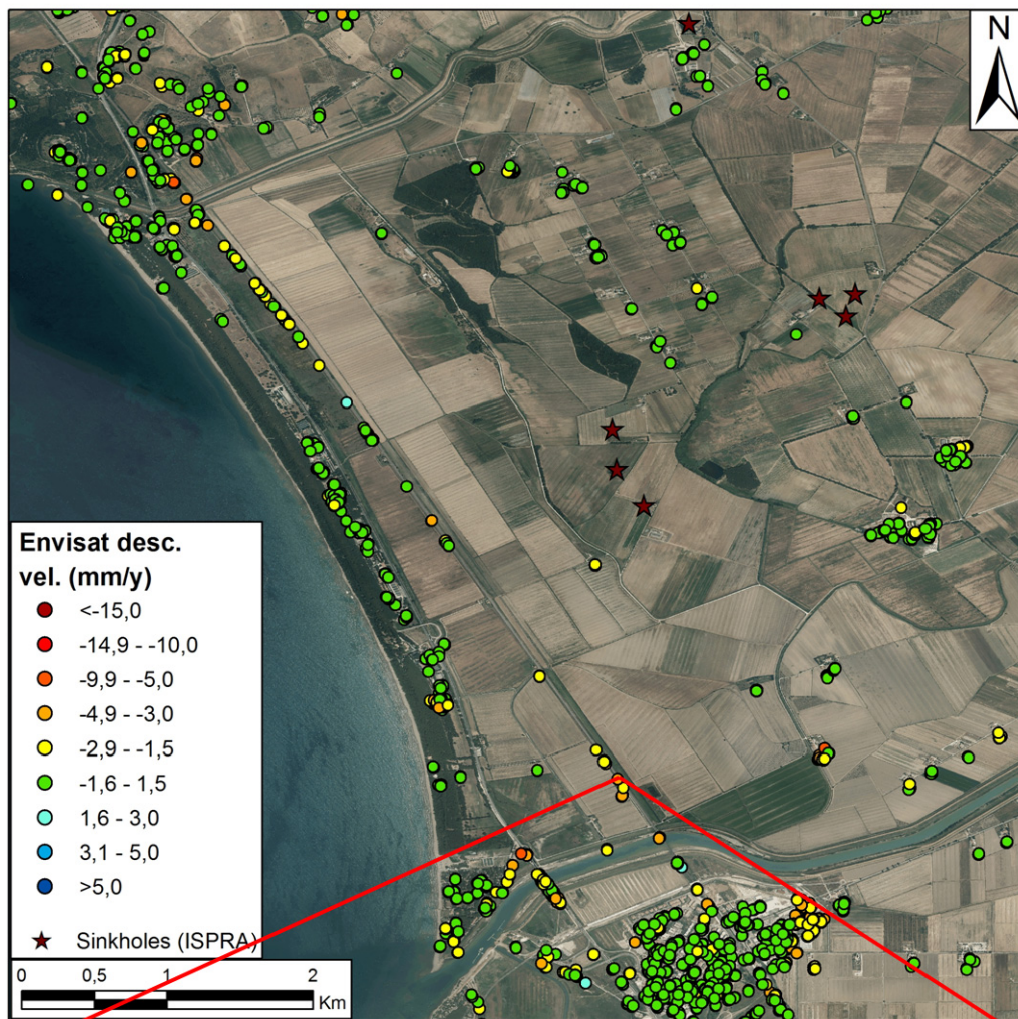


Figura 15 – Distribuzione dei dati PS Envisat discendenti relativi all'area compresa tra le valli del torrente Osa (a Nord) e del Fiume Albegna (a Sud) ed esempio di serie storica di uno dei punti ritenuti più significativi. Le stelle rosse indicano i *sinkholes* cartografati da ISPRA.

3.4 Meccanismi di innesco presunti

Allo stato attuale delle conoscenze, in attesa di studi specifici da condurre nel prosieguo degli studi per la realizzazione dell'autostrada, è possibile formulare delle ipotesi circa i meccanismi di innesco più probabili per la formazione di *sinkholes* nell'area di indagine.

Dato l'elevato spessore di sedimenti, che, sulla base dei sondaggi e della geologia delle zone limitrofe, si può ipotizzare compreso tra i 100 e i 300 m, appare improbabile che fenomeni di sprofondamento possano essere legati a *cover collapse* o *cover subsidence sinkholes*. Questo perché i primi sono solitamente tipici di ambienti in cui i depositi non superano i 30 m, in quando per spessori maggiori gli effetti di una cavità in profondità tendono ad essere assorbiti tramite un riassetto meno consolidato del materiale sedimentario. I secondi invece sono solitamente favoriti da perturbazioni superficiali del livello piezometrico, che però difficilmente hanno effetti a tale profondità, anche a causa della presenza di intervalli coesivi poco permeabili.

Pertanto i meccanismi più probabili sono il *deep-piping* e la formazione per suffosione. La presenza di attività tettonica, di sorgenti idrotermali (Figura 9) e del Calcare Cavernoso nell'area è un elemento chiave per poter avere processi di *deep-piping*. La risalita di fluidi idrotermali in pressione e probabilmente acidi è in grado di spiegare la formazione di cavità nel substrato roccioso e anche nei sedimenti. Per validare questa ipotesi è da verificare, nell'ambito dello studio idrogeologico di seguito proposto, la presenza di un acquifero in pressione ed il chimismo delle acque per valutarne un'eventuale origine profonda. In questo caso l'innesco sarebbe naturale ma potrebbe essere favorito da attività antropiche che causino una repentina decompressione della falda confinata oppure una rottura dell'interfaccia substrato-copertura; infatti nel momento in cui, rotta l'interfaccia di confinamento tra acquifero e copertura, la falda in pressione è libera di spingere sui terreni sovrastanti (*pumping*), si possono innescare fenomeni di erosione meccanica diretta dei terreni di copertura stessi e soprattutto, se le condizioni di circolazione carsica lo permettono, di dissoluzione chimica, di trasporto solido ed allontanamento del materiale eroso da parte della circolazione idrica sotterranea.

Invece nel caso in cui le cavità si formino per suffosione la causa innescante sarebbe da ricercare nelle variazioni repentine del livello freatico (soprattutto ad opera di pompaggi intensi, scavi, forti piogge, rotte di argini), mentre i fattori predisponenti nella presenza di porzioni di terreno permeabili nei primi metri del sottosuolo. La geologia dell'area e alcuni indizi forniti dallo studio di foto aeree e del catasto leopoldino suggeriscono che tali corpi granulari possano essere rappresentati da paleo-dune e paleo-meandri. L'identificazione di questi volumi potrà essere condotta tramite opportune indagini geofisiche di seguito suggerite.

4 Sopralluogo

In data 15 gennaio 2016 il personale del DST-UNIFI ha effettuato un sopralluogo sull'area di studio per verificare la presenza di evidenze geomorfologiche di *sinkholes*, in particolare verificando quelli cartografati da ISPRA ed altre forme sospette individuate nella fase di analisi di immagini aeree e satellitari.

Nel corso degli ultimi decenni le forme del territorio sono state pesantemente rimaneggiate per vari scopi che vanno dalle bonifiche, alle canalizzazioni, all'attività agricola. Oltretutto la carenza di parti edificate non rende possibile l'individuazione di eventuali fratture che potrebbero essere spia di deformazioni del sottosuolo. Pertanto il riconoscimento di *sinkholes* dalle sole manifestazioni superficiali risulta estremamente difficoltoso.

In località Tre piscine il terreno risulta completamente piano, coperto da coltivazioni senza segni apparenti di depressione. Esiste un'area del diametro inferiore ai 10 m coperta di canne (Figura 16) che indica la presenza di una zona umida; questa è una tipica evoluzione di fenomeni di sprofondamento, tuttavia le ridotte dimensioni e la prossimità con un canale irriguo non supportano questa tesi.



Figura 16 – Foto del 15 gennaio 2016 che mostra l'area di Tre piscine e un piccolo canneto, tipico di zone umide.

In località Ceppaie, dei tre punti individuati da ISPRA, è stato rinvenuto che in corrispondenza di "Ceppaie 2" è ad oggi presente un laghetto di forma regolare (Figura 17), di circa 40x50 m di lato (e quindi compatibile con i 75 m di diametro indicati da ISPRA), già individuato dall'osservazione delle immagini satellitari (Figura 6). Questo parte da circa 1 m al di sotto del piano campagna, con delle rive più scoscese verso O e dolci verso E. I *sinkholes* naturali hanno in genere una forma sub-circolare che con il tempo può variare a causa di crolli e cedimenti successivi o per mano dell'uomo. In questo caso, vista la regolarità della forma, sarebbe necessario ipotizzare un intervento antropico, forse finalizzato all'aratura.



Figura 17 – Foto del 15 gennaio 2016 del laghetto che si trova dove il *database* di ISPRA segnala il *sinkhole* “Ceppaie 2”. L’apparente forma ricurva è dovuta ad un effetto di distorsione del grandangolo utilizzato per effettuare una fotografia panoramica; in realtà il corpo d’acqua ha una forma rettangolare.

Il sopralluogo presso il punto in cui nel *database* di ISPRA è indicato come “da verificare”, il *sinkhole* “Podere 34” ha mostrato che la forma circolare seguita dalla strada non è da attribuirsi alla presenza di un vecchio lago ma piuttosto ad un leggero rilievo (forse una duna residuale o terreno di riporto; Figura 18), il che consente di escluderlo come possibile *sinkhole*.

Infine, presso il punto “Podere 55” (Figura 19), il sopralluogo ha mostrato un terreno interamente mascherato dall’attività agricola che non ha evidenziato alcuna traccia che faccia presupporre o escludere l’esistenza di un *sinkhole*.



Figura 18 – Foto che mostra un poggio coltivato laddove la cartografia di ISPRA ipotizzava un *sinkhole* descritto come “da verificare”.



Figura 19 – Foto che mostra il terreno in cui il database di ISPRA colloca il *sinkhole* “Podere 55”.

5 Programma di indagini

Da quanto emerso risulta di primaria importanza impostare un programma di indagini volto a colmare le lacune conoscitive che sono prevalentemente legate all'individuazione di un substrato calcareo (nonché di eventuali cavità sotterranee), di eventuali corpi drenanti sub-superficiali (come paleo-meandri) e alla caratterizzazione delle falde freatiche presenti.

5.1 Indagine idrogeologica

Al fine di verificare la possibilità di processi di *deep-piping* risulta importante caratterizzare la falda profonda anche da un punto di vista geochimico, così da dimostrare o escludere l'esistenza di flussi profondi in risalita. Tale studio si esplica anche nel determinare se ed in che misura acque di circolazione profonda possano essere contaminate dalle acque idrotermali presenti nella zona e quanto invece siano affini a quelle superficiali. Si prevede pertanto che vengano effettuate delle analisi geochimiche volte a determinare gli elementi maggiori, il pH, la conducibilità, la temperatura e la profondità di campionamento. Idealmente, la falda di maggiore interesse per questa verifica è quella presente nel Calcare Cavernoso; tuttavia, non essendo nota con esattezza la profondità di tale falda, è possibile che il suo raggiungimento non risulti fattibile da un punto di vista economico. In tal caso è comunque importante cercare di effettuare un campionamento alla massima profondità possibile.

Sono previsti 5 punti di prelievo per la caratterizzazione delle acque, localizzati come segue:

1. In corrispondenza del sondaggio SPEA SD13 (coordinate N4712941.442 E1678904.416).
2. In corrispondenza del sondaggio SPEA SD16 (coordinate N4711263.624 E1679859.812).
3. In corrispondenza del sondaggio SPEA SD20 o, alternativamente, del sondaggio SPEA SD21. Qualora in uno di questi casi la perforazione non fosse ancora avvenuta, si propone di incrementare le profondità di perforazione fino all'eventuale raggiungimento del substrato o di 150 m di profondità, così da poter campionare la falda presente nel substrato.
4. In corrispondenza del sondaggio 4/1 SD17 (indagini SPEA 2011), ove questo fosse ancora accessibile e fruibile. Il sondaggio infatti è prossimo all'area termale dell'Osa ed intercetta il substrato, pertanto potrebbe rappresentare un buon punto di prelievo per la caratterizzazione geochimica dell'acquifero profondo.
5. Si propone infine, qualora i sondaggi di cui al punto 2 non soddisfino le caratteristiche di profondità richieste, la perforazione di un ulteriore pozzo, con profondità fino all'eventuale raggiungimento del substrato o di 150 m di profondità, ubicato in prossimità del tracciato, in corrispondenza della zona interessata dai *sinkhole* mappati da ISPRA e identificati come Ceppaie 1, Ceppaie 2, Ceppaie 3. Indicativamente le coordinate di tale sondaggio sono N4711085.359 e E1680255.868.

Nel caso in cui sprofondamenti possano essere invece generati da flussi sub-superficiali che per suffosione portino alla formazione di vuoti all'interno di corpi sedimentari granulari, risulta importante lo studio dei deflussi superficiali e sub-superficiali. Questo comprende la ricostruzione del reticolo idraulico superficiale ed eventualmente sub superficiale, che tenga conto di tubature che, in caso di perdite, potrebbero facilmente rappresentare un rischio di liquefazione del terreno. Lo studio deve anche comprendere il monitoraggio dei livelli piezometrici nell'area volta a ricostruire il livello freatico e le sue oscillazioni; questo deve essere eseguito almeno per un anno con una misura ogni 3 mesi presa in corrispondenza di tutti i piezometri di SPEA. Ciò permetterebbe di valutare quantitativamente l'effetto dell'attività antropica (pompaggi, scavi) e delle precipitazioni sulla falda e quindi su eventuali sprofondamenti; inoltre le misure effettuate potrebbero essere correlate con eventuali fenomeni di subsidenza che potrebbero essere individuati dal monitoraggio satellitare. Non si riscontra la necessità di effettuare bilanci idrici di bacino.

Spesso deformazioni profonde e voragini di sprofondamento sono associati a variazioni del livello freatico che quindi è indice di disequilibri nel sottosuolo.

5.2 Indagini sismiche a riflessione

Al fine di ricostruire in maniera precisa la geologia del sottosuolo dell'area di studio, si propone una campagna di indagini sismiche a riflessione. La sismica a riflessione permette infatti di realizzare una ricostruzione piuttosto fedele dell'assetto stratigrafico e strutturale dei corpi geologici.

Le tecniche di base per l'esplorazione sismica consistono nel generare onde sismiche artificialmente nel terreno e misurare il tempo necessario a queste onde per coprire il tragitto dalla sorgente ai ricevitori. Tramite l'analisi dei tempi di arrivo delle onde ai vari ricevitori e delle relative velocità, è possibile ricostruire il percorso del raggio sismico.

Quindi, l'indagine sismica a riflessione consiste nell'energizzazione del sottosuolo e nella registrazione degli arrivi delle onde di compressione (onde P) riflesse, o delle onde di taglio (onde SH) riflesse, in corrispondenza di geofoni verticali. La realizzazione di una campagna di indagini mediante sismica a riflessione è basata sulla definizione di alcuni parametri, che sono:

- distanza minima/massima tra sorgente e ricevitore;
- distanza tra i geofoni;
- copertura nominale;
- tipo di stendimento;
- filtri in acquisizione.

La distanza tra i geofoni e la lunghezza totale dello stendimento influenzano la profondità di indagine che è tanto maggiore, quanto maggiore è la lunghezza dello stendimento. In prima approssimazione, la distanza tra la sorgente ed il primo ricevitore dello stendimento corrisponde circa alla minima profondità investigabile, mentre la distanza tra la sorgente e l'ultimo ricevitore dello stendimento è pari o poco inferiore alla massima profondità investigabile.

La risoluzione orizzontale dipende invece dalla distanza tra i geofoni ed è tanto maggiore quanto minore è questa distanza; dal momento che le indagini sismiche vengono solitamente eseguite impiegando 24 o 48 geofoni posti equidistanti lungo lo stendimento, se ne ricava che la distanza inter-geofonica è data dal rapporto tra la lunghezza dello stendimento ed il numero di geofoni utilizzati.

Per quanto riguarda i filtri, questi sono spesso utili in fase di acquisizione per separare il segnale sismico dal rumore di fondo.

L'obiettivo dell'indagine è l'acquisizione di un profilo sismico che permetta di ricostruire le geometrie e gli spessori dei terreni alluvionali presenti nell'area di studio e, soprattutto, di localizzare la profondità del substrato roccioso, presumibilmente superiore ai 100 m, come deducibile dai sondaggi geognostici effettuati.

Lo stendimento andrà realizzato in maniera tale da scorrere il più possibile parallelamente al previsto andamento del tracciato autostradale. Tale stendimento potrà subire modifiche in relazione a possibili difficoltà logistiche, legate alla presenza di ostacoli (quali muretti a secco, filari di alberi, fossi ecc.).

Lo studio iniziale della cartografia dell'area e il successivo sopralluogo sul terreno, effettuato in data 15 gennaio 2016, hanno permesso di effettuare delle valutazioni preliminari circa l'estensione e la localizzazione del possibile profilo sismico. La localizzazione suggerita per lo stendimento è mostrata in Figura 20.

Il profilo consigliato ha un andamento circa NO-SE. Si prevede di effettuare più stendimenti successivi della lunghezza di 250 m, per ottenere una profondità di indagine di almeno 200 m, con spaziatura tra i geofoni di 5 m (48 geofoni), oppure di 10 m (24 geofoni). I geofoni devono essere in un numero minimo di 24, con

frequenza propria variabile tra 8 e 14 Hz, per la sismica ad onde di taglio e tra 25 e 100 Hz, per la sismica ad onde di compressione.

La necessità di realizzare più stendimenti successivi è legata all'esigenza di effettuare un'indagine il più possibile esaustiva di tutta l'area di interesse, avente una lunghezza totale di circa 6 km. Si propone quindi di effettuare 25 stendimenti della lunghezza di 250 m, in direzione parallela al tracciato autostradale, nonché la realizzazione di 6 stendimenti della lunghezza di 250 m, in direzione trasversale al tracciato, ubicati come riportato in Figura 20.

La strumentazione necessaria per l'acquisizione del profilo sismico richiederà almeno 4 unità principali: un sistema di acquisizione dati (sismografo), un sistema di trasduzione (geofoni), un sistema di immagazzinamento dati ed un sistema di energizzazione. Il sistema di energizzazione più adeguato alla profondità di indagine andrà valutato dalla ditta esecutrice dei lavori, in base anche al numero di geofoni a disposizione ed alle caratteristiche tecniche della strumentazione; potrà essere costituito da:

- martello strumentato, lasciato cadere su piastra metallica appoggiata al suolo;
- cannoncino sismico;
- energizzatori olopneumatici e/o gravimetrici trainati e/o trasportati;
- cariche di esplosivo.

Considerata la profondità dell'indagine, si consiglia l'utilizzo di un maglio di 50-100 kg o, alternativamente, di cariche esplosive.

Ad integrazione dell'indagine sismica sarà necessario realizzare un rilievo topografico di dettaglio, che comprenda la determinazione plano-altimetrica delle localizzazioni dei geofoni delle basi sismiche a riflessione.

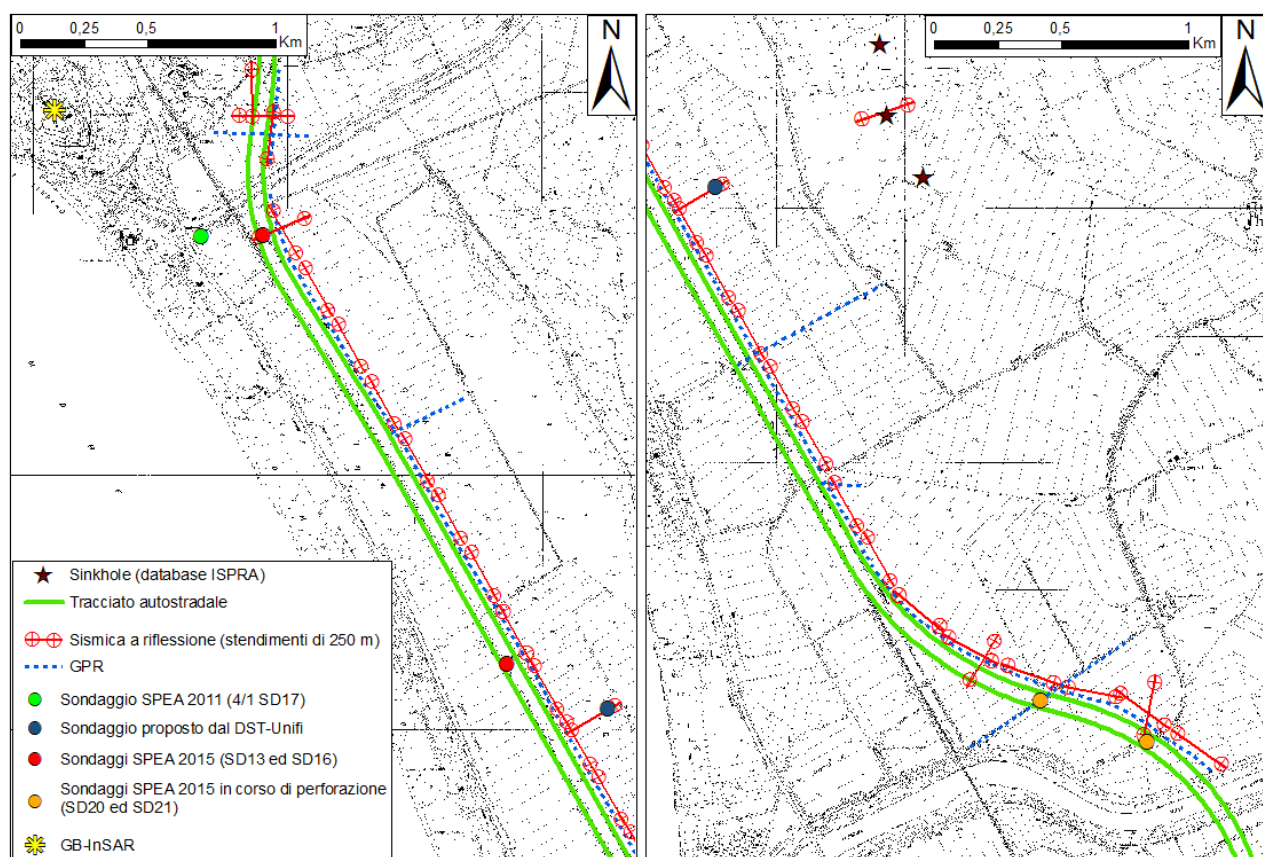


Figura 20 – Progetto delle indagini proposte.

5.3 Indagini georadar

Rispetto ad altre tecniche di indagine indiretta, come la sismica a riflessione, il georadar (o *Ground Penetrating Radar*, GPR) consente di raggiungere profondità generalmente minori, ma caratterizzate da una migliore risoluzione e soprattutto da una velocità di esecuzione estremamente maggiore. Infatti, tra i principali vantaggi della tecnica GPR c'è la possibilità di realizzare l'indagine in maniera speditiva, montando la strumentazione su un automezzo ed effettuando acquisizioni lungo il tracciato autostradale di progetto e, lungo 5 tratti, trasversalmente ad esso per lunghezze variabili a seconda della presenza o meno di ostacoli (Figura 20). Per tale ragione si propone di effettuare una campagna di indagini tramite GPR finalizzata all'individuazione di eventuali cavità propagatesi fin quasi alla superficie nonché a valutare l'ipotesi che *sinkholes* possano essere causati da fenomeni di sifonamento e suffosione di lenti di sedimenti grossolani all'interno dei depositi sovrastanti il substrato.

Il metodo del GPR si basa sul principio della propagazione di impulsi elettromagnetici nei materiali e sulla loro riflessione in corrispondenza delle superfici di discontinuità dovute a variazioni della costante dielettrica dei materiali investigati. Il segnale energizzante è rappresentato da una sequenza di impulsi ad altissima frequenza, mentre il segnale di ritorno viene trasformato in tensione elettrica variabile ed amplificato. Il tipo di frequenze utilizzate è legato alle dimensioni delle antenne, che possono variare significativamente in relazione all'obiettivo del rilievo.

In generale il sistema è composto da tre parti principali: il generatore d'onda radar con la capacità di generare segnali ad altissima frequenza (da qualche decina a qualche migliaio di MHz), l'antenna o le antenne riceventi e quelle trasmittenti. Un parametro importante per la qualità del rilievo è dato dalla distanza tra l'antenna e la superficie, che non dovrebbe essere superiore ai 10 cm. Il rilievo va eseguito il più possibile in maniera uniforme e con velocità regolare.

Il risultato del rilievo GPR sono immagini bidimensionali del sottosuolo con in ascisse la distanza proporzionale all'apertura delle antenne e in ordinata il tempo di andata e ritorno degli impulsi elettromagnetici. La scala temporale sull'asse delle ordinate può essere trasformata in scala di profondità; questa conversione sarà tanto più precisa quanto più il materiale è omogeneo, dato che richiede la necessità di stimare la velocità media di propagazione delle onde elettromagnetiche nel mezzo attraversato.

In fase di organizzazione della campagna di indagini vanno considerati quattro aspetti fondamentali:

- le dimensioni dell'antenna (che sono proporzionali alla lunghezza d'onda del segnale emesso);
- la profondità di indagine (frequenze più basse permettono di avere coefficienti di assorbimento più bassi e quindi una profondità più alta);
- la risoluzione, tenendo presente che diminuisce al diminuire della frequenza e che due riflessioni orizzontali risultano distinguibili tra loro solo se a distanza superiore di $\lambda/4$ (dove λ è la lunghezza d'onda del segnale);
- gli effetti di dispersione, legati a fenomeni di perdita di energia.

Un altro aspetto da non trascurare riguarda la scelta dell'orientazione delle antenne, che influenza fortemente i risultati ottenibili dalle indagini. Se l'antenna trasmittente e la ricevente sono poste perpendicolarmente alla direzione di investigazione, la sovrapposizione delle loro impronte risulta maggiore, permettendo così di identificare oggetti sparsi all'interno del mezzo o riflettori per profondità e intervalli di distanza più ampi.

La Tabella 3 mostra le profondità d'indagine attese (in favorevoli condizioni di propagazione) per antenne di frequenza compresa fra 30 e 2000 MHz (Daniels, 1996).

Frequenza centrale (MHz)	Penetrazione (m)	Risoluzione verticale (m)	Dimensioni (m)
31	16	1,6	4,8
63	8	0,8	2,4
125	4	0,4	1,2
250	2	0,2	0,6
500	1	0,1	0,3
1000	0,5	0,05	0,15
2000	0,25	0,03	0,075

Tabella 3 – Relazione tra frequenza centrale di acquisizione di un'antenna GPR con determinate dimensioni (m) e profondità di penetrazione e risoluzione verticale (Daniels, 1996).

Come osservabile in Tabella 3, antenne ad alta frequenza (>400 MHz) forniscono elevate risoluzioni spaziali, ma limitate profondità di penetrazione, quindi sono adatte per investigare spessori modesti. Al contrario, antenne a bassa frequenza consentono una penetrazione superiore, a discapito della risoluzione spaziale. Tuttavia i valori indicati sono da ritenersi puramente indicativi, in quanto fortemente influenzati dalla presenza di eventuali lenti nel terreno, nonché dal contenuto d'acqua (che riduce la penetrazione del segnale). Ad esempio, rimanendo nel campo dello studio di *sinkholes*, Gómez-Ortiz e Martín-Crespo (2012) hanno impiegato una antenna ad alta frequenza (200 MHz) per raggiungere una profondità di 6 m. In caso di terreno sabbioso non saturo, Hager e Carnevale (2006) hanno raggiunto una profondità di investigazione di 40 m utilizzando un'antenna con frequenza pari a 15 MHz. Inoltre, solitamente, viene sfruttata la rapidità di esecuzione della tecnica per eseguire indagini utilizzando due frequenze diverse così da ottenere sia un *dataset* caratterizzato da una maggiore profondità sia uno caratterizzato da una maggiore risoluzione (Gutiérrez et al., 2011; Gómez-Ortiz e Martín-Crespo, 2012).

Per le ragioni sopra indicate risulta impossibile prevedere con precisione la profondità di indagine che potrà essere ottenuta impiegando una determinata frequenza. Per far fronte a ciò si raccomanda preventivamente l'impiego di 3 tipi di antenne: da 20 MHz, 200 MHz e 400 MHz.

Nell'area di indagine compresa tra le valli dei torrenti Osa ed Albegna, la presenza di spessori elevati di sedimenti ad alta conducibilità rende difficoltoso l'utilizzo di tale strumentazione per l'investigazione di spessori del sottosuolo molto elevati, tuttavia le profondità raggiunte potranno essere considerate sufficienti per valutare la presenza di possibili elementi predisponenti la formazione di *sinkholes*. In fase di realizzazione sarà necessario valutare gli effettivi ostacoli presenti e, ove necessario, variare il profilo in relazione alle condizioni di campagna.

Si consiglia infine di effettuare le misure in periodi poco piovosi, in quanto l'umidità nel terreno, aumentandone la conducibilità, tende ad attenuare il segnale radar.

5.4 Sondaggi geognostici

Per lo studio presente, l'esecuzione di sondaggi ha una molteplice funzione. Sondaggi effettuati prima delle indagini geofisiche hanno lo scopo di ricostruire la stratigrafia e individuare la profondità del substrato, informazioni importanti per la caratterizzazione del rischio *sinkhole* e la progettazione delle indagini geofisiche. Queste inoltre sono un elemento fondamentale per tarare ed interpretare le informazioni ricavate dalle misure geofisiche. Sondaggi svolti a seguito delle prospezioni geofisiche hanno invece l'obiettivo di verificare e validare eventuali situazioni anomale che possono essere state riscontrate.

Oltretutto i sondaggi permetterebbero l'esecuzione di prove geotecniche e di analisi geochimiche sulle acque profonde, a supporto alle indagini idrogeologiche.

Si raccomanda l'esecuzione di almeno un sondaggio profondo che vada ad integrare il programma di sondaggi già effettuati ed equamente distribuiti sulla lunghezza del tracciato e posti in prossimità di esso (Figura 20). Il sondaggio dovrà essere a carotaggio continuo almeno per i primi 25 m. La profondità del sondaggio dovrebbe essere tale da raggiungere il tetto del basamento; qualora questo dovesse risultare

particolarmente profondo, il sondaggio si potrà arrestare ad una profondità minore, in funzione del *budget* disponibile, e comunque non inferiore a 150 m. In linea con quanto proposto nel paragrafo 5.1, si prevede che il sondaggio possa essere perforato con tali caratteristiche in corrispondenza del sondaggio SPEA SD20 o, alternativamente, del sondaggio SPEA SD21, qualora uno dei due non sia già stato effettuato. Nel caso in cui tali sondaggi siano già stati effettuati senza le caratteristiche proposte, si raccomanda l'esecuzione di uno in prossimità del tracciato, in corrispondenza della zona interessata dai *sinkholes* mappati da ISPRA e identificati come Ceppaie 1, Ceppaie 2, Ceppaie 3. Indicativamente le coordinate di tale sondaggio sono N4711085.359 e E1680255.868.

5.5 Prove geotecniche

In corrispondenza del sondaggio geognostico indicato nel paragrafo 5.4, si propone di effettuare delle prove penetrometriche. Tali prove possono fornire informazioni sulla qualità del terreno e del substrato pur mantenendo i costi contenuti. Nello specifico, ipotizzando l'alternanza di terreni granulari e coesivi, si raccomanda l'esecuzione di prove SPT e CPT da effettuarsi a seconda del tipo di terreno incontrato. Si propone l'esecuzione di 3 prove nei primi 25 m di terreno.

Si propone inoltre il prelievo di campioni finalizzati alla determinazione di granulometria, peso di volume, resistenza al taglio e, per i terreni coesivi, anche dei limiti di Atterberg e dei risultati di una prova edometrica. Tali prove dovrebbero essere ripetute su almeno 3 campioni prelevati a 3 diverse profondità (indicativamente a 2 m, 10 m, 25 m e comunque mirate a caratterizzare gli orizzonti più significativi attraversati) allo scopo di caratterizzare il terreno e di comprenderne la suscettibilità a fenomeni di liquefazione o di resistenza nel caso in cui siano presenti cavità sottostanti.

5.6 Studio di dati interferometrici satellitari recenti

In ragione del fatto che allo stato attuale delle conoscenze non esistono modi per conoscere con certezza e precisione dove e quando si potrà verificare un *sinkhole*, una strategia di mitigazione del rischio rimane il monitoraggio preventivo, volto ad individuare fenomeni precursori di eventuali sprofondamenti; infatti, anche in assenza di evidenze geomorfologiche che testimonino la presenza di *sinkholes*, è comunque possibile che eventuali deformazioni del terreno possano mostrare l'esistenza di voragini di sprofondamento ancora attive nel sottosuolo. Esperienze di questo tipo sono comparse in letteratura scientifica di recente, grazie agli sviluppi tecnologici disponibili negli ultimi anni (Nof et al., 2013; Jones et al., 2014; Intriery et al., 2015).

I satelliti in particolare sono infatti in grado di misurare sia piccoli movimenti precursori precedenti il collasso, sia, a collasso avvenuto, le eventuali deformazioni che persistono lungo i bordi della voragine. La tecnica interferometrica consente di misurare soltanto la componente di spostamento che avviene lungo la linea di vista (*Line Of Sight*, LOS) del sensore, ossia lungo la congiungente sensore-bersaglio; di conseguenza, essendo la LOS dei satelliti pressoché perpendicolare alla superficie terrestre, i movimenti verticali attribuibili a fenomeni di sprofondamento sono particolarmente adatti ad essere monitorati da piattaforme satellitari.

Per definire un quadro deformativo aggiornato rispetto a quello ricavato dai dati del Piano Straordinario Telerilevamento (paragrafo 3.3) si prevede l'analisi di ulteriori dati interferometrici finalizzata a:

- individuare e localizzare i punti di misura radar al suolo (*Permanent Scatterers* e *Distributed Scatterers*);
- stimare le velocità medie annue di spostamento di tutti i punti di misura (mm/anno) e le serie storiche di spostamento (mm).

Si propone pertanto di realizzare l'analisi storica dei dati acquisiti dai satelliti RADARSAT-1 e RADARSAT-2; si tratta di immagini a media risoluzione, così distribuite:

- 138 immagini derivanti dall'archivio storico del satellite RADARSAT-1 per il periodo compreso tra il 2003 ed il 2010;

- 82 immagini derivanti dall'archivio storico del satellite RADARSAT-2 per il periodo compreso tra il 2008 ed il 2015.

Si propone inoltre l'attivazione *on demand* del satellite ad alta risoluzione (COSMO-SkyMed) su aree specifiche, definite sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi dei dati RADARSAT e, successivamente, l'attivazione di dati ottenuti dal satellite SENTINEL, con possibilità di aggiornamento ad ogni nuova immagine acquisita.

La missione SENTINEL-1 è la prima di sei missioni satellitari progettate da ESA, nell'ambito del progetto europeo Copernicus, finalizzato allo studio dei "cambiamenti" della Terra. La missione SENTINEL-1 è composta da una costellazione di due satelliti equipaggiati con sensori SAR in banda C, con tempi di rivisitazione di 12 giorni. La presenza in orbita dei due satelliti gemelli (SENTINEL-1a e SENTINEL-1b) ha permesso di ridurre il tempo di rivisitazione a 6 giorni. Tale missione opera in modalità preprogrammata, in modo da acquisire archivi consistenti di immagini adatti a programmi di monitoraggio a lungo termine. SENTINEL-1 è in grado di acquisire strisciate di terreno larghe oltre 200 km e di misurare con precisione millimetrica piccoli movimenti della superficie terrestre. Le immagini, non processate, sono disponibili sul sito dell'ESA gratuitamente, con dati regionali aggiornati ogni 6 giorni.

In Figura 21 è possibile osservare in modo schematico la copertura delle immagini satellitari che si propone di analizzare in questa sede.

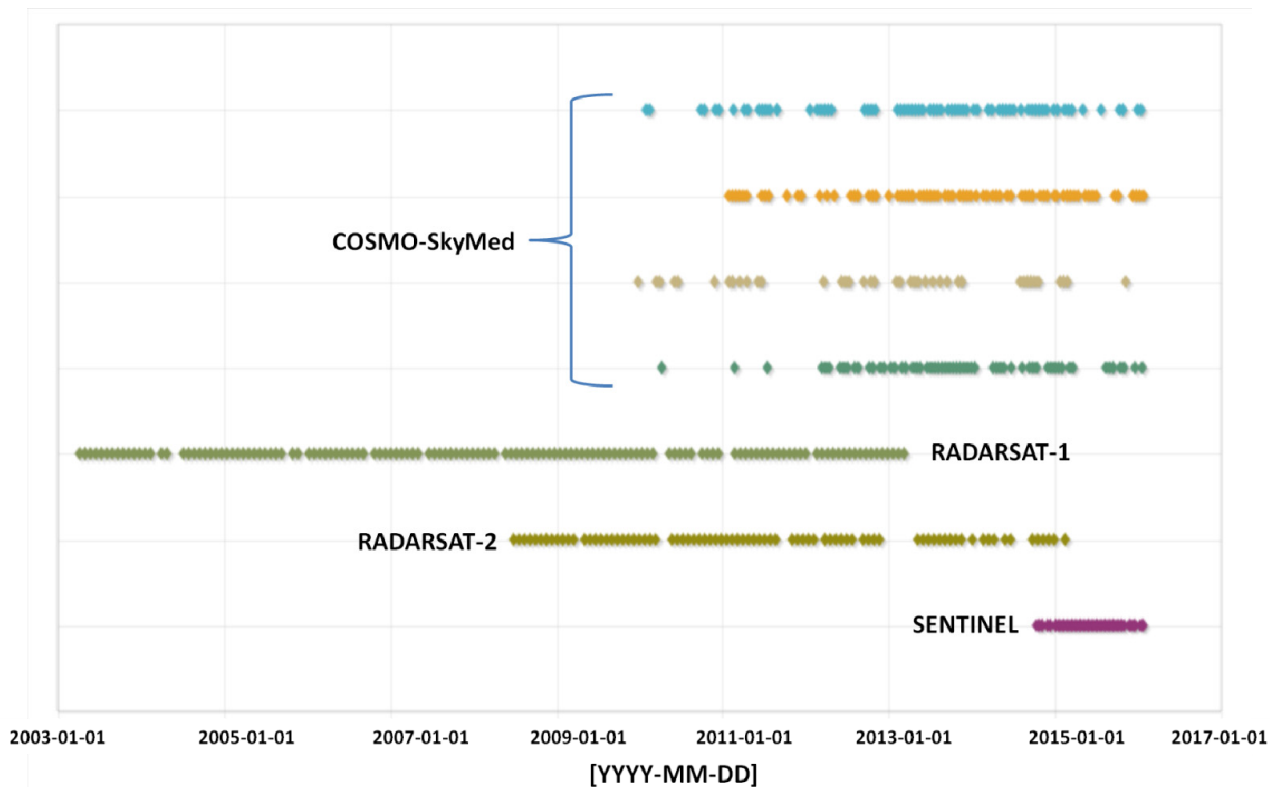


Figura 21 – Copertura temporale delle immagini satellitari proposte per l'analisi.

I dati verranno elaborati con tecnica SqueeSAR™, un'evoluzione della tecnica PS-InSAR™ (Ferretti et al., 2001, 2011).

La copertura temporale dei dati acquisiti dal satellite RADARSAT-1 va da aprile 2003 a marzo 2013; il satellite acquisisce a media risoluzione, ma con ottima distribuzione spaziale, che determina la possibilità di analizzare l'intera area di interesse con un solo *dataset* (Figura 22).

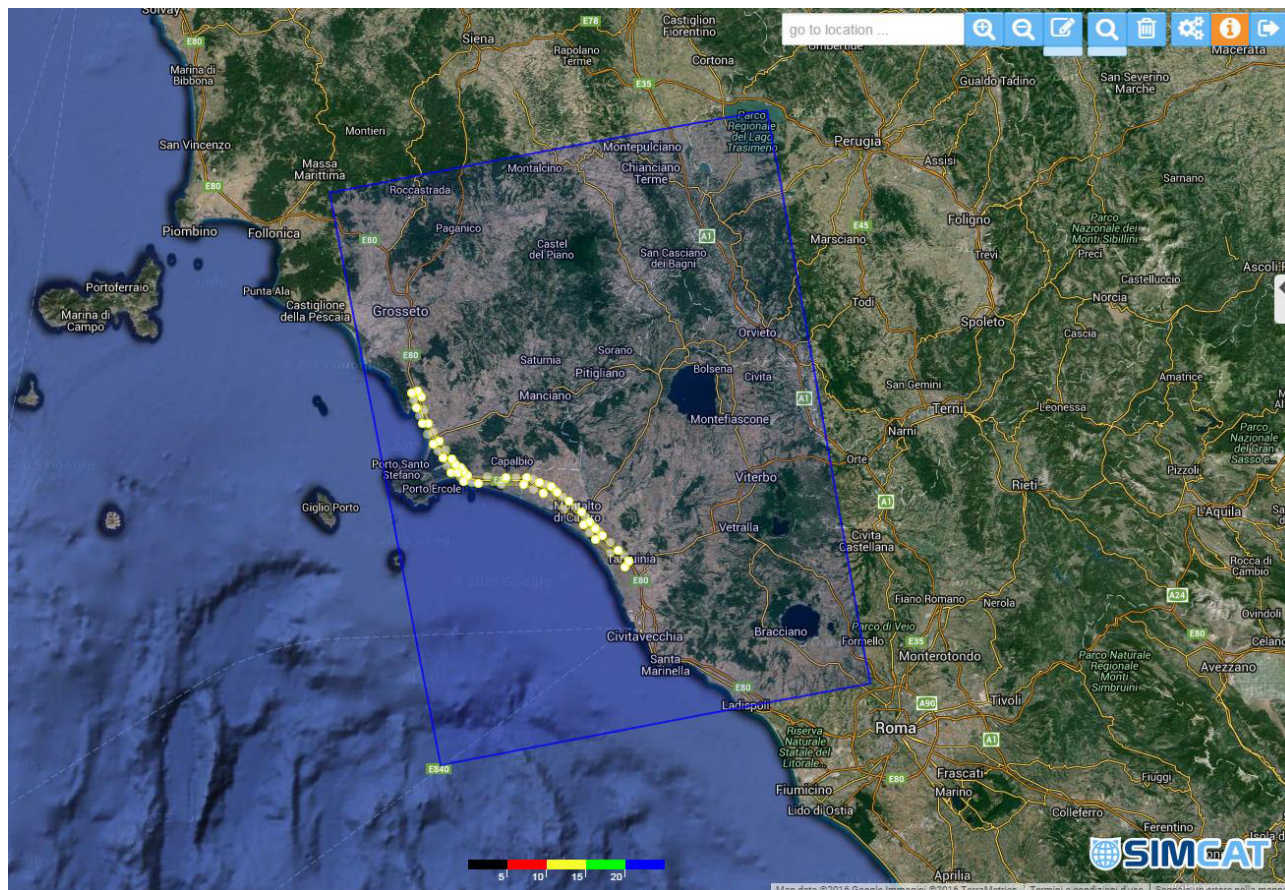


Figura 22 – RADARSAT-1 (distribuzione spaziale *dataset* ascendente).

La copertura temporale relativa ai dati acquisiti dal satellite RADARSAT-2 va da giugno 2008 a febbraio 2015; anche in questo caso i dati hanno risoluzione media, ma ottima distribuzione temporale, con possibilità di analizzare l'intera area con un solo *dataset* (Figura 23).

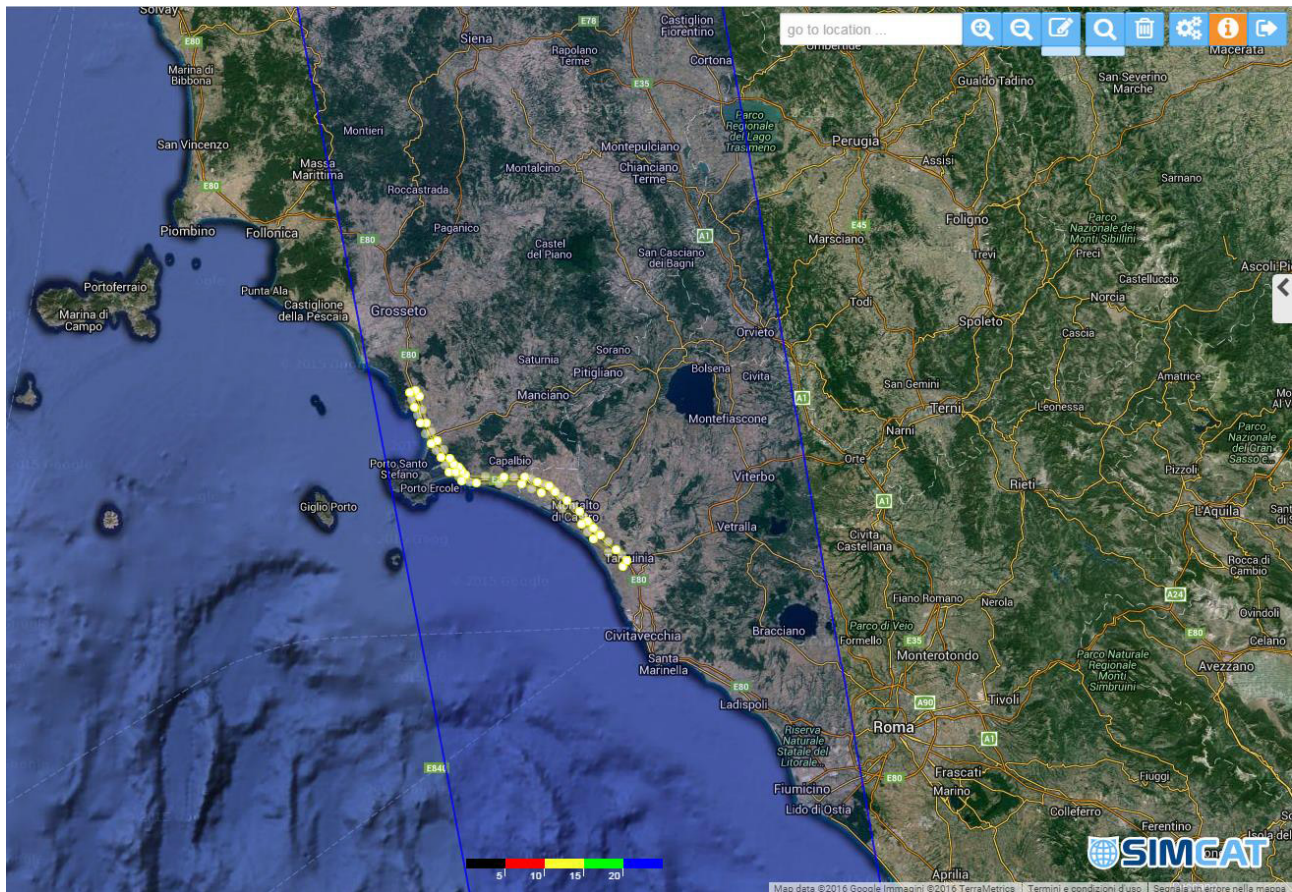


Figura 23 – RADARSAT-2 (distribuzione spaziale *dataset* ascendente).

I dati COSMO-SkyMed che si propone di acquisire sono riferiti all'intervallo di tempo compreso tra il 2010 (inizio acquisizioni con COSMO-SkyMed) e febbraio 2016; il satellite è ad alta risoluzione, ma la copertura spaziale dell'area di interesse, caratterizzata dalla disponibilità di immagini distribuite irregolarmente, richiede la necessità di almeno due *dataset* (Figura 24, Figura 25).

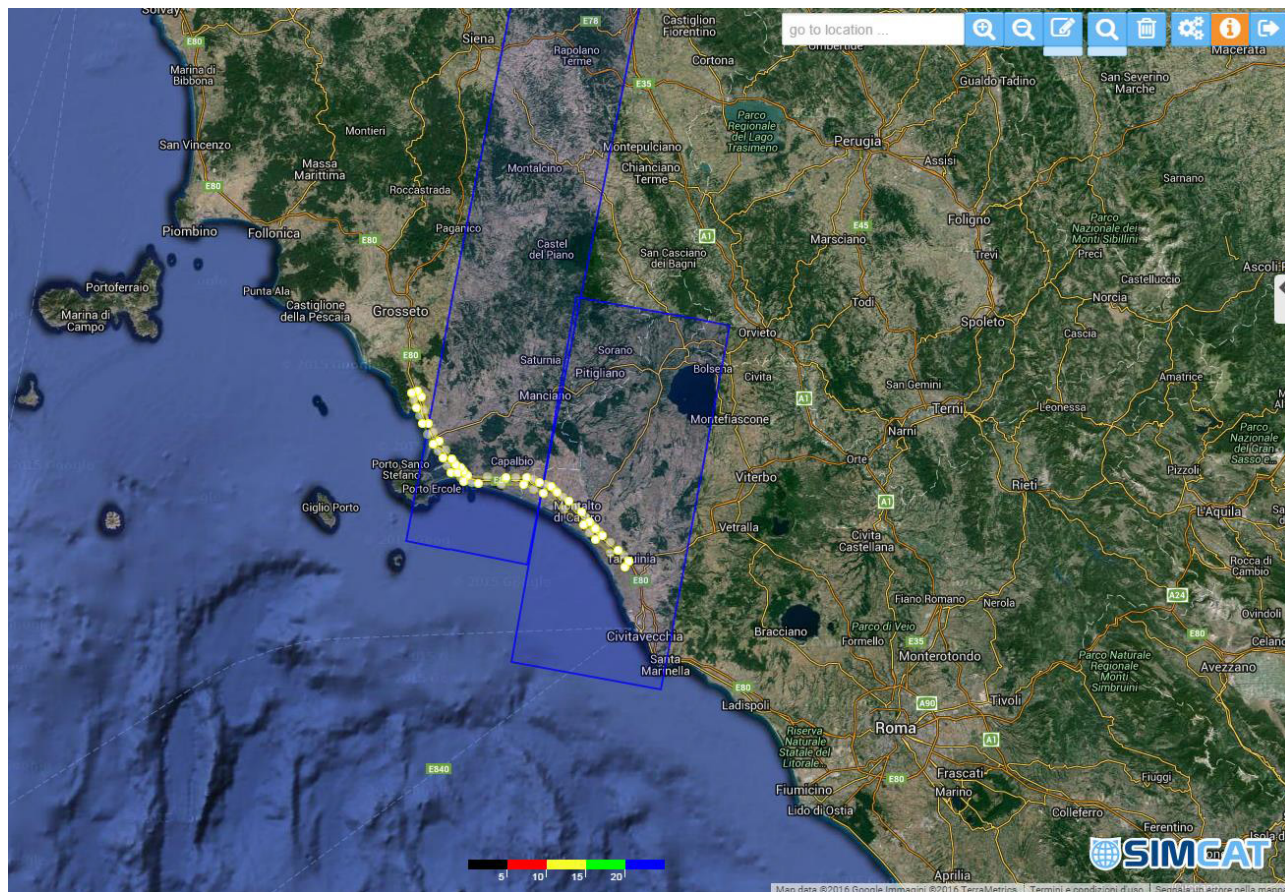


Figura 24 – COSMO-SkyMed (distribuzione spaziale *dataset* discendente).

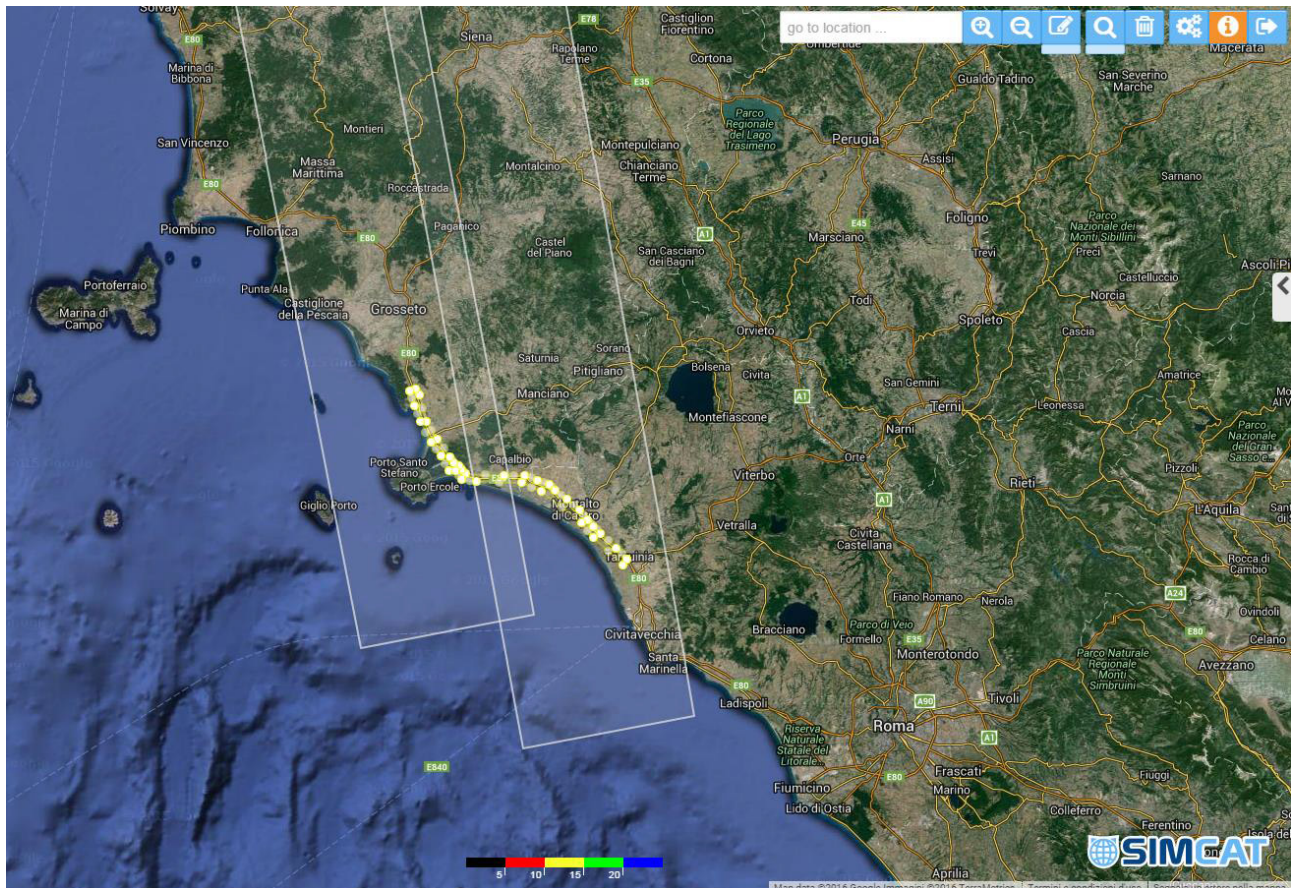


Figura 25 – COSMO-SkyMed (distribuzione spaziale *dataset* ascendente).

Per quanto riguarda i dati acquisiti dal satellite SENTINEL, la copertura temporale va dal 4 ottobre 2014 a febbraio 2016, un intervallo di tempo breve per poterne ricavare informazioni ma che comunque prevede la possibilità di aggiornamenti futuri. Il satellite è a media risoluzione e con una buona distribuzione spaziale (Figura 26). Il suo vantaggio principale risiede però nel fatto che le immagini sono disponibili gratuitamente ed hanno solamente l'onere relativo all'elaborazione del dato. Per tale ragione, non appena i dati acquisiti saranno sufficienti per poter essere elaborati, si consiglia l'impiego di immagini SENTINEL per svolgere un monitoraggio continuo del territorio. Tale monitoraggio, da proseguirsi almeno fino al termine dei lavori autostradali, avrà lo scopo di individuare eventuali deformazioni del terreno che possano essere precursori di *sinkholes*.

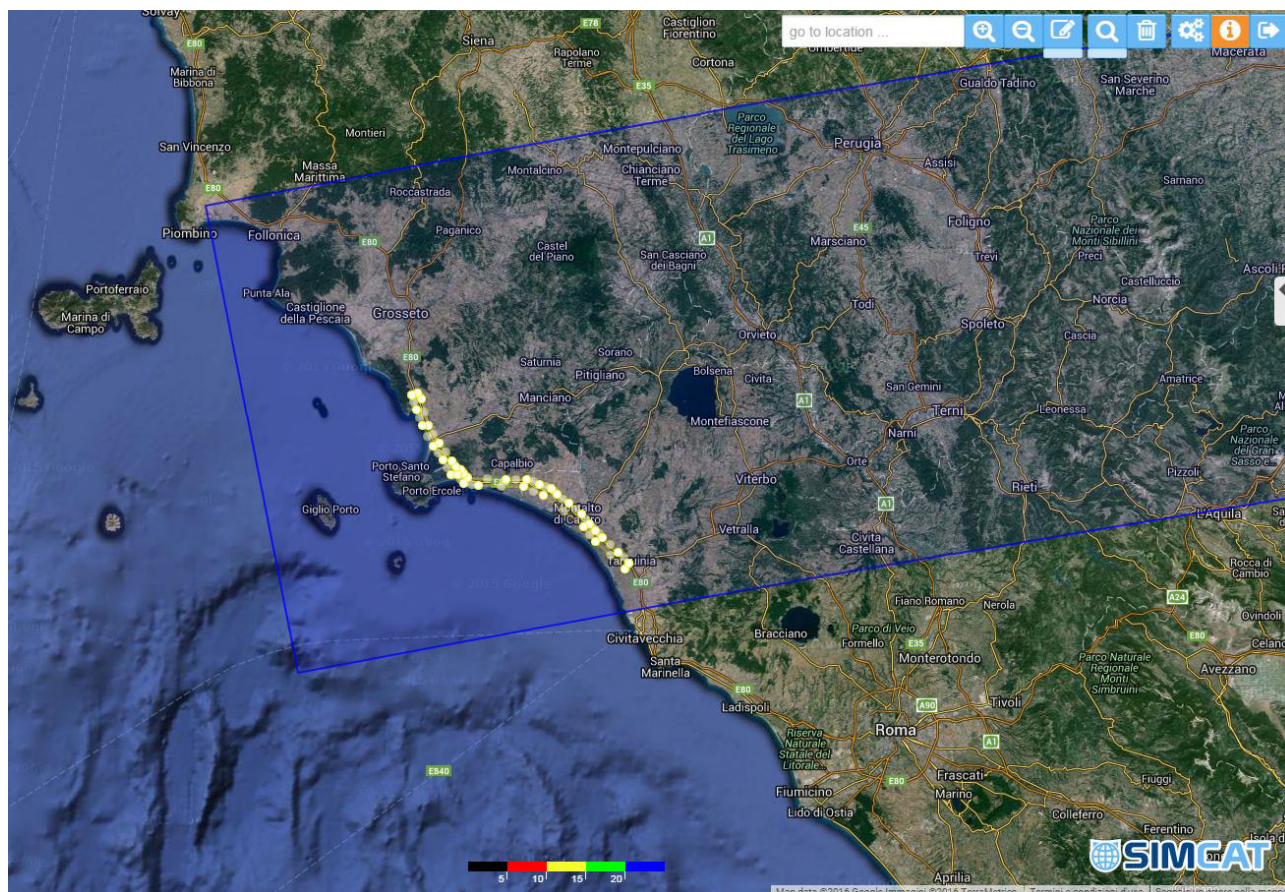


Figura 26 – SENTINEL (distribuzione spaziale *dataset* ascendente).

5.7 Monitoraggio interferometrico da terra

Sempre nell'ottica di un monitoraggio volto a prevedere l'insacco di fenomeni di sprofondamento, è stata valutata, durante il sopralluogo del 15 gennaio 2016, la fattibilità di installare un radar interferometrico ad apertura sintetica basato a terra (GB-InSAR). Tale strumento condivide gli stessi principi di funzionamento dell'interferometria satellitare applicandoli su piattaforma terrestre. Tale impiego risulta molto efficace per monitoraggi focalizzati su aree specifiche in quanto è in grado di effettuare misure quasi in tempo reale caratterizzate da elevata risoluzione e precisione. Il suo utilizzo per il monitoraggio dei fenomeni franosi è ampiamente documentato in tutto il mondo a partire dalle prime applicazioni effettuate proprio dal DST-UNIFI agli inizi del secolo. Recentemente il DST-UNIFI ha anche sperimentato il GB-InSAR per il monitoraggio di *sinkholes* nell'area de Il Piano (Isola d'Elba) riuscendo a prevedere l'apertura di una voragine su una strada provinciale, e prevenendo così un possibile disastro.

Caratteristica intrinseca della tecnica interferometrica (sia da satellite che da terra), consiste nella limitazione di poter misurare solo la componente dello spostamento allineata lungo LOS dello stesso. Ciò significa che movimenti perpendicolari rispetto alla direttrice sensore-bersaglio risultano invisibili. Trattandosi i *sinkholes* di fenomeni caratterizzati da spostamenti verticali, si rende necessaria l'installazione del radar su una posizione sopraelevata.

Tuttavia nell'area in esame i rilievi sono estremamente modesti, né sono state individuate strutture o edifici elevati che potrebbero essere utili a tale scopo. L'unica posizione sopraelevata dalla quale sia possibile una visuale dell'intera piana è sulla vetta del Talamonaccio (101 m s.l.m.), ai piedi dell'area archeologica che custodisce i resti del tempio etrusco di Talamonaccio (Figura 20, Figura 27). Qui sarebbe possibile costruire una cabina in legno per custodire lo strumento dagli agenti atmosferici e da atti vandalici. La connessione a internet per la trasmissione dei dati potrebbe essere garantita da un modem *wi-fi* fornito di scheda SIM. Si renderebbe probabilmente necessaria la potatura di alcuni pini che ostacolano la

linea di vista dello strumento e la costruzione di un piccolo basamento in cemento per poter posizionare in piano il radar.

Vi sono tuttavia delle difficoltà logistico-tecniche. La difficoltà logistica è legata principalmente alla disponibilità di corrente che dovrebbe essere fatta arrivare sul luogo dell'installazione. Infatti il consumo dell'apparecchiatura è tale da non essere compatibile con un'alimentazione fornita da pannelli solari o da batterie. La difficoltà tecnica è, come accennato in precedenza, dovuta alla poca elevazione del promontorio che non consente un buon allineamento della LOS con la direzione di movimento atteso (cioè verticale) del fenomeno. Da un punto di vista numerico ciò significa che di un eventuale movimento verticale che si verifichi circa all'altezza del torrente Osa (cioè ad una distanza di 600 m planimetrici) solo il 17% sarebbe misurato. Sebbene tale percentuale possa essere considerata accettabile, ad una distanza di 1000 m questa scende già al 10%, al centro dell'area di studio (3000 m) è del 3.5% e all'altezza del fiume Albegna (6000 m) dell'1.8%.

Anche assumendo spostamenti verticali elevati come quelli che precedono un collasso verticale, dell'ordine di qualche cm, con una percentuale di rilevazione così bassa i valori misurati sarebbero paragonabili al rumore strumentale.



Figura 27 – Foto scattata dall'interno dell'area che recinta il sito archeologico di Talamonaccio. Ai piedi della recinzione potrebbe essere installato il GB-InSAR, dove però l'effetto di copertura dei pini sarebbe maggiore.

6 Zonazione della predisposizione al rischio *sinkhole*

Sulla base dei dati preliminari e delle informazioni al momento disponibili è stata effettuata una zonazione della predisposizione al rischio *sinkhole* (Figura 28).

I criteri con cui questa è stata redatta sono i seguenti:

- Litologia affiorante: laddove siano presenti sedimenti coesivi questi sono tipicamente maggiormente connessi al verificarsi di fenomeni di *sinkhole*.
- Profondità del substrato: sebbene *sinkholes* per *deep-piping* possano verificarsi anche con profondità del substrato di qualche centinaio di m, in generale tali fenomeni risultano meno probabili tanto maggiore è la profondità in questione.
- Indizi di *sinkholes* sepolti: la presenza presunta di paleo-*sinkholes* rappresenta una maggiore pericolosità legata alla possibilità che si riverifichino *sinkholes* se permangono le condizioni predisponenti ed i fattori innescanti.
- Presenza di corpi d'acqua: sebbene non sempre visibili, questi corpi segnalano in alcuni casi la presenza di possibili paleo-*sinkholes*. In altri casi potrebbero essere indice di paleo-meandri che rappresentano aree suscettibili a fenomeni di suffosione.
- Presenza di acque idrotermali: l'area nei pressi delle terme dell'Osa è stata considerata un elemento predisponente per la formazione di *sinkholes*.

A valle delle indagini proposte, l'individuazione di cavità sotterranee o paleo-meandri sepolti, la ricostruzione geologica del sottosuolo, la caratterizzazione idrogeologica dell'area nonché di aree soggette a subsidenza localizzata, potranno contribuire ad una più accurata delimitazione delle aree a diversa predisposizione al rischio *sinkhole*.

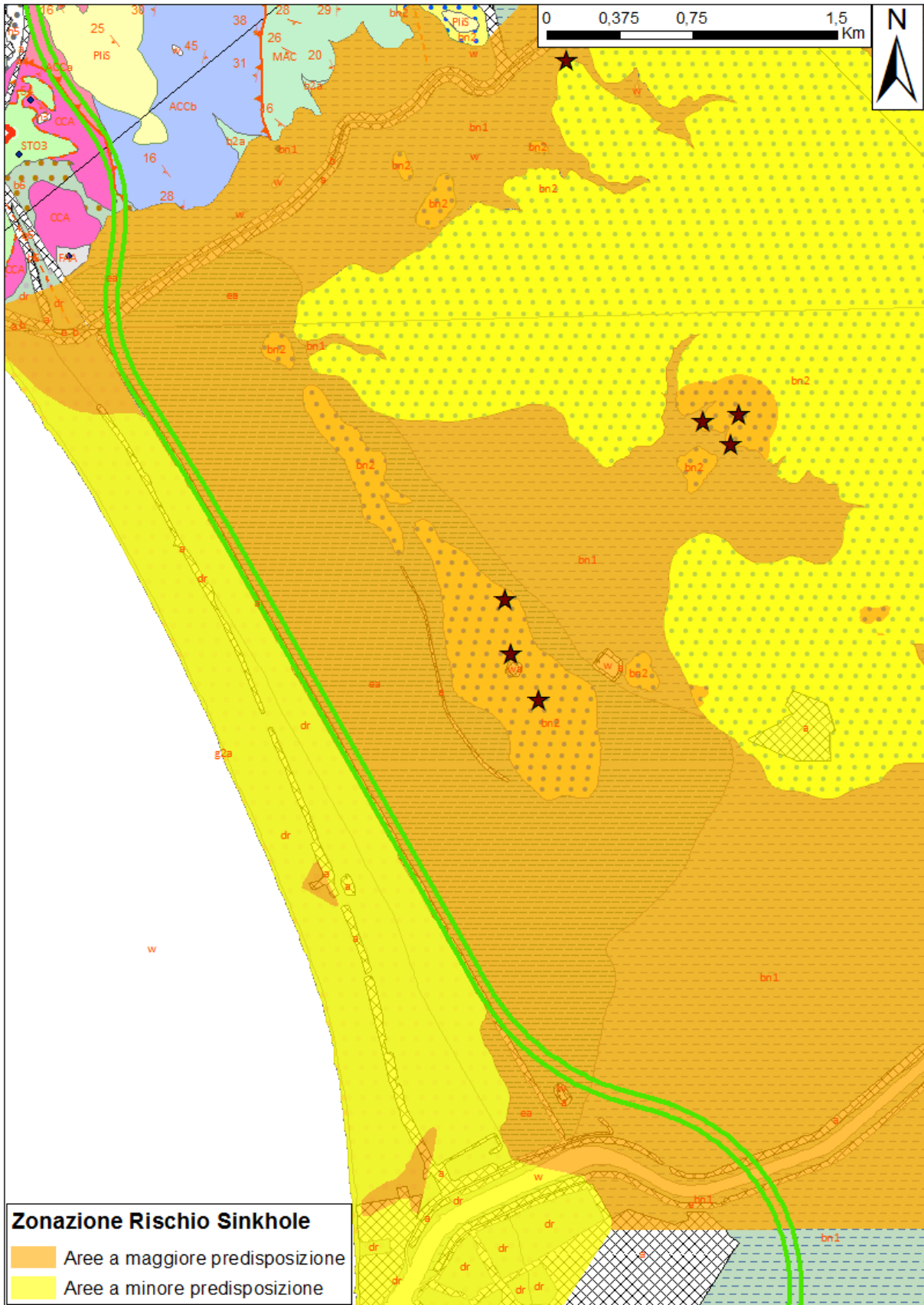


Figura 28 – Zonazione dell’area di studio indicante le aree a maggiore e minore predisposizione al rischio *sinkhole*.

7 Conclusioni

La presente relazione metodologica è finalizzata ad inquadrare la problematica *sinkhole* e a definire, oltre ad una valutazione preliminare del rischio *sinkhole*, una proposta di indagini d'approfondimento.

Nell'area compresa tra il torrente Osa ed il fiume Albegna, nel Comune di Orbetello (GR), sono in corso gli studi per la costruzione dell'Autostrada A12 Livorno Rosignano – Civitavecchia, tratto Fonteblanda – Ansedonia (Lotto 5b). All'interno di questo lavoro si inquadra la presente relazione metodologica per la definizione delle indagini e delle prospezioni per lo studio di aree a rischio *sinkhole*. I *sinkholes* sono dei fenomeni di sprofondamento improvvisi che possono essere generati sia da cause naturali che antropiche.

Data anche la presunta presenza del Calcare Caveronoso come substrato profondo, i meccanismi di innesco di *sinkhole* che si ipotizzano più probabili nell'area di studio sono quello per suffosione (legato alla circolazione idrica superficiale all'asportazione di sedimenti) e *deep-piping* (legato alla risalita di fluidi aggressivi lungo discontinuità tettoniche).

Gli esiti del sopralluogo e lo studio delle deformazioni rilevate dai dati ERS ed ENVISAT, unito a quello di fonti bibliografiche, inventari e cartografie storiche, non hanno mostrato segni riconducibili a sprofondamenti avvenuti di recente; sono tuttavia emerse indicazioni riguardanti alcuni laghi del diametro di alcune decine di metri, oggi non sempre visibili a seguito delle bonifiche e delle attività agricole avviate negli scorsi decenni.

Date le caratteristiche dell'area ed i meccanismi presunti di innesco di possibili *sinkholes*, sono state proposte le seguenti indagini:

- Indagine idrogeologica: volta sia a caratterizzare la falda superficiale ed i deflussi, così da comprenderne la vulnerabilità a fenomeni di suffosione, sia a determinare chimismo, temperatura, pH e conducibilità delle acque profonde, per valutarne il possibile ruolo in fenomeni di *deep-piping*.
- Indagini sismiche a riflessione: mirate alla ricostruzione del sottosuolo ed in particolare all'individuazione del substrato e di eventuali cavità. Si prevede una serie di stendimenti lunghi 250 m che coprano un tratto parallelo al tracciato autostradale lungo quanto l'intera area di studio, nonché la realizzazione di alcuni stendimenti perpendicolari.
- Indagini georadar: finalizzate alla caratterizzazione dettagliata dei primi metri di sottosuolo, per l'individuazione di lenti o corpi che possano essere soggetti a fenomeni di suffosione o liquefazione. Per bilanciare le caratteristiche di risoluzione e profondità di indagine si raccomanda l'impiego di frequenze diverse di indagine. Anche in questo caso le indagini sono da effettuarsi parallelamente al tracciato autostradale per tutta la sua lunghezza ed in alcuni transetti.
- Sondaggi geognostici: si raccomanda l'esecuzione di almeno un sondaggio profondo (di almeno 150 m) allo scopo di raggiungere il substrato o quanto meno di estendere la stima di una profondità minima. Tale sondaggio può avere luogo in corrispondenza di uno dei punti previsti da SPEA (SPEA SD20 o SPEA SD21) oppure, nel caso questi siano stati già perforati, in un punto nuovo, posto lungo il tracciato di uno stendimento della sismica a riflessione. La finalità ulteriore del sondaggio, che almeno per i primi 25 m dovrà essere a carotaggio continuo, è quella di fornire una taratura per le prove geofisiche.
- Prove geotecniche: rivolte alla caratterizzazione dei primi 25 m di terreno per comprenderne la suscettibilità a fenomeni di liquefazione e la resistenza in caso di cavità sottostanti. Le prove proposte consistono in SPT, CPT, determinazione di granulometria, peso di volume, resistenza al taglio e, per i terreni coesivi, anche dei limiti di Atterberg e dei risultati di una prova edometrica.

L'esecuzione di indagini geoelettriche è stata attentamente valutata. Tuttavia, viste le caratteristiche presunte di conducibilità del terreno, si presuppone una profondità di indagine più bassa rispetto a quella ottenibile, a parità di costi e tempi, con la sismica a riflessione. Un'integrazione di maggior dettaglio alla

sismica a riflessione verrà fornita dalle indagini GPR, le quali hanno il vantaggio, rispetto alla geoelettrica, di una rapidità di esecuzione estremamente maggiore.

E' stata valutata anche la possibilità di effettuare uno studio dei gas. Tuttavia si ritiene che possa essere sufficiente l'analisi geochimica proposta, in quanto registra comunque gli effetti della presenza di gas dissolti nell'acqua.

Vista comunque la difficoltà di prevedere in maniera deterministica i luoghi ed i tempi in cui potrebbero avvenire eventuali sprofondamenti, si propone anche di effettuare un monitoraggio continuo dell'area, così da tenere sotto controllo le deformazioni verticali del terreno, possibili precursori di fenomeni di sprofondamento. L'applicazione di un sistema interferometrico da terra risulta non praticabile a causa della mancanza di un punto di installazione dalle caratteristiche adeguate. E' tuttavia consigliabile un monitoraggio interferometrico satellitare. Sono necessari dati caratterizzati da una buona precisione, risoluzione spaziale non superiore alle poche decine di m ed un tempo di rivisitazione non superiore alle due settimane. Il satellite più economico in grado di fornire questo tipo di dati risulta essere SENTINEL, le cui acquisizioni tuttavia non sono ancora sufficienti per poter fornire dati affidabili, ma che dovrebbe essere completamente sfruttabile durante l'esecuzione dei lavori.

Infine, è stata anche realizzata una zonazione delle aree a maggiore e minore predisposizione al rischio *sinkhole*. Questa è stata effettuata sulla base delle informazioni e dei dati attualmente disponibili. Pertanto sono stati individuati come fattori predisponenti la profondità del substrato presunta, la litologia affiorante, la presenza segnalata di *sinkhole* sepolti e di paleo-laghi. Si sottolinea che tale mappatura rappresenta un prodotto preliminare che potrà subire aggiornamenti in funzione dei risultati delle indagini proposte.

8 Bibliografia

- Beck, B. F., Sinclair, W. C., 1986. Sinkholes in Florida: an introduction. Florida Sinkhole Research Institute Report 85-86.
- Berti, G., Canuti, P., Casagli, N., Micheli, L., Pranzini, G., 2002. Risultati preliminari sullo sprofondamento in località Bottegone (Grosseto). In: "Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana". Att. Conv. 31 marzo 2000, Regione Toscana, pp. 242-256.
- Brinkmann, R., Parise, M., Dye, D., 2008. Sinkhole distribution in a rapidly developing urban environment: Hillsborough County, Tampa Bay area, Florida. *Engineering Geology* 99, 169–184.
- Caramanna, G., Ciotoli, G., Nisio, S., 2008. A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas. *Natural Hazards* 45 (2), 145-172.
- Cramer H. 1941. Die Systematik der karstdolinen. *Neues Jb. Miner. Geol. Paläont.* 85 Abt. B, 293-382. In German.
- Daniels D.J., 1996. Surface-penetrating Radar. *Electronica and Communications Engineers Journal*, August 1996.
- Fairbridge, R. W., 1968. *The Encyclopaedia of Geomorphology*. Reinhold (ed.), New York, 1295 pp.
- Fallani, F., Magazzini, P., 2002. L'area carsica dei poggi ad est di Orbetello. Proceedings of "Le voragini catastrofiche: un nuovo problema per la Toscana", 31 March 2000, Grosseto (Italy), pp. 123-134.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 39, no. 1, pp. 8-20.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., Rucci, A., 2011. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 9, pp. 3460-3470.
- Gómez-Ortiz, D., & Martín-Crespo, T. (2012). Assessing the risk of subsidence of a sinkhole collapse using ground penetrating radar and electrical resistivity tomography. *Engineering Geology*, 149, 1-12.
- Guarino, P. M., Nisio, S., 2012. Anthropogenic sinkholes in the territory of the city of Naples (Southern Italy). *Physics and Chemistry of the Earth* 49, Parts A/B/C, 92-102.
- Gutiérrez, F., Guerrero, J., 2008. A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. *Environmental Geology* 53, 993–1006.
- Gutiérrez, F., Galve, J. P., Lucha, P., Castañeda, C., Bonachea, J., & Guerrero, J. (2011). Integrating geomorphological mapping, trenching, InSAR and GPR for the identification and characterization of sinkholes: a review and application in the mantled evaporite karst of the Ebro Valley (NE Spain). *Geomorphology*, 134(1), 144-156.
- Hager, J., Carnevale, M., 2006. The application of low frequency GPR to stratigraphic investigations. *GPR 2006: 11th International Conference on Ground Penetrating Radar*, pp. 590-594.
- IGM, 2016. Carte antiche. <http://www.igmi.org/ancient/>
- Intrieri, E., Gigli, G., Nocentini, M., Lombardi, L., Mugnai, F., Casagli, N., 2015. Sinkhole monitoring and early warning: an experimental and successful GB-InSAR application. *Geomorphology*, 241, 304-314. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.04.018.
- ISPRA, 2016. Progetto Sinkhole. <http://sgi1.isprambiente.it/sinkhole/viewer/index.html>
- Jones, C.E., Blom, R.G., 2014. Bayou Corne, Louisiana, sinkhole: precursory deformation measured by radar interferometry. *Geology* 42, 111–114.

- Kaufmann, O., Quinif, Y., 1999. Cover-collapse sinkholes in the Tournaisis area, southern Belgium. *Engineering Geology* 52, 15-22.
- Krawczyk, C. M., Polom, U., Trabs, S., Dahm, T., 2012. Sinkholes in the city of Hamburg—New urban shear-wave reflection seismic system enables high-resolution imaging of suberosion structures. *Journal of Applied Geophysics* 78, 133-143.
- Nisio, S., 2008a. I sinkholes: problemi terminologici, meccanismi genetici, classificazione. In: Nisio, S. (ed.), *Mem. Descr. Carta Geol. d'It. LXXXV*, pp. 17-32.
- Nisio, S., 2008b. I sinkholes in Toscana. In: Nisio, S. (ed.), *Mem. Descr. Carta Geol. d'It. LXXXV*, pp. 213-268.
- Nof, R.N., Baer, G., Ziv, A., Raz, E., Atzori, S., Salvi, S., 2013. Sinkhole precursors along the Dead Sea, Israel, revealed by SAR interferometry. *Geology* 41, 1019–1022.
- Progetto CASTORE, 2016. Regione Toscana e Archivi di Stato toscani. <http://web.rete.toscana.it/castoreapp/>
- Waltham, T., Bell, F., Culshaw, M., 2005. *Sinkholes and subsidence*. Springer Verlag (Ed.), Berlin Heidelberg, New York, 382 pp.
- White, W. B., 1988. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford and New York, Oxford University Press (Ed.).
- Williams, P., 2003. Dolines. In: Gunn, J. (Ed.), *Encyclopedia of caves and karst science*. Taylor and Francis Group, New York, USA. 304-310.

Allegato 1: Elenco Elaborati previsti per la successiva fase di studio (Fase II)



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DST
DIPARTIMENTO DI
SCIENZE DELLA TERRA

Elenco degli elaborati finalizzati allo “Studio
specialistico” nell’ambito della Progettazione
Definitiva del Tratto Fonteblanda -
Ansedonia



Firenze, 21 Giugno 2016

9 Introduzione

Il presente documento costituisce l'elenco elaborati previsto all'interno della Fase I ("Studio propedeutico") del Disciplinare Tecnico definito da SPEA Engineering S.p.A. (di seguito SPEA) relativamente alla Richiesta d'Offerta n. 310001382 per affidare al Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze (DST-UNIFI) lo studio di aree a rischio di voragini di sprofondamento (*sinkhole*) nell'ambito della Progettazione Definitiva del Tratto Fonteblanda - Ansedonia.

Gli elaborati di seguito elencati verranno prodotti durante la Fase II ("Studio specialistico") e saranno costituiti da relazioni ed elaborati grafici finalizzati alla sintesi e alla rappresentazione delle conoscenze acquisite durante il progetto.

10 Elenco degli elaborati

Il progetto porterà alla realizzazione di una serie di elaborati grafici relativi all'area in oggetto, elaborati in ambiente GIS 9.3 per massimizzare la compatibilità con il *software* in uso presso l'Ufficio Geologia di SPEA. Gli elaborati grafici saranno consegnati sia in formato digitale che cartaceo a colori e sono qui elencati:

- Carta geologica eventualmente aggiornata sulla base delle indagini eseguite.
- Sezioni geologiche lungo i tracciati di maggior interesse.
- Carta geomorfologica (comprendente topografia, idrografia superficiale, fenomeni carsici, frane e dissesti, forme del rilievo, derivanti da sopralluoghi, fotointerpretazione e studio cartografico).
- Carta di sintesi degli archivi cartografici storici.
- Relazione contenente l'interpretazione delle indagini geofisiche.
- Relazione contenente l'interpretazione dei dati interferometrici satellitari.
- Carta della predisposizione a *sinkholes* che evidenzia possibili interferenze con il tracciato autostradale.
- Relazione finale descrittiva di tutto il lavoro eseguito in entrambe le fasi del progetto e che sintetizza il tutto fornendo un accurato quadro relativo alla predisposizione areale al verificarsi di *sinkholes*, nonché alla loro possibile interferenza con la realizzazione dell'autostrada. Tale documento verrà consegnato nel formato e nelle modalità che verranno richieste da SPEA.