

**PROVINCIA DELLA SPEZIA
COMUNE DELLA SPEZIA**



**Sub Distretto di trasformazione AD1/C
Loc. La Pianta - Ex SIO
Comune della Spezia**

TALEA s.p.a

STUDIO GEOLOGICO AMBIENTALE – RAPPORTO FINALE

I Tecnici

Dott. Geol. Paolo PETRI ORGL n° 94

Collaboratore

Dott. Geol. Alessandro LENZI ORGT n° 890

**Studio di Geologia Tecnica ed Ambientale Dott. Paolo PETRI
(Sistemi Informativi Geografici, Geotecnica, Modellistica
Idrogeologica)**

Iscritto Ordine Regionale dei Geologi della Liguria n° 94
P.IVA: 01390700118 - COD.FISC. PTRPLA47C18E463M
**Via Antonio Pacinotti, 18 - 19124 La Spezia - mobile:
+39/3356002176**
e_mail: paolopetri@logicadelterritorio.com
pec: paolopetri@epap.sicurezza postale.it

DENOMINAZIONE	Rev	Data	Oggetto della revisione
01. Relazione Tecnica	0.1	Ottobre 2018	VAS

Sommario

1	Premessa	3
1.1	Contesto territoriale	3
2	Geologia e Idrogeomorfologia	4
2.1	Geologia	6
2.2	Indagini Geognostiche raccolte nel contesto territoriale	6
2.3	Le sezioni geolitologiche	8
2.4	Indagine Geoelettrica ERT 3D	11
2.4.1	Indagine Elettrica: metodologia e acquisizione	12
2.4.2	Processing dei dati	13
2.4.3	Risultati ed interpretazione dell'indagine geoelettrica ERT 3D	14
2.5	Indagine HVSR: metodologia e acquisizione	21
3	Idrogeomorfologia	29
3.1	Assetto Morfologico	29
3.2	Reticolo Idrografico (ved. Fig. 15 e 16)	30
3.3	Censimento Pozzi e Carta delle Isofreatiche	34
4	Analisi Interferometrica	35
4.1	I sinkholes	35
4.2	Dati interferometrici satellitari storici	37
4.2.1	Permanent Scatter - AREA STAGNONI	39
4.2.2	Permanent Scatter - AREA EX SIO	41
5	Conclusioni	45

1 Premessa

Il presente rapporto rappresenta lo sviluppo di un insieme indagini ed analisi geologico idrogeomorfologiche ed ambientali sviluppate in diverse fasi relativamente alle problematiche connesse con il contesto territoriale in cui si inserisce il PUO – AD1 area EX– SIO. L’areale è stato analizzato seguendo da un lato le problematiche segnalate dall’Amministrazione Comunale e dalla Regione Liguria e dall’altro le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018).

In particolare per l’insieme delle problematiche poste è stato necessario estendere l’area di studio ampliando la zona ad un contesto territoriale ben più ampio rispetto all’area in cui si inserisce il PUO – AD1 EX– SIO.

Di fatto è stata analizzata la situazione geologico strutturale partendo dalla zona di Montepertico (dove sono recentemente stati segnalati delle forme morfologiche che potrebbero far ricordare dei possibili Sink-hole) fino alla zona Stagnoni-Valle Oscura (la zona degli Stagnoni era interessata dalla presenza di due stagni).

Sulla base dei dati disponibili, interpretando la Carta Geologica CARG ufficiale viene proposta una possibile interpretazione geologica mediante la redazione di una apposita sezione geologica dell’area. La sezione è stata ulteriormente migliorata esplodendo la zona interessata dall’area Ex-SIO utilizzando una serie di indagini geognostiche puntuali che hanno interessato l’area partendo dal Palazzetto dello Sport, alla zona Ex-SIO, Termomeccanica, fino alla svincolo degli Stagnoni.

L’analisi sulla valutazione della presenza o meno dei citati Sink-hole nella zona Ex-SIO ci si è avvalsi sia di una indagine sismica per individuare il Bedrock sismico dell’area, nonché una indagine geoelettrica mediante l’applicazione di tecniche tomografiche, limitatamente all’areale Ex-SIO.

Inoltre è stato analizzato il censimento dei *sink-holes*, derivante dal Progetto *Sink-hole*, realizzato e coordinato dal Servizio Geologia Applicata ed Idrogeologia dell’ISPRA a partire dal 2002 (ISPRA, 2016 e sono stati ulteriormente utilizzati i dati Interferometrici disponibili da parte del Ministero dell’Ambiente, sviluppando una analisi sui trend dei Permanent Scatter individuati sia sulla zona EX-SIO che nella vicina zona degli STAGNONI, per poter esprimere una corretta valutazione basata su dati certi, su possibili movimenti nell’area riconducibili a fenomeni di cedimento.

1.1 Contesto territoriale

Il contesto territoriale, come già accennato, prende in esame un’area più vasta comprendendo alcune zone limitrofe all’area EX SIO al fine di ricercare e inquadrare le problematiche di ordine geologico, geotecnico ed idrogeologiche connesse con questa porzione della pianura della Città della Spezia.

Come richiesto l’indagine è stata svolta su un’area ben più vasta anche di quanto richiesto alla normativa vigente, NTC 2018, quale areale e volume significativo e l’area di riferimento è estesa all’area circostante l’area Ex SIO come da immagine seguente (**Fig. 1 – Contesto Territoriale**)



Fig. 1 - Contesto Territoriale

Nell'area in esame, definita quale Contesto Territoriale, sono state eseguite le seguenti attività:

- Ricerca bibliografica sui lavori esistenti in zona in merito alla presenza/assenza di Sink-Hole;
- Raccolta Indagini Geognostiche eseguite in zona;
- Censimento pozzi per acqua e verifica della profondità della falda con ricostruzione carta delle Isofreatiche;
- Analisi del Reticolo Idrografico;

Questa fase di analisi ha permesso di chiarire a livello di contesto territoriale la presenza/assenza dei fenomeni di Sink-Hole a livello generale e con l'indagine geofisica eseguita a livello dell'area specifica interessata dall'intervento, integrata con le analisi interferometriche, si sono date le risposte necessarie alla definizione delle problematiche connesse con questa zona.

E' stato inoltre analizzata la documentazione relativa al Reticolo Idrografico proposto dalla Regione Liguria. Inoltre è stata rilevata la falda in alcuni pozzetti interni ed esterni all'area per realizzare la carta delle isofreatiche e sulla base dei dati geognostici raccolti la distribuzione areale e verticale delle problematiche inerenti la stratigrafia della zona e le problematiche connesse alle caratteristiche geomeccaniche dei terreni che interessano questa parte di città.

2 Geologia e Idrogeomorfologia

L'analisi geologica ed idrogeomorfologica è stata eseguita sviluppando una rigorosa analisi basata su dati ufficiali (Carg Fig. 248 – ISPRA), derivando le necessarie informazioni di ordine Geologico Strutturale finalizzate alla redazione di due sezioni geologiche ubicate come dalla Fig. 2 di cui la seconda, di maggior dettaglio, corrisponde alla fascia dal Palazzetto dello Sport – Svincolo autostradale degli Stagnoni in cui ricade l'area Ex-SIO.

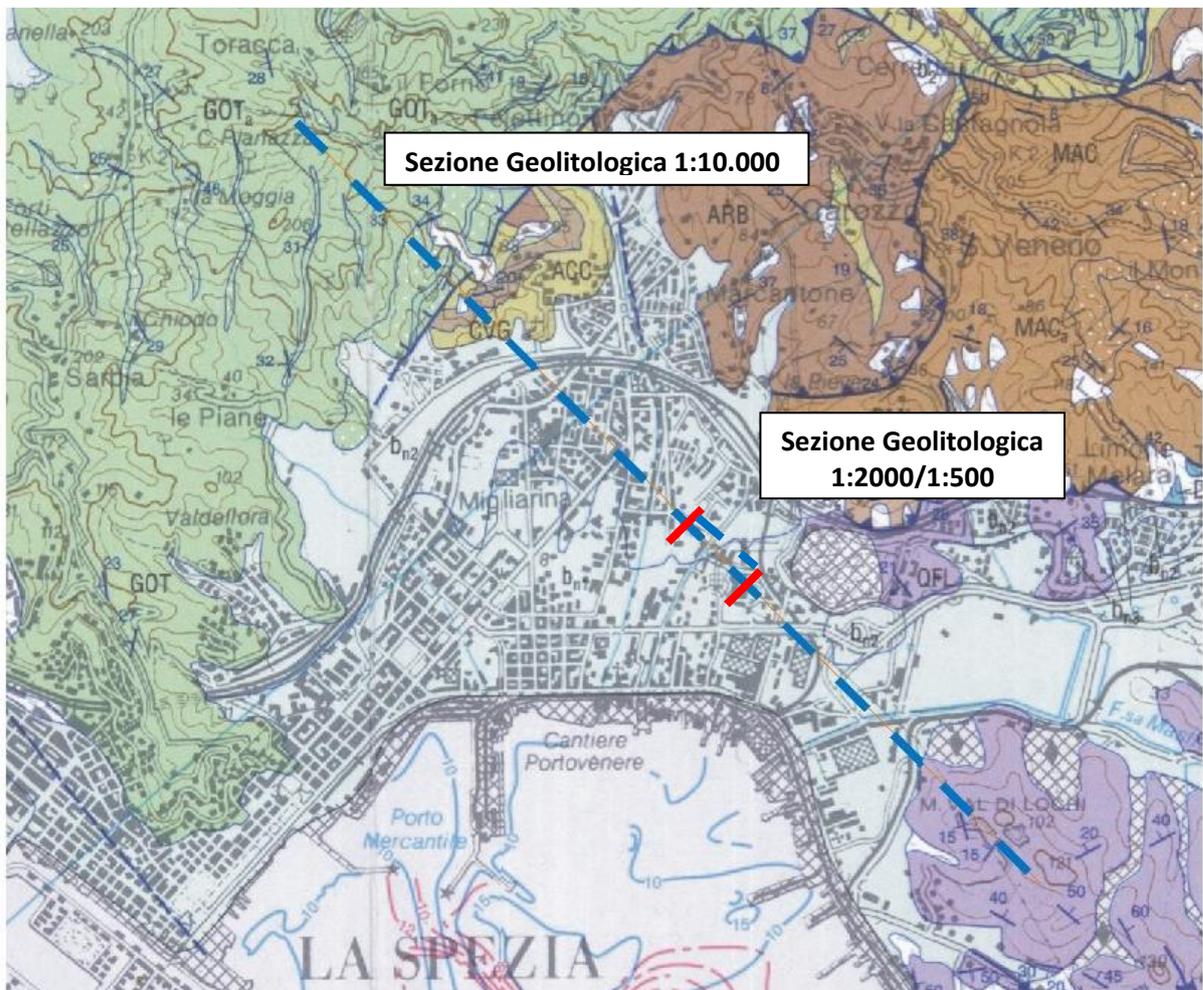
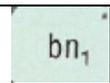
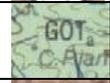
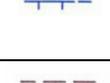
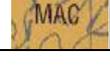


Fig. 2 - Estratto Carta Geologica Fg. 248 CARG

Legenda			
	Depositi alluvionali terrazzati con ghiaie, sabbie e limi di origine fluviale (bn 1-4)		Brecce di Maralunga
	Coltri Eluvio Colluviali		Quarziti e filladi
	Arenarie di M. Gottero		Struttura Antropica
	Arenarie di Ponte Bratica		Contatto Stratigrafico
	Calcari di Groppo del Vecovo		Sovrascorrimento Principale
	Argille e calcari di Canetolo		Faglia Diretta
	Arenarie tipo Macigno		Faglia Presunta

2.1 Geologia

L'area in esame è posta generalmente in pianura, a pochi metri sul livello del mare, eccezion fatta per le colline circostanti. I terreni presenti all'interno della zona pianeggiante sono composti da materiali sciolti di varia origine e con granulometrie che comprendono un ampio intervallo, dalle argille a limi, sabbie fino a ghiaie anche grossolane.

Le origini dei terreni in questione non sono da ricercare in un unico meccanismo, in quanto l'area rappresenta il punto d'incontro di ambienti fluviali (zona di transizione fra la pianura e la collina), piuttosto turbolenti, caratterizzati da depositi alluvionali eterogenei ma generalmente ricchi di materiali grossolani come ghiaie, sabbie e ciottolami, con ambienti deposizionali calmi quale può essere quello dell'ambiente lacustre o lagunare, come mostrano i ritrovamenti di torbe, resti vegetali e fossili marini presenti nei sondaggi eseguiti in tempi e luoghi diversi, nei dintorni del nostro lotto.

Al fine di dare un inquadramento dell'area dal punto di vista geologico d'insieme è stata realizzata una sezione generale in scala 1:10.000 da M. Val di Locchi a M. Pertego, passando per il lotto studiato (v. Tracce di Sezione allegata Fig. 2).

2.2 Indagini Geognostiche raccolte nel contesto territoriale

Nell'area in esame sono stati raccolti dati riferiti a sondaggi geognostici e prove CPT e CPTU eseguite nelle seguenti zone:

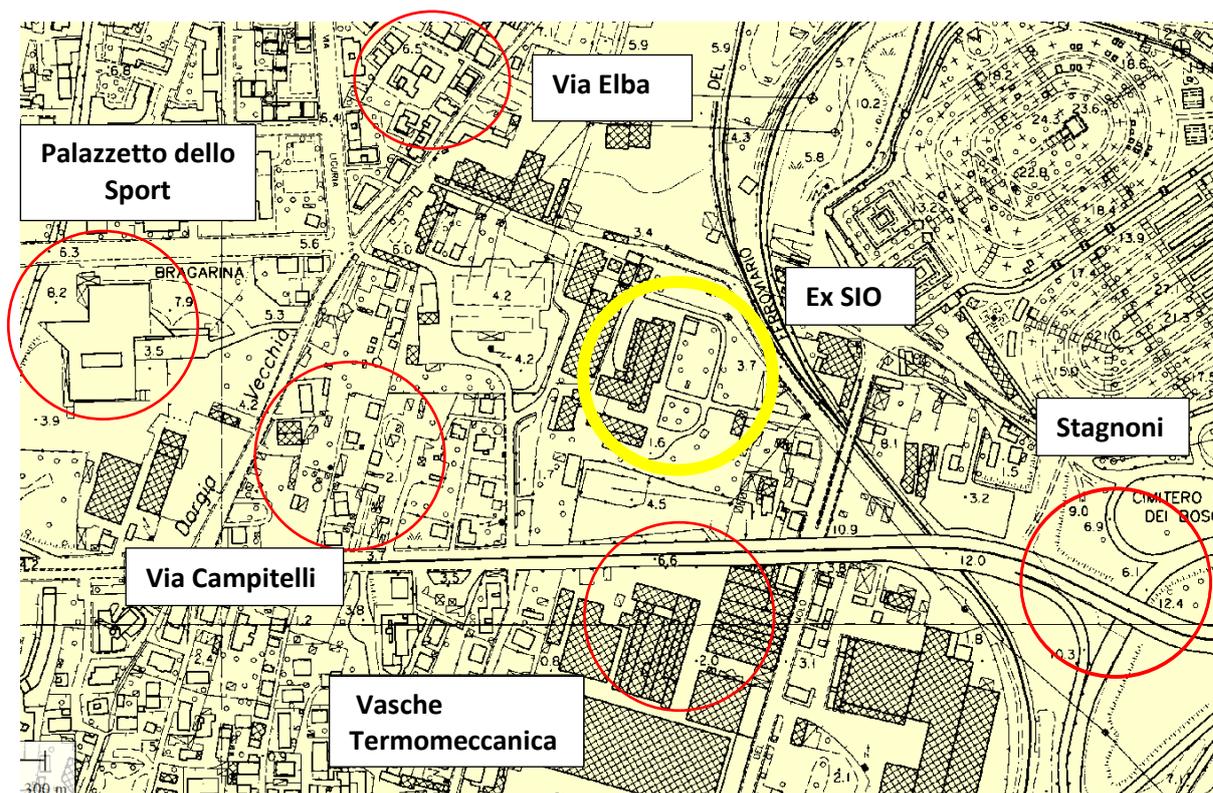


Fig. 3 - Distribuzione areale delle indagini raccolte

Qui di seguito vengono presentati sinteticamente i risultati delle indagini e prove reperite.

1. **Palazzetto dello Sport:** sono state reperite N° 7 prove di cui 2 - CPT e 5 CPTU eseguite dalla ISMES nel marzo 1985 che hanno raggiunto profondità di circa 30 metri;
2. **Zona Via ELBA :** sono stati reperiti n° 2 Sondaggi Geognostici che hanno raggiunto la profondità di circa 11/14 metri;

3. **Zona Vasche della Termomeccanica:** sono stati reperiti n° 2 Sondaggi Geognostici eseguiti nel 1969 ed hanno raggiunto la profondità di circa 27 metri;
4. **Zona Svincolo autostradale "Stagnoni"** : sono stati reperiti n° 1 Sondaggio (profondità raggiunta 60 metri ed una prova CPT eseguita con penetrometro statico da 20 TON (1987) che ha raggiunto la profondità di 30 metri
5. **Zona Via Campitelli** : Eseguite n° 2 prove penetrometriche CPTU con profondità massima di 8.5 e 11.5 metri.
6. **Zona EX SIO** : eseguite n° 5 CPTU Prove penetrometriche con punta piezometrica con profondità di circa 15 metri solamente una ha raggiunto i 20 metri.

Dall'insieme dei dati esaminati si può affermare che:

La **zona del Palazzetto dello Sport** presenta caratteristiche geomeccaniche molto scadenti con una stratigrafia caratterizzata da una fitta intercalazione di argille limose e sabbie fini con presenza di argille organiche che interessano in particolare i primi 10/12 metri di profondità;

La **zona di Via Elba** presenta una copertura vegetale di circa 3.50 metri dopodiché argille con parti organiche e argille di colore brunastro fino a circa 10.00 metri di profondità oltre i 10 metri si trova sabbia, ghiaia e limo con presenza di acqua.

La **zona delle Vasche della Termomeccanica** è caratterizzata nei primi metri (fino a circa 6.00 metri da argille molto plastiche con intercalazioni di ghiaie e sabbie (a 2.00 metri fino a 3.50 è stata riscontrata la presenza di una fanghiglia con alghe e residui di conchiglie). Oltre i 6.00 metri si riscontrano intercalazioni di argilla gialla compatta con ciottoli e ghiaie per passare a – 18.00 metri argilla grigia compatta con livelli di pietrisco.

La **zona dello svincolo degli Stagnoni** presenta una stratigrafia piuttosto articolata dove dopo un primo strato di circa 3.00 metri costituito da riporto e da limo argilloso, fino alla profondità di 13.00 metri si riscontra un limo debolmente argilloso – torboso con resti fossili e vegetali (entro i primi 10.00 metri). Oltre i 13.00 metri fino ad almeno 31.80/32 metri si riscontra la presenza di un limo argilloso variamente intercalato con livelletti di ghiaie. Oltre i 32 metri si passa ad una prevalenza di sabbie più o meno fini con livelli di limo debolmente sabbioso fino ai 60 metri di fine sondaggio.

La prova CPT, conferma questo stacco intorno ai 13 metri che interrompe la parte con caratteristiche geomeccaniche più scadenti.

La **zona di Via Campitelli** presenta una situazione dove la parte più superficiale è caratterizzata da terreni argillo limosi intercalati fittamente da sabbie fini con caratteristiche geomeccaniche scadenti fino a 8.00 metri di profondità.

La **zona EX – SIO** presenta anch'essa una situazione dove la parte superficiale è caratterizzata da terreni argillo limosi con caratteristiche geomeccaniche scadenti che tendono a migliorare oltre i 10 metri di profondità.

Peraltro nel caso delle indagini EX SIO e Via Campitelli anche le prove sismiche seguite confermano un aumento della velocità delle onde Vs intorno ai 10 metri di profondità.

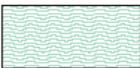
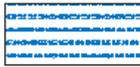
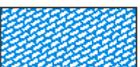
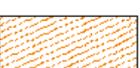
La zona esaminata è interessata dalla presenza di terreni con scadenti caratteristiche geomeccaniche almeno per i primi 10/12 metri di profondità, in particolare la fascia almeno dal Palazzetto dello Sport all'area EX-SIO, svincolo Stagnoni, Vasche Termomeccanica confermano la presenza di questo strato caratterizzato da argille e limi fittamente intercalate con sabbie fini e zone di argille organiche e torbe con resti di conchiglie marine.

2.3 Le sezioni geolitologiche

Per la realizzazione della sezione sono state consultate ed utilizzate, oltre alla varia cartografia disponibile (CARG, PUC, ecc.), alcune serie di dati provenienti da indagini geognostiche eseguite in aree prossime (vedi par. 2.2), inoltre sono stati utilizzati i dati riferiti alla Indagine HVSR (vedi par. 2.5).

In questo ambito si sono riscontrate, tra l'altro, alcune discrepanze tra la cartografia del PUC e quella del CARG. In questo lavoro, per la stesura delle sezioni, è stata seguita la linea della cartografia CARG, soprattutto per quanto riguarda la litostratigrafia delle rocce incassanti, mentre sono state estratte informazioni da entrambe le carte per i depositi di terreni più recenti.

Oltre alle fonti citate ricordiamo infine l'apporto avuto da tre prospezioni HVSR (Tromino) eseguite all'interno del nostro lotto nell'ambito del presente lavoro e da ricognizioni sul campo da noi eseguite. Qui di seguito la legenda.

Legenda sezione generale in scala 1:10.000	
	DEPOSITI SUPERFICIALI (DS) - Depositi di origine fluviale (granulometria variabile da ghiaia ad argilla) e depositi di origine lagunare e lacustre (terreni prevalentemente limoso - sabbioso - argillosi con frequenti livelli torbosi. Presenti resti fossili e vegetali (Quaternario)
	DEPOSITI PROFONDI (DP) - Sedimenti di origine prevalentemente marina composti prevalentemente da terreni sabbiosi con frazioni argillose e limose subordinate a scarsi ciottoli subarrotondati. Presenti resti fossili e vegetali (Quaternario)
	CALCARI DI GROPPO DEL VESCOVO (CGV) – Torbiditi calcareo marnose e calcarenitiche chiare alternate con argilliti scure (Eocene inf. - medio)
	ARGILLE E CALCARI DI CANETOLO (ACC) - Argilliti scure con torbiditi calcaree, siltoso arenacee e calcarenitiche (Paleogene)
	ARENARIE DI M. GOTTERO (GOT) - Arenarie torbiditiche a grana media e medio-fine con peliti e microconglomerati (Campaniano sup. - Paleocene inf.)
	QUARZITI E FILLADI (QFL) - Quarziti grigio rosate ben stratificate, talora con livelletti basali microanagenitici; nella parte alta delle quarziti si intercalano filladi e metasiltiti grigie, talora verdastro - violacee (Carnico)

Per cercare di rappresentare meglio i terreni di più diretto interesse si è deciso anche di eseguire una ulteriore sezione di maggior dettaglio, ad una scala di 1:2.000 nella direzione orizzontale e di 1:500 in quella verticale (v. oltre).

Nella sezione generale, alla quale si rimanda per una visione complessiva della piana spezzina, zona Migliarina, si vede, sul lato NW, l'area di affioramento delle Arenarie del Gottero, in contatto tettonico con le Argille e Calcari di Canetolo. In corrispondenza degli affioramenti di queste ultime compaiono anche i Calcari di Groppo del Vescovo, anch'essi appartenenti all'Unità di Canetolo.

Queste due ultime formazioni si presentano sempre solo e soltanto in contatto tettonico tra di loro, tanto che difficilmente si può dire se si siano depositate in sequenza o in eteropia. Nell'area compresa tra La Spezia, Arcola e Vezzano Ligure compaiono solo in lembi isolati. In prossimità della

traccia di sezione, senza però esserne intercettata, compare anche la formazione delle Arenarie di Ponte Bratica, che rappresenta la copertura dell'Unità di Canetolo.

Alla fine dei rilievi, quando entriamo in pianura, è difficile ipotizzare la successione litologica al di sotto dei sedimenti della piana. Riteniamo ragionevole pensare che, attraverso un contatto tettonico, si passi a formazioni torbiditiche tipo Arenarie del Gottero o Macigno prima di incontrare, a circa metà della piana, i terreni metamorfici dell'Unità di Massa, affioranti a fine sezione con la formazione delle Quarziti e Filladi.

Per quanto concerne la quota delle rocce incassanti, queste dovrebbero trovarsi in posizione prossima ai 75 m di profondità in corrispondenza dell'ex area SIO, dal momento che il bedrock sismico riscontrato nelle prospezioni HVSR Tr1, Tr2 e Tr3 (v. Tavola di Ubicazione delle indagini) risulta collocato rispettivamente a 73.60, 88.60 e 75.00 m dal p.c., interpretazione confortata anche dalla relativa vicinanza del lotto dagli affioramenti quarziticci osservabili in corrispondenza del Cimitero Urbano dei Boschetti. Le profondità fornite dalle tre prospezioni individuano tra l'altro un piano inclinato di circa 20° immergente a SW che ben si raccorda con gli affioramenti citati.

Nulla si può dire sulle profondità del substrato per l'area degli Stagnoni e per il territorio compreso tra l'ex SIO e la stazione ferroviaria di Migliarina.

Fatta esclusione per inizio e fine sezione, i terreni di copertura sono costituiti da materiali sciolti che abbiamo schematicamente suddiviso con le sigle DS (depositi superficiali) e DP (depositi profondi), mal rappresentabili alla scala 1:10.000.

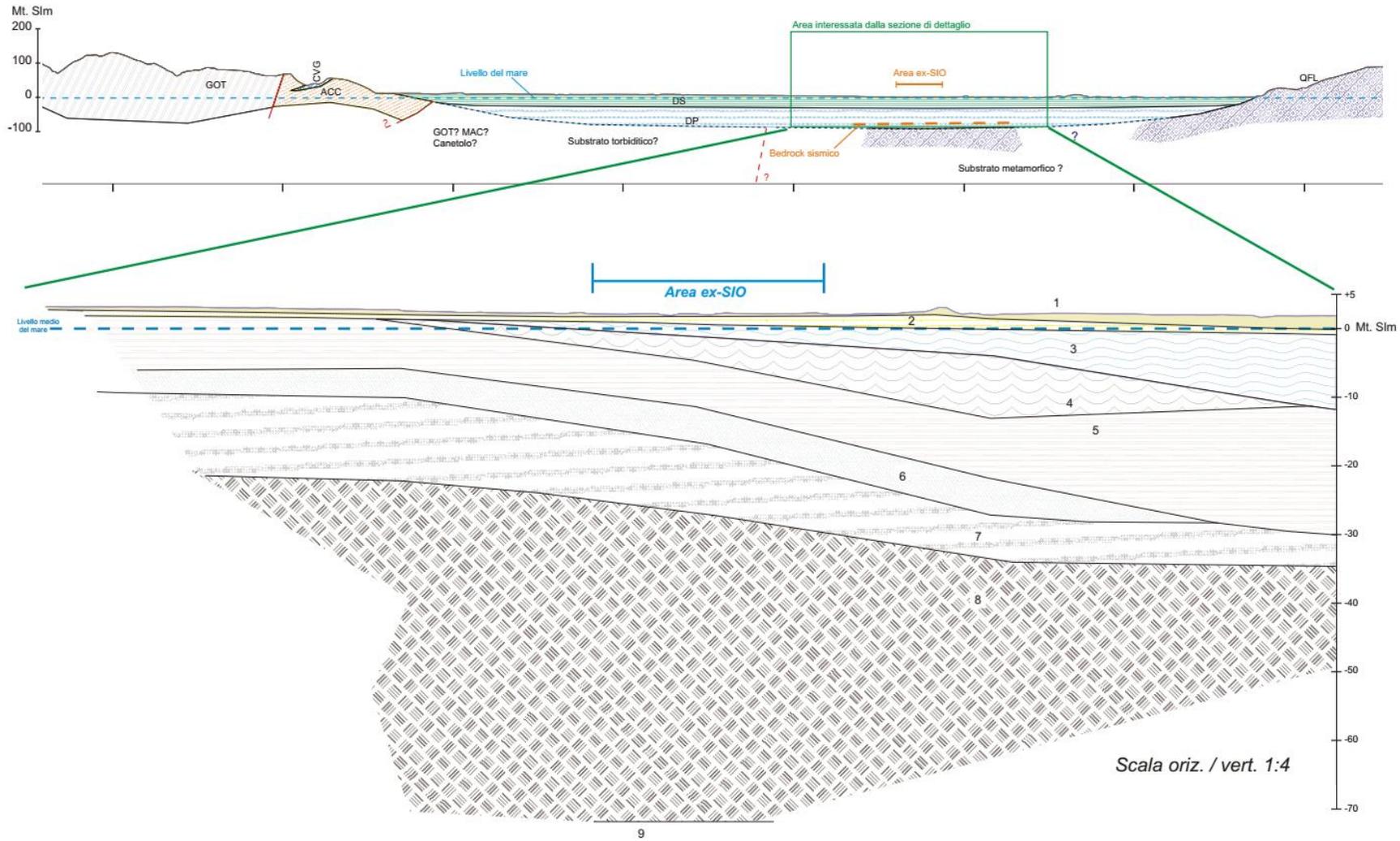
Nella sezione di dettaglio sono stati invece distinti 9 strati sulla base delle granulometrie prevalenti, dello stato di compattazione dei materiali e, in qualche caso, sull'ambiente di deposizione.

La seguente tabella rappresenta la legenda della sezione di dettaglio allegata.

Legenda sezione di dettaglio in scala 1:2.000 / 1:500	
1	Rilevati, riporto: depositi di origine antropica; sono accomunati sotto questa sigla rilevati stradali o ferroviari e riporti di vario tipo, oltre alla cuticola areata/vegetata superficiale.
2	Depositi prevalentemente fluviali o fluvio-lacustri composti da argille sabbiose soffici e plastiche a limi argillosi, raramente con spalmature carboniose nerastre.
3	Limi prevalenti, da argillosi a sabbiosi, generalmente torbosi, con residui fossili di origine marina. Ambiente salmastro, lagunare o di lago costiero.
4	Grande lente di argille compatte
5	Limi argillosi passanti ad argille plastiche soprattutto nella parte NW della sezione. Strato particolarmente potente in corrispondenza della Loc. Stagnoni.
6	Argille più o meno consistenti fino a limi argillosi, talora con livelli ghiaiosi. Strato apparentemente assente in Loc. Stagnoni.
7	Sabbie con limi e argille, generalmente compatte, a tratti inglobanti frustoli carboniosi. A vari livelli si incontrano strati di materiali simili, ma inglobanti ghiaie, sempre subordinate.
8	Sequenza di sabbie prevalenti, compatte, da fini a grossolane, con livelli di ghiaie e aree con presenza variamente marcata di materiali fini. Le velocità delle Vs superano i 400 m/s
9	Bedrock sismico, caratterizzato da $V_s > 900$ m/s. I materiali, non riscontrati in prove e osservazioni dirette, possono essere interpretati come depositi terrigeni estremamente addensati e compatti, parzialmente o completamente cementati, o come il livello più superficiale di vera e propria roccia incassante.

Sezione geologica interpretativa

Scala orizz./vert. 1:1



Il deposito che costituisce la piana è composto da molti tipi di sedimenti: detrito di versante, alluvioni fluviali, sedimenti lacustri / lagunari, depositi marini, oltre ad ampie aree interessate da riporti di origine antropica.

I depositi marini, affioranti nella zona del porto e nell'area di Fossamastra, risultano composti da abbondanti terreni grossolani (sabbie, ghiaie, ciottolami) di varia natura litologica e presentano frazioni fini più o meno abbondanti a seconda della zona. Materiali di questo tipo sono stati riscontrati anche nelle porzioni più profonde di alcuni sondaggi, anche distanti dall'attuale linea di costa.

I depositi lacustri, di ambiente salmastro lagunare come testimoniato tra l'altro dai fossili marini riscontrati nei sedimenti, si estendono in affioramento o subaffioramento da Corso Nazionale fino ad oltre gli Stagnoni, addentrandosi nell'entroterra fino a loc. Bragarina. Lungo la sezione lo spessore di questi terreni varia da circa 30 m a SE a una decina di m a NW. All'interno di questo spessore si riconoscono vari strati con composizione simile (argille, limi argillosi e sabbiosi) ma con notevoli differenze a livello di addensamento e competenza dei materiali.

I depositi fluviali circondano i precedenti e si estendono fino alle pendici dei rilievi, dove si fondono spesso in complesse digitazioni col detrito di versante. Anche i rapporti con i depositi lacustri sono digitati, eteropici e, almeno parzialmente, il fluviale ricopre il lacustre. I sedimenti alluvionali presentano composizioni estremamente eterometriche, andando dalle argille a sabbie, ghiaie e ciottoli.

Il detrito di versante è presente in generale in quantità più esigue ed è concentrato in prossimità dei rilievi. Nelle sezioni non è comunque rappresentato. Nei pressi del lotto esaminato compare, nella forma di frammenti quarzatici di dimensioni centrimetriche provenienti soprattutto dall'area del cimitero dei Boschetti, soprastante ai terreni alluvionali o miscelato ad essi.

2.4 Indagine Geoelettrica ERT 3D

Le indagini eseguite nel mese di settembre si sono spinte alla verifica della presenza di anomalie geoelettriche nella zona EX SIO che potessero avere un qualche significato in merito ai rapporti fra Geologia ed idrogeologia con anomalie provenienti dal basso.

Al fine di caratterizzare il sottosuolo in termini di variazioni della resistività elettrica e valutare la presenza di eventuali disomogeneità nel volume di terreno indagato sono state eseguite n.7 prospezioni geoelettriche tomografiche (Electrical Resistivity Tomography o ERT) denominate in seguito ERT L1, ERT L2, ERT L3, ERT L4, ERT L5, ERT L6 e ERT L7.

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata per l'indagine di tipo elettrico è costituita da:

un sistema di acquisizione costituito da un Georesistivometro digitale Iris Instruments modello Syscal-Pro Switch 72 che permette la misura della resistività del terreno con tecnica multielettrodo e multicanale.

Lo strumento integra al suo interno tutto il necessario per effettuare misure multielettrodo fino a 72 elettrodi e si caratterizza per la massima precisione e rapidità operativa, grazie alla tecnica multicanale. L'alimentazione è assicurata da pacchi di batteria interni ed esterni gestiti dal microprocessore integrato; la potenza massima raggiungibile è di 250 Watt senza ausilio di generatore esterno.

Il collegamento degli elettrodi è garantito da 3 cavi ad alta resistenza dotati di 24 take out ciascuno, con passo massimo pari a 3 m. Ai cavi multi elettrodo sono stati connessi, con passo regolare, 48/72 picchetti in acciaio infissi nel terreno con un passo, variabile a seconda delle sezioni, di 2.5 m o 3 m.

La registrazione e il salvataggio dei dati avvengono su memoria interna. L'unità è totalmente computerizzata e tutte le funzioni vengono selezionate selezionando il menu corrispondente sul monitor LCD integrato.

2.4.1 Indagine Elettrica: metodologia e acquisizione

Il metodo geoelettrico si basa sullo studio delle alterazioni di un campo elettrico, creato artificialmente nel terreno, indotte dalle caratteristiche fisiche del terreno stesso. Con tale metodologia è possibile definire la natura e le strutture presenti nel sottosuolo attraverso misure opportunamente eseguite in superficie sfruttando, in particolare, le diverse caratteristiche di conducibilità elettrica dei materiali.

In pratica tramite una coppia di elettrodi in acciaio (AB = elettrodi di corrente) collegati ad una batteria, si genera un campo elettrico nel terreno le cui intensità e geometrie dipendono dalle caratteristiche elettriche degli orizzonti litologici attraversati, costituenti il sottosuolo. Tramite una seconda coppia di elettrodi MN si misura il valore della differenza di potenziale generata nel terreno al passaggio della corrente (metodo della resistività) oppure si misura il tempo di azzeramento di tale potenziale, nel momento in cui si interrompe la corrente elettrica agli elettrodi A e B (metodo della polarizzazione indotta).

Il metodo della resistività utilizza, come parametro geofisico per indagare il sottosuolo, la resistività elettrica del terreno. La resistività è una grandezza fisica posseduta dalle rocce, misurata in $\Omega \times m$ (Ohm*m), ed indica la resistenza incontrata dalla corrente elettrica nell'attraversare una formazione rocciosa. Il valore di resistività che si misura è una resistività apparente perché le linee di corrente che consentono di valutare tale parametro, hanno attraversato più formazioni rocciose: misuriamo cioè un valore anomalo rispetto al valore che si misurerebbe in un sottosuolo omogeneo ed isotropo. Questo dato non è semplicemente il valore medio delle resistività degli elettrostrati incontrati, ma è definito da una funzione più complessa in quanto dipende sia dalle resistività dei vari litotipi attraversati che dai loro spessori. Ed è proprio grazie al fatto che la distribuzione della resistività apparente è legata allo spessore, alla localizzazione, alla forma e alla resistività dei litotipi che la corrente ha oltrepassato, che da questa misura si possono ottenere informazioni sulle discontinuità presenti nel sottosuolo. In generale la resistività apparente può essere definita come la resistività vera di una roccia immaginaria (omogenea ed isotropa) equivalente ad una reale eterogenea ed anisotropa.

Il metodo elettrico tomografico, basandosi sulla stessa teoria, costituisce un recente sviluppo della metodologia geoelettrica. Utilizzando strumentazioni multielettrodo è infatti possibile l'acquisizione automatica, e in tempi brevi, di una grande serie di valori di resistività apparente o polarizzazione indotta, in modo da coprire in continuità una determinata sezione.

Con la tomografia elettrica 2D (che si serve di uno stendimento rettilineo e permette di ottenere un profilo tomografico al di sotto dello stendimento) è pertanto possibile studiare tutta la porzione di sottosuolo al di sotto dello stendimento elettrodoico realizzato.

Con particolari tecniche è possibile acquisire e restituire il dato anche in maniera tridimensionale (tecnica non invasiva indispensabile qualora sia richiesto di indagare il terreno posto al disotto di fabbricati, senza dover necessariamente infiggere gli elettrodi sulla verticale d'indagine): operando mediante una griglia di elettrodi, all'interno della quale vengono effettuate misure su tutte le combinazioni fattibili, è possibile risalire a un reale modello tomografico 3D. Il vantaggio del modello 3D è senza dubbio la completezza dell'informazione oltre alla possibilità di ricavare sezioni del modello, disposte su piani qualsiasi (sia xy che xz o yz).

In sintesi, per caratterizzare dal punto di vista georesistivo il sito d'interesse, sono stati realizzati sette distinti stendimenti elettrodoici non lineari, con modalità di acquisizione Dipolo – Dipolo, Wenner e Schlumberger reciproco.

Per l'esecuzione delle indagini ERT, per ognuna delle linee, è stato impiegato un cavo multicanale che è stato steso lungo il profilo e connesso ai picchetti in acciaio infissi nel terreno; le linee elettriche sono state impostate con passo costante (2.5 m o 3 m) e con un numero di elettrodi (48 o 72) tale da consentire, in funzione della disponibilità dell'area, il giusto compromesso con il dettaglio ricercato.

Riferimento linea	n. elettrodi	passo interelettrodoico	Lunghezza linea	Data esecuzione
ERT L1	72	2.5 m	177.5 m	19.09.2018
ERT L2	48	2.5 m	117.5 m	20.09.2018
ERT L3	48	2.5 m	117.5 m	20.09.2018
ERT L4	72	2.5 m	177.5 m	21.09.2018
ERT L5	48	2.5 m	117.5 m	21.09.2018
ERT L6	48	3 m	141 m	24.09.2018
ERT L7	48	3 m	141 m	25.09.2018

Le misure effettuate sono state processate con il software ERTLab TM di Geostudi Astier srl e Multi-Phase Technologies LLC che, tra le altre caratteristiche, consente di generare le sequenze di acquisizione, gestire la successione delle misure, processare i dati attraverso inversione congiunta dei vari metodi di acquisizione utilizzati fornendo degli elaborati finali rappresentanti le singole sezioni 2D. Il software consente inoltre l'elaborazione in 3D dei dati acquisiti sebbene le acquisizioni delle linee siano state eseguite separatamente; si ottengono, in questo modo, una sorta di blocchi 3D che permettono la visualizzazione di sezioni orizzontali di resistività.

2.4.2 Processing dei dati

Sono stati processati e invertiti i dati derivanti dall'acquisizione delle misure di resistività per un totale di 408 elettrodi e oltre 30.000 quadripoli di misura.

L'indagine complessivamente è penetrata nel sottosuolo fino ad una profondità intorno ai 20 -25 m sotto il piano di campagna.

Dopo il processo di elaborazione, gli estremi minimo e massimo dei valori di resistività invertiti sono risultati essere 0.13 Ohm*m e 385 Ohm*m. Al fine di evidenziare in maniera netta i contrasti di resistività individuati, è stata fissata una scala cromatica compresa tra 5 e 25 Ohm*m.

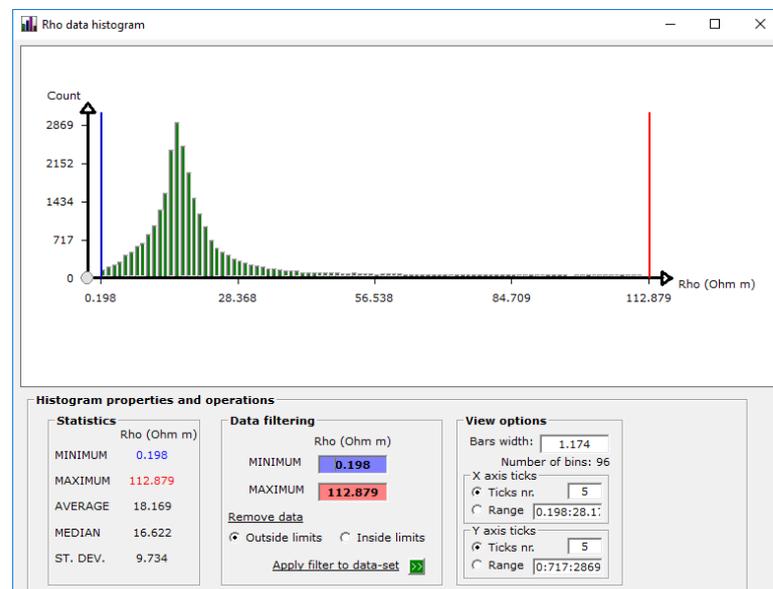


Fig. 4 - Distribuzione totale dei valori di RHO misurati nelle 7 stese

In fase di realizzazione della campagna d'indagine, infine, è stato realizzato ad hoc un rilievo plano-altimetrico con stazione totale laser modello Sokkia SET4130R3 al fine di georeferenziare la posizione dei singoli sensori (elettrodi) (operazione necessaria per le successive fasi di elaborazione via software), nonché le verticali delle indagini in sismica passiva.

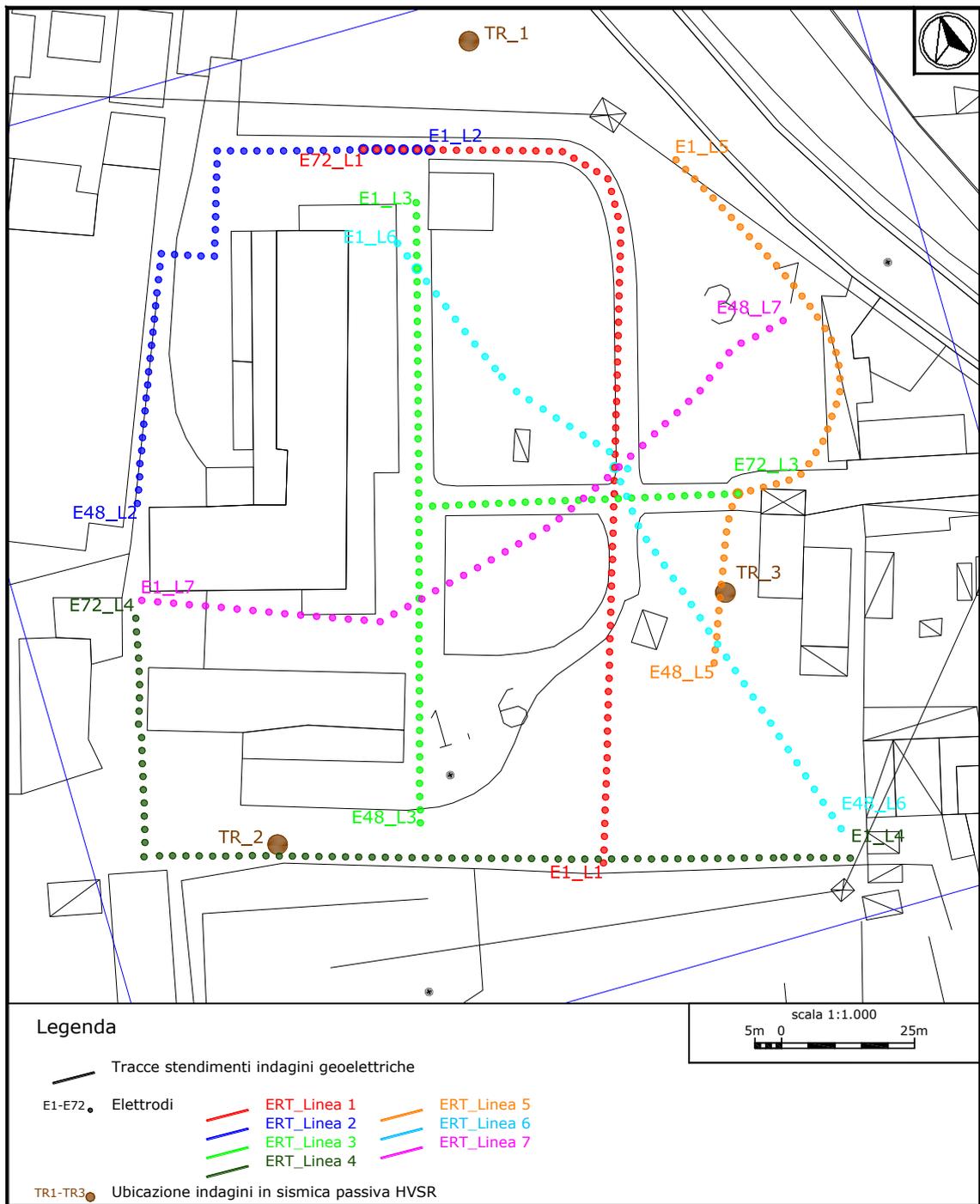


Fig. 5 - Ubicazione Indagini Geofisiche ERT - HVSR

Qui di seguito vengono presentate le sintesi, georiferite, dei risultati della indagine ERT 3D eseguita all'interno dell'area Ex-SIO che ha avuto lo scopo di verificare la presenza di anomalie nell'ambito dei primi 20/25 metri di profondità e delle loro possibili interferenze sul piano idrogeologico.

2.4.3 Risultati ed interpretazione dell'indagine geoelettrica ERT 3D

Per affrontare l'interpretazione dell'indagine geoelettrica ERT 3D è opportuno rifarsi, almeno a grandi linee alle caratteristiche di resistività dei terreni. Nella seguente tabella vengono espressi dei valori indicativi di resistività dei più comuni terreni e rocce.

litotipo	Resistività (Ωm)
Acqua dolce	10-100
Acqua di mare	0.2-0.3
Sabbie sciolte secche	1000
Sabbie sciolte sature in acqua dolce	80-150
Limi saturi in acqua dolce	15-50
Argille in acqua dolce	5-20
Ghiaie asciutte	>1000
Ghiaie sature in acqua dolce	150-300
Calcari	500-2000
Dolomie	1000-5000
Marne	10-100
Basalti	20-2000

Come si può notare, la resistività dei terreni occupa intervalli certamente differenziati, ma per un certo verso anche sufficientemente ampi da presentare ampi margini di sovrapposizione. Questa forma di ambiguità viene risolta in quanto l'area da investigare è in genere sufficientemente raccolta ed il numero di litologie presenti piuttosto concentrato in condizioni chimico fisiche spesso uniformi. Certamente è un primo passaggio questo che permette comunque di confermare o escludere la presenza di anomalie all'interno di situazioni litostratigrafiche piuttosto omogenee.

In particolare nel nostro caso siamo in presenza di litologie costituite essenzialmente da materiali fini immersi in acqua dolce (ph 6.9) caratterizzati da una miscela di argille plastiche con limi e sabbie fini e quindi i range di misura viene ulteriormente ridotto e concentrato nei limiti compresi fra 5 e 25 $\Omega*m$ che rende particolarmente coerenti i risultati dell'indagine geoelettrica paragonandoli con le prove CPTU che sono state eseguite nei terreni circostanti.

In questo caso nella successiva Fig. 4 è riportata la classificazione della resistività apparente derivata da "Zambrini R., 2007. *Studio sull'intrusione salina nell'area costiera romagnola*. Centro Interdisciplinare di Ricerca per le Scienze Ambientali (C.I.R.S.A.).

LITOTIPO	RESISTIVITA' (ohm*m)
Acqua dolce	10-100
Argille in acqua dolce	5-15
Limi argillosi in acqua dolce	10-30
Limi sabbiosi in acqua dolce	20-50
Sabbie sciolte sature in acqua dolce	50-150
Sabbie sciolte secche	1000
Ghiaie sature in acqua dolce	150-300
Acqua salmastra	2-3
Acqua salata	0.2
Argille in acqua salata	1.5-2
Limi argillosi in acqua salata	1.5-2
Limi sabbiosi in acqua salata	1-5
Sabbie sciolte sature in acqua salata	1-5

Fig. 4- Resistività materiali sciolti - da Zambrini, 2007



Fig. 5 - legenda elettrostratigrafica

Questo ha permesso di individuare degli elettro-strati che rappresentano le diverse litologie all'interno di acque di falda. Per quanto riguarda le soglie di resistività dei vari depositi e dei vari tipi di acque vi è un'ampia letteratura (Burger, 1992; Celico, 1998; Bulter, 2005).

In questo studio è stata utilizzata una tabella di valori di resistività fissata per i diversi materiali incontrati nell'area indagata e la chiave di lettura dei profili è rappresentata in fig. 4 e fig. 5: quindi ogni litotipo è associato ad un intervallo di resistività.

In questo modo il grafico profondità-resistività può essere interpretato come profilo "idro-stratigrafico".

Si tenga presente inoltre che spesso, laddove c'è saturazione risulta molto complicato individuare la litologia del sedimento (argillosa o sabbiosa) perché l'intervallo di resistività è molto ristretto; sotto questo aspetto siamo stati aiutati certamente dalla disponibilità di dati derivanti dalle elaborazioni delle prove CPTU, per cui gli strati isolati sono stati raggruppati in un unico strato con una resistività media molto bassa in genere (intorno a 5/7 ohm*m).

Nelle sezioni ottenute i colori freddi rappresentano i valori di resistività più bassa, mentre quelli caldi quelli a resistività più elevata.

Si possono individuare principalmente i seguenti elementi caratteristici che si presentano in tutti i profili:

- colore viola/blu/azzurro zone caratterizzate da argille plastiche con probabile presenza di torbe;
- colori che tendono al verde limi argillosi fino a limi sabbiosi;
- colori gialli probabile aumento della frazione incoerente (sabbie fini);
- colori verso il rosso parte più superficiale coincidente con le strutture antropiche.

Nelle figure seguenti vengono presentati i risultati delle indagini a diverse profondità di investigazione

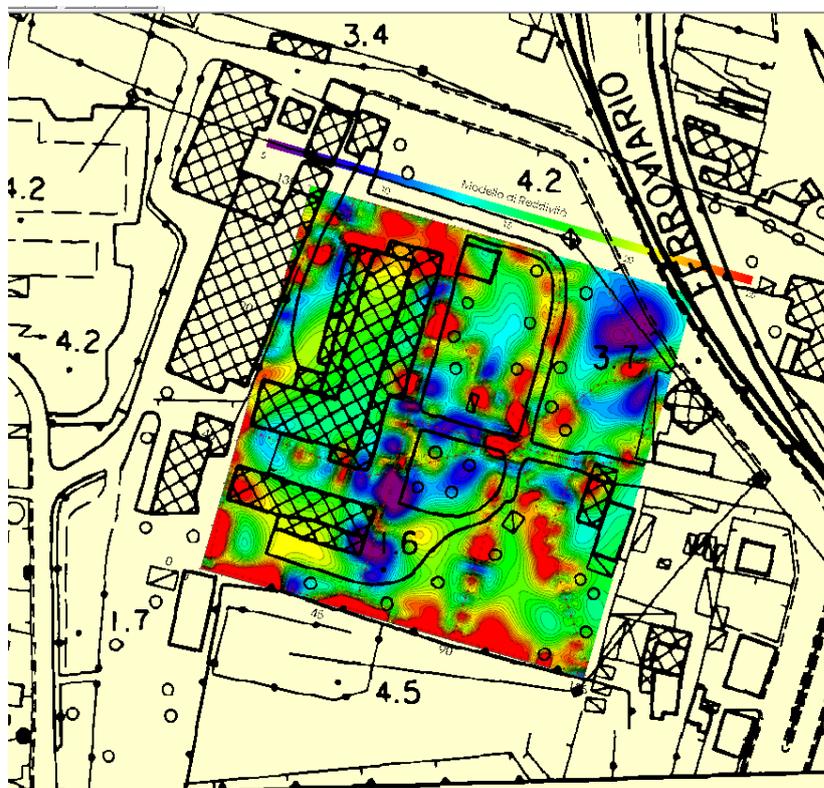


Fig. 6 - ERT 3D -1.00 p.c.

Nell'immagine le zone rosse si riferiscono alle interferenze con strutture antropiche (cemento, asfalto), le zone viola-azzurre fino ad azzurro scuro si riferiscono a zone caratterizzate da un basso valore di ohm/m a cui sono riconducibili zone argillo limose con torba impregnate di acque.

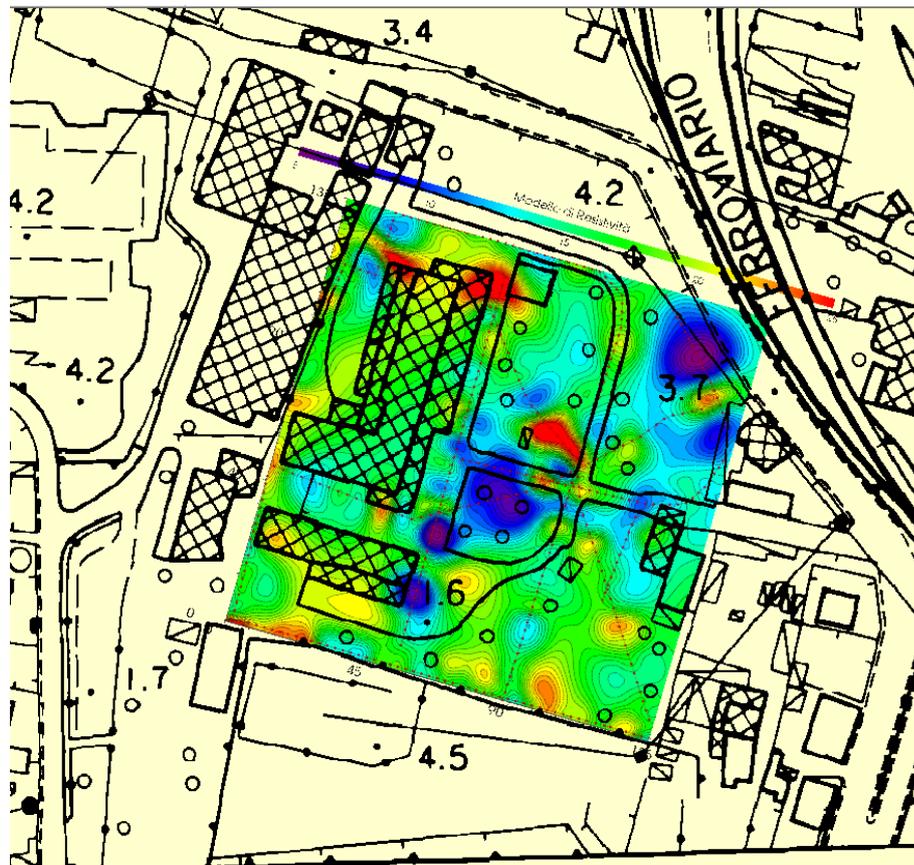


Fig. 7 - ERT 3D -4.00 p.c

La presenza di queste anomalie caratterizzate da sedimenti molto fini, argillosi e torbosi impregnati di acqua caratterizzano un allineamento Sud Ovest – Nord-Est, in particolare si riscontrano nella zona centrale coincidente con la presenza di uno stagno e nella zona al confine verso la curva della ferrovia dove probabilmente sono presenti terreni molto compressibili con torbe.

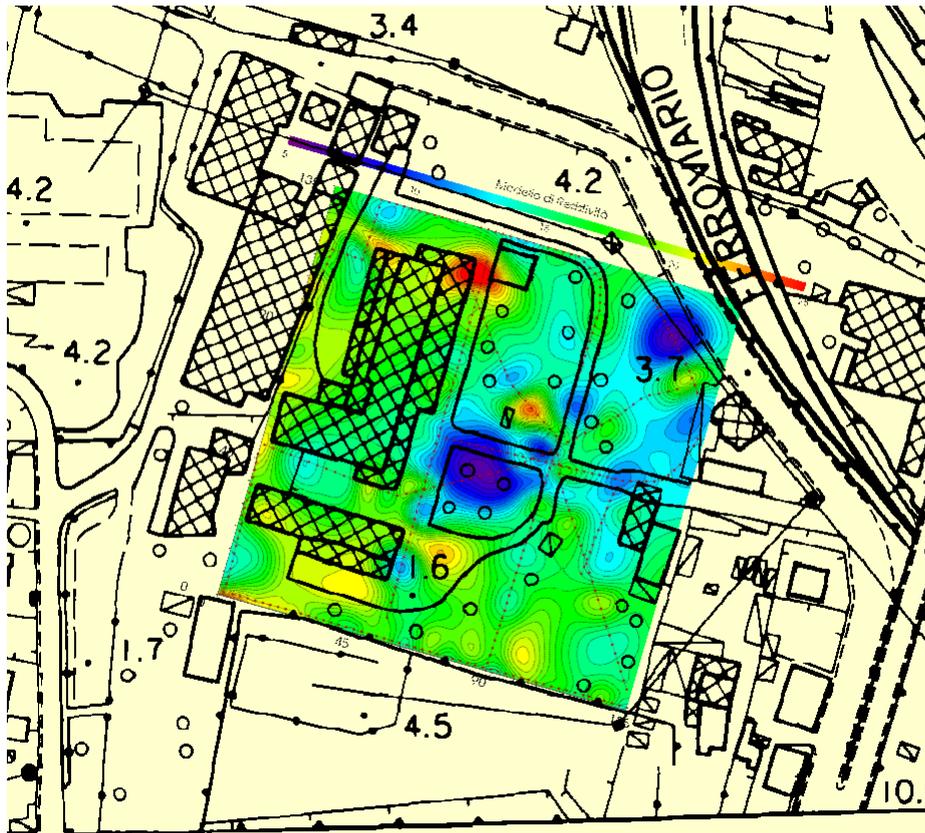


Fig. 8 - ERT 3D - 6.00 p.c

La presenza di queste anomalie comincia ad attenuarsi pur continuando a manifestarsi con una certa intensità nella zona centrale e al confine della proprietà verso Nord-Est

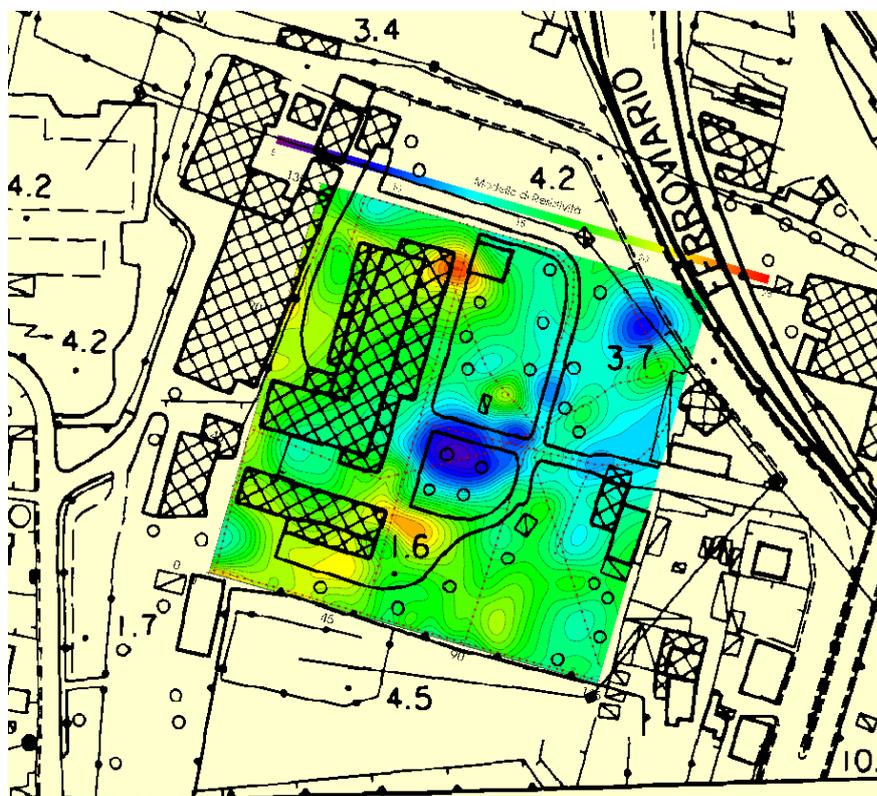


Fig. 9 - ERT 3D - 8.00 p.c.

A – 8.00 mt dal p.c. la situazione continua ad attenuarsi e rimangono evidenti le due anomalie già riscontrate in precedenza

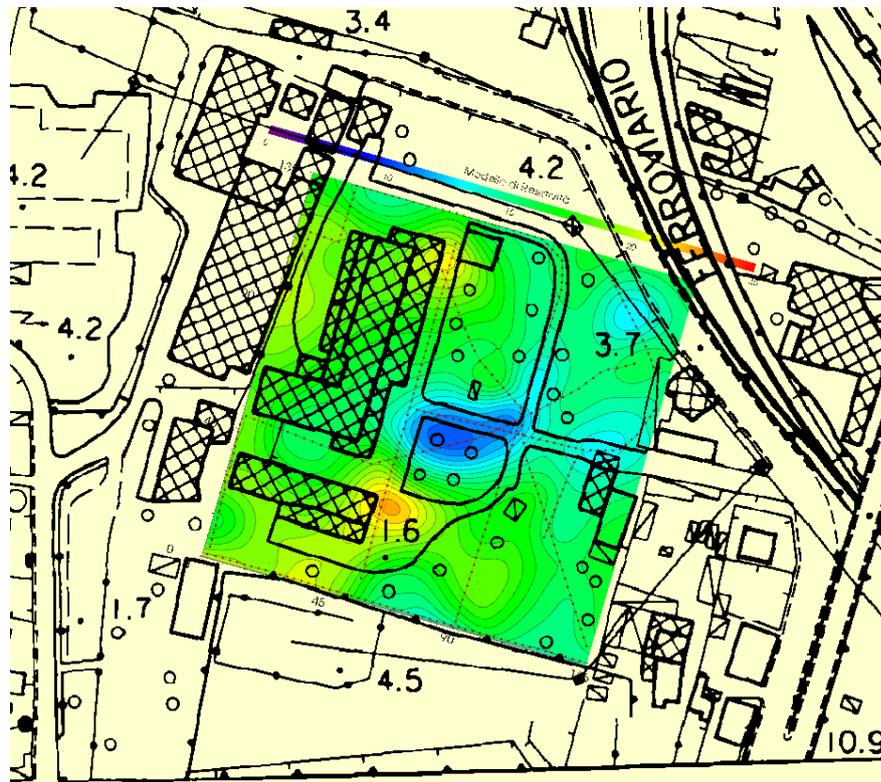


Fig. 10 - ERT 3D - 12.00 dal p.c.

Fra gli 8 e 12 metri di profondità permane ancora l'anomalia centrale mentre quella verso Nord-Est tende a diminuire

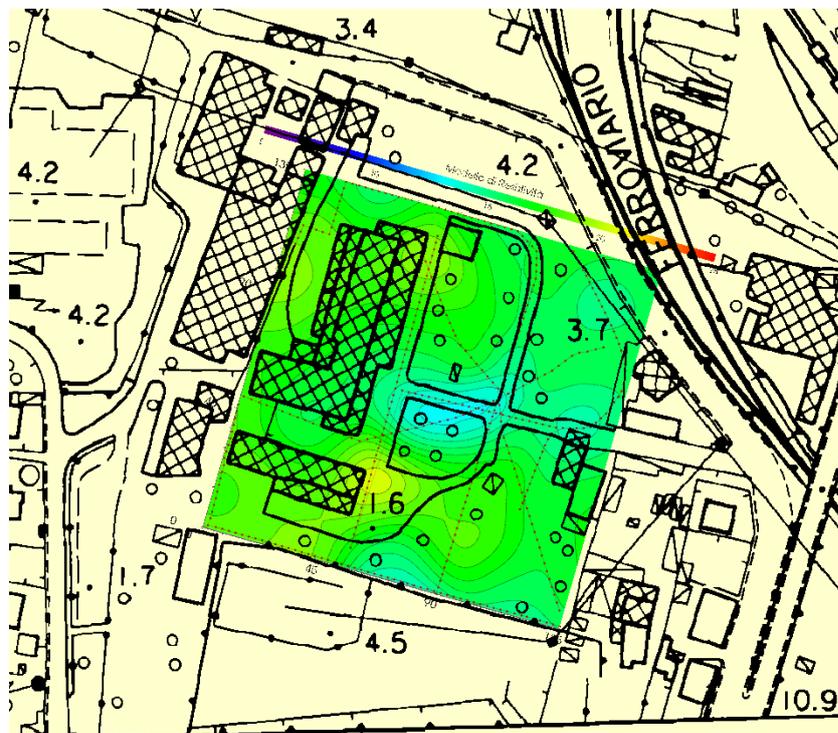


Fig. 11 - ERT 3D - 16.00 dal p.c.

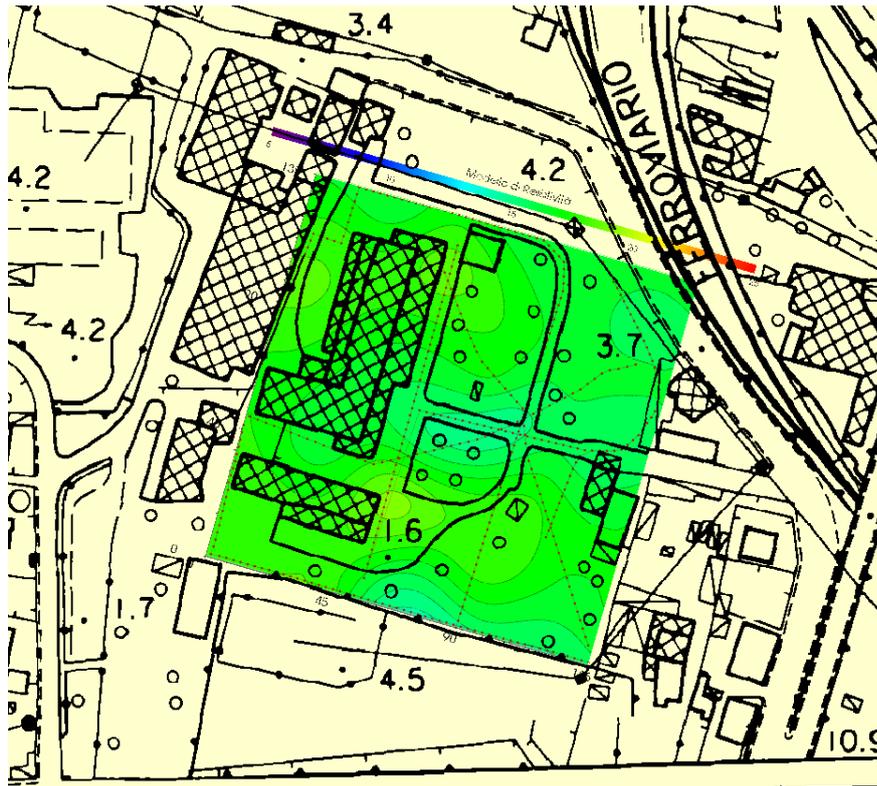


Fig. 12 - ERT 3D -20.00 dal p.c.

Fra 16.00 e 20.00 mt. le anomalie scompaiono totalmente e la zona si presenta pressoché omogenea.

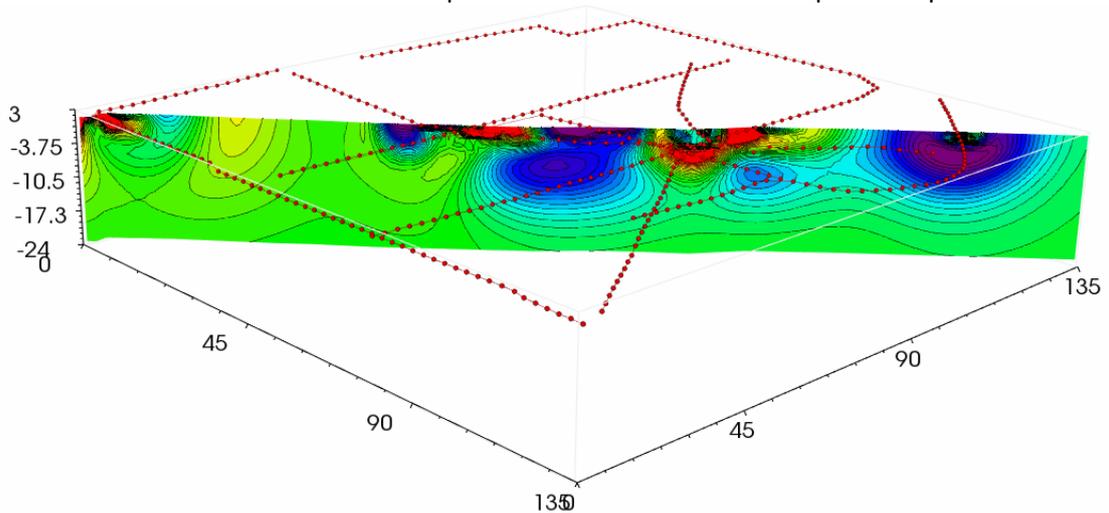
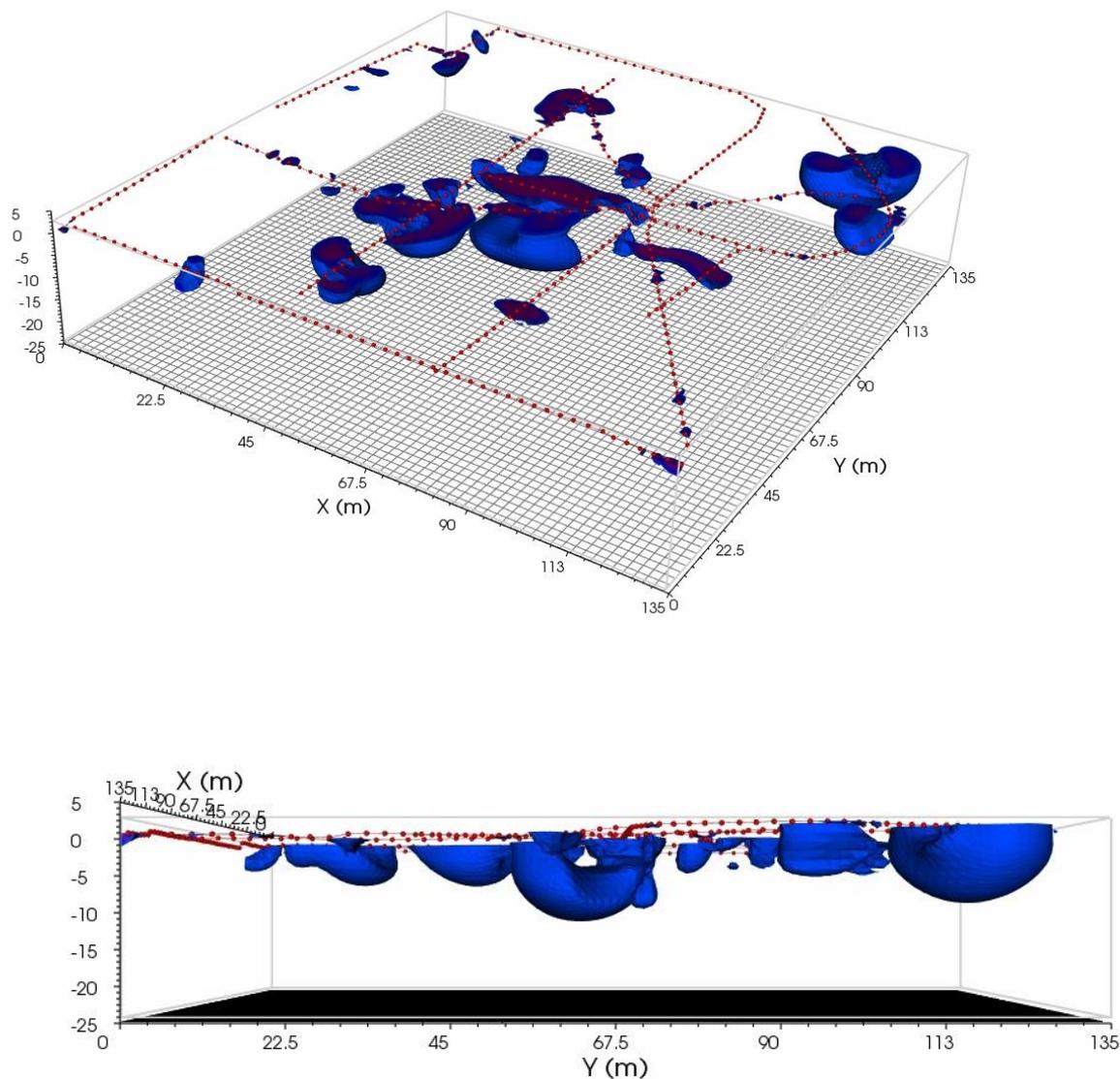


Fig. 13 - sezione allineamento Sud Ovest - Nord-Est

Anche la sezione di Fig. 13, eseguita sull'allineamento Sud-Ovest/Nord-Est, evidenzia come il fenomeno sia contenuto entro i 10/12 metri, confermando peraltro quanto riscontrato in generale nella zona esaminata sia dentro l'area Ex-Sio che esterna ad essa (Via Campitelli, Palazzetto dello Sport).

L'analisi effettuata porta a ritenere che le anomalie presenti siano riconducibili a fenomeni di ordine geotecnico dovuti alla presenza di terreni molto compressibili con argille organiche e torbe piuttosto che fenomeni profondi provenienti dal substrato.

Infatti se avessimo riscontrato delle anomalie provenienti dal substrato le stesse si sarebbero manifestate interessando in profondità la sezione elettrostratigrafica, mentre le anomalie riscontrate appaiono come delle bolle che galleggiano sulle sabbie limose (vedi Fig. seguenti) testimoniando la loro provenienza dall'alto e non dal basso.



2.5 Indagine HVSR: metodologia e acquisizione

Il rumore sismico, generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica, è presente ovunque sulla superficie terrestre. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto più piccole di quelle indotte dai terremoti.

I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

I microtremori sono in parte costituiti da onde di volume, P o S, ma un ruolo fondamentale nella produzione dei microtremori è rivestito dalle onde superficiali, che hanno velocità prossima a quella delle onde S.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo dal rumore sismico registrato in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o H/V), proposta da Nogoshi e Igarashi (1970). La tecnica è universalmente riconosciuta come efficace nel fornire stime affidabili della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo.

I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la frequenza caratteristica di risonanza del sito che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;
- la velocità media delle onde di taglio V_s calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc.) e riconoscibile nella curva H/V. E' possibile calcolare la V_{s30} e la relativa categoria del suolo di fondazione;
- la stratigrafia del sottosuolo con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

Durante questa campagna geofisica sono state eseguite tre misure di microtremori ambientali (acquisizioni in sismica passiva a stazione singola) secondo la seguente configurazione spaziale e temporale:

Denominazione	Coordinate Gauss Boaga	Durata acquisizione	Frequenza di campionamento
TR1	X= 1568337.2 Y= 4885092.0	20 min	128 Hz
TR2	X= 1568260.7 Y= 4884955.7	20 min	128 Hz
TR3	X= 1568354.8 Y= 4884978.4	20 min	128 Hz

Le misure, orientate secondo il Nord e della durata di 20 minuti ciascuna, tempo di acquisizione più che sufficiente per le finalità delle indagini stesse, sono state effettuate con il tromografo digitale Tromino® di MoHo srl.

I dati di rumore, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 128 Hz.

I risultati ottenuti dall'esecuzione delle indagini tromografiche sono stati elaborati attraverso il software *Grilla 7.4.1* (MoHo srl).

J18_093_09_19_LA_SPEZIA_TR, EX SIO HVSR1

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: n.a.

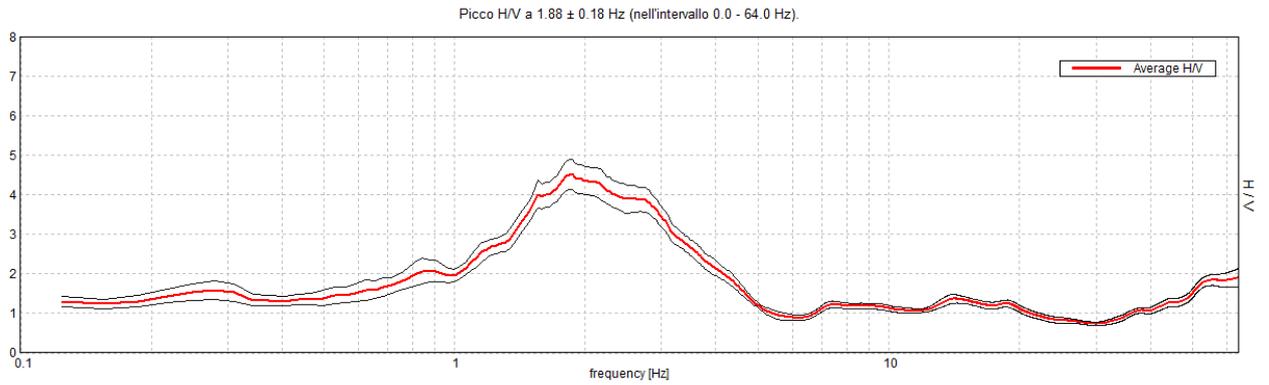
Inizio registrazione: 20/09/18 15:52:01 Fine registrazione: 20/09/18 16:12:02

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

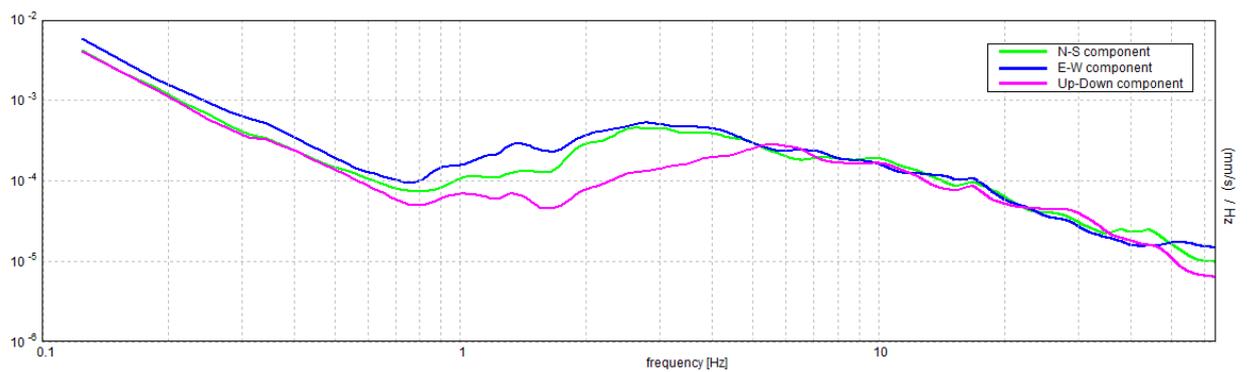
Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00". Analisi effettuata sull'intera traccia.
 Freq. campionamento: 128 Hz
 Lunghezza finestre: 20 s
 Tipo di lisciamento: Triangular window
 Lisciamento: 10%

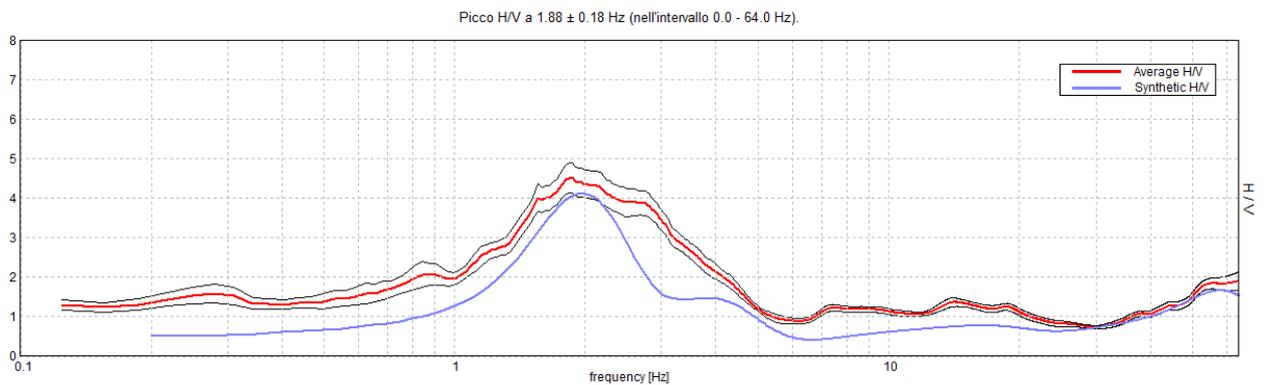
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

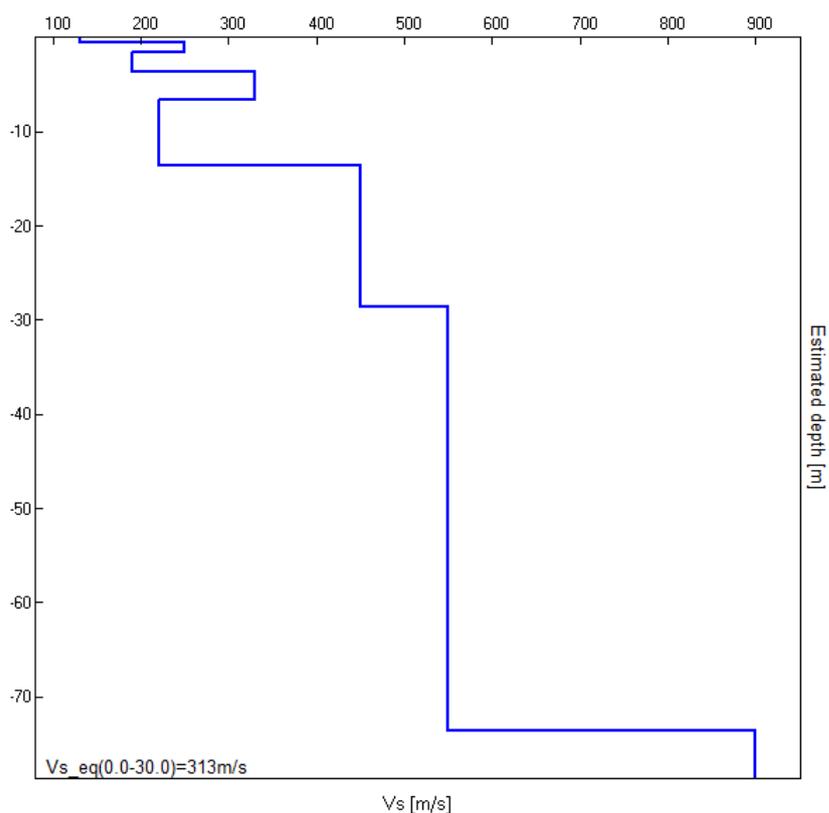


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità dello strato [m]	alla base Spessore [m]	Vs [m/s]
0.60	0.60	130
1.60	1.00	250
3.60	2.00	190
6.60	3.00	330
13.60	7.00	220
28.60	15.00	450
73.60	45.00	550
inf.	inf.	900

Vs_eq(0.0-30.0)=313m/s



J18_093_09_19_LA_SPEZIA_TR, EX SIO HVSR2

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: n.a.

Inizio registrazione: 21/09/18 11:43:17 Fine registrazione: 21/09/18 12:03:18

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

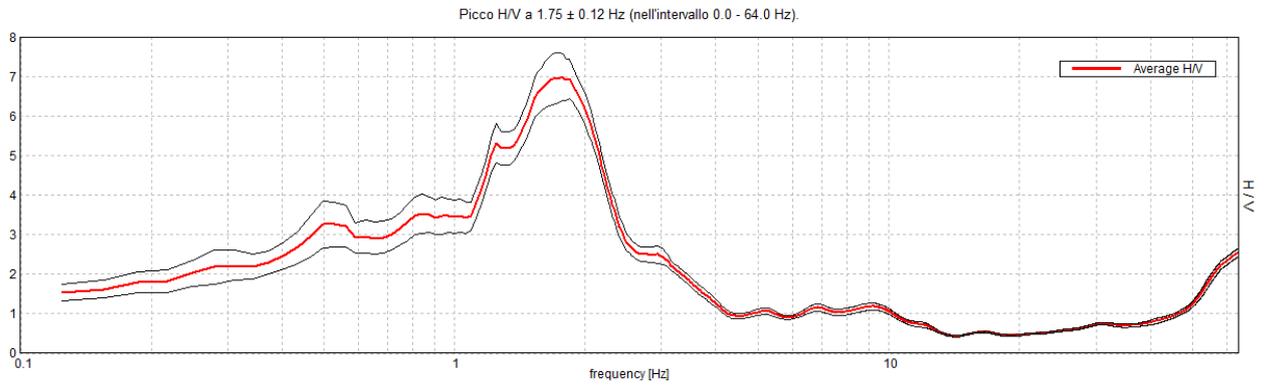
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

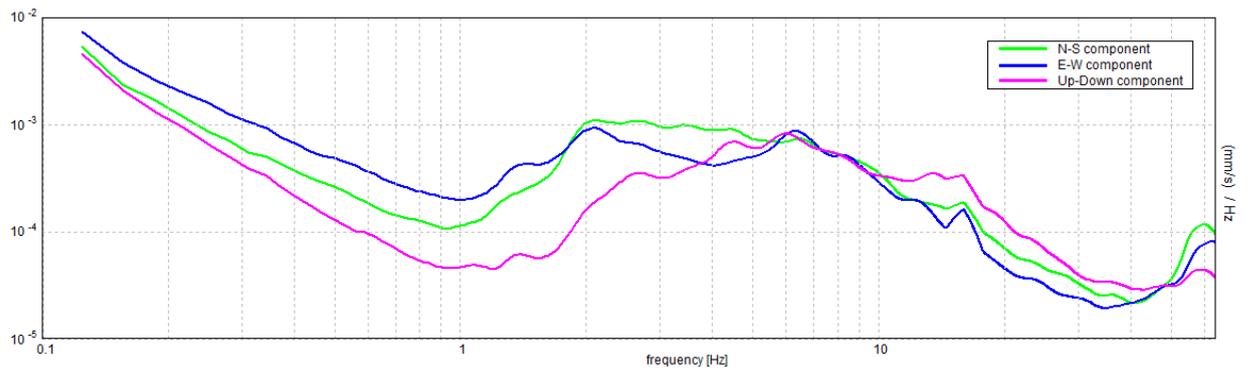
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

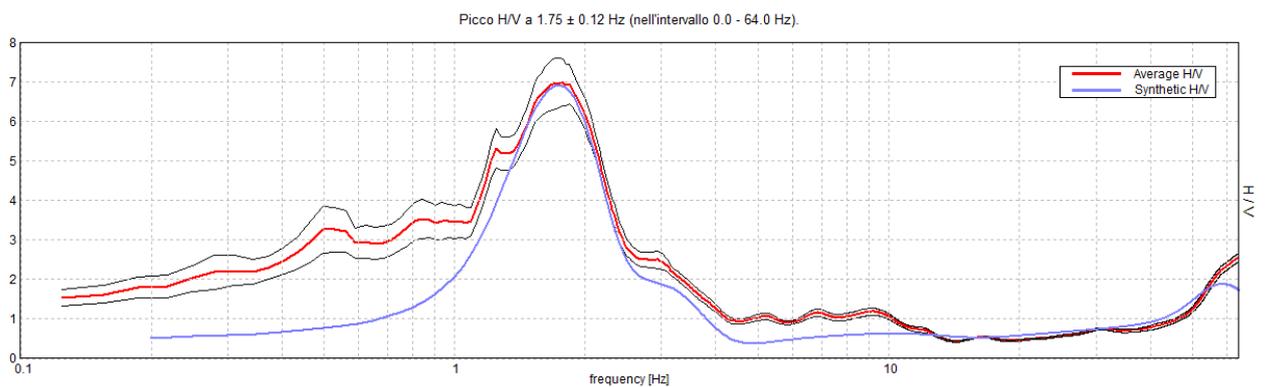
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



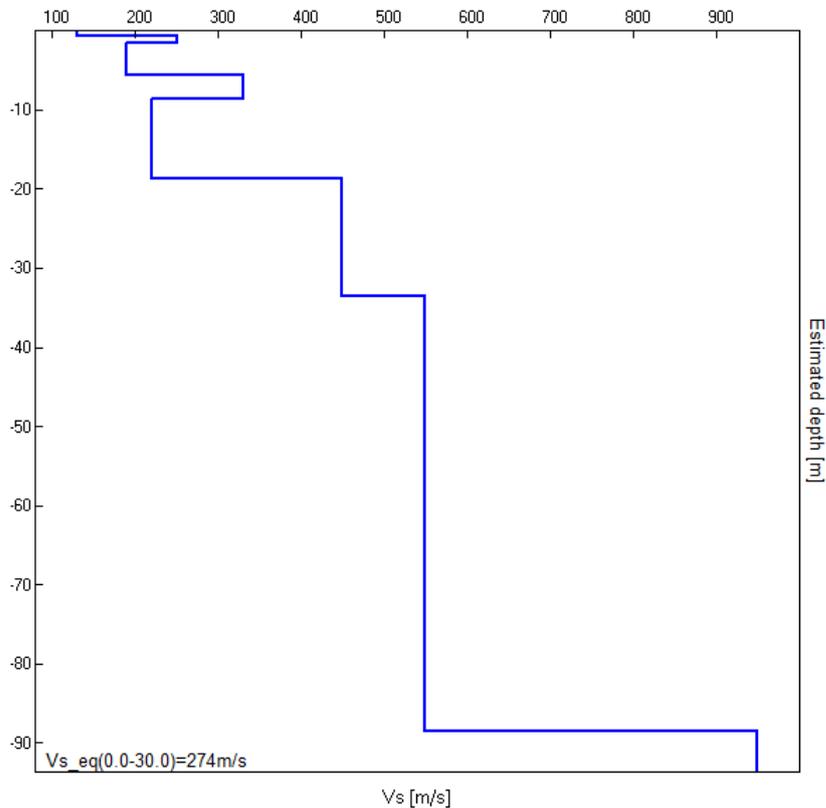
H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità dello strato [m]	alla base Spessore [m]	Vs [m/s]
0.60	0.60	130
1.60	1.00	250
5.60	4.00	190

8.60	3.00	330
18.60	10.00	220
33.60	15.00	450
88.60	55.00	550
inf.	inf.	950

Vs_eq(0.0-30.0)=274m/s



J18_093_09_25_LA_SPEZIA_TR, EX SIO HVS3BIS

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: n.a.

Inizio registrazione: 25/09/18 10:21:03 Fine registrazione: 25/09/18 10:41:03

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

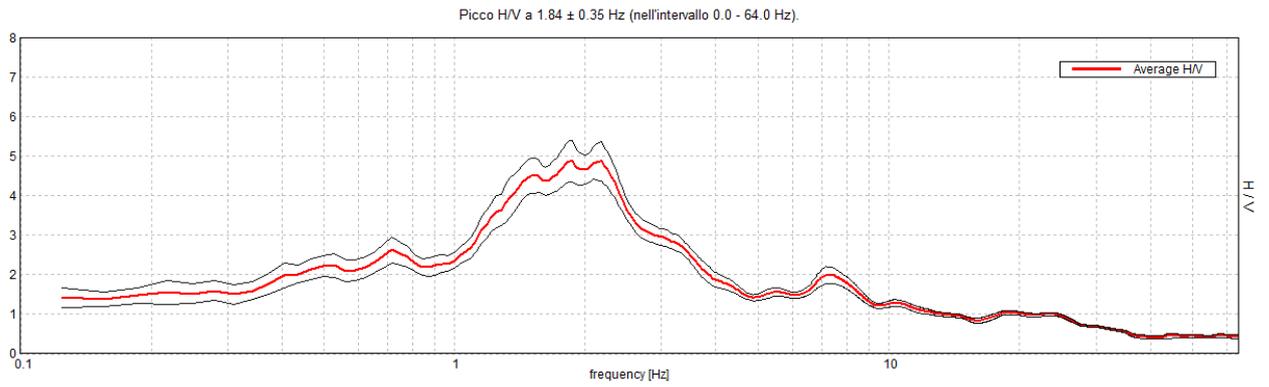
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

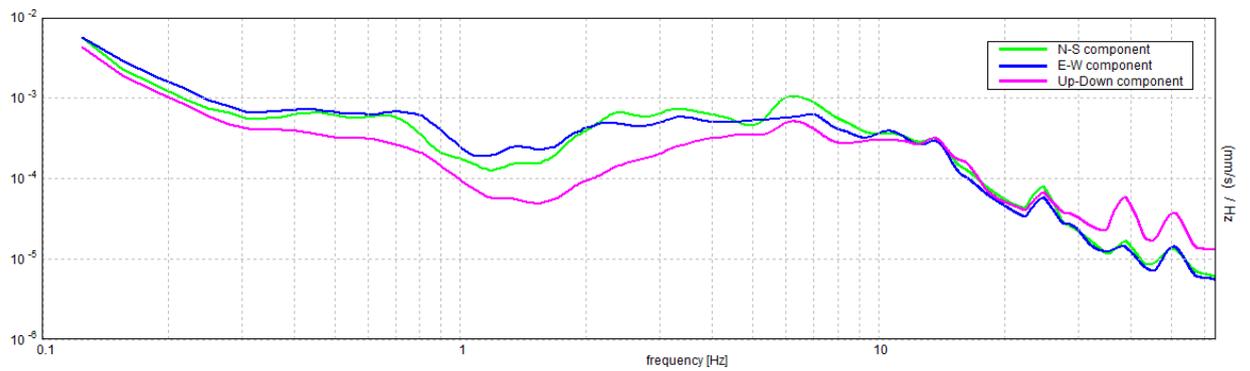
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

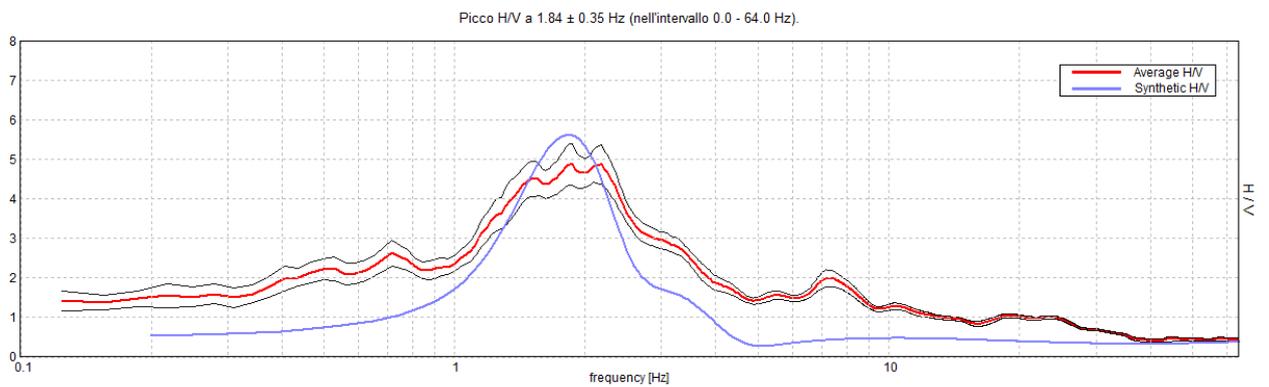
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

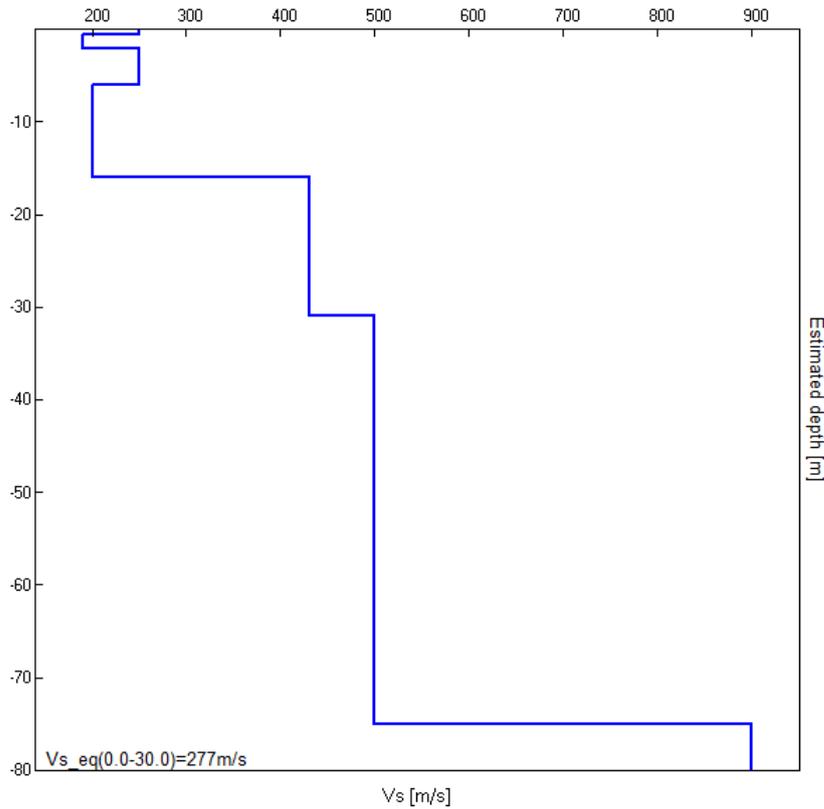


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità dello strato [m]	alla base Spessore [m]	Vs [m/s]
0.50	0.50	250
2.00	1.50	190
6.00	4.00	250
16.00	10.00	200
31.00	15.00	430
75.00	44.00	500
inf.	inf.	900

$V_{s_eq}(0.0-30.0)=277\text{m/s}$



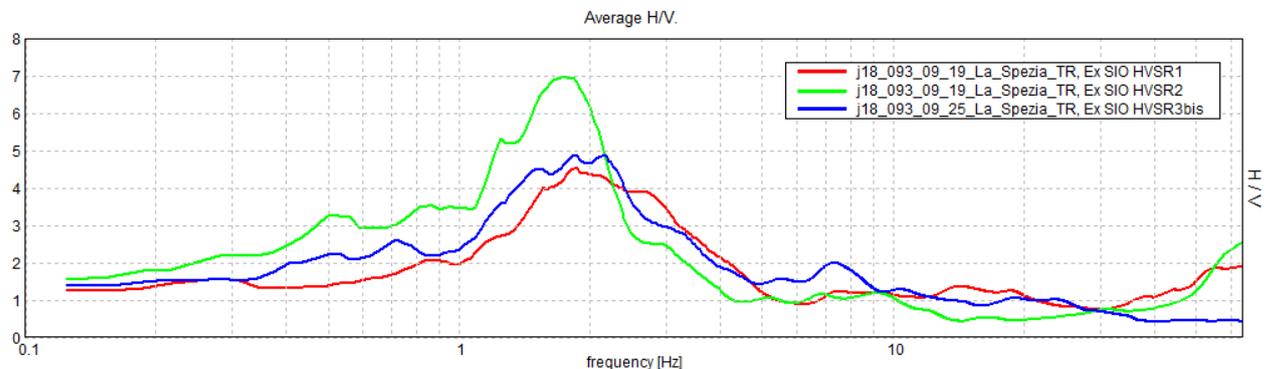
Il confronto tra le misure HVSR evidenzia come le tre verticali di misura siano caratterizzate da una sostanziale omogeneità sismostratigrafica.

Il picco principale, individuabile a frequenze prossime ai 2 Hz è imputabile a un contrasto di impedenza che si trova a profondità significative.

I valori di V_s e gli spessori dei sismostrati riportati nelle schede in coda al testo indicano che il sottosuolo è caratterizzato da una sostanziale omogeneità sismostratigrafica.

È necessario inoltre precisare che, trattandosi di misure indirette, come per tutte le indagini geofisiche, i risultati ottenuti possono variare all'interno di un range pari a circa il 20%.

H/V SPERIMENTALE -CONFRONTO TR1, TR2 e TR3



3 Idrogeomorfologia

L'analisi degli aspetti idrogeomorfologici è stata eseguita affrontando tre tematiche specifiche e cioè:

1. Assetto Morfologico;
2. Reticolo Idrografico;
3. Censimento Pozzi e Carta delle Isofreatiche

3.1 Assetto Morfologico

L'area in esame si presenta morfologicamente pianeggiante, leggermente depressa rispetto alle zone circostanti, interessate da un intenso sviluppo urbano.

Nelle immagini seguenti viene presentata una elaborazione eseguita sulla base dei dati LIDAR del Ministero dell'Ambiente. La scelta di questa elaborazione è conseguenza sia della tecnica di rilievo utilizzata, sia al grado di omogeneità generale che ne deriva per lavori a scala territoriale pur mantenendo un livello di dettaglio molto spinto.

Il DTM (modello digitale del Terreno) derivato da tali dati è basato su celle di 0.81x0,81 mt e dove i vari colori rappresentano il continuum delle fasce di quota che si riscontrano.

La motivazione della posizione ribassata del piano di campagna dell'area non va ricercata in azioni o problemi intrinseci all'area (sterri, dilavamento, sprofondamento o assestamento del terreno) ma nella evoluzione antropica che si è succeduta nei terreni intorno ad essa, sui quali si sono succeduti ed accavallati interventi di differenti tipi ed entità: costruzione di strade e ferrovie, realizzazione di piazzali, costruzioni, rilevati, con ampie pavimentazioni in cemento o asfalto. In generale si osserva facilmente che tutta l'attività antropica recente ha teso a rialzarsi, per un motivo o per un altro, rispetto al piano di campagna originario.

Anche a valle del lotto considerato gli interventi umani negli anni recenti hanno aumentato l'impermeabilizzazione o comunque il rimaneggiamento del suolo con la realizzazione di grandi piazzali cementificati o con la costruzione di terrapieni (raccordo V. Carducci – Autostrada), creando un ostacolo dove si trovavano canali per il drenaggio e il deflusso delle acque che attualmente risultano invasi dalla vegetazione.

I terreni dell'area ex SIO, sotto uno strato della potenza di circa 100 cm composto da materiali arenati, rimaneggiati, vegetati, presentano una natura per lo più argillosa e/o limosa, con caratteristiche quindi coerenti o semicoerenti, con la conseguenza di una permeabilità molto bassa e che tende a diminuire con l'aumentare della profondità.

In questa situazione, nel caso di impedimento di deflussi delle acque, si viene a creare la condizione di una falda sospesa, ristagnante. Questa situazione trova riscontro, tra l'altro, nei risultati della campagna geoelettrica (v. paragrafo relativo), dove possono essere ben osservate le porzioni di terreno soggette a saturazione. Nei modelli tridimensionali e nelle sezioni elettriche allegate si può facilmente intuire che, all'interno della nostra area notevoli quantità d'acqua affluiscono senza controllo principalmente dall'angolo NE, il più prossimo alla massicciata ferroviaria che passa giusto al di là della strada, in posizione sopraelevata (intorno ai due metri) rispetto al piano di campagna dei nostri terreni.

L'acqua così "captata" defluisce solo parzialmente grazie al citato canale, ma per il resto, come già detto, tende ad accumularsi nei primi metri di terreno soprattutto nella diagonale NE-SW.

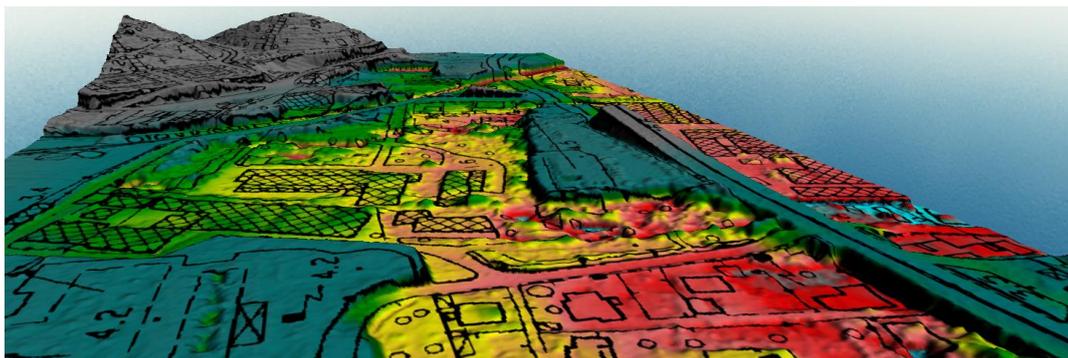


Fig. 14 - Elaborazione DTM LIDAR MATTAM

3.2 Reticolo Idrografico (ved. Fig. 15 e 16)

L'analisi del Reticolo Idrografico ha richiesto una attenta verifica per quanto riguarda l'attraversamento del reticolo idrografico, nella fascia di interesse della zona EX-SIO, da parte del reticolo proposto dalla Regione Liguria.

Tale verifica è stata eseguita mediante controlli in campo a partire dall'imboccatura del canale (in corrispondenza del muro di confine del cantiere TOTO COSTRUZIONI a monte della Linea Ferroviaria ed è proseguita nella zona della rotonda in prossimità del Cimitero dei Boschetti e successivamente ulteriormente verificato con gli uffici tecnici del Comune della Spezia, in quanto tale fascia è interessata da un importante progetto di manutenzione straordinaria.

Il reticolo proposto dalla Regione Liguria in alcune sue parti è risultato errato ed è stato possibile ricostruirlo anche recuperando le informazioni desumibili dal Catasto di Impianto sia del Quadro di Unione, sia dei Fogli 40,43,44,45 (Edizione 1950),46 (edizione 1937). Qui di seguito (vedi Fig. 15 e 16) vengono evidenziate le difformità, quindi il canale è pressochè globalmente tombato dal Cimitero dei Boschetti, fatto salvo piccole parti scoperte costeggia la ferrovia verso Lerici, si raccorda con il canale proveniente dagli Stagnoni e attraversa la ferrovia in prossimità di un'area industriale e riemerge dopo l'area portuale per sfociare in mare.

Dalla cartografia prodotta risulta chiaramente che l'area NON è interessata da alcun fosso riconducibile al reticolo idrografico

Il resto dei fossi che interessano in particolare le aree esterne all'area EX SIO sono fossi di smaltimento delle acque superficiali che non rientrano nel reticolo Regionale.

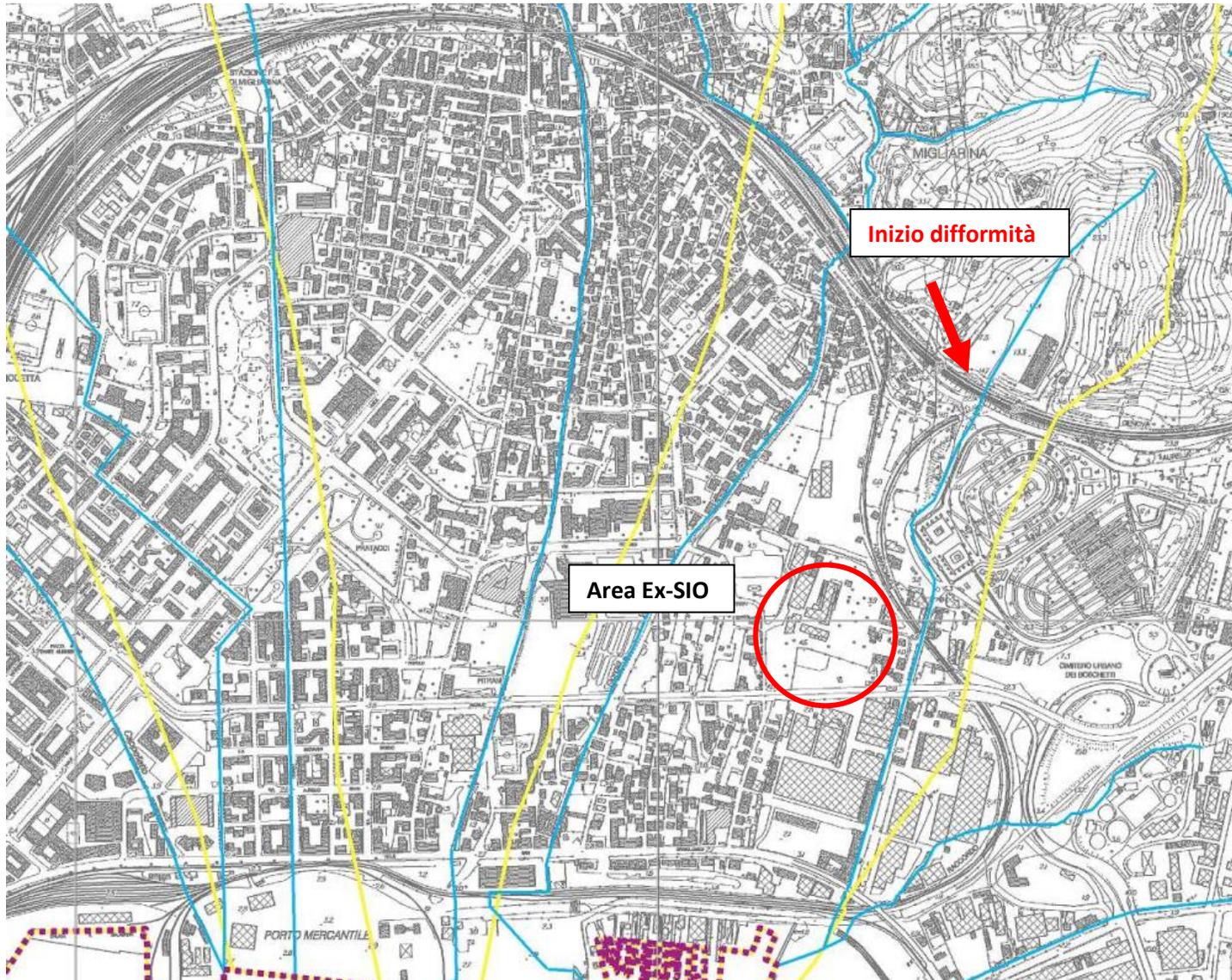


Fig. 15 - Estratto Carta del Reticolo Idrografico Regione Liguria

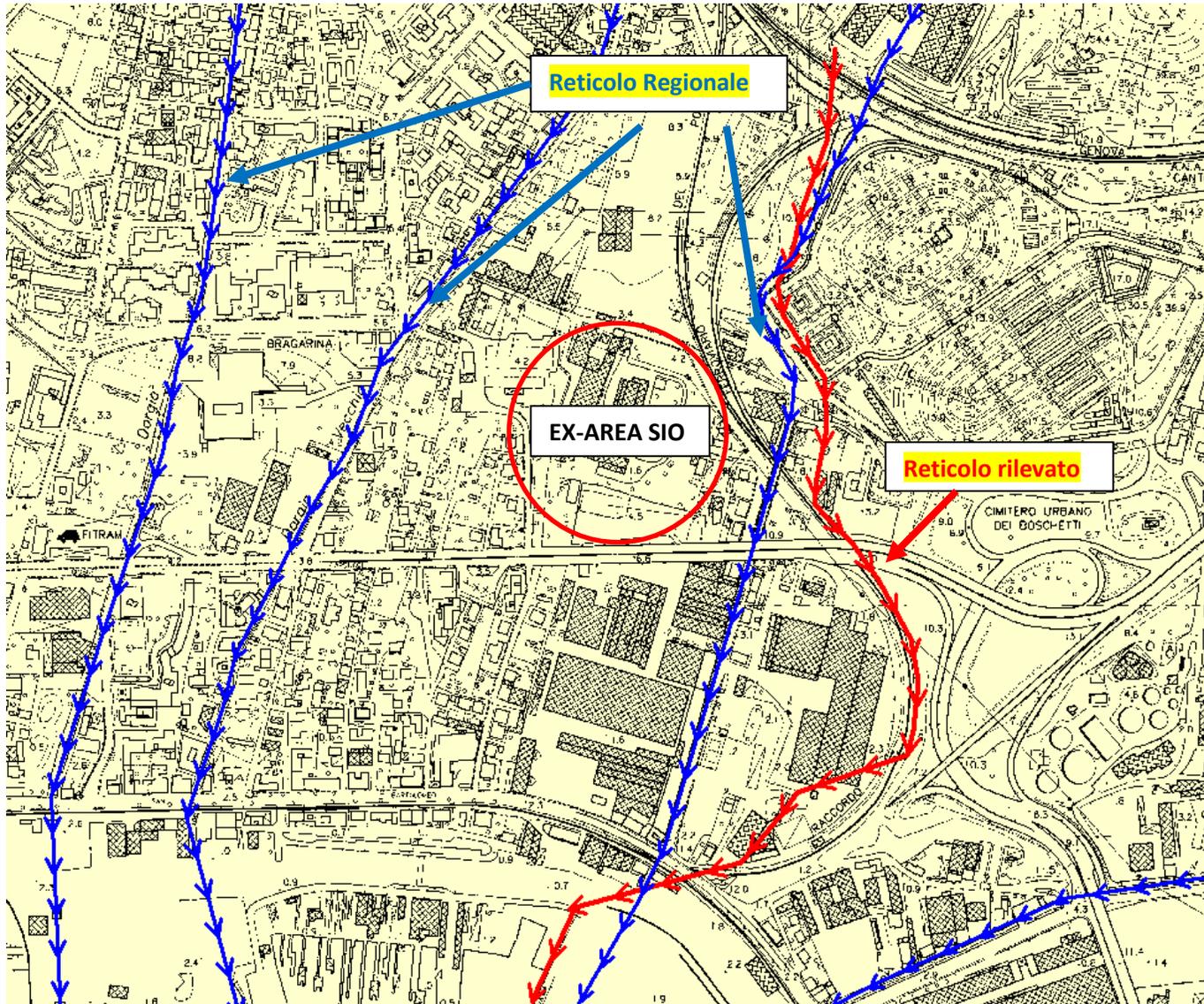


Fig. 16 - Reticolo Idrografico rilevato

3.3 Censimento Pozzi e Carta delle Isofreatiche

Il censimento dei pozzi è stato eseguito in due fasi, la prima digitalizzando i pozzi presenti nella cartografia catastale di impianto, la seconda nel ricercare i pozzi ancora presenti. Inoltre per la redazione della Carta delle Isofreatiche sono stati utilizzati i piezometri interni all'area Ex-SIO ed in alcuni casi sono stati realizzati ex novo mediante l'uso di un escavatore, visto che l'acqua di falda è piuttosto superficiale.

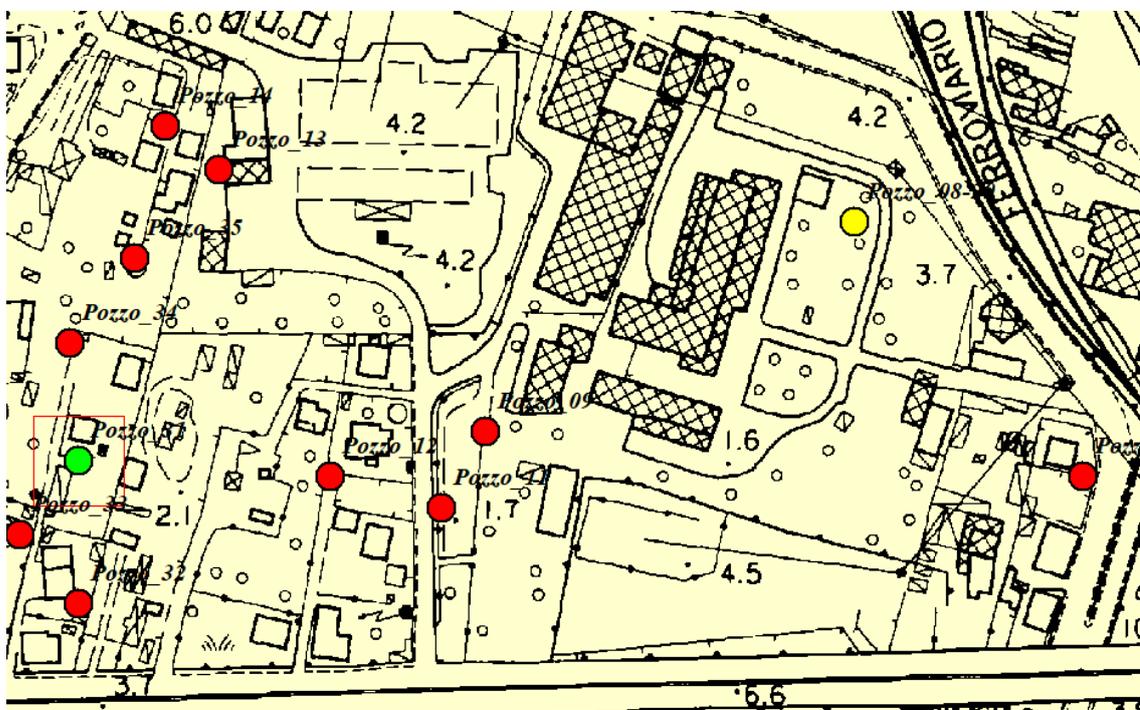


Fig. 17 - Censimento Pozzi

L'unico pozzo che è stato possibile misurare è ubicato in Via Campitelli (●), Il pozzo interno all'area Ex-Sio (●) segnalato anche nella relazione del Dott. GP. Brozzo, non è stato possibile ritrovarlo mentre il resto dei pozzi nella maggior parte dei casi sono stati coperti oppure non è stato possibile accedere. Per ovviare alla mancanza di dati abbiamo realizzato dei pozzetti ex novo ed in alcuni casi sono stati utilizzati i pozzetti eseguiti durante la fase di caratterizzazione.

Qui di seguito viene presentata la elaborazione della Carta delle Isofreatiche espressa in mt slm. La falda è stata riscontrata compresa fra 2.7/2.8 mt sllm e 07/1.2 mt slm con un andamento di alimentazione proveniente da monte, come peraltro immaginabile.

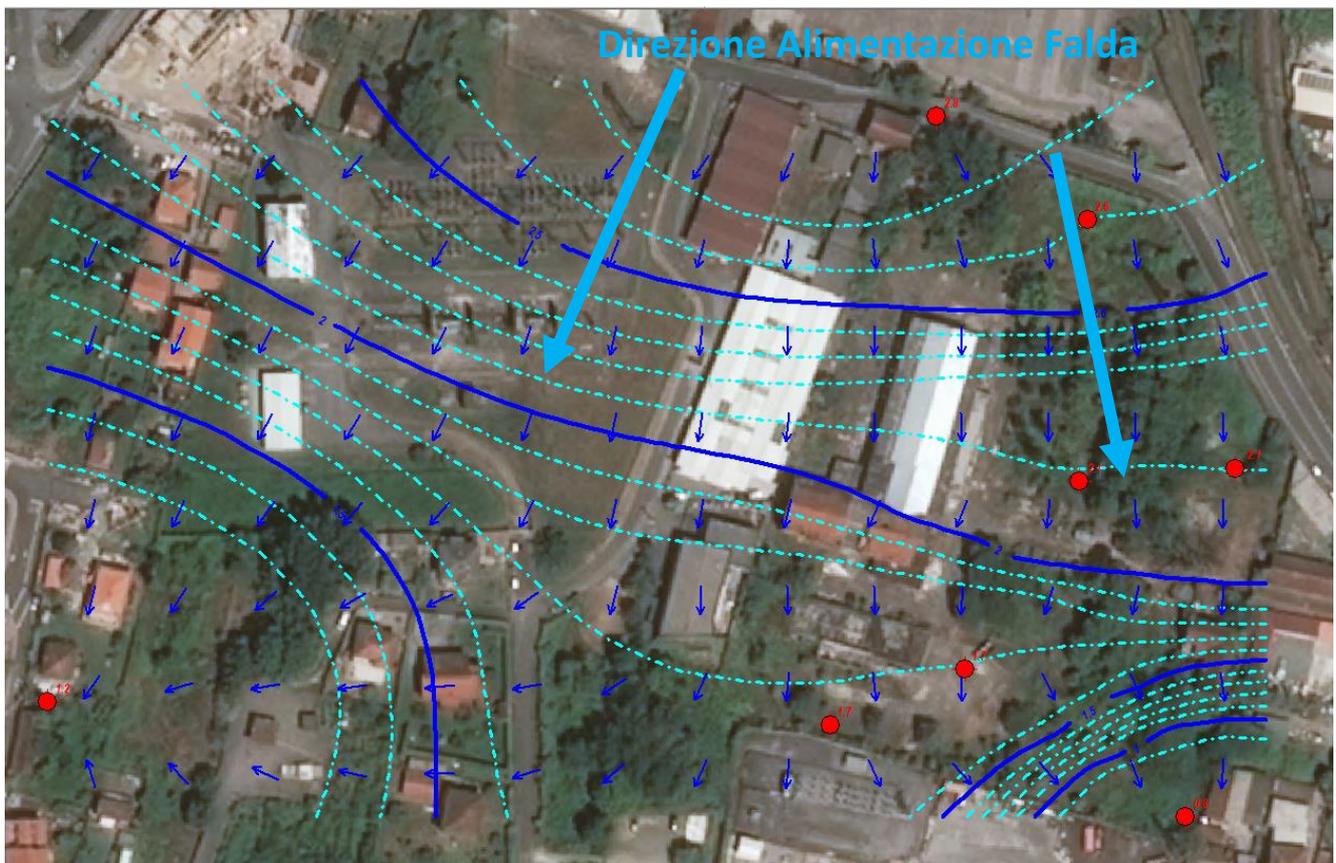


Fig. 18 - Carta Isofreatiche (mt.s.l.m.)

4 Analisi Interferometrica

Nel parere espresso sulla componente idrogeologica nella PROCEDURA DI VERIFICA DI ASSOGGETTABILITA' Ex art. 13 L.R. 32/2012 – Relazione Istruttoria n.1 del 6 Giugno 2018, si evidenziava “lungo un allineamento tettonico sepolto, che interferisce con l’area del PUO, siano presenti fenomeni spruqolari responsabili di alcune forme di “Sink-Hole”.

Dalle analisi fino a qui svolte non emergono elementi tali da poter far presupporre la presenza di fenomeni comunque riconducibili ai Sink-Hole

4.1 I sinkholes

“Sink-hole” è un termine introdotto per la prima volta da Fairbridge (1968) per descrivere depressioni superficiali o collassi sub-circolari formatisi 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.

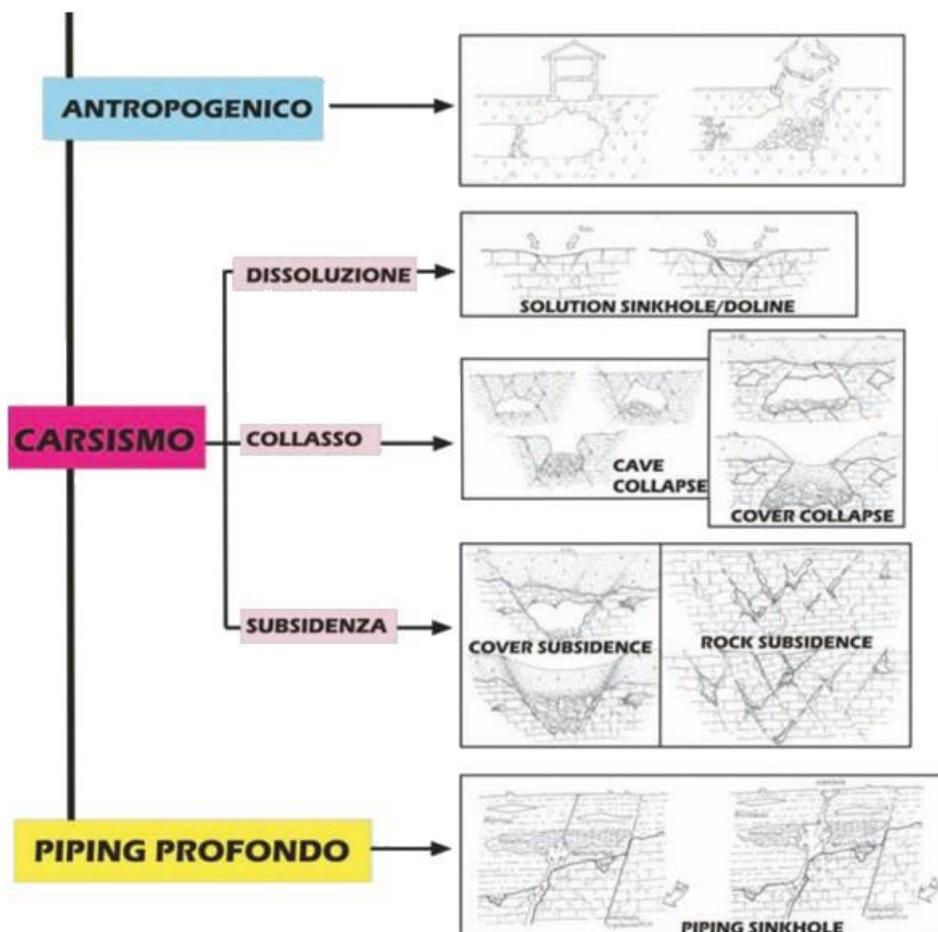


Fig. 19 – Schema dei principali tipi di sinkhole (Nisio, 2008).

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).

Come sopra detto uno degli elementi predisponenti alla formazione dei SinkHole (forse i principali) sono fenomeni di dissoluzione carsica (presupposto è quindi avere un substrato carbonatico). Come abbiamo visto dalle sezioni geologiche derivate dalla cartografia ufficiale CARG, nella zona della area Ex-SIO siamo in presenza, probabilmente, di un substrato caratterizzato da quarziti e filladi che possono essere interessate da fratture profonde ma che non sono interessate da fenomeni di tipo carsico.

Comunque al di là della disquisizione genetica rimane aperto un problema che è legato ai possibili cedimenti che le strutture sia edilizie che lineari possono subire a causa di fenomeni riconducibili a cedimenti differenziali.

Una delle tecniche più affidabili (e abbastanza recente) per verificare fenomeni legati alla subsidenza, piuttosto che a movimenti legati a fenomeni franosi è l'Interferometria radar.

4.2 Dati interferometrici satellitari storici

L'interferometria radar rappresenta una tecnica diffusasi 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 Radio Detection And Ranging) 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 2003-2008/2010, 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 e vengono proposte a confronti l'area EX-SIO e l'area Svincolo degli Stagnoni.

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 (PS), 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 nella zona di nostro interesse (Ex-SIO) i punti di misura individuati mostrano una sostanziale stabilità con sporadici movimenti locali, dell'ordine di 1 mm/anno.

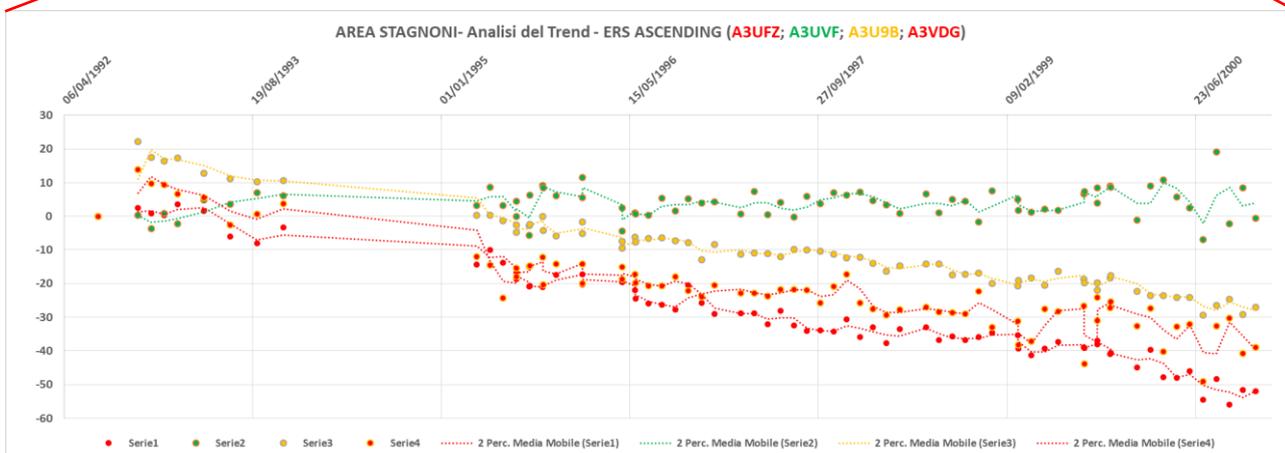
I PS sono perlopiù localizzati in corrispondenza dei centri abitati Fabbricati nel nostro caso e delle principali vie di comunicazione (svincolo autostradale degli Stagnoni). Ad ogni modo, i

pochi PS presenti nelle vicinanze dei suddetti sinkholes mostrano una generale stabilità nel periodo di riferimento.

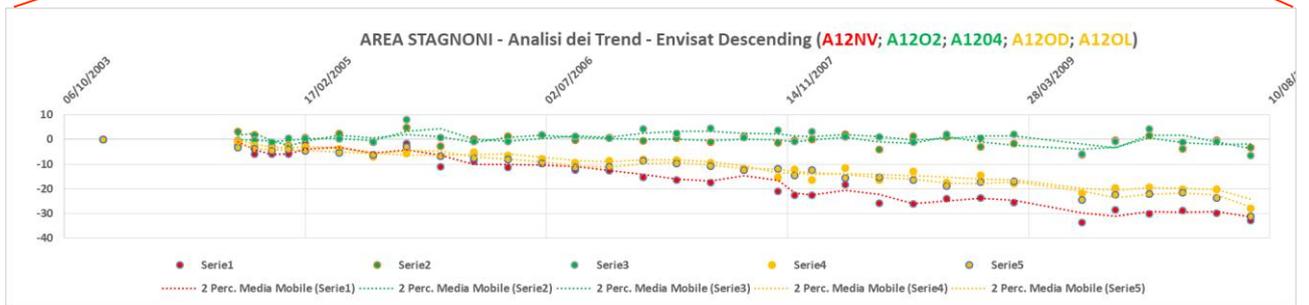
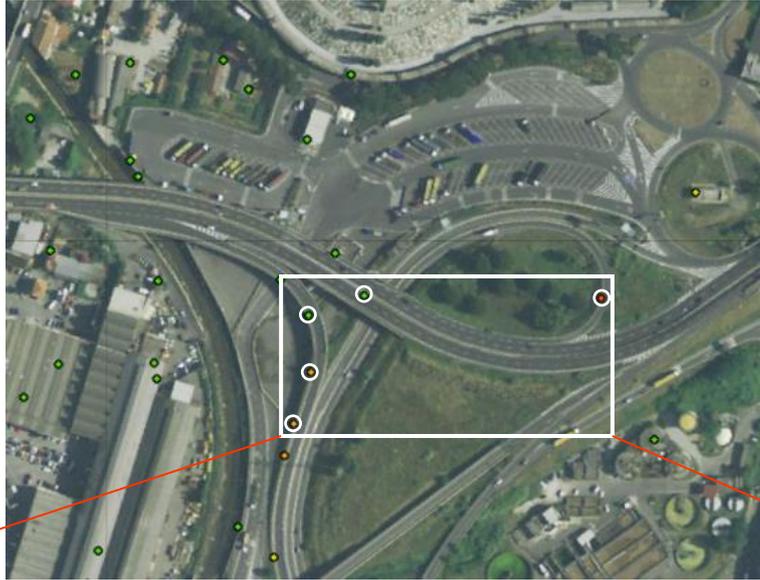
Qui di seguito vengono presentati i risultati di alcune elaborazioni effettuate rispettivamente per l'Area Stagnoni e l'Area EX- SIO

4.2.1 Permanent Scatter - AREA STAGNONI

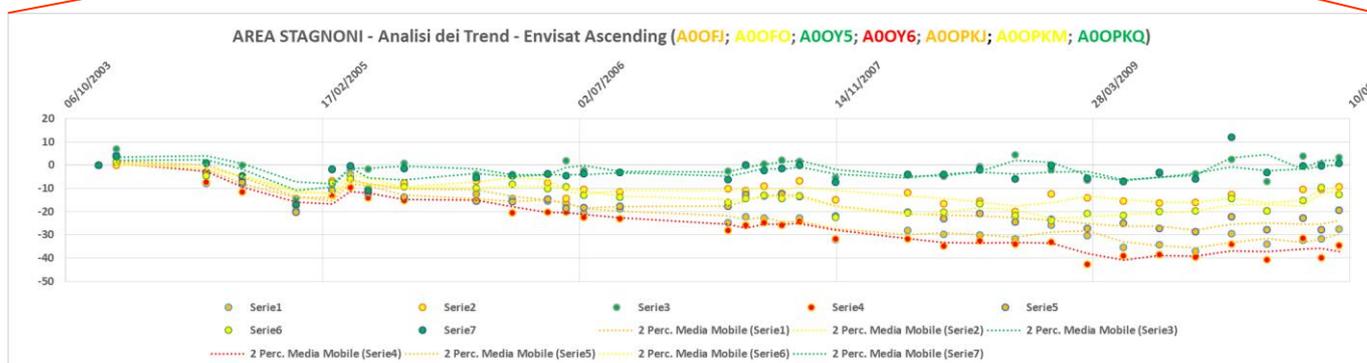
Vengono qui presentati alcuni punti (P.S.) ritenuti significativi – Satellite ERS ASCENDING



Satellite ENVISAT DESCENDING



Satellite ERS ASCENDING

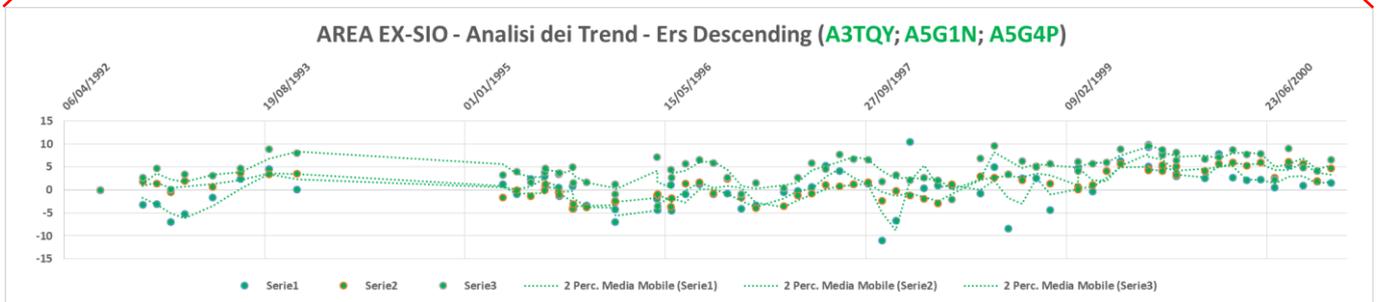


Come è possibile notare l'area degli Stagnoni è interessata almeno per alcuni PS da un trend negativo che evidenzia un possibile cedimento (peraltro molto contenuto) della struttura.

4.2.2 Permanent Scatter - AREA EX SIO

In questo caso dopo aver analizzato una serie di dati relativamente all'area nel suo complesso vengono presentati i risultati dell'analisi dei trend su alcuni PS significativi che si ritrovano sia nella analisi effettuata con i dati satellitari ERS che Envisat

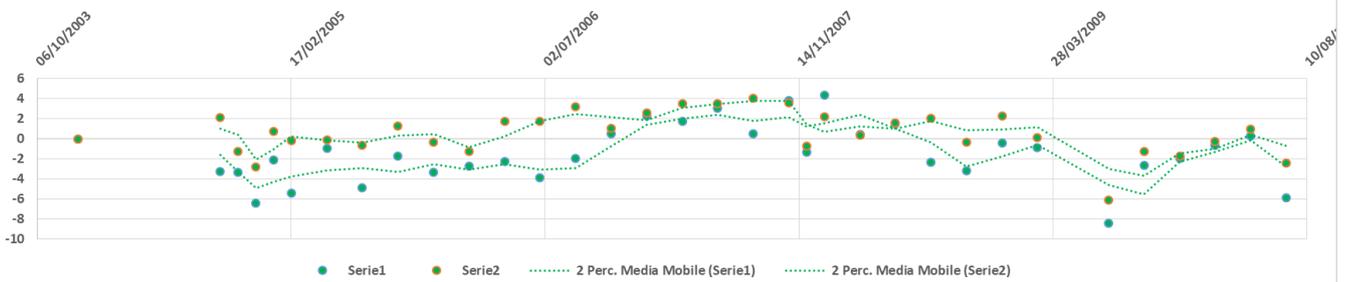
ERS DESCENDING



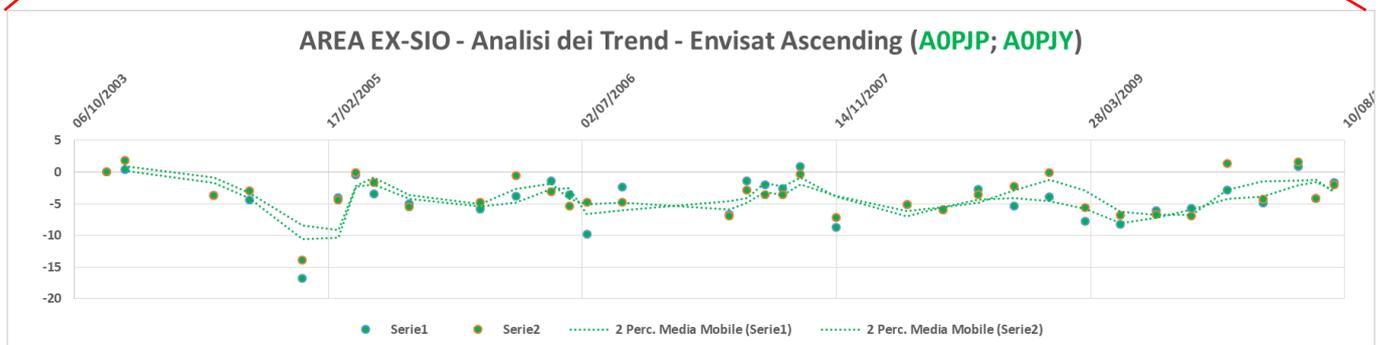
Envisat Descending



AREA EX-SIO - Analisi dei Trend - Envisat Descending (A12PW; A12PX)



Envisat Ascending



Nel caso dell'area EX-SIO si può notare una sostanziale stabilità dei PS, che porta a ritenere che i fabbricati esistenti non abbiano risentito delle fluttuazioni della falda né di eventuali cedimenti differenziali e quindi che manifestano nel complesso una buona stabilità.

5 Conclusioni

Il presente rapporto ha affrontato in maniera organica una serie di tematiche con sono state poste con riferimento al parere espresso sulla componente idrogeologica nella PROCEDURA DI VERIFICA DI ASSOGGETTABILITA' Ex art. 13 L.R. 32/2012 – Relazione Istruttoria n.1 del 6 Giugno 2018, si evidenzia:

"Sotto il profilo idrogeologico, nel parere si evidenzia la presenza nell'area di fluidi a bassa termalità riconducibili ad acque aggressive in grado di causare dissesti a terreni e fondazioni, e come lungo un allineamento tettonico sepolto, che interferisce con l'area del PUO, siano presenti fenomeni spruqolari responsabili di alcune forme di "Sink-Hole". Viene segnalata altresì l'elevata compressibilità dei terreni argillosi presenti. Viene in conclusione sottolineato come "le indagini e gli studi eseguiti non riconoscono alcuna di queste problematiche" ;

L'insieme delle considerazioni ed analisi già sviluppate nei rapporti intermedi e gli approfondimenti che vengono qui presentati permettono di avere un quadro geo-ambientale organico e approfondito che offre delle risposte adeguate al progetto in esame.

Riprendendo quanto già a suo tempo presentato è opportuno rilevare che l'areale a cui riferiamo lo studio va ben al di là di quanto "normalmente" richiesto sotto il tema del volume/area significativa in quanto l'analisi sviluppata parte dalle propaggini della zona di Montepertico (ipoteticamente interessata da Sink-Hole (peraltro NON censiti e NON riconosciuti dalle Banche dati nazionali di ISPRA) ed arriva alla zona degli Stagnoni fino all'area ENEL verificando e analizzando le aree di pianura con estremo dettaglio nonostante la mancanza di dati disponibili. Di fatto i dati a cui abbiamo potuto fare accesso riguardano indagini messe a disposizione dal sottoscritto e/o da colleghi geologi che ringrazio (Vedi Cap. 2).

Questo ci ha permesso di poter esprimere una valutazione sulla situazione del substrato della piana spezzina ed ipotizzare una profondità del substrato sismico, peraltro individuato mediante indagini in sismica passiva HVSR (Vedi Cap. 2.5) riscontrabile intorno agli 80 metri.

Per rimanere nel tema dei Sink-Hole (Vedi 4.1) si ribadisce che a livello nazionale (Banche Dati ISPRA) non viene segnalato nell'area in esame, nessun elemento morfologico riconducibile a queste forme e questo rapporto conclusivo affronta questo tema utilizzando i dati della campagna geoelettrica che evidenziano la presenza di alcune anomalie superficiali che nulla hanno a che vedere con eventuali fenomeni profondi o provenienti dal substrato (avremo dovuto riscontrare delle piume di anomalie provenienti dal basso), oltre al fatto che il substrato, almeno per la parte EX-SIO molto probabilmente è caratterizzato da litologie Quarzitiche e Filladiche che notoriamente non sono interessate da fenomeni carsici, questo non esclude comunque che il substrato possa presentarsi localmente fratturato e favorire la risalita di fluidi, come ipotizzato dal Dott. BROZZO nei suoi lavori in merito a:

"Studio Geochimico delle Acque di Falda nel sito di Pitelli, ed in particolare nella zona della Centrale Termoelettrica della Spezia "EUGENIO MONTALE".

Peraltro è stata anche evidenziata la compressibilità dei terreni che interessano l'area EX-SIO con rischio di cedimenti differenziali ecc.

Dall'esame dei dati che abbiamo potuto esaminare, possiamo affermare che le problematiche di compressibilità dei terreni e della presenza di argille limose tenere con intercalazioni di argille organiche ecc, è un fenomeno che viene riscontrato in varie parti della pianura della Spezia non solo nelle verticali presentate, ossia Palazzetto dello Sport, Via Campitelli, Area EX-SIO, Termomeccanica e svincolo degli Stagnoni, di fatto vedi sezioni geolitologiche abbiamo uno strato variabile fra 10 e 15 metri che presenta caratteristiche geomeccaniche molto scadenti a causa dei sistemi di deposizione che hanno caratterizzato questi ambienti. Sono problematiche note che vanno affrontate in ambito di una corretta progettazione strutturale affrontando il tema delle opere fondazionali con molta

attenzione, peraltro le strutture edilizie presenti in zona testimoniano che una corretta progettazione affronta e risolve problematiche geomeccaniche di questa tipologia.

Peraltro è ancora opportuno richiamare l'attenzione sulla disponibilità di dati da parte del Ministero dell'Ambiente riferiti ai Permanent Scatter (Vedi Cap. 4) e sulle relative elaborazioni effettuate, che permettono di sviluppare sofisticate analisi sulle problematiche connesse a fenomeni di subsidenza, piuttosto che a fenomeni franosi. Questi dati sono relativi ad elaborazioni di dati radar che permettono di valutare spostamenti dell'ordine del millimetro sulle strutture edilizie piuttosto che lineari e nel nostro caso sono presentate due zone a confronto, ossia l'area EX-SIO e l'area Svincolo degli Stagnoni. Nelle due situazioni si osservano alcune differenze riconducibili ad un diverso comportamento degli elementi strutturali. Ossia mentre nell'area EX-SIO abbiamo un comportamento dei Permanent Scatter piuttosto omogeneo con oscillazioni dell'ordine dei decimi di millimetro/anno in un arco di circa 15/18 anni, mentre nella zona degli Stagnoni si riscontra in alcuni PS un trend negativo di alcuni millimetri/anno.

Ora considerando anche la faticenza e il tempo di permanenza delle strutture edilizie nell'area EX-SIO il dato dimostra che la struttura edilizia è sostanzialmente stabile.

Per quanto riguarda l'assetto Idrogeomorfologico evidenzia come la zona EX-SIO si presenta sostanzialmente ribassata rispetto alle aree circostanti con la falda molto prossima al piano campagna che unita alla presenza di argille organiche e torbe porta a ritenere che l'area necessita una grande attenzione proprio sul piano idrogeomorfologico da affrontare con attenzione in fase di progettazione esecutiva.

Una particolare attenzione è stata poi rivolta all'analisi del reticolo Idrografico, anche per le implicazioni normative che questo comporta e si segnala (vedi cap. 3.2) una sostanziale difformità fra Reticolo Regionale e Reticolo rilevato e confrontato con gli stessi Uffici Comunali, per cui sarebbe opportuno comunicare alla Regione stessa la modifica dell'andamento del reticolo idrografico, fermo restando che anche il reticolo errato non interferisce con l'area ex sio..

Dott. Paolo PETRI ORGL n° 94	
Dott. Alessandro LENZI ORGT n° 890	