



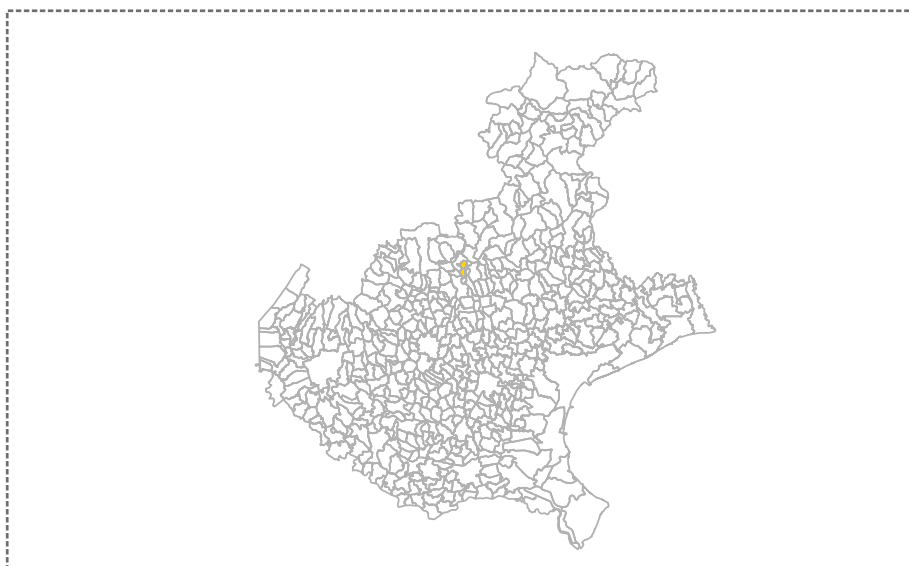
REGIONE DEL VENETO

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Regione Veneto

Comune di Solagna



Regione
REGIONE VENETO

Segreteria Regionale per
l'Ambiente

Soggetto realizzatore
COMUNE DI SOLAGNA

Progettista:
Dr. Geol. Matteo Collareda

Collaboratore:
Dr.ssa Geol. Claudia Tomassoli
Dr.ssa Geol. Laura Guerra

Data
Luglio 2024
Revisione Gennaio 2025

Studi di Livello 3

I N D I C E

1	INTRODUZIONE	2
2	GENERALITÀ	3
3	ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA	5
3.1	Inquadramento geografico.....	5
3.2	Assetto geomorfologico e geologico locale	6
3.3	Inquadramento idrografico e idrogeologico	8
3.4	Inquadramento geologico strutturale generale	10
4	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO	13
4.1	Inquadramento sismotettonico generale	13
4.2	Caratterizzazione sismogenetica locale	17
4.3	Sismicità storica del comune di Solagna	18
4.4	Faglie capaci e sorgenti sismogenetiche	22
4.5	Zonazione sismica nazionale	25
4.6	Pericolosità sismica di riferimento.....	26
5	MICROZONAZIONE SISMICA. PRINCIPI FONDAMENTALI E FINALITÀ	29
5.1	Introduzione.....	29
5.2	La natura del problema	29
5.3	Finalità e livelli di approfondimento	31
6	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI DA INDAGINI PREGRESSE E DI NUOVA REALIZZAZIONE	32
6.1	Indagini pregresse e di nuova realizzazione	32
6.2	Metodologia di elaborazione delle nuove indagini	32
6.2.1	Indagine sismica di tipo passivo a stazione singola (H.V.S.R.)	32
6.2.2	Indagine sismica di tipo passivo in array (Re.Mi.)	35
6.2.3	Indagine elettromagnetica	37
	Strumentazione utilizzata	37
	Acquisizione ed elaborazione dei dati	38
6.3	Modello geosismico del sottosuolo	38
7	ELABORATO CARTOGRAFICI DI LIVELLO 1	40
7.1	Carta delle indagini	40
7.2	Carta delle frequenze	41
7.3	Carta geologico tecnica per la microzonazione sismica.....	44
7.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica	47
7.5	Carta della pericolosità sismica locale (CPSL)	51
8	APPROFONDIMENTI DI LIVELLO 3	53
8.1	Analisi di risposta sismica locale	54
8.1.1	Descrizione del metodo	54
8.1.2	Casi applicativi nel Comune di Solagna.....	61
8.2	Analisi elettromagnetica	70
8.3	Definizione dell'area interessata dalla propagazione di fenomeni di crollo	78
9	PROPOSTA PER LE NORME TECNICHE OPERATIVE (NTO)	84
	Art.X Riduzione del rischio sismico	84
10	REDAZIONE CARTOGRAFICA E CREAZIONE BASI INFORMATIVE	86
11	BIBLIOGRAFIA	89
12	ALLEGATI FUORI TESTO	90

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

1 INTRODUZIONE

Tra i principali compiti che la Regione Veneto svolge in materia ambientale e di governo del territorio, vi è quello di pianificare e programmare strumenti diretti alla mitigazione dei rischi naturali e antropici, con l'obiettivo di favorire trasformazioni positive nella vita delle persone e una migliore sostenibilità ambientale.

I rischi naturali possono essere mitigati attraverso azioni preventive, come la corretta gestione del territorio da parte delle Amministrazioni competenti: attendere un evento sismico per intervenire in fase di emergenza, aumenta esponenzialmente il costo di gestione degli interventi e delle successive ricostruzioni. Al contrario, agire in modo preventivo, ridurrebbe i costi di gestione delle fasi successive all'evento.

Procedere in modo preventivo, significa quindi sviluppare una serie di norme, linee guida e/o comportamenti operativi e/o educativi finalizzati alla gestione dei rischi naturali, alla riduzione generale dei costi sociali e conseguentemente alla loro ricaduta sulla popolazione.

La Regione Veneto, da diversi anni, ha attivato una serie di iniziative di tipo normativo e tecnico-operativo per conseguire efficaci progressi sulla conoscenza dei fenomeni naturali del proprio territorio legati alla geologia, con l'obiettivo di attivare azioni efficaci in materia di riduzione dei rischi naturali, con particolare riguardo al rischio sismico.

Gli studi preventivi in campo sismico permettono di identificare aree in cui la pericolosità sismica raggiunge livelli che possono pregiudicare la sostenibilità del territorio, sia in termini di vite umane, sia economici e sia di degrado ambientale.

Per Microzonazione Sismica (di seguito definita MS) si intende la “valutazione della pericolosità sismica locale attraverso l'individuazione di zone del territorio caratterizzate da comportamento sismico omogeneo”.

In sostanza, la MS individua e caratterizza le zone stabili, le zone stabili suscettibili di amplificazione locale del moto sismico e le zone suscettibili di instabilità: è ormai noto che lo stesso evento sismico può provocare scuotimenti decisamente differenti in dipendenza degli spessori e delle qualità dei terreni posti a copertura del substrato roccioso, delle caratteristiche morfologiche del sito ed, inoltre, è riconosciuto che gli effetti di un terremoto variano col variare delle condizioni geologiche in cui esso si sviluppa.

Le caratteristiche geologiche del territorio possono alterare localmente e in maniera evidente l'azione sismica. Recentemente, anche in Italia (ad esempio Umbria-Marche, 1997; Salò, 2004; L'Aquila, 2009; Modenese, 2012), sono stati evidenziati livelli di danneggiamento estremamente diversi in edifici ubicati a breve distanza tra loro e aventi all'incirca le stesse caratteristiche strutturali. In alcune di queste località (ad esempio Umbria-Marche, 1997) sono state effettuate registrazioni accelerometriche durante un *aftershock*, che hanno mostrato come i livelli di scuotimento su siti in pianura, su terreni sciolti, siano stati amplificati di oltre il doppio rispetto ai siti su roccia e, inoltre, abbiano avuto una durata molto più lunga.

Gli studi di MS hanno l'obiettivo di razionalizzare la conoscenza di questi fenomeni, restituendo informazioni utili per chi deve pianificare o realizzare interventi sul territorio.

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

2 GENERALITÀ

La MS è uno strumento molto utile ai fini della prevenzione sismica e della valutazione del rischio sismico, per il governo del territorio, per la progettazione e per la pianificazione per l'emergenza.

La MS ha lo scopo di riconoscere ad una scala sufficientemente grande (scala comunale o sub-comunale) le condizioni locali che possono modificare sensibilmente le caratteristiche del moto sismico atteso o possono produrre deformazioni permanenti rilevanti per le costruzioni e le infrastrutture.

In sostanza, lo studio di MS viene sintetizzato in una carta del territorio nella quale sono indicate:

- le zone in cui il moto sismico non viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante e, pertanto, gli scuotimenti attesi sono equiparati a quelli forniti dagli studi di pericolosità di base;
- le zone in cui il moto sismico viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante, a causa delle caratteristiche litostratigrafiche del terreno e/o geomorfologiche del territorio;
- le zone in cui sono presenti fenomeni di deformazione permanente del territorio, attivi o potenzialmente inducibili/attivabili in caso di sisma (instabilità di versante, liquefazioni, fagliazione superficiale, cedimenti differenziali, ecc.).

In funzione dei diversi contesti e dei diversi obiettivi, gli studi di MS possono essere effettuati a vari livelli di approfondimento, con complessità e impegno crescenti, passando dal Livello 1 fino al Livello 3:

- il **Livello 1** è un livello propedeutico ai veri e propri studi di MS, in quanto consiste in una raccolta di dati preesistenti, elaborati per suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee rispetto alle zone sopra descritte;
- il **Livello 2** si propone di quantificare l'effetto sismico proprio di ogni zona omogenea individuata nel Livello 1, utilizzando allo scopo ulteriori e mirate indagini, ove necessario, e definisce la "Carta di microzonazione sismica";
- il **Livello 3** restituisce una "Carta di microzonazione sismica" con approfondimenti su tematiche o aree particolari.

Tali studi sono di fondamentale importanza nella pianificazione, al fine di:

- orientare la scelta di aree per nuovi insediamenti;
- definire gli interventi ammissibili in una data area;
- programmare le indagini e i livelli di approfondimento;
- stabilire gli orientamenti e le modalità di intervento nelle aree urbanizzate;
- definire le priorità di intervento.

Nella pianificazione d'emergenza, sia di livello comunale che provinciale, gli studi di MS consentono una migliore e consapevole individuazione degli elementi strategici di un piano di emergenza e, in generale, delle risorse di protezione civile.

La conoscenza dei possibili effetti locali indotti da un evento sismico su un territorio contribuisce a:

- scegliere opportunamente le aree in cui si dovranno posizionare le strutture di emergenza e gli edifici strategici;
- individuare le strutture e le infrastrutture che necessitano di specifiche analisi, per definirne il grado di adeguamento necessario ad evitarne il collasso in caso di sisma e, quindi, per non compromettere le loro funzioni di pubblica utilità.

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

Il presente studio è stato svolto ad un Livello 3 di approfondimento, secondo le modalità riportate negli “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica” approvati dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome il 13/11/2008 e s.m.i. e secondo le **DGRV 1572/2013 - DGRV 899/2019 - DGRV 1381/2021**. Inoltre, tale studio recepisce e integra quanto ottenuto nel Livello 1 di Microzonazione Sismica, precedentemente condotto.

Per quanto riguarda la rappresentazione cartografica e l’informatizzazione dei dati, sono state utilizzate le indicazioni previste dagli “Standard di rappresentazione e Archiviazione Informatica” - versione 4.2.

A tal riguardo, sono state effettuate delle **misurazioni geognostiche sul territorio comunale**, in modo da ottenere informazioni più dettagliate sulla risposta sismica locale, necessaria per definire con maggior cura lo studio di MS e per restituire carte tematiche importanti per lo sviluppo urbanistico del territorio e per gli eventuali adeguamenti sismici delle strutture. Inoltre, sono state analizzate e quantificate le possibili amplificazioni del moto sismico di base (Livello 3 di approfondimento).

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

3 ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA

Nel presente capitolo vengono illustrate le principali caratteristiche geomorfologiche, litologico-stratigrafiche ed idrogeologiche del territorio oggetto di analisi e riprese dallo studio di microzonazione sismica di Livello 1 del Comune di Solagna, redatto e aggiornato dal Geol. Livio Sartor in data dicembre 2014 e dal PAT comunale.

3.1 Inquadramento geografico

Il comune di Solagna si colloca nella porzione settentrionale della provincia di Vicenza. La città si trova ai piedi delle Prealpi Venete nel punto in cui il Brenta sbocca dal canale di Brenta. Il territorio così individuato si caratterizza quindi per l'importante asse vallivo del Brenta che rappresenta l'elemento morfologico principale e che separa, in senso nord-sud, gli importanti massicci pedemontani del Grappa e dell'Altopiano di Asiago. Di seguito si riportano i principali dati altimetrici e di superficie.

Altitudine 131 m s.l.m.

Superficie 15,81 km²

Abitanti 1807 (01-01-2022)

Dal punto di vista morfologico, si ha una nettissima relazione tra geologia e geomorfologia, che si esplica soprattutto nell'erosione selettiva dei vari termini della serie geologica: maggiore erosione nei terreni più teneri (marne e argille) che diventano facile preda delle acque meteoriche, e una erosione minore, per non dire quasi assente nei terreni più duri (arenarie, calcari e conglomerati). Viene così a formarsi il tipico paesaggio "a corde" dell'alta pianura, in cui si riconoscono file di rilievi collinari intercalati da valli ad esse parallele.

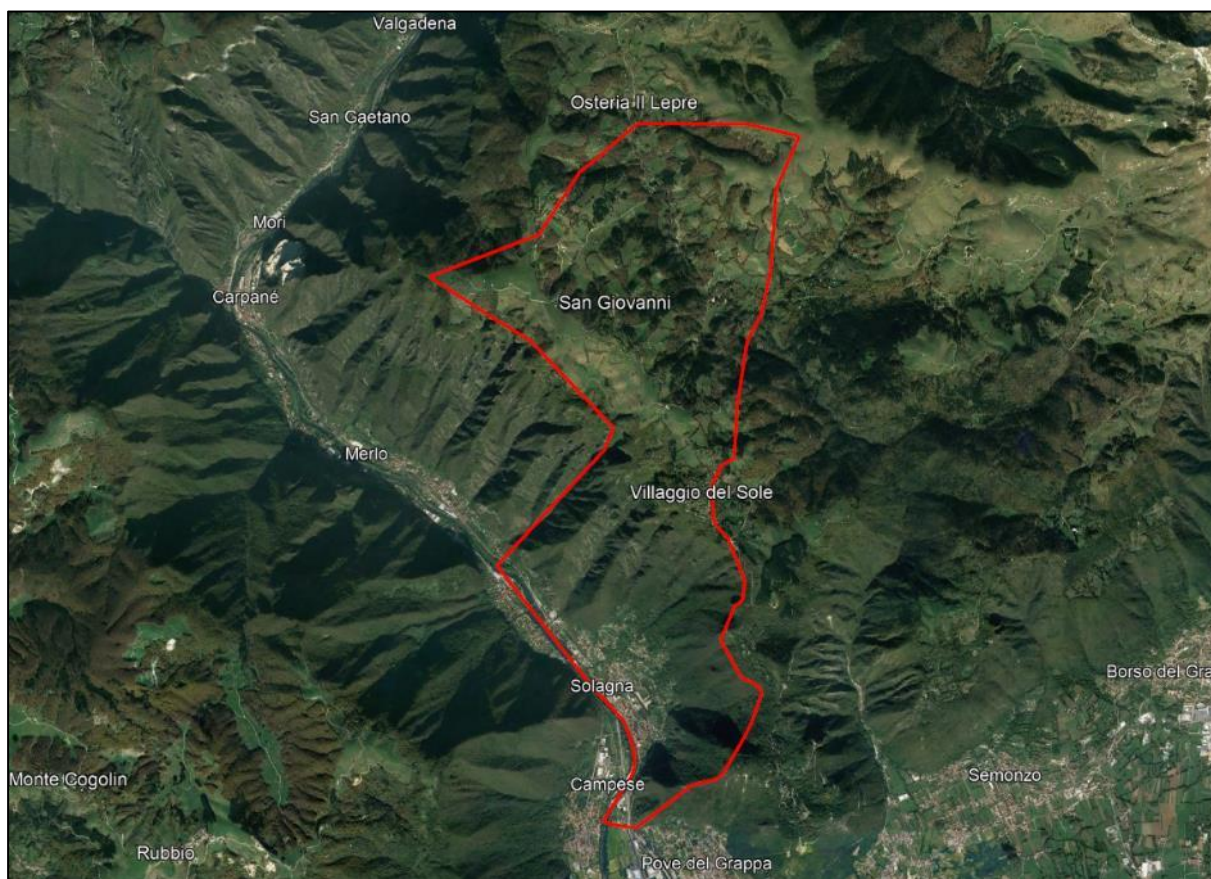
La situazione geologica dell'area in esame impone, sia dal punto di vista litologico che da quello idrogeologico, una netta distinzione tra la zona montuosa la zona collinare e quella pianeggiante.

I rilievi montani e collinari si sono formati durante le fasi dell'orogenesi alpina, per piegamento e sollevamento derivante dall'attività di un complesso sistema di pieghe e di faglie. Questa struttura geologica, costituita da dolomie e calcari, che rappresentano i terreni più antichi della zona, ha favorito l'instaurarsi di un complesso sistema carsico.

Ai piedi del rilievo montuoso, allo sbocco delle valli in pianura, si aprono a ventaglio conoidi alluvionali anche di notevole estensione e spessore, dovuti ad apporto misto detritico ed alluvionale dei corsi d'acqua.

I depositi alluvionali sono costituiti da alternanze di ghiaie, a volte cementate, e sabbie, con intercalati lenti limose e/o argillose.

Gran parte del territorio sub-pianeggiante è dominato dai depositi fluvioglaciali del fiume Brenta, prevalentemente ghiaioso-sabbiosi. Nell'area in esame si riscontrano dei terrazzi posti su vari livelli, originati dalla progressiva migrazione dell'asta principale del fiume, in conseguenza a variazioni del regime idrico, dal massimo glaciale alle fasi postglaciali.

*Estratto di ortofoto da Google Earth*

3.2 Assetto geomorfologico e geologico locale

La litologia del territorio secondo il PATI si presenta, nel complesso, abbastanza semplice con la prevalenza di litotipi di carattere carbonatico sui versanti e sulle aree sommitali e la presenza di depositi sciolti quaternari concentrati soprattutto sul fondovalle del Brenta. La sequenza stratigrafica degli affioramenti del substrato, partendo dalle formazioni più antiche sino alla più recenti, viene descritta di seguito:

Dolomia Principale (Trias superiore)

Formazione costituita da dolomie stratificate in bancate massicce dal comportamento tenace. Affiora con continuità sui versanti laterali della valle del Brenta.

Calcari grigi (Giurassico inferiore)

Litotipo caratterizzata da una sequenza ciclica di bancate di calcari micritici ed oolitici stratificati o affioranti in banchi molto evidenti per la loro caratteristica tenacità. Quasi tutti i versanti più acclivi o subverticali che si affacciano sulla valle del Brenta sono impostati su questa Formazione (elevata recentemente a rango di Gruppo per la classificazione di tre Formazioni distinte al suo interno). Il suo spessore complessivo è di circa 300-350 m.

Rosso ammonitico veronese (Giurassico superiore)

Formazione costituita da alternanze di calcari nodulari e sottili strati argilloso-marnosi che determinano la caratteristica struttura tanto apprezzata e conosciuta. Altro elemento caratteristico è dato dalla tipica colorazione rossastra che permette una facile individuazione della formazione se disponibile in affioramento. La stratificazione sottile e la presenza di frazioni argillose rendono questa

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

formazione, il cui spessore totale supera raramente i 20 metri, molto meno resistente agli agenti esogeni rispetto alle formazioni precedenti.

Biancone (Cretaceo inferiore)

Formazione calcarea fittamente stratificata di colore crema-biancastro con frequenti noduli e livelli di selce e frequenti variazioni di colore, anche verdastro, nella parte media e sommitale la formazione compare nella classica colorazione biancastra. Anche in questo caso la sottile stratificazione con giunti molto spesso riempiti, anche se in modo parziale, da materiale argilloso, rendono nel complesso la formazione più facilmente aggredibile dagli agenti esogeni generando, in genere, morfologie a bassa energia.

I depositi sciolti quaternari, che come accennato affiorano con particolare frequenza nel fondovalle del Brenta, derivano dalla alterazione del substrato litoide presente, con conseguente formazione di terreni molto poveri di frazione limoso argillosa e a prevalente sviluppo di forme di deposito gravitativo. Nel comune di Solagna affiorano:

Materiali sciolti per accumulo detritico di falda a pezzatura grossolana: costituiscono i depositi maggiormente rappresentati, assieme ai depositi alluvionali, del fondovalle del Brenta. Sono rappresentati da depositi sciolti di materiale grossolano, con granulometria compresa tra le ghiaie ed i ciottoli, quasi sempre a spigoli vivi, con ottime caratteristiche geotecniche e permeabilità molto elevata. I depositi costituiti da questi sedimenti presentano in genere pendenze variabili, anche elevate, e ottime condizioni di stabilità intrinseche, possono essere oggetto di erosione nel caso in cui corsi d'acqua incidano il deposito stesso.

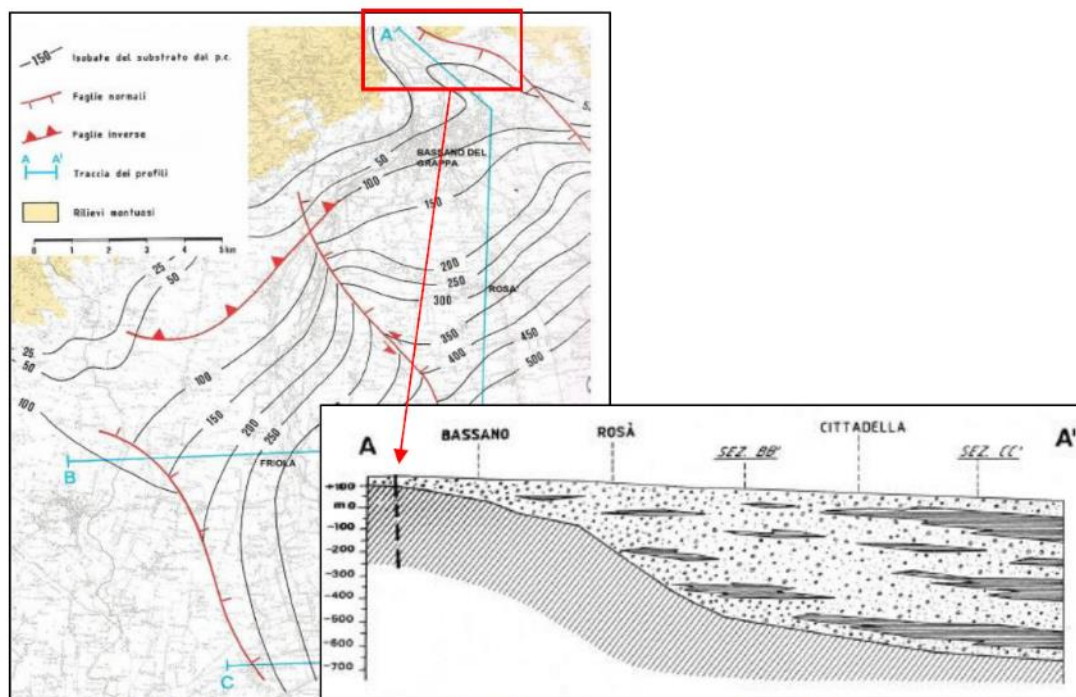
Materiali sciolti di deposito recente ed attuale dell'alveo mobile e delle aree di esondazione recente: depositi di origine fluviale concentrati in corrispondenza dell'alveo attivo del Brenta, sono costituiti da ghiaie e sabbie con modeste frazioni di materiali fini non ancora stabilizzati dalla vegetazione o da interventi antropici di regimazione; sono oggetto di erosione, trasporto e risedimentazione durante le piene di maggiore importanza del fiume.

Materiali sciolti di alveo fluviale recentemente stabilizzati dalla vegetazione: si tratta di depositi analoghi ai precedenti ma non più soggetti a fenomeni di erosione e di trasporto grazie alla stabilizzazione ottenuta sia per la vegetazione sia per le opere di regimazione idraulica finalizzata alla riduzione del rischio.

Per quanto riguarda l'area pianeggiante, essa è costituita da un materasso alluvionale formato da ghiaie grossolane a matrice sabbiosa con livelli conglomeratici, a volte con livelli limoso argillosi. Lo spessore del materasso alluvionale presenta variazioni laterali, dovute alla morfologia del basamento roccioso. I rilievi geosismici eseguiti dall'Agip Mineraria hanno infatti evidenziato uno spessore minimo in destra Brenta e un suo progressivo aumento verso SE, raggiungendo, sulla verticale di Cittadella, la potenza di circa 600 metri. Anche i letti limoso argillosi si fanno più frequenti ed aumentano di spessore procedendo da NW verso SE.

In figura seguente è rappresentata la morfologia del substrato roccioso e gli spessori del Quaternario, con la traccia delle sezioni.

Si riporta quella passante per il comune limitrofo di Pove del Grappa che è la porzione iniziale della sezione "A" con andamento circa N-S, ed è rappresentata nell'immagine seguente. Dall'esame della sezione e della figura rappresentante la morfologia del substrato roccioso è riscontrabile la presenza del substrato roccioso a profondità variabile: da circa 25 metri dal p.c. nella zona sub pianeggiante settentrionale a circa 50 metri in quella meridionale del territorio comunale.

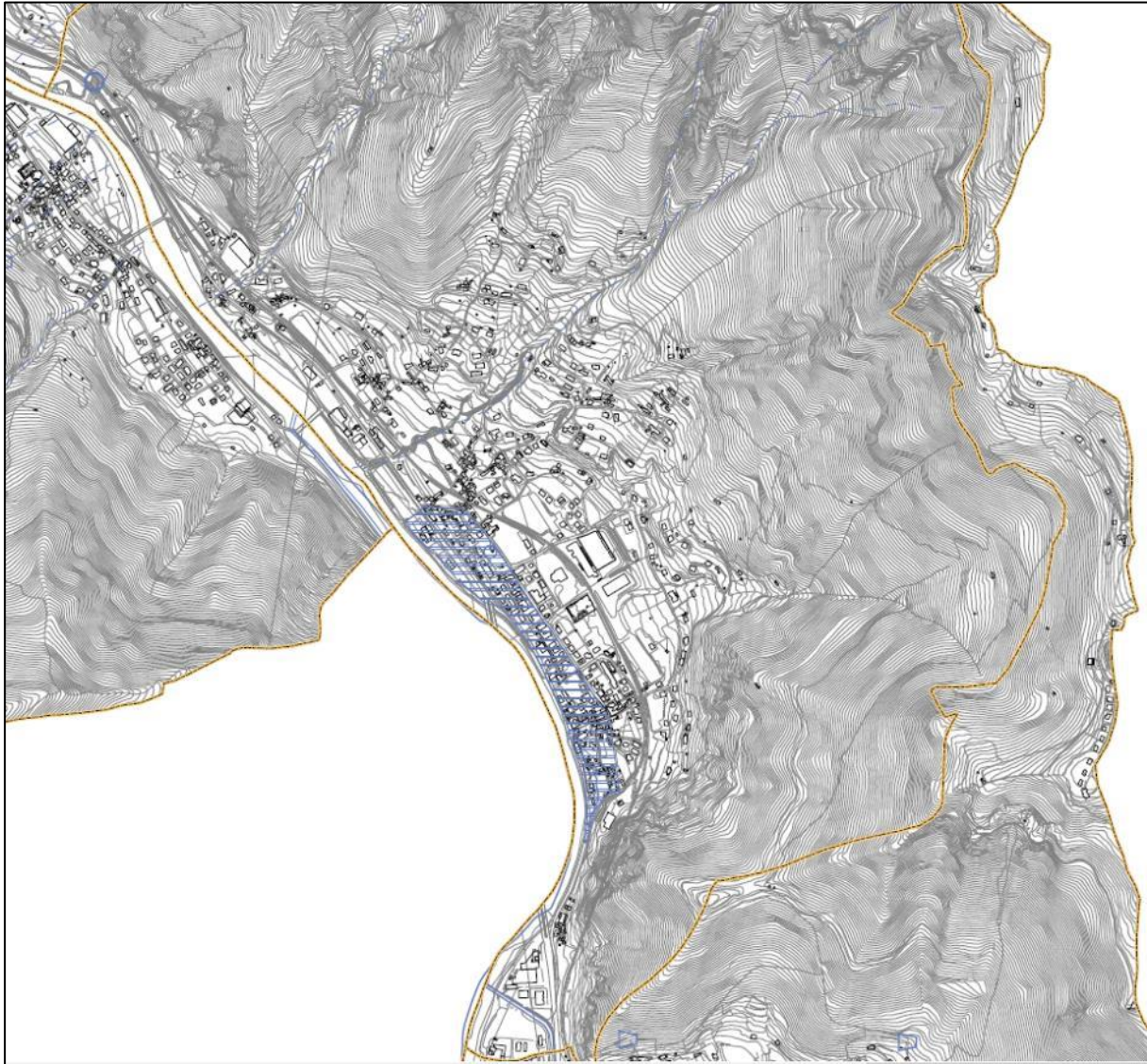


Morfologia del substrato roccioso e spessori del Quaternario (da CNR - Regione Veneto-ULSS5/9 "Difesa degli acquiferi dell'alta pianura veneta - stato d'inquinamento e vulnerabilità delle acque sotterranee del bacino del F. Brenta" -1988)

3.3 Inquadramento idrografico e idrogeologico

Nel territorio comunale vi è una netta distinzione tra la zona montuosa-collinare e quella pianeggiante. Mentre i rilievi sono costituiti da terreni coerenti generalmente permeabili per fessurazione, il materasso alluvionale del fondovalle è invece formato da ghiaie grossolane ad elevata permeabilità, che permettono l'esistenza di un'importante falda freatica. A rendere complicata la situazione idrogeologica della zona montuosa hanno notevolmente contribuito le varie vicende tettoniche succedutesi nel tempo; ripiegando e fratturando le dolomie e i calcari, che rappresentano i terreni più antichi della zona, esse hanno infatti favorito l'instaurarsi del complesso fenomeno carsico. In questi litotipi la circolazione idrica superficiale è stata sostituita da una diffusa circolazione sotterranea, che alimenta le sorgenti del fondovalle, per lo più mascherate dal sovralluvionamento postglaciale.

Un maggiore interesse idrogeologico hanno invece gli acquiferi posti nelle alluvioni del fondovalle che contengono un acquifero freatico, alimentato fondamentalmente dalla dispersione del Fiume Brenta, dall'infiltrazione diretta degli afflussi meteorici, dalla infiltrazione dei ruscellamenti dai versanti e dalle acque carsiche sotterranee. La profondità della falda riscontrata in un pozzo acquedottistico a Solagna, il 01.03.2014 era di -13.40 metri dal piano campagna, e nel corso dell'anno subisce delle escursioni di qualche metro.



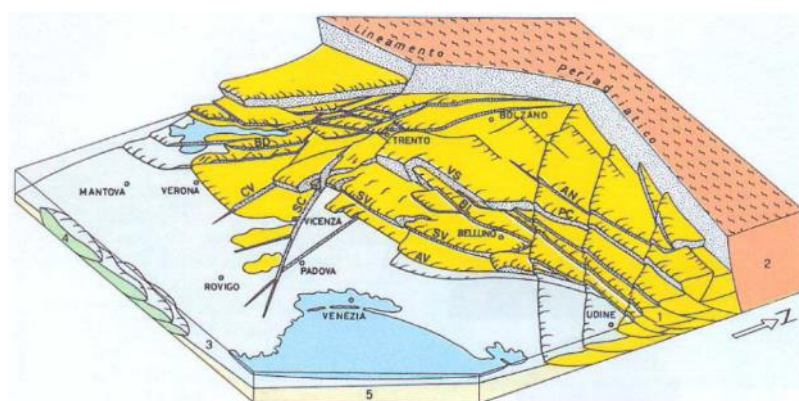
-  Confini Comunali
-  Pozzo freatico
-  Vasca o serbatoio
-  Sorgente
-  Corso d'acqua permanente
-  Corso d'acqua temporaneo
-  Canale artificiale
-  Bacino lacustre
-  Area soggetta ad inondazioni periodiche (fonte PAI)

Estratto della carta Idrogeologico del PATI di Valbrenta

3.4 Inquadramento geologico strutturale generale

Tra gli elementi tettonici che hanno condizionato l'evoluzione della regione si possono riconoscere due stili con orientamenti diversi: una serie di pieghe e faglie con direzione WSW-ENE che evolvono in sovrascorrimenti, e una serie di faglie con movimenti sia trascorrenti che verticali con direzione nord ovest-sud est (figura a seguire). A questi si può aggiungere una serie di ricoprimenti con direzione nord ovest-sud est che interessano il Friuli e solo marginalmente l'area in esame.

Al primo gruppo va la responsabilità della formazione dei rilievi mentre il secondo diseca le compagini rocciose in grandi blocchi che possono muoversi in modo relativo; i contatti tra un blocco e l'altro, frantumati dalle faglie, costituiscono zone di minor resistenza e su di esse avrà buon gioco l'erosione.



Visione tridimensionale delle principali deformazioni Alpine: AN = Linea dell'Antelao; AV = Linea di Aviano; BD = Faglia del M. Baldo; BL = Linea di Belluno; CV = Faglia di Castelfranco; FP = Fronte della Catena Appenninica; PC = Linea di Pieve di Cadore; SC = Faglia Schio-Vicenza; SV = Sovrascorrimento Schio-Valdobbiadene ("Flessura pedemontana").

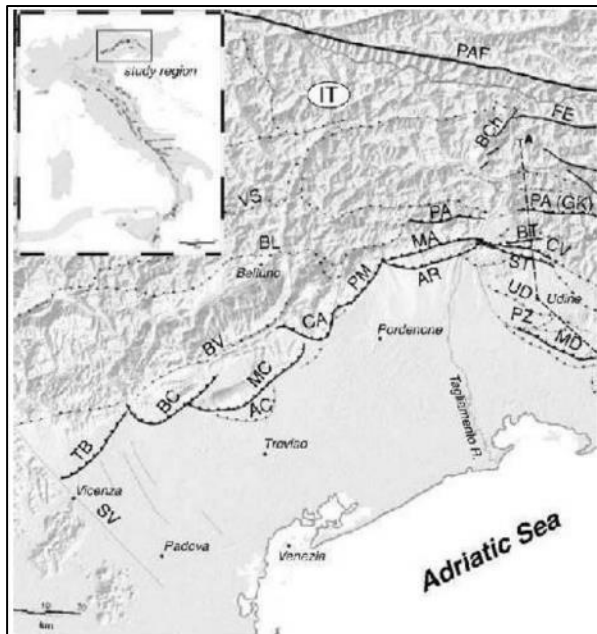
Struttura geologico-tettonica dell'Italia Nordorientale

Il progredire dell'orogenesi dalle Alpi verso la pianura avviene per attivazione di fronti successivi di sovrascorrimento: nel Miocene sup.-Pliocene si è attivato il fronte Periadriatico (fianco nord del Vallone Bellunese), nel Pliocene-Pleistocene inf. il fronte Bassano-Valdobbiadene-Vittorio Veneto sul versante meridionale delle Prealpi e, infine, nelle ultime centinaia di migliaia di anni si è attivato il fronte più esterno che passa davanti al Montello ed è talvolta chiamato linea di Aviano.

In corrispondenza di questi ultimi due fronti abbiamo fenomeni sismici che periodicamente ci ricordano che l'orogenesi è ancora in atto. Nell'ultimo milione di anni una serie di variazioni climatiche si inseriscono a turbare i complessi equilibri tra sollevamento ed erosione fluviale: imponenti masse glaciali, che dal cuore delle Alpi si spingono verso la periferia della catena, scavano profonde valli e trasportano ingenti quantità di detriti. Queste pulsazioni glaciali, intercalate da periodi relativamente più caldi, furono almeno 4, denominate, dalla più antica alla più recente: Gunz, Mindel, Riss e Wurm. Come è logico, l'ultima fase glaciale tende a cancellare le tracce delle precedenti per cui diventa estremamente difficile ricostruire l'effettiva estensione delle lingue di ghiaccio: possiamo ipotizzare che seguissero i percorsi fluviali preesistenti. Lembi di terreni depositati nel corso delle glaciazioni Mindel e Riss si ritrovano nella vallata e nella fascia collinare.

Al ritiro del ghiacciaio Rissiano il Paleopiave si è trovato la valle di Fadalto ostruita, probabilmente da alcune frane, e ha modificato, quindi, il suo corso deviando verso ovest a Ponte nelle Alpi appropriandosi del letto del Paleocordevole; in questo modo sfociava in mare ad ovest del Montello. Il drenaggio delle acque viene allora svolto dal Paleomeschio che, partendo dalla Val Lapisina, percorreva l'attuale valle del Soligo.

Lo schema strutturale aggiornato del fronte pliocenico-quadernario evidenzia la segmentazione del fronte stesso in un sistema di “thrust” arcuati, in massima parte ciechi e spesso caratterizzati da rampe oblique, mediante le quali un “thrust” si accavalla lateralmente su un altro. Analisi morfotettoniche e neotettoniche applicate a tali strutture hanno permesso in vari casi di datarne l’attività e di definirne la cinematica quadernaria.



Schema strutturale semplificato del Sudalpino orientale (da Burrato e altri - 2009).

Legenda: BC=sovrascorrimento Bassano-Cornuda; BV= sovr. Bassano-Valdobbiadene; TB= sovr. Thiene- Bassano; MC: sovr. Montello-Conegliano; AC: sovr. Arcade.

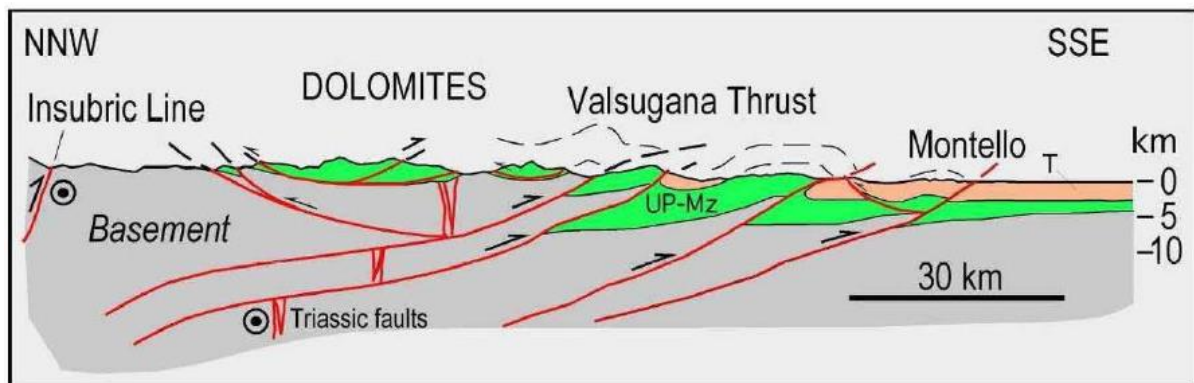


Fig.18 - Sezione del ventaglio embriciato delle Alpi Meridionali, dalla Val Pusteria alla pianura veneta. Le Vette Feltrine, immediatamente a sud del pop-up delle Dolomiti, sono a letto del sovrascorrimento della Valsugana. UP-Mz, Permiano superiore-Mesozoico; T, Cenozoico (da DOGLIONI & CARMINATI, 2008).

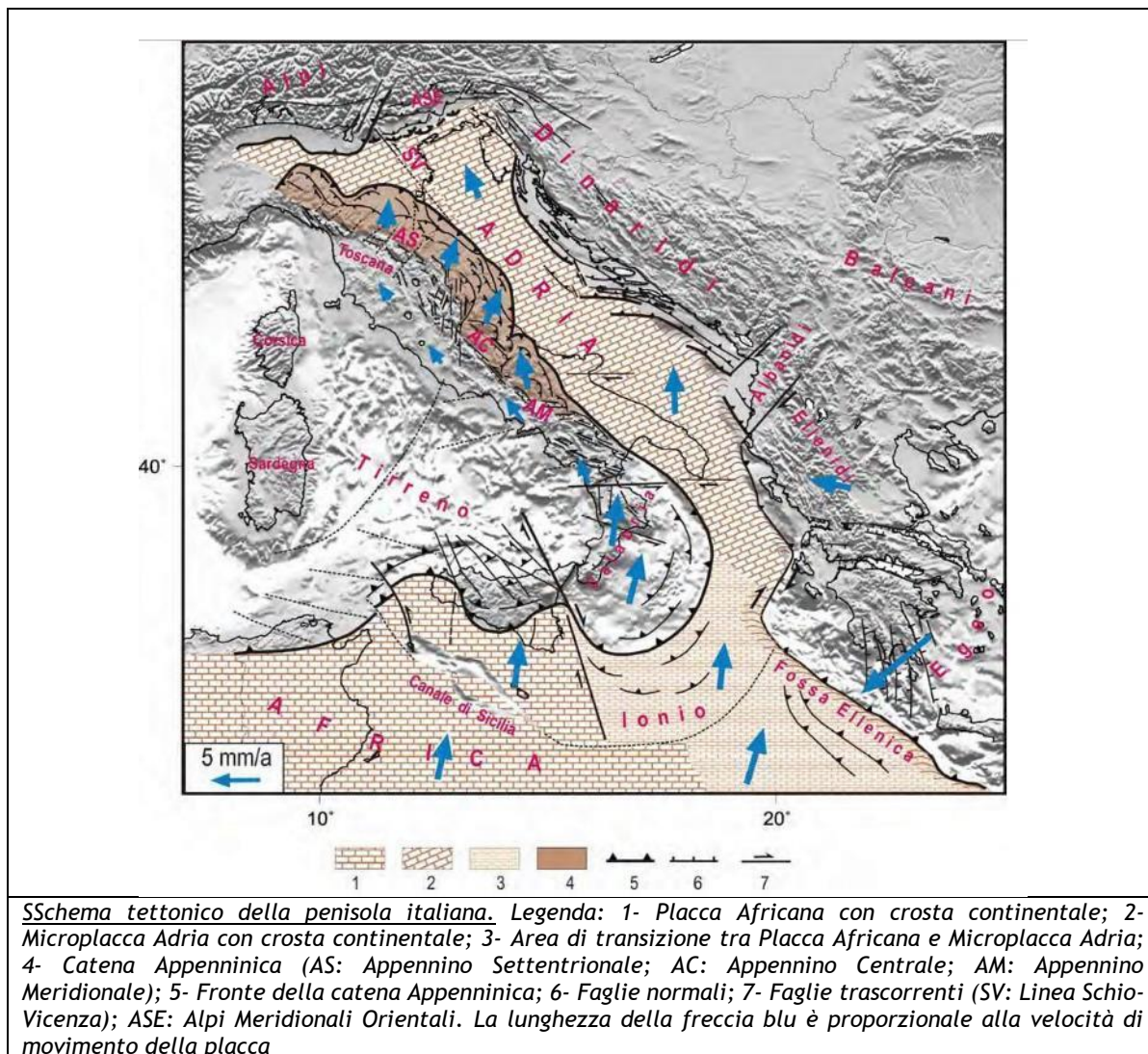
Sezione geologico strutturale rappresentative

4 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

Nel presente capitolo verrà trattata la sismicità storica locale, le faglie capaci e le sorgenti sismogenetiche, la zonazione sismica nazionale, la pericolosità sismica di riferimento e verrà fatto un accenno all'inquadramento sismo-tettonico generale del comune di Solagna ripreso dallo studio di MS1 ma integrato con gli aggiornamenti dei database avvenuti negli ultimi anni.

4.1 Inquadramento sismotettonico generale

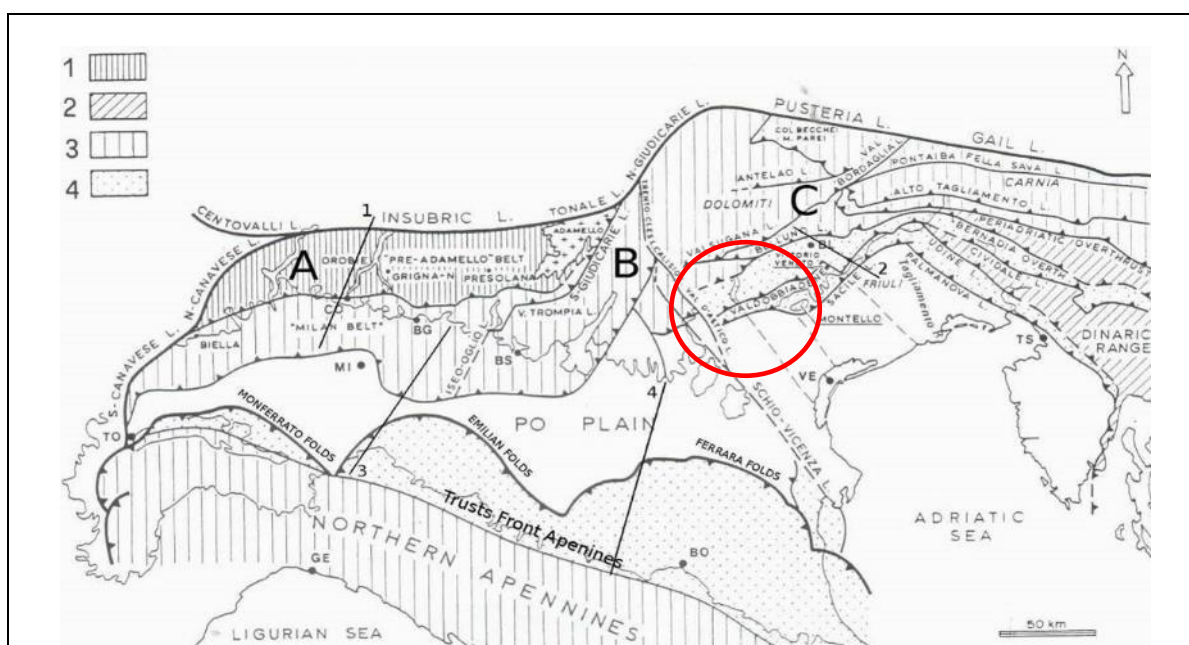
Dal punto di vista strutturale, il territorio di Solagna si colloca nell'Alta Pianura Veneta a ridosso della grande unità litologica delle Alpi meridionali. Quest'ultima è stata interessata dal *rifting* giurassico con l'individuazione di una piattaforma carbonatica bordata dal Bacino Carnico, Bacino Bellunese, Bacino di Tolmino e dal *plateau* Carnico - Giulio. La placca Adria, che tettonicamente rappresenta un promontorio della placca africana (Channell, 1996) collocata lungo la Pianura Padana - Veneta e lungo il mare Adriatico, interagisce attivamente con la placca Europea determinando il corrugamento Alpino e Appenninico e, conseguentemente, lo *stress* tettonico attuale.



L'Adria è costituita da crosta continentale che, nella porzione più settentrionale, è rappresentata dal substrato della Pianura Padana interagente con il fronte della catena Appenninica a Sud e con il Sud-Alpino a nord. La collisione continentale tra la parte più settentrionale della placca Adria e quella Europea ha portato alla formazione della catena Alpina. La conseguente subduzione verso Sud della placca Europea e il sovrascorrimento della placca Adria (subduzione continentale, Ballye al., 1985) ha provocato la formazione di strutture di *retro-trust*.

Un importante ruolo di svincolo cinematico della placca Adria settentrionale viene svolto dalla Linea Schio - Vicenza (Babbucci e al., 2002): una faglia trascorrente sinistra (Plio - Quaternaria) che mette le Apli Meridionali a contatto con quelle Centro Occidentali.

Il blocco Veneto - Friulano (figura seguente) è caratterizzato da strutture tettoniche con direzioni variabili (Dogliosi e al., 1987; Castellarin e al., 1992; Pontron e al., 2000). Nella zona friulana centrale si ha il massimo delle deformazioni e del raccorciamento per l'estrema embricazione Sud - vergente delle unità. L'assetto strutturale della Pianura Veneta, che rappresenta l'avampaese di due catene montuose perimetrali, è condizionato dall'interferenza tra le strutture del Sud Alpino a nord ed il fronte della catena Dinnarica a Est (Merlini e al., 2002).



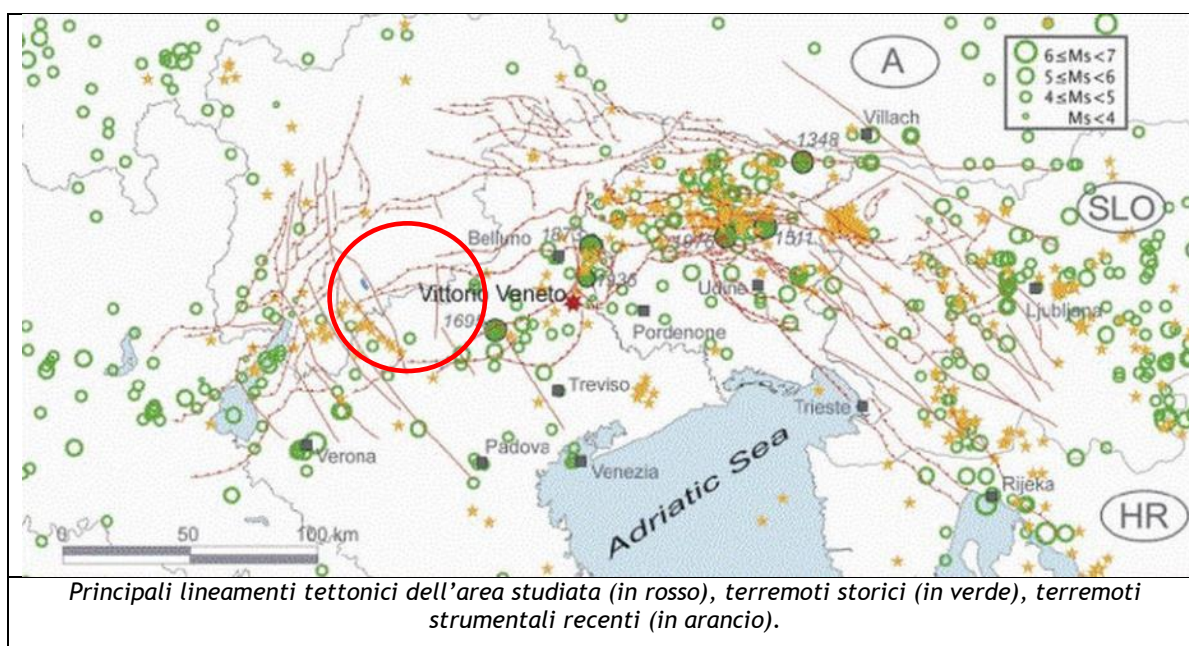
Schema strutturale della Pianura Padana (microplacca Adria) e delle aree adiacenti (modificato da: CASTELLARIN e al., 1982). Legenda: Il Sud - alpino è tettonizzato in età eoalpina (Cretaceo-Paleocenica) (1) e in età Eocene inf. e medio (2). L'area Appenninica è coeva al settore più occidentale delle Alpi (3) di età Messiniana e Plio - Pleistocenica. L'area Appenninica e Veneto-Friulana (4), in forte accorciamento, è caratterizzata dalle strutture sepolte sotto i depositi di pianura. Il Sud - Alpino è diviso in A) Blocco Lombardo, B) Blocco Trentino - Lessineo e C) Blocco Veneto - Friulano.

Dallo studio della distribuzione dei meccanismi focali si è ricavato l'assetto dell'ellissoide dello stress tettonico in termini di direzione di massima compressione e distensione, questo al fine di definire l'interazione tettonica attuale tra la placca Europea e quella Adria, responsabile degli ultimi terremoti emiliani (Balocchi, 2012; Balocchi e al., 2012).

Si può concludere che la placca Adria sia in netta compressione nel settore Sud - Alpino dove il sovrascorrimento di quest'ultima rispetto alla placca Europea genera dei *retro-stress* all'interno delle unità litologiche deposte sulla crosta continentale dell'Adria. Il risultato finale è rappresentato da un'attività sismica nelle regioni delle Alpi Orientali (Slejko et al., 1989) considerata tra le più elevate del nostro paese. Cinque terremoti con magnitudo di superficie (MS) superiore a 6 sono, infatti, avvenuti nell'ultimo millennio: nel 1348 a Villaco con MS 6,4 (l'epicentro sembra localizzato

nell'attuale zona di confine tra Italia e Austria), nel 1511 nella zona tra Gemona e Idria con MS 6,2, nel 1695 ad Asolo con MS 6,5, nel 1873 nell'Alpago con MS 6,3 e nel 1976 a Gemona con MS 6,5. Oltre a questi, nel 1936 un terremoto di magnitudo (MS) 6,1 ha provocato distruzioni nei paesi del Cansiglio.

La figura seguente mostra le faglie principali rilevate nella regione e la distribuzione spaziale dei maggiori terremoti. Questi ultimi, nell'area indagata, risultano di numero molto inferiore rispetto a quelli avvenuti nel vicino Friuli: bisogna segnalare, però, che la sismicità friulana risente della coda del forte terremoto del 1976 e che le stazioni della rete sismometrica dell'Italia nord-orientale sono state ubicate, per un lungo periodo, esclusivamente sul territorio friulano.



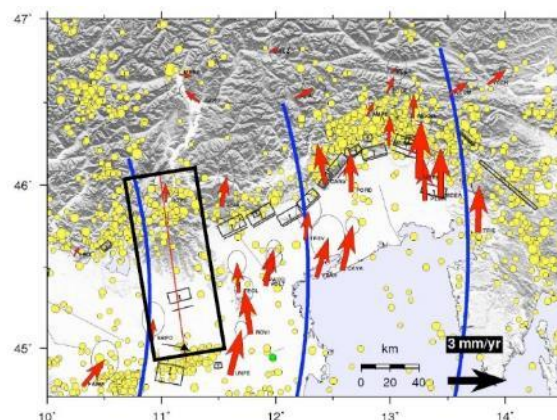
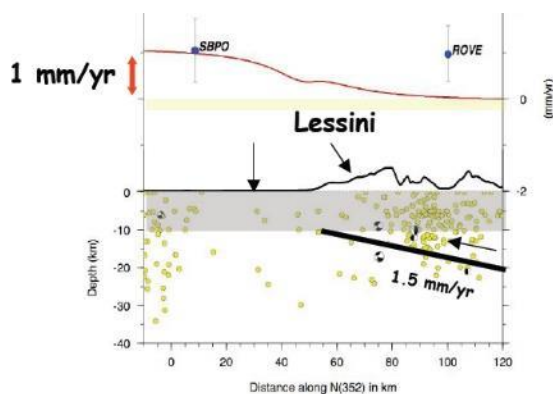
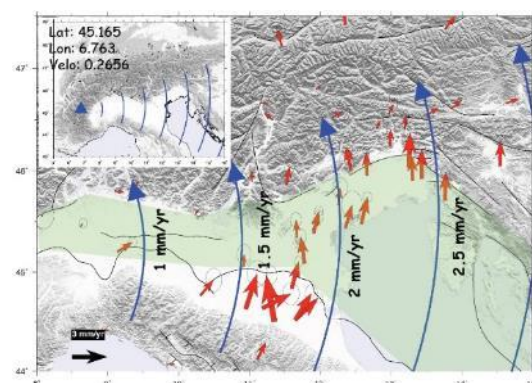
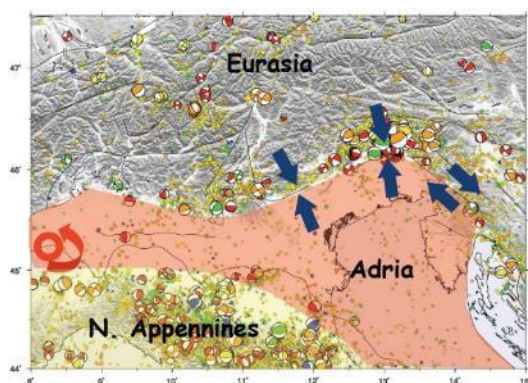
Le principali strutture tettoniche nel Veneto Orientale sono rappresentate da sovrascorrimenti con orientazione nord est-sud ovest, tagliati, talvolta, da faglie trascorrenti.

Una prima interpretazione della sismicità in chiave sismogenetica è stata presentata da Slejko et al. (1989) nell'ambito di un modello sismotettonico che interessa il territorio italiano dal lago di Garda al confine con la Slovenia.

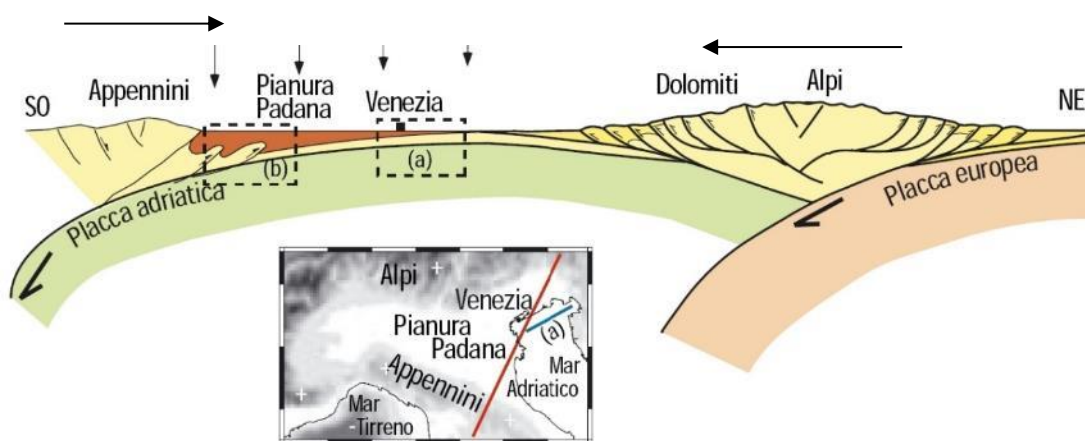
In un progetto sviluppato negli anni Novanta, Meletti et al. (2000) hanno formulato un modello sismogenetico per l'Italia che consta di 80 zone sismogenetiche. Queste zone risultano omogenee sia dal punto di vista tettonico che da quello sismico. Studi successivi (Slejko e Rebez, 2002) hanno portato a complicare, a livello regionale, quel modello (zonazione FRI) o a semplificarlo (Zonazione ZS9 - Meletti and Valensise, 2004) al fine di disporre di cataloghi sufficientemente ricchi di terremoti per tutte le zone sismogenetiche.

Nell'ambito della pianura padana si constata un avanzamento verso nord del margine appenninico sulla placca adriatica il cui movimento avviene secondo una rotazione antioraria la cui cerniera è localizzata in Piemonte (lat. 45,165 - long. 6,763). In corrispondenza alle Alpi meridionali l'accrescimento dei rilievi alpini sulla placca adriatica, in cui è coinvolta anche l'area dei monti Lessini, avviene con una velocità relativa stimata dell'ordine di 1,5 mm/anno.

Il settore più settentrionale del territorio veneto, che è localizzato al passaggio tra l'area di pianura e quella della fascia collinare, fa parte di una zona di svincolo tettonico con caratteri sismogenetici, in cui le fagliazioni trascorrenti ad andamento scledense riscontrate in superficie tendono a dislocare i sovrascorrimenti delle serie cenozoiche e mesozoiche caratterizzati da una vergenza sud-orientale (Scardia et al., 2012).



Rappresentazione schematica della cinematica della microplacca Adria in corrispondenza del margine alpino tratta da Serpelloni, 2008.

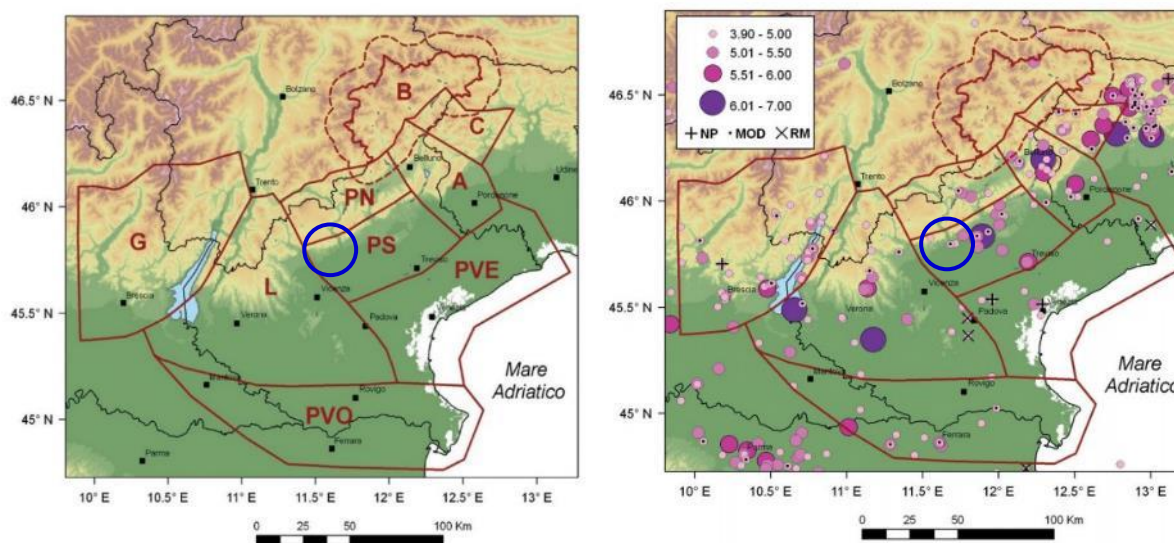


Schema tettonico dell'Italia settentrionale con evidenziati i movimenti delle placche coinvolte, tratto da Carminati et al.,

4.2 Caratterizzazione sismogenetica locale

Il territorio regionale del Veneto è stato suddiviso in distretti sismici: ogni distretto rappresenta un'area all'interno della quale si ritiene che i terremoti possano essere identificati da alcuni elementi sismogenetici comuni, pur con la consapevolezza che le schematizzazioni in tal senso sono sempre riduttive e devono essere opportunamente contestualizzate nell'interpretazione dello specifico evento sismico. Sulla base di dati sismologici, elementi geologico-strutturali e informazioni relative alla cinematica e alla tettonica attiva, sono stati identificati 9 distretti sismici come visibile nella figura sotto riportata.

Il territorio comunale di Solagna ricade a confine tra il distretto Pedemontana Sud (PS) e Pedemontana Nord (PN), che si estende dall'altopiano di Asiago fino alla zona pedemontana del margine del Cansiglio.



Legenda: Giudicarie (G); Lessini-Schio (L); Pedemontana Sud (PS); Pedemontana Nord (PN); Alpago-Cansiglio (A); Claut (C); Alto Bellunese-Dolomiti (B); Pianura Veneta Est (PVE); Pianura Veneta Ovest (PVO).

Mappa della sismicità storica del Veneto e aree limitrofe; fonte dati CPTI04 criticamente rivisto (Molin et al., 2008).

In legenda i simboli colorati indicano la magnitudo equivalente a MW riportata in CPTI Working Group (2004); i sovrassegni indicano eventi revisionati, rispettivamente come non parametrizzati 'NP', modificati 'MOD' o rimossi 'RM'.

DISTRETTO PEDEMONTANA SUD (PS)

Nel distretto Pedemontana Sud (PS), è presente la Flessura Pedemontana (FP in Figura sottostante), elemento dal quale prendono il nome sia questo distretto, sia il contiguo elemento (Pedemontana Nord) a nord ovest; le interpretazioni recenti ritengono che le strutture verso nord abbiano raggiunto una configurazione tettonica quasi definitiva (Zanferrari et al., 1982), e individuano invece nella porzione meridionale le potenziali sorgenti di terremoti distruttivi (Galadini et al., 2005; Burrato et al., 2008, 2009; Poli et al., 2008). Il distretto Pedemontana Sud si estende a sud est rispetto alla zona di pianura, approssimativamente ad includere la fascia delle risorgive; lungo la catena, il sistema strutturale è troncato bruscamente ad ovest dagli allineamenti disposti nord ovest-sud est del Sistema Schio-Vicenza mentre verso est da elementi paleogeografici riconducibili alla strutturazione della Piattaforma Friulana (margine occidentale del massiccio del Cansiglio). I limiti scelti non includono questi elementi.

L'area è caratterizzata da pieghe e sovrascorrimenti ad andamento ENE-OSO, prevalentemente vergenti a sud-sud est (Poli et al., 2008). La strutturazione della attuale fascia pedemontana, estesa dal Bassanese fino al fiume Tagliamento, trae le sue origini nell'evento compressivo del Messiniano-Pliocene, ampiamente propagatosi all'interno della catena entro sistemi già strutturati (Castellarin

et al., 1998b). Tuttora l'area presenta un'attività tettonica rilevante, con una compressione attiva la cui velocità è stimata nell'ordine di qualche mm/a (D'Agostino et al., 2005). Il potenziale sismico dell'area resta ancora piuttosto controverso, e si moltiplicano gli studi per comprendere la relativa assenza di sismicità su faglie ritenute capaci di generare forti terremoti. Per questo, si attendono i risultati di monitoraggi specifici, attualmente in corso per caratterizzare la deformazione geodetica e la microsismicità.

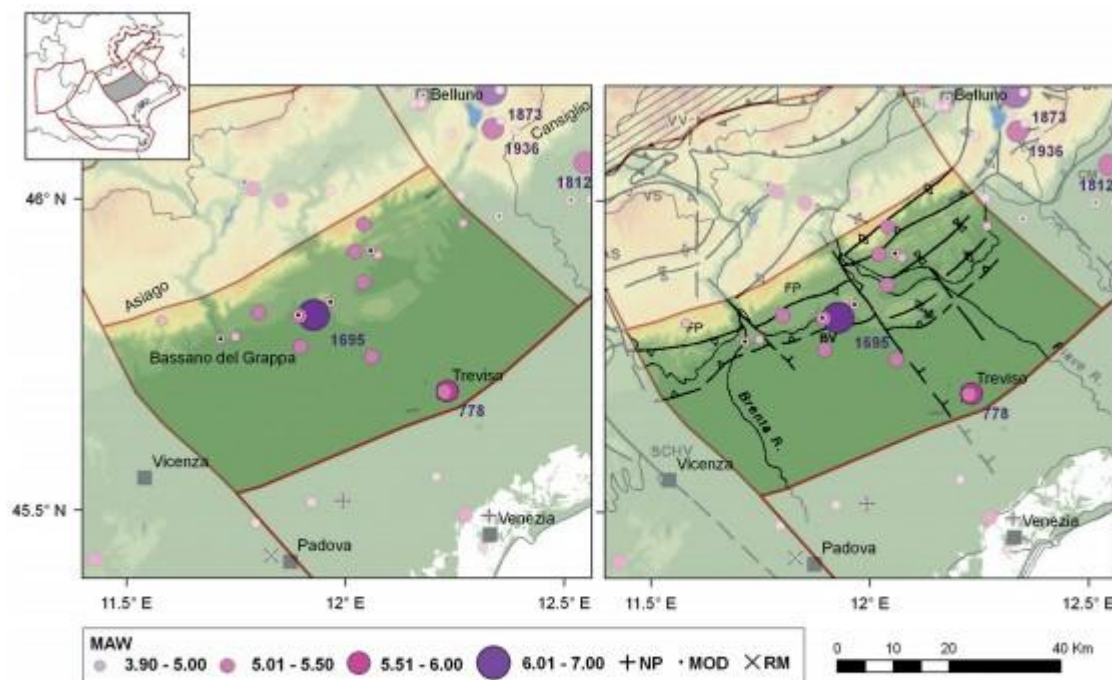


Fig. 4.11 - Mappa della sismicità storica del distretto Pedemontana Sud (PS); fonte dati CPTI04 criticamente rivisto (Molin *et al.*, 2008). Visualizzazione su DEM in scala cromatica (sn) e su DEM integrato con modello strutturale tratto da Castellarin *et al.* (1998b) (dx). In legenda: *Maw* indica la magnitudo equivalente a M_W riportata in CPTI Working Group (2004); i sovrassegni indicano eventi revisionati, rispettivamente come non parametrizzati 'NP', modificati 'MOD' o rimossi 'RM'.

Estratto "Distretti sismici del Veneto, M. Sugan, L. Peruzza, 2011"

4.3 Sismicità storica del comune di Solagna

Il Veneto è attualmente una regione "silente" dal punto di vista sismico. L'assenza di grossi eventi sismici recenti sorprende, ma non deve far pensare che il Veneto sia una regione tettonicamente inattiva. Evidenze di movimenti recenti (neotettonica) sono osservabili soprattutto nella fascia pedemontana (in particolare al confine tra le province di Belluno e Treviso) lungo la quale sono allineati i principali eventi storici.

La pericolosità sismica del Veneto è in parte legata all'attività dei distretti sismici del Friuli Centrale e, in minor misura, dell'Alpago e del Garda. Allo stato attuale, il territorio regionale è interessato da una certa sismicità di magnitudo medio-bassa, messa in luce negli ultimi decenni dal monitoraggio strumentale dell'attività sismica.

Tra i terremoti storici più rilevanti con epicentro in Veneto si possono ricordare:

Data	Area epicentrale	I MCS MAGNITUDO	Descrizione
03/01/1117	veronese	IX-X $M_w=6.7$	I danni maggiori si registrarono a Verona, ma interessarono anche la valle dell'Adige e, verso sud, il territorio fino ai primi rilievi emiliani.

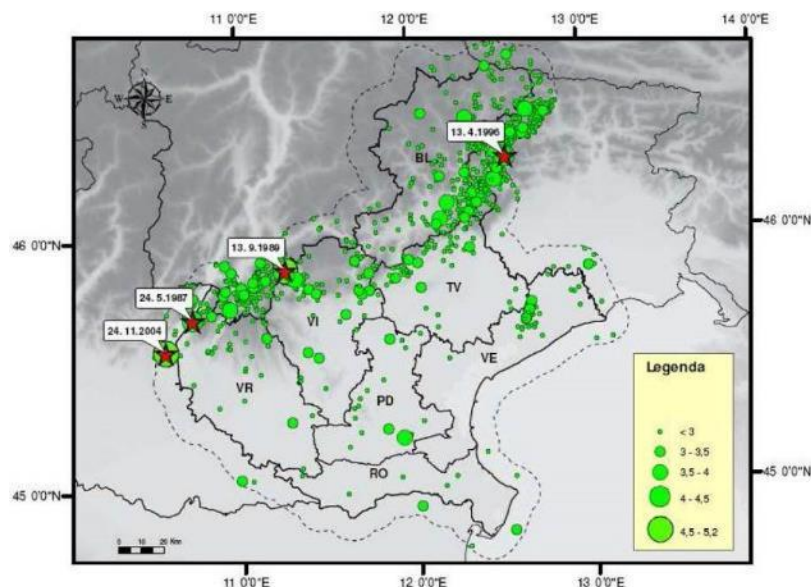
Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

04/11/1268	trevigiano	VII-VIII Mw=5.4	Colpita la provincia di Treviso. Danni gravi a Treviso, Feltre, Asolo. La scossa fu fortemente risentita a Padova.
25/02/1695	asolano	X Mw=6.5	Gravi danni in larga parte del Veneto in particolare nell'alto trevigiano, a sud del monte Grappa. Colpita la città di Asolo. Centinaia le vittime.
12/06/1836	Bassano	VIII Mw=5.5	Le località più danneggiate furono Liedolo, Fonte, Sant'Eulalia: Complessivamente crollarono un centinaio di case. Sentita fortemente anche a Venezia.
11/08/1866	monte Baldo	VII Mw=4.9	Danni nelle località poste sulla riva orientale del Lago di Garda, in particolare ad Assenza, Cassone, Castelletto, Malcesine.
29/06/1873	bellunese	IX-X Mw=6.3	L'area più colpita dalla scossa fu il bellunese, ma gravi danni subirono gli edifici dei paesi compresi tra Belluno, Pordenone e Conegliano Veneto (TV). Il centro più danneggiato fu Belluno e si osservarono lesioni anche a Gorizia, Pordenone, Trieste, Udine, Verona e Vicenza; 80 le vittime.
29/04/1876	monte Baldo	VII Mw=4.9	La scossa provocò danni a Cassone, Malcesine, Ferrara di Monte Baldo.
18/09/1882	monte Baldo	VII Mw=5.0	Interessati i paesi della costa orientale del Lago di Garda, con danni lievi nei paesi di Cassone e Castelletto di Brenzone. Risentita a Verona.
07/06/1891	valle d'Illasi	VIII-IX Mw=5.9	I danni più gravi a Castelvero, Badia Calavena, Marzemigo. Una ventina i paesi danneggiati in modo significativo (superiore o pari al VII MCS). La scossa fu risentita fino a Trieste, Auronzo, Bormio, Chiavenna, Domodossola, Torino, Asti, Genova.
19/02/1932	monte Baldo	VII-VIII Mw=5.0	La scossa provocò danni a diverse località della sponda veronese del Lago di Garda, tra le quali Albisano, S. Zeno, Garda.
18/10/1936	Alpago-Cansiglio (BL-PN)	IX Mw=6.1	Colpita la zona di confine fra le attuali province di Belluno, Treviso e Pordenone con i massimi effetti a sud dell'altopiano del Cansiglio nei paesi di Fiaschetti, Stevenà e Villa di Villa. Gravissimi danni anche a nord del Cansiglio, nella conca d'Alpago in particolare nelle località di Puos d'Alpago, Cornei e Villa.

Nel periodo 1977-2006, la rete gestita dall'INOGS (Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale di Trieste) ha registrato in Veneto quasi 1200 eventi sismici con magnitudo compresa tra 2,0 e 3,0.

La maggior parte di questi eventi è localizzata lungo la fascia prealpina che unisce l'Alpago al monte Baldo. La profondità epicentrale più frequente è compresa tra i 7 e i 15 km di profondità. Solo l'11% degli eventi si colloca a profondità maggiore (fino a 22 km). Nella figura seguente è riportata la distribuzione di tutti i terremoti registrati da INOGS distinti per classi di magnitudo di durata M_D ¹. Gli eventi con $M_D > 4$, i cui epicentri ricadono nel territorio regionale o in prossimità di esso, sono identificati con una stella rossa.

¹ La magnitudo di durata M_D è il tipo di magnitudo che si utilizza per registrare piccoli terremoti, come quelli registrati in zona vulcanica che, vicini agli strumenti, li saturano. Si basa sul logaritmo della durata dell'evento sismico.



Distribuzione di tutti i terremoti recenti registrati dalla rete sismometrica gestita dall'INOGS in Veneto nel periodo 1977 – 2006 (Priolo, 2008)

Come riportato nella figura precedente, gli eventi con $M_D > 4$ i cui epicentri ricadono nel territorio regionale o in prossimità di esso sono identificati con una stella rossa. Si tratta dei seguenti terremoti:

Data	Località	Magnitudo
24/05/1987	Garda	4,2
13/09/1989	Pasubio	4,8
13/04/1996	Claut M.	4,2
24/11/2004	Salò	5,2

La ricostruzione storica degli eventi sismici che hanno caratterizzato il territorio comunale di Solagna è stata fatta utilizzando il database macrosismico italiano DBMI15 dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (a cura di M. Locati, R. Camassi e M. Stucchi, 2015. DBMI15, la versione 2015 del Database Macrosismico Italiano. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI15>): rispetto al precedente DBMI11, raccomandato nelle linee guida della Regione Veneto per la realizzazione dello studio della compatibilità sismica, il DBMI15 ne rappresenta l'integrazione e l'aggiornamento, per cui è stato consultato per estrarre le seguenti informazioni.

Nello specifico, il comune di Solagna appare 3 volte nel Database sopra citato con intensità registrata superiore o uguale a 3. Nella tabella seguente sono stati elencati i vari eventi registrati, con indicati, oltre all'intensità in scala MCS al sito in esame (I), la data (anno, mese, giorno, ora, minuto) in cui si è verificato l'evento Ax, l'intensità massima epicentrale in scala MCS (I_0) e la magnitudo momento (M_w).

Il grafico seguente ricostruisce la storia sismica di Solagna (per terremoti con intensità al sito superiore o uguale a 3) tra gli anni 1000 e fino al 2015.

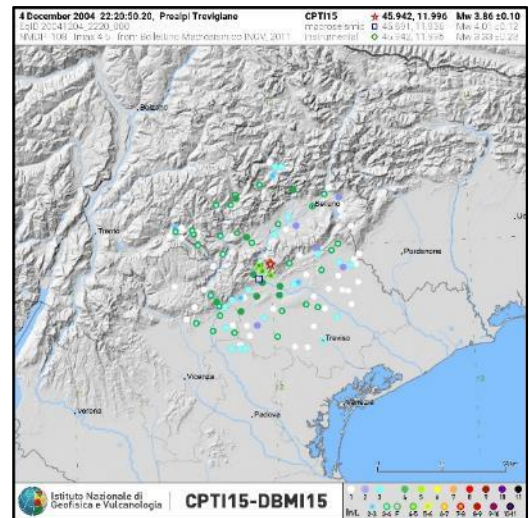
L'evento registrato il giorno 04 dicembre 2004 è stato quello di maggiore intensità rilevato nel territorio di Solagna. Secondo i



cataloghi oggi disponibili (CPTI15, Guidoboni et al., 2016) la magnitudo M_w del 2004 sarebbe stata pari a circa 3.86 e a Solagna, si sarebbe avvertito con un'intensità MCS di 4-5.

Solagna

PlaceID IT_25383
Coordinate (lat, lon) 45.815, 11.720
Comune (ISTAT 2015) Solagna
Provincia Vicenza
Regione Veneto
Numero di eventi riportati 4



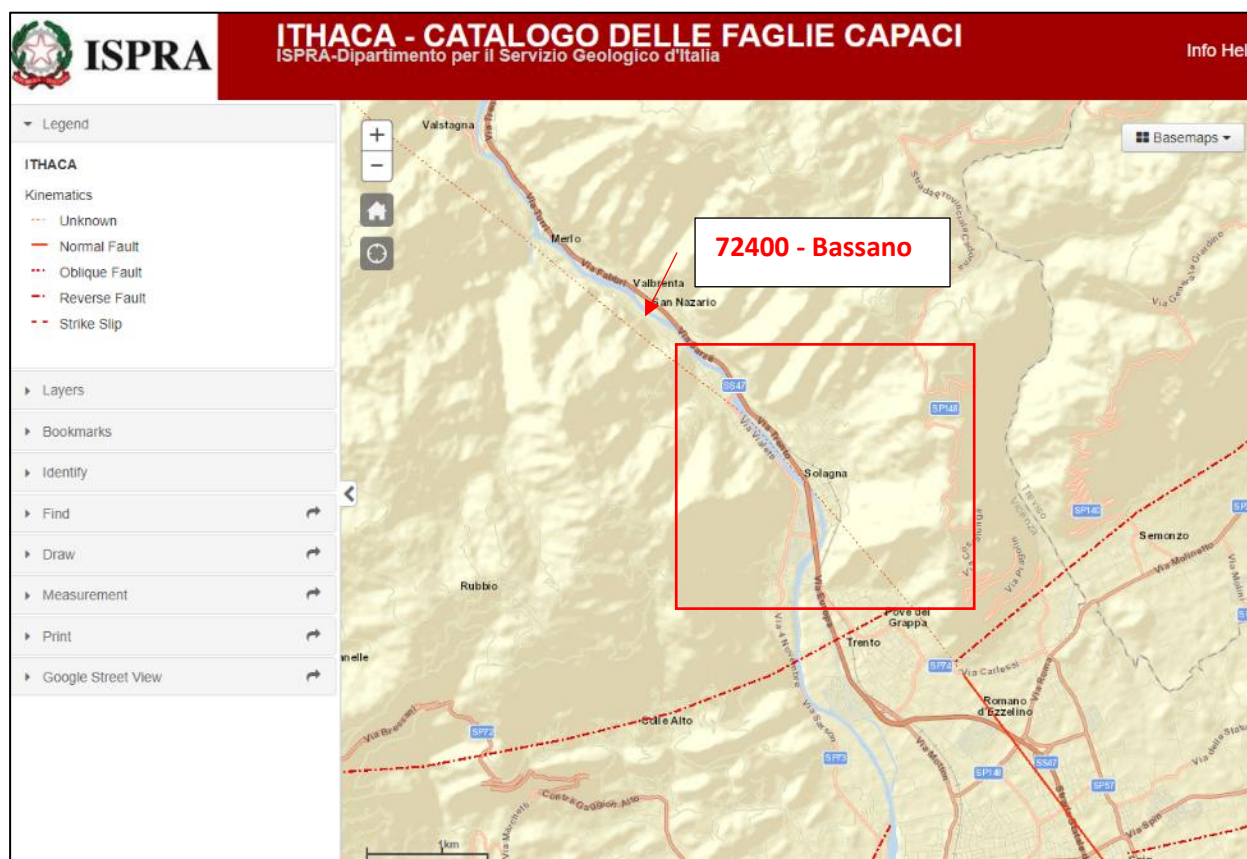
Effetti	In occasione del terremoto del							
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP Io Mw
3	1904	03	10	04	23	0	Slovenia nord-occidentale	57
NF	1987	05	02	20	43	5	Reggiano	802 6 4.71
3-4	2001	07	17	15	06	1	Val Venosta	657 5-6 4.78
4	2004	12	04	22	20	5	Prealpi Trevigiane	108 4-5 3.86

4.4 Faglie capaci e sorgenti sismogenetiche

Per quanto riguarda il tema delle faglie capaci (faglie che si sono rotte almeno una volta negli ultimi 40.000 anni, raggiungendo la superficie e producendo una rottura del terreno) e l'inquadramento delle sorgenti sismogenetiche più prossime all'area di Solagna si è fatto riferimento agli studi condotti dagli esperti scientifici e riportate nei cataloghi **ITHACA** e **DISS 3.3.0**.

Le sorgenti sismogenetiche rappresentano le zone che sono state riconosciute come origine dei terremoti grazie allo studio della sismicità storica e delle indagini geologiche.

Le sorgenti sismogenetiche rappresentano le zone che sono state riconosciute come origine dei terremoti grazie allo studio della sismicità storica e delle indagini geologiche. ITHACA è un database creato per la raccolta e la consultazione di tutte le informazioni disponibili sulle strutture tettoniche attive in Italia, con particolare attenzione ai processi tettonici che potrebbero generare rischi naturali. Il progetto si occupa in modo particolare delle faglie capaci, definite come faglie che potenzialmente possono creare deformazione in superficie: dalla sua consultazione è stato possibile individuare nel territorio comunale in esame, la presenza varie faglie capaci - immagini estratte dal sito dell'ISPRA. Nelle tabelle sottostanti, vengono riportate le informazioni desunte dalle schede specifiche ITHACA per tali lineamenti.



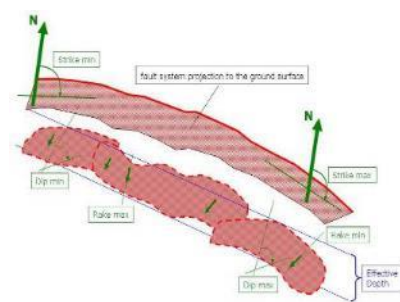
Nome faglia	Bassano
Tipo Faglia	ND
Codice faglia	72400
Regione	Veneto
Sistema	Bassano
Ordine	Secondaria

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

Direzione media	140
Direzione di immersione	-
Lunghezza (km)	20.0
Ultima attività (anni)	Pleistocene Generico
Qualità dello studio	Bassa

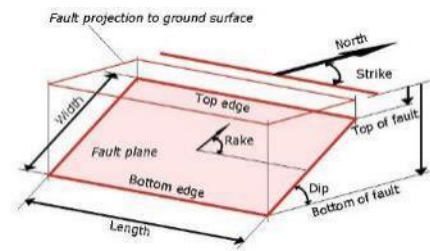
La mappa dell'INGV riportata di seguito, denominata DISS 3.3.0 (*Database of Individual Seismogenic Sources - DISS Version 3*), mostra tre tipologie di sorgenti sismogenetiche.

Sorgenti individuali (IS): per le quali viene proposta una rappresentazione tridimensionale semplificata del piano di faglia. Questo tipo di sorgente esibisce caratteristiche definite di estensione, movimento e massima magnitudo attesa.



Sorgenti composite (CS):

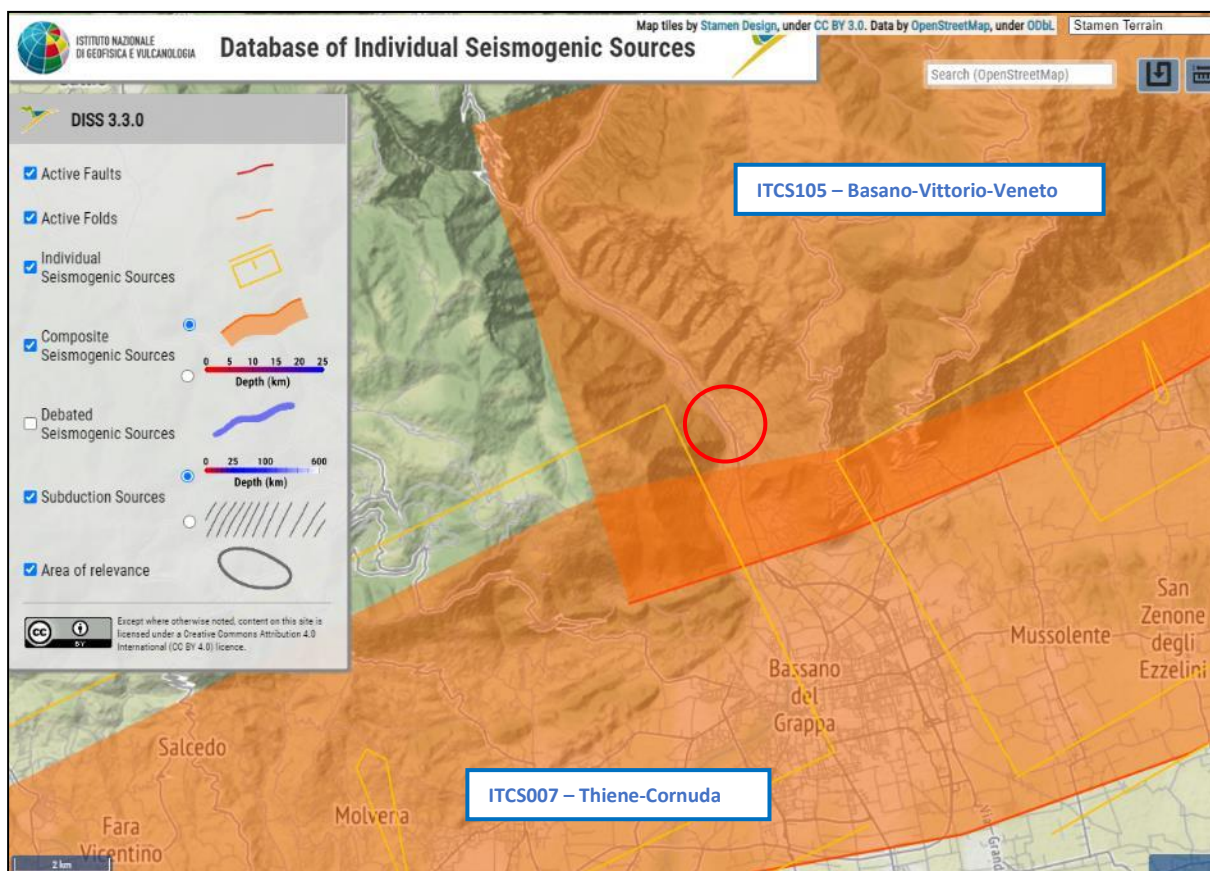
sono regioni estese contenenti un numero non specificato di sorgenti minori allineate che non è ancora conosciuto singolarmente. Le sorgenti composite non sono associate a uno specifico gruppo di terremoti storici.



Sorgenti dibattute (DS):

sono zone proposte in letteratura come potenziali sorgenti, ma considerate ancora non sufficientemente

attendibili per entrare nel database.



Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

La mappa del DISS inserisce il Comune di Solagna tra le zone ITCS 007 “Thiene-Cornuda” ed ITCS 105 “Bassano-Vittorio Veneto”.

La zona **ITCS 105** è collocata tra le regioni del Friuli e del Veneto attraversando le principali città tra Belluno e Pordenone. Questa sorgente appartiene al sistema compressivo della catena sud-alpina orientale che confina con la pianura veneta-friulana nel nord-est Italia. È un sistema vergente verso sud-est ed è legato alla convergenza tra la africana e quella europea. Questa sorgente include anche il thrust di Bassano che confina con l’anticlinale del Montello.

Minima profondità (km)	1
Massima profondità (km)	10
Direzione (°)	200 - 245
Inclinazione (°)	30 - 50
Rake (°)	60 -100
Velocità di movimento (mm/anno)	0,29 – 0,72
Magnitudo massima	6.9

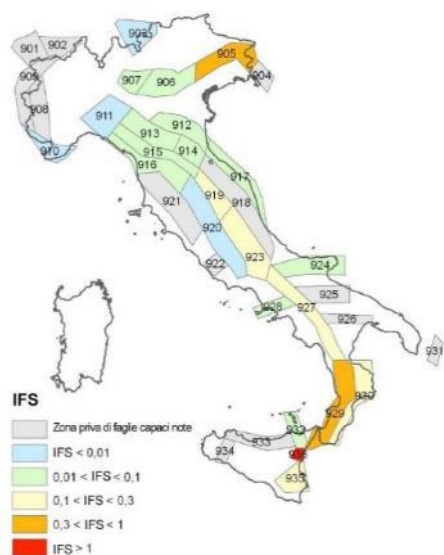
Riguardo invece la sorgente **ITCS 007**, questa attraversa la regione Veneto dalle colline orientali fino ai sistemi di thrust che lambiscono la pianura veneto-friulana nel nord-est Italia. Questo fronte è un sistema di faglie vergente in direzione sud-sud est ed è pensato per accogliere la convergenza in direzione nord-sud tra la placca africana ed europea. I cataloghi storici e strumentali, considerano attiva dal punto di vista sismico solo la parte settentrionale della regione. Un evento molto forte associato a questa sorgente è quello del 25 febbraio 1965 (Mw 6.7) avvenuto nell’area di Asolano e risentito nell’area di interesse con intensità pari a 10. Un ulteriore evento dannoso è avvenuto a Bassano il 12 Giugno 1836 (Mw 5.5).

Minima profondità (km)	0.5
Massima profondità (km)	6.5
Direzione (°)	240 - 245
Inclinazione (°)	30 - 40
Rake (°)	80 -100
Velocità di movimento (mm/anno)	0,68 – 0,96
Magnitudo massima	6.5
Rake (°)	80
Velocità di movimento (mm/anno)	0,20 – 0,30
Magnitudo massima	5.5

4.5 Zonazione sismica nazionale

In seguito all'emanazione dell'O.P.C.M. 20/03/2003, n° 3274, in cui si manifestava l'esigenza di una mappa di pericolosità sismica di riferimento per l'individuazione delle zone sismiche sul territorio nazionale, è stato redatto a cura dell'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) un documento denominato "Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'O.P.C.M. 20/03/2003, n° 3274. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile" (INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici), che rappresenta il punto di riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica su tutto il territorio nazionale (figura a lato). All'interno della ricerca eseguita per tale redazione, è stata elaborata una nuova zonazione sismogenetica, denominata ZS9 che divide tutto il territorio italiano in 36 zone.

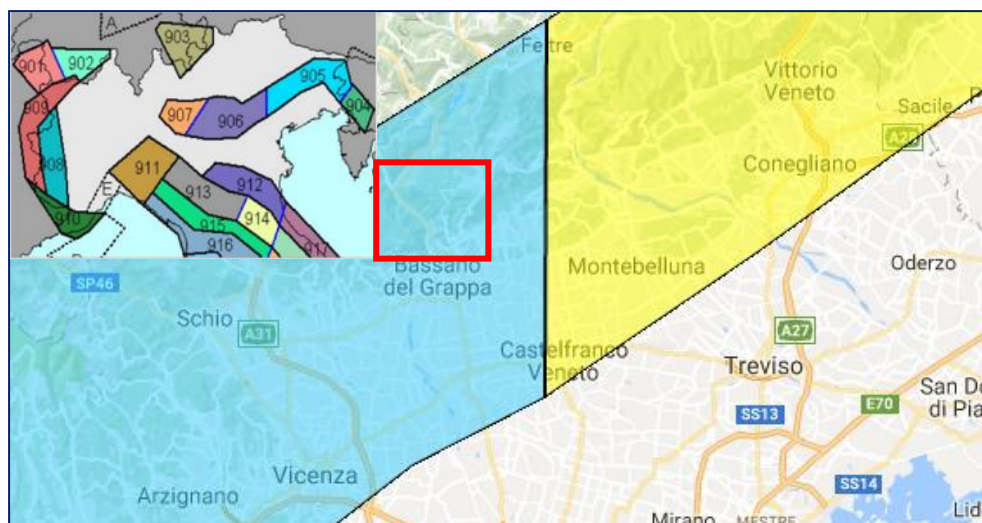
Tale zonazione è stata condotta tramite l'analisi cinematica degli elementi geologici (cenozoici e quaternari) coinvolti nella dinamica delle strutture litosferiche profonde e della crosta superficiale; essa, pur basandosi ampiamente sull'impianto generale e sul *background* informativo della precedente zonazione ZS4 (Scandone e Stucchi, 1996), rappresenta un suo sostanziale ripensamento, alla luce delle evidenze di tettonica attiva, delle valutazioni sul potenziale sismogenetico acquisite nei primi anni del decennio (con i fondamentali contributi del



Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), che, combinando dati geologici, storici e strumentali, censisce le sorgenti in grado di produrre terremoti di magnitudo 5.5 e superiore) e del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (all'epoca della redazione della mappa CPT12, ora arrivato alla versione CPT15). Il confronto tra le informazioni che hanno condotto alla costruzione del modello geodinamico e la sismicità osservata ha permesso di costruire la Carta delle Zone Sismogenetiche del territorio nazionale. Ogni zonizzazione sismogenetica è caratterizzata da un definito modello cinematico il quale sfrutta una serie di relazioni di attenuazione stimate sulla base di misurazioni accelerometriche effettuate sia sul territorio nazionale che europeo.

Secondo la zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), nel Veneto ricadono le Zone Sismogenetiche n°905 "Friuli-Veneto orientale" e n°906 "Garda-veronese", che interessano rispettivamente la fascia pedemontana tra Bassano del Grappa e il confine con il Friuli Venezia Giulia e la fascia pedemontana che da Bassano prosegue fino al lago di Garda. Il meccanismo di fagliazione responsabile dei terremoti che si sono verificati in entrambe le zone è di tipo faglia inversa, con una profondità ipocentrale media stimata di 8 km. Entrambe le zone sono legate all'interazione Adria-Europa ma presentano una sismicità differente.

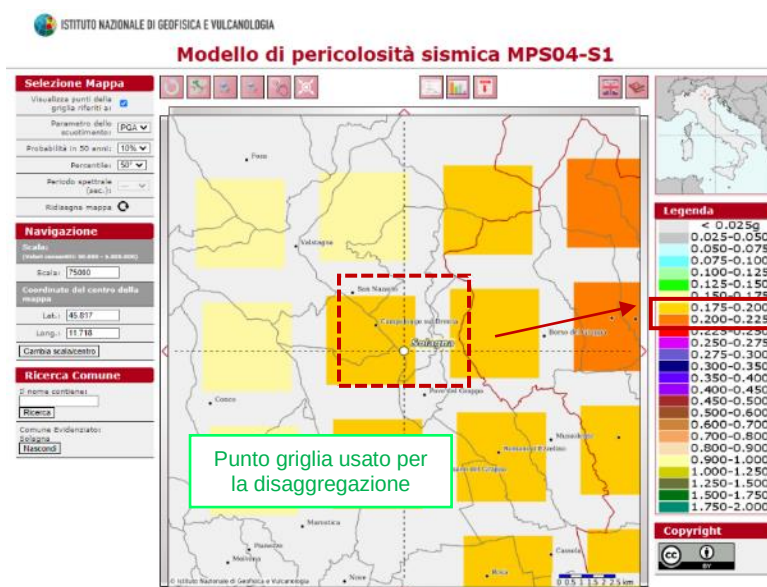
Il comune di Solagna si posiziona all'interno della zona sismogenetica n. 906 della figura seguente, per cui si sviluppa all'interno dell'area di massima convergenza tra la placca adriatica ed europea caratterizzata da strutture a pieghe sud-vergenti e faglie inverse associate (*trend* dinarico) (es., Bernardis et al., 2000; Baic et al., 2001; Vrabec, 2001).



Dettaglio della Carta delle zone sismogenetiche ZS9 (Meletti e Valensise, marzo 2004), con l'ubicazione del comune di Solagna

4.6 Pericolosità sismica di riferimento

La distribuzione e la caratterizzazione delle zone sismogenetiche finora riconosciute e descritte in precedenza è stata tradotta in una Carta di Pericolosità Sismica, valida su tutto il territorio nazionale ed entrata in vigore con l'O.P.C.M. n° 3519 del 28/04/2006. Nella carta, della quale la figura seguente rappresenta l'estratto per il comune di Solagna, sono riportati i valori di accelerazione orizzontale massima al suolo a_g con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferiti a suoli rigidi subpianeggianti di Categoria A.



Carta di pericolosità sismica espressa in termini di accelerazione massima del suolo a_g con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli di Categoria A ($V_{s,30} > 800$ m/s) subpianeggianti (categoria topografica T1 da N.T.C. 2018)

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

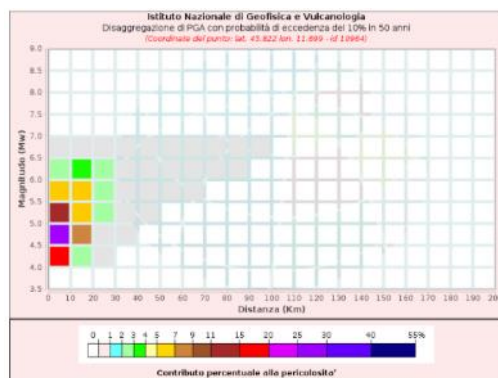
Pertanto, secondo l'O.P.C.M. n° 3519 del 28/04/2006 e considerata l'emanazione del D.M. 17/01/2018 - NTC, la maggior parte del territorio oggetto dello studio di microzonazione sismica è inseribile nella fascia distinta da un valore di accelerazione sismica orizzontale a_g riferito a suoli rigidi sub-pianeggianti caratterizzati da $V_s > 800$ m/s compreso tra 0,175 g e 0,200 g (valori riferiti ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni - mappa 50° percentile), ovvero in Zona 2, come classifica la tabella riportata sotto, estratta dall'O.P.C.M. n° 3519 stessa.

a) Ciascuna zona è individuata mediante valori di accelerazione massima del suolo a_g con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, riferiti a suoli rigidi caratterizzati da $V_{s30} > 800$ m/s, secondo lo schema seguente:

zona	accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni $[a_g]$	accelerazione orizzontale massima convenzionale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico $[a_g]$
1	$0,25 < a_g \leq 0,35$ g	0,35 g
2	$0,15 < a_g \leq 0,25$ g	0,25 g
3	$0,05 < a_g \leq 0,15$ g	0,15 g
4	$\leq 0,05$ g	0,05 g

Dal punto di vista amministrativo, con deliberazione n.244 del 9 marzo 2021 (BUR 38 del 16 marzo 2021) la Giunta Regionale ha approvato il nuovo elenco dei comuni sismici del Veneto che inserisce il territorio comunale di Solagna in ZONA sismica 2.

In ultima, si riporta il calcolo della disaggregazione della pericolosità: questa ha lo scopo di individuare il maggior contributo alla pericolosità del sito in termini di magnitudo-distanza di un evento. I grafici riportati sotto sono stati desunti dalle Mappe Interattive di Pericolosità Sismica dell'INGV e sono relativi al punto della griglia definito nella figura precedente (Carta di Pericolosità Sismica dell'INGV).



Distanza (km)	Disaggregazione di PGA con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto: lat. 45.822 lon. 11.699 - id 10964)									
	Magnitudo (Mw)									
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5
0-10	0.0000	15.3000	25.9000	12.9000	5.5100	2.0600	0.2060	0.0000	0.0000	0.0000
10-20	0.0000	2.8000	7.6800	6.9100	5.0000	3.0200	0.4080	0.0000	0.0000	0.0000
20-30	0.0000	0.0504	0.9300	2.1800	2.8000	2.7200	0.4820	0.0000	0.0000	0.0000
30-40	0.0000	0.0000	0.0063	0.2820	0.7310	0.9760	0.2030	0.0000	0.0000	0.0000
40-50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0091	0.1720	0.3550	0.0847	0.0000	0.0000	0.0000
50-60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0245	0.1340	0.0377	0.0000	0.0000	0.0000
60-70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0007	0.0442	0.0169	0.0000	0.0000	0.0000
70-80	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0102	0.0071	0.0000	0.0000	0.0000
80-90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0012	0.0024	0.0000	0.0000	0.0000
90-100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000
100-110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
110-120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
120-130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
130-140	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
140-150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
150-160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
160-170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
170-180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
180-190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
190-200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Valori Medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.09	10.3	0.817

Dalla ricostruzione dell'INGV riportata sopra, considerando un tempo di ritorno $T_r = 475$ anni e una Categoria A di sottosuolo in condizioni sub-pianeggianti, si evidenzia che il maggior contributo alla pericolosità sismica locale è dato da eventi di entità M_w compresa tra 4,0 e 6,5 e relativamente vicini ($R =$ entro 10-30 km).

Si fa comunque presente che, come tutte le zone sismogenetiche del territorio italiano, anche quella contrassegnata dal n°906 e precedentemente descritta viene considerata omogenea ai fini della

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

probabilità di accadimento degli eventi sismici, ovvero si ritiene che tutti i punti in essa contenuti abbiano la stessa probabilità di essere sede di eventi sismici.

Secondo il paragrafo 2.8 degli “Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica”, per alcune tipologie di verifiche si potrebbe assumere come valore di magnitudo attesa quella massima della zona sismogenetica di appartenenza, che per la zona n°906, in cui ricade il territorio di Solagna, vale $M_{wmax} = 6,60$.

Tabella 2.8-1 – Valori di M_{wmax} per le zone sismogenetiche di ZS9 (estratto da Gruppo di lavoro, 2004)

Nome ZS	Numero ZS	M_{wmax}
Colli Albani, Etna	922, 936	5.45
Ischia-Vesuvio	928	5.91
Altre zone	901, 902, 903, 904, 907, 908, 909, 911, 912, 913, 914, 916, 917, 920, 921, 926, 932, 933, 934	6.14
Medio-Marchigiana/Abruzzese, Appennino Umbro, Nizza-Sanremo	918, 919, 910	6.37
Friuli-Veneto Orientale, Garda-Veronese, Garfagnana-Mugello, Calabria Jonica	905, 906, 915, 930	6.60
Molise-Gargano, Ofanto, Canale d'Otranto	924, 925, 931	6.83
Appennino Abruzzese, Sannio – Irpinia-Basilicata	923, 927	7.06
Calabria tirrenica, Iblei	929, 935	7.29

5 MICROZONAZIONE SISMICA. PRINCIPI FONDAMENTALI E FINALITÀ

5.1 Introduzione

I recenti terremoti che hanno interessato il nostro paese hanno ampiamente dimostrato che la variabilità spaziale del danno rilevato trova molto spesso la sua causa principale nei cosiddetti “effetti locali”, ossia nelle differenti risposte del territorio alle azioni sismiche, legate alla variazione delle sue condizioni geologiche, geomorfologiche e geotecniche.

Una efficace cultura di difesa dai terremoti deve essere fondata su una valutazione della pericolosità locale a scala urbana, più ampia di quella della singola costruzione, e deve potersi basare su un'operazione tecnico-scientifica che sia autorizzata a rientrare a pieno titolo nelle valutazioni urbanistiche di riduzione del rischio e nelle politiche di pianificazione del territorio.

Tale operazione è, appunto, la “microzonazione sismica”: la MS è l'operazione di suddivisione di un dato territorio in zone omogenee sotto il profilo della risposta ad un terremoto di riferimento, valutata tenendo conto delle interazioni tra le onde sismiche e le condizioni proprie di ogni zona individuata (pericolosità sismica locale).

5.2 La natura del problema

Durante lo scuotimento sismico e immediatamente dopo il terremoto, si verificano degli effetti molto appariscenti e, spesso, più devastanti dell'onda sismica, che sono tra le cause più importanti di vittime e danni: questi sono gli “effetti di sito” che sono ormai ben conosciuti e possono amplificare notevolmente le sollecitazioni nelle strutture (di entità tale da portarle fino al collasso) o essere rappresentati da rotture del terreno, movimenti franosi, elevati cedimenti nei terreni soffici, liquefazione dei terreni incoerenti saturi. Le figure sottostanti sono un esempio di tali effetti.



Turchia, agosto 1999



Emilia, maggio 2012



L'Aquila, aprile 2009



Tatsuoka, 2006

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

Le osservazioni condotte nei secoli hanno dimostrato come possono verificarsi situazioni completamente differenti all'interno dello stesso territorio, anche a breve distanza; fin dagli anni '70, le ricerche scientifiche hanno evidenziato che la causa maggiore di variabilità spaziale del moto sismico sono i fenomeni legati alla propagazione delle onde S nei terreni, lungo la direzione verticale.

Da tali osservazioni è nata la necessità di iniziare degli studi per ipotizzare il comportamento del territorio in caso di terremoto e, di conseguenza, per valutare la pericolosità sismica locale e realizzare la microzonazione sismica (MS), precedentemente definita.

La MS può assumere forme molto diverse a seconda delle condizioni territoriali in cui si realizza ed è difficile da standardizzare anche se, grazie ad alcune procedure ormai consolidate, è possibile sintetizzare lo studio di MS in una cartografia del territorio nella quale sono indicate:

- le zone in cui il moto sismico non viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante (Categoria A di sottosuolo secondo Eurocodice 8) e, pertanto, gli scuotimenti attesi sono equiparati a quelli forniti dagli studi di pericolosità di base;
- le zone in cui il moto sismico viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante, a causa delle caratteristiche litostratigrafiche del terreno e/o geomorfologiche del territorio;
- le zone in cui sono presenti o suscettibili di attivazione fenomeni di deformazione permanente del territorio indotti o innescati dal sisma (instabilità di versante, liquefazione, fagliazione superficiale, cedimenti differenziali, ecc.).

In sostanza, dal punto di vista della pericolosità, la MS distingue le seguenti aree:

- **aree sismicamente stabili**, dove possono verificarsi o meno "effetti di sito" (stratigrafici, di valle, topografici, ecc.);
- **aree sismicamente instabili**, dove possono verificarsi anche fenomeni di instabilità quali movimenti franosi, crolli di roccia, liquefazione, densificazione, subsidenza, spostamenti di faglia, crolli legati a cavità, ecc.



A tal proposito, per la mitigazione del rischio sismico a scala locale, la finalità di uno studio di MS è, pertanto, quello di pervenire alla stesura di una mappa, dove:

- siano identificati i confini delle zone con analoga risposta al terremoto di riferimento;
- vengano indicati i livelli di pericolosità delle diverse zone attraverso opportuni indicatori.

La mappa di MS diventa, quindi, una cartografia di sintesi che identifica il tipo di problemi e le gerarchie di pericolosità tra le diverse aree; nel caso di Bassano del Grappa, tali informazioni serviranno a fornire all'amministrazione comunale uno strumento utile per la futura programmazione territoriale, la pianificazione urbanistica e la gestione delle emergenze, nonché per la ricostruzione post-sismica.

Si fa comunque presente che la MS è legata alla gestione del territorio ed alla pianificazione urbanistica e NON alla progettazione delle strutture.

5.3 Finalità e livelli di approfondimento

La MS ha lo scopo di riconoscere ad una scala sufficientemente grande (comunale o subcomunale) le condizioni locali che possono modificare sensibilmente le caratteristiche del moto sismico di base in termini di ampiezza, durata e frequenza o possono produrre deformazioni permanenti rilevanti per le costruzioni e le infrastrutture.

Essa si colloca ad un livello intermedio tra la classificazione sismica a scala nazionale, che fa riferimento ad un terreno ideale rigido e pianeggiante per il quale fornisce dei parametri indicativi della pericolosità di base, e la progettazione antisismica, che opera invece a scala di singolo manufatto.

L'obiettivo principale è, in primo luogo, quello di distinguere le zone il cui comportamento può essere instabile (aree critiche) dalle zone stabili dove possono aversi o meno "fenomeni di amplificazione del moto sismico" (aree stabili suscettibili o non suscettibili di amplificazione), mentre il secondo obiettivo è quello di valutarne la risposta.

Le principali linee guida internazionali, tra cui gli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" del Dipartimento della Protezione Civile (2008), prevedono tre livelli di approfondimento (1, 2 e 3).

In sintesi:

- il Livello 1, propedeutico ai veri e propri studi di MS, si basa prevalentemente sulla raccolta di dati preesistenti, elaborati per suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee in prospettiva sismica;
- il Livello 2 associa alle zone omogenee dei parametri quantitativi di interesse ingegneristico, utilizzando allo scopo ulteriori e mirate indagini, ove necessarie, e definisce la "Carta di microzonazione sismica";
- il Livello 3 quantifica numericamente l'amplificazione del moto sismico atteso in superficie tramite un'analisi monodimensionale o bidimensionale, a seconda delle condizioni geologiche-topografiche del sito d'indagine, e restituisce una "Carta di microzonazione sismica" con approfondimenti su tematiche o aree particolari.

Va sottolineato che l'adozione di tre livelli consente una grande flessibilità nelle applicazioni, in quanto permette di adeguare il livello di approfondimento alle risorse ed ai tempi disponibili, nonché al tipo di utilizzo.

Nel caso in esame, è possibile affermare che lo studio di MS è stato svolto ad un Livello 3 di approfondimento, quantificando le variazioni in termini di frequenza, durata e intensità che un moto sismico di base subisce attraversando gli strati più superficiali, fino a raggiungere la superficie. Tali valutazioni hanno portato alla **determinazione dei Fattori di Amplificazione** in corrispondenza delle aree soggette allo studio; in particolare, sono state effettuate modellazioni numeriche bidimensionali rappresentative della sismo-stratigrafia media del territorio. La costruzione dei modelli è stata condotta utilizzando le numerose prove geognostiche condotte e di seguito illustrate.

Alla luce delle analisi effettuate e dei risultati ottenuti, è stato possibile rivisitare lo studio di MS di Livello 1, precedentemente svolto dal sottoscritto.

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

6 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI DA INDAGINI PREGRESSE E DI NUOVA REALIZZAZIONE

6.1 Indagini pregresse e di nuova realizzazione

Durante la realizzazione dello studio di MS di livello 1, consultando diverse fonti, sono state raccolte un significativo numero di indagini pregresse, e realizzate nuove prove sismiche. Ad oggi, al fine di integrare le informazioni relative alla risposta sismica dei terreni, durante lo studio di MS di livello 3, sono state condotte nuove misure geofisiche in prossimità dei punti ritenuti più significativi.

In particolare, sono state effettuate e catalogate in più rispetto al Livello 1:

- **n° 18 registrazioni di rumore sismico ambientale a stazione singola con elaborazione H.V.S.R. (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)** per individuare le frequenze di risonanza dei depositi;
- **n° 16 prospezioni sismiche con tecnica passiva Re.Mi. (*Refraction Microtremor*)** sviluppate in *array* lineari con geofoni ad asse verticale per la ricostruzione sismo-stratigrafica del sottosuolo tramite la misura della velocità di propagazione delle onde S;
- **campagna geofisica in n.7 punti mediante l'applicazione della metodologia elettromagnetica** allo scopo di individuare eventuali anomalie presenti nel sottosuolo dovute a cavità sotterranee.

6.2 Metodologia di elaborazione delle nuove indagini

6.2.1 Indagine sismica di tipo passivo a stazione singola (H.V.S.R.)

La tecnica di sismica passiva (tecnica dei rapporti spettrali o H.V.S.R., *Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non richiede nessun tipo di perforazione, né stendimento di cavi, né energizzazioni esterne diverse dal rumore ambientale che in natura già esiste ovunque. I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la **frequenza di risonanza del sito**, che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale. Si dovranno adottare adeguate precauzioni nel costruire edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno, per evitare l'effetto di *doppia risonanza*, estremamente pericoloso per la stabilità degli stessi;
- la **frequenza fondamentale di risonanza di un edificio**, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito, sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito (*free field*) e capire se, in caso di sisma, la struttura potrà essere o meno a rischio;
- 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. Sarà quindi possibile calcolare la $V_{s,30}$ e la relativa categoria di sottosuolo come esplicitamente richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 17/01/2018;
- la **stratigrafia del sottosuolo** con un *range* di indagine compreso tra 0,5 m e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 m. Il principio su cui si basa la

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostante per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e la densità del mezzo stesso.

Le basi teoriche della tecnica H.V.S.R. si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremori. La forma di un'onda registrata in un sito x da uno strumento dipende:

- dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s ;
- dal percorso dell'onda dalla sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda);
- dalla risposta dello strumento.

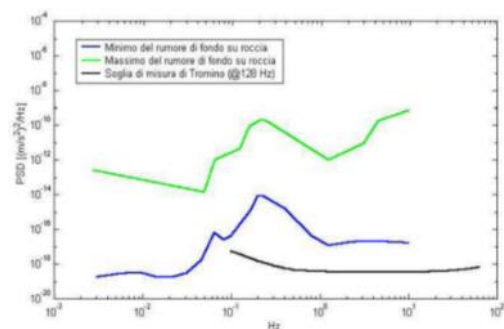
Possiamo scrivere questo come:

segnale registrazione al sito x = sorgente * effetti di percorso * funzione trasferimento strumento

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche *microtremore* poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi, poiché il rumore non è generato *ad hoc*, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva. Nel tragitto dalla sorgente s al sito x le onde elastiche (sia di terremoto che microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che, se da un lato l'informazione riguardante la sorgente è persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica, è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni concernenti il percorso del segnale e, in particolare, relative alla struttura locale vicino al sensore. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene informazioni. Questa informazione è però sepolta all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune.

Una di queste tecniche è la teoria dei rapporti spettrali o semplicemente H.V.S.R., che è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali del sottosuolo, informazione di notevole importanza nell'ingegneria sismica.

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un tromometro digitale della ditta Moho S.r.l. modello *Tromino® ENGY-Plus* che rappresenta la nuova generazione di strumenti ultra-leggeri e ultra-compatti in alta risoluzione adatti a tali misurazioni. Lo strumento racchiude al suo interno tre velocimetri elettrodinamici ortogonali tra loro ad alta definizione con intervallo di frequenza compreso tra 0,1 Hz e 256 Hz. Nella figura a fianco si riporta la curva di rumore di Tromino® a confronto con i modelli standard di rumore sismico massimo (in verde) e minimo (in blu) per la Terra. Gli spettri di potenza sono espressi in termini di accelerazione e sono relativi alla componente verticale del moto.



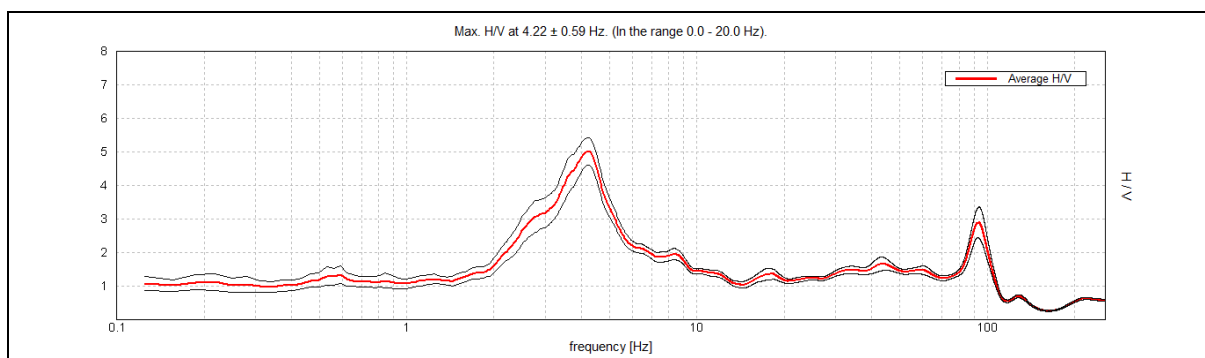
Sintesi dei risultati

Le frequenze di risonanza del terreno fanno parte degli "effetti di sito" che, assieme all'instabilità per azione sismica, caratterizzano la vulnerabilità del territorio quale elemento indispensabile per la stima del rischio sismico. In linea di principio, visto che il suolo è assimilabile ad un corpo

viscoelastico, è possibile misurarne le frequenze proprie di oscillazione in ogni punto: infatti, le frequenze sono determinate dalle proprietà meccaniche e, in maniera secondaria, dalla morfologia attorno al punto di misura.

Analizzando la “Carta delle frequenze” e la “Carta delle indagini” successivamente descritte, si vede come sia stato indagato integralmente il territorio previsto dall’incarico e come le misure H.V.S.R. eseguite e recuperate siano state distribuite in modo da interessare completamente il territorio di Solagna: la distribuzione delle prove è stata ottimizzata per vedere il “modo” di rispondere dei vari depositi alle sollecitazioni sismiche.

Durante le fasi interpretative delle misure HVSR si è cercato di individuare la frequenza “fondamentale” considerando la finestra frequenziale di 0,1-20 Hz, che risulta essere quella di normale interesse ingegneristico-strutturale. Nello specifico, la frequenza fondamentale corrisponde a quella con il valore più basso (f_0) e il rapporto H/V più alto. Nella tabella seguente è riportata esclusivamente la sintesi dei risultati delle misure H.V.S.R. eseguite in questa fase mediante Tromino® da cui è possibile osservare che nel comune di Solagna è stato possibile osservare un comportamento generalmente omogeneo in cui è visibile quasi sempre una frequenza di risonanza alle medio-alte frequenze con ampiezze elevate e associabili al passaggio con il bedrock geofisico.



CODICE PROVA	F ₀ “FONDAMENTALE” [Hz] (INTERVALLO 0,1 - 20 Hz)	CONDIZIONE DI AMPLIFICAZIONE (INTERVALLO 0,1-20 Hz)
024101P44	8.44	si
024101P45	7.2	si
024101P46	4.06	si
024101P47	12.78	si
024101P48	4.22	si
024101P49	5.31	si
024101P50	5.19	si
024101P51	Misura disturbata	
024101P52	19	si
024101P53	5.59	si
024101P54	3.75	si
024101P55	0	no
024101P56	8.03	si
024101P57	4.18	si
024101P58	13.47	si
024101P59	12.94	si
024101P60	Misura disturbata	
024101P61	4.28	si

In allegato fuori testo sono invece riportati i report dei risultati di tali prove. In particolare, per ogni misura sono stati indicati:

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

- i grafici rappresentanti il rapporto spettrale H/V registrato e l'andamento delle tre componenti spettrali;
- la time history del segnale e la documentazione fotografica;
- la qualità del segnale acquisito in base al progetto SESAME (*Linee guida 2005*).

6.2.2 Indagine sismica di tipo passivo in array (Re.Mi.)

È noto che la propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati e trasversalmente isotropi, avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più un'unica velocità, ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d'onda. Queste lunghezze d'onda interessano il terreno a diverse profondità e risultano influenzate dalle caratteristiche elastiche che sono variabili, appunto, con la profondità. Questo comportamento viene definito *dispersione in frequenza* ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie. Ovviamente, le lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario, le lunghezze d'onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte, rimangono nelle immediate vicinanze della superficie. I metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde di superficie si basano su modelli fisico-matematici nei quali il sottosuolo viene schematizzato come una serie di strati con caratteristiche elastiche lineari.

La procedura Re.Mi. è un metodo di prospezione sismica sviluppato presso l'Università di Reno in Nevada (Louie, 2001) e viene classificato come *metodo passivo* in quanto utilizza il rumore ambientale. I vantaggi derivanti da questo metodo sono molteplici poiché è veloce e semplice da usare in fase di acquisizione, raggiunge una buona profondità e risoluzione d'indagine ma, soprattutto, permette di ottenere migliori risultati in ambienti particolarmente urbanizzati. La fase di acquisizione deve essere effettuata con una serie di accorgimenti e precauzioni da adottare in sito e nella pianificazione della registrazione. Tutto è finalizzato alla registrazione di dati contenenti la miglior informazione possibile riguardo alla propagazione delle onde di Rayleigh con buon rapporto segnale-rumore.

Il rumore incoerente, cioè di tipo casuale, rappresenta nel caso Re.Mi. la fonte del segnale utile che si vuole registrare. I microtremori generati dall'ambiente si propagano nel suolo e di questi si cerca di distinguere il modo fondamentale di vibrazione dell'onda di Rayleigh dai modi superiori e dall'*aliasing* spaziale: risulta quindi necessario soddisfare la condizione di *omnidirezionalità* delle sorgenti, cioè si suppone che il rumore ambientale provenga sostanzialmente da tutte le direzioni.

I tempi di registrazione dei microtremori sono decisamente più elevati rispetto alle indagini di tipo attivo. La registrazione viene analizzata in finestre temporali che variano dai 10 ai 30 secondi. Sono da considerare la lunghezza dello stendimento L e la distanza intergeofonica Δx , che agisce sul segnale come una specie di filtro in frequenza; supponendo, infatti, che il segnale arrivi da tutte le direzioni, maggiore è la spaziatura, minore sarà la frequenza del segnale utile campionabile e viceversa: se la frequenza è più bassa, aumenta la profondità d'indagine. La fase più delicata è quella del *data processing*, che consiste nel trattamento dei dati acquisiti con l'obiettivo di stimare la velocità di fase delle onde di Rayleigh (V_r), che sono correlabili con le velocità V_s di propagazione delle onde S ($V_s \approx 1,1 V_r$). Le varie tecniche di processing trasformano l'informazione registrata nel dominio $x-t$ (spazio tempo), in un dominio dove l'energia associata all'evento è funzione della frequenza e di altre variabili. Tutto questo allo scopo di localizzare attraverso lo spettro la densità di energia maggiore, alla quale sono di solito associate le onde di Rayleigh. Con procedura manuale vengono selezionati dei punti sullo spettro, che andranno a formare la curva di dispersione sperimentale.

La scelta di questi valori, denominata *picking*, è condizionata da alcune indicazioni ma è imprescindibile dall'abilità e dall'esperienza dell'interprete anche in base ad altre conoscenze in merito al sito in esame.

Per ottenere un elevato dettaglio del segnale, il *sampling rate* utilizzato è stato di 512 Hz. La durata (lunghezza temporale) del segnale registrato per ogni misura è stato di circa 6 minuti. Il software utilizzato per l'analisi spettrale è [Grilla v.9.7.0 release 2021](#).

Data la necessità di analizzare con elevato dettaglio le basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 10 Hz), sono stati utilizzati n° 16 geofoni verticali a 4,5 Hz uniti in *array* lineari totalmente digitali (*SoilSpy Rosina*). Ogni geofono è munito di un digitalizzatore che converte il segnale e lo trasmette al sismografo tramite un'interfaccia USB. Tale sistema permette di avere elevati rapporti di rumore, un perfetto sincronismo e una estrema leggerezza. Tutti gli stendimenti eseguiti non presentavano sostanziali variazioni di quota e, quindi, i siti indagati sono stati considerati a sviluppo orizzontale.

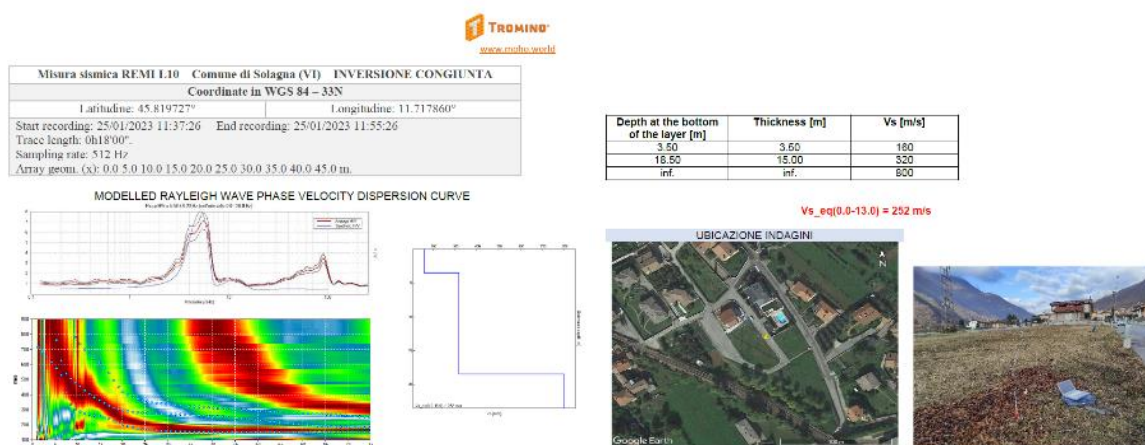


Sintesi dei risultati

Come detto in precedenza, nel territorio comunale sono state fatte una serie di misure sismiche di superficie (*array* sismici) per approfondire le conoscenze sulle caratteristiche sismiche dei litotipi costituenti il territorio in esame: in particolare, esse sono state utilizzate per determinare la velocità di propagazione delle onde di taglio S (V_s) dei terreni testati.

L'interpretazione degli *array* è stata eseguita in modo congiunto con le misure H.V.S.R. accoppiate ad esse. L'utilizzo incrociato delle due tecniche sismiche ha permesso di ottenere un modello sismo-stratigrafico del sottosuolo robusto e affidabile in corrispondenza della zona d'interesse. L'indagine Re.Mi. ha individuato le discontinuità sismiche superficiali e stimato le velocità di propagazione delle onde S mentre la prospezione passiva a stazione singola (H.V.S.R.), ha stimato il grado di rigidità della copertura e del substrato di riferimento.

A seguire si riporta un esempio di profilo verticale delle onde di taglio (V_s) e di grafico delle curve di dispersione rappresentativa del comune di Solagna. Infatti, le indagini eseguite sono risultate coerenti tra loro, mostrando un modello sismo-stratigrafico omogeneo nei vari litotipi investigati. Si rimanda all'allegato fuori testo per la lettura completa delle schede con i risultati di ogni singola prova.



6.2.3 Indagine elettromagnetica

Il metodo FDEM (Frequency Domain Electro-Magnetic) si basa sul principio dell'induzione elettromagnetica in un semi-spazio omogeneo ed è regolato dalle note equazioni di Maxwell. Una bobina trasmittente genera un campo magnetico primario (H_p) che si propaga nello spazio circostante e nel sottosuolo. Questo campo magnetico variabile, attraversando un conduttore (il terreno), induce in esso delle correnti elettriche. Le correnti indotte si propagano nel mezzo generando un campo magnetico secondario (H_s) che è rilevato in superficie da una bobina ricevente posta a una distanza fissa da quella trasmittente.

Il campo magnetico secondario avrà una differenza di fase rispetto al campo magnetico primario che dipende dalla conducibilità del terreno. Dall'analisi del rapporto H_s/H_p si ottengono quindi delle informazioni sulle proprietà elettriche di quest'ultimo.

Il campo magnetico secondario misurato nella bobina ricevente è una funzione complessa che dipende fondamentalmente dalla spaziatura delle due bobine, dalla frequenza di trasmissione ($\omega=2\pi f$) e dalla conducibilità del mezzo attraversato.

Sotto certe condizioni, definite come basso numero d'induzione, si osserva che il campo magnetico secondario diventa una funzione semplice di queste variabili e pertanto può essere facilmente misurato.

Gli strumenti FDEM sono comunemente impiegati per prospezioni geofisiche superficiali, per la ricerca di ordigni bellici inesplosi (UXO), per applicazioni in campo ambientale, come la ricerca di rifiuti interrati e di alcune forme di inquinamento superficiale e anche in campo archeologico (ricerca di strutture antropiche sepolte). Alcuni di questi operano a frequenza di trasmissione fissa, altri possono impiegare più frequenze contemporaneamente.

Il risultato di un rilievo FDEM è restituito sotto forma di mappe tematiche che riguardano: la **componente in fase (ppt)** del campo magnetico secondario (particolarmente sensibile alla presenza di forti conduttori come, ad esempio, corpi metallici) e la **conducibilità elettrica (mS/m)** del terreno.

Le misure vengono effettuate lungo profili paralleli (griglie di acquisizione regolari) cercando di coprire l'area di studio in maniera omogenea.

Strumentazione utilizzata

I rilievi elettromagnetici sono stati effettuati con lo strumento CMD-Explorer della GF Instruments, in grado di misurare contemporaneamente conducibilità elettrica e componente in fase su coppie di sensori posti a distanze variabili tra loro. Il sistema è disponibile in diverse configurazioni (HIGH e LOW depth range) che consentono di raggiungere diverse profondità a seconda dell'orientamento dei sensori; in questo caso è stata



utilizzata la configurazione HIGH depth range che consente di investigare a tre livelli di profondità da 2 a 6 m di profondità dal p.c. Lo strumento utilizza la generazione, da parte di una bobina trasmittente (Tx), di un campo elettromagnetico detto "primario" (H_p), che induce nel mezzo attraversato (sottosuolo e, ovviamente, anche gli eventuali corpi presenti all'interno di esso) una circolazione di corrente che a sua volta genererà un ulteriore campo elettromagnetico detto "secondario" (H_s), la cui intensità sarà proporzionale alle caratteristiche fisiche del mezzo attraversato (in particolare la conduttività). La bobina trasmittente (Tx) immette nel terreno una corrente circolare alternata (che rappresenta il campo primario), mentre quella ricevente (Rx) misura l'intensità del campo magnetico secondario dovuto alla variazione di corrente indotta all'interno del mezzo attraversato. A parità di

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

campo elettromagnetico primario immesso nel sottosuolo, l'intensità di quello secondario sarà tanto più elevata quanto più alta è la conducibilità (ς) del mezzo attraversato. Inoltre, l'intensità del campo elettromagnetico secondario dipende fortemente anche dalla distanza tra Tx e Rx, e dalla frequenza del segnale trasmesso.

Le grandezze restituite dalla strumentazione sono classificabili quindi in due componenti:

- Componente in quadratura (mS/m): proporzionale allo sfasamento tra il campo primario e quello secondario e pertanto proporzionale alla conducibilità elettrica del sottosuolo.
- Componente in fase (ppt): proporzionale all'intensità del campo elettromagnetico ricevuto dallo strumento, quindi sensibile alla presenza di parti metalliche (materiale con alte concentrazioni di ioni metallici, tubazioni, fusti, serbatoi, ecc.) oppure indice di materiali quasi isolanti (cemento, calcestruzzo, rifiuti, laterizi, materiale organico).

La componente in fase risulta utile soprattutto nella ricerca di corpi metallici superficiali o nel primo sottosuolo, oggetti tubi e condotte metalliche sepolte e, in depositi di rifiuti, di detriti ferrosi e/o metallici.

Nel caso della componente in fase una elevata ampiezza (sia essa positiva o negativa) indica la presenza di una sorgente di anomalia più "forte", ossia presenza di oggetti più conduttivi, o più magnetici. La polarità e l'ampiezza delle anomalie inoltre dipende anche dall'orientazione del corpo rispetto al campo magnetico terrestre e rispetto all'orientazione dei sensori.

Acquisizione ed elaborazione dei dati

Le misure sono state eseguite con distanza tra i profili di 1 m con la configurazione HIGH depth range che permette di raggiungere una profondità massima di circa 6 metri dal piano campagna.

Lo strumento è equipaggiato con una scheda di acquisizione e antenna GPS, che consente di localizzare in maniera assoluta i punti di misura. I dati registrati comprendono sia le misure di conducibilità elettrica apparente in mS/m sia la componente in fase rispetto al campo indotto in ppt; lo strumento fornisce una misura simultanea della conducibilità elettrica e della componente in fase acquisita dai 2 sensori.

L'elaborazione dei dati ha previsto una fase preliminare di data-processing sui dati acquisiti durante la campagna, in modo tale da effettuare una pulizia dei dati acquisiti. Successivamente, si è proceduto alla rappresentazione dei dati della conducibilità e della componente in fase. Si è inoltre proceduto con la conversione della conducibilità a resistività. L'elaborazione delle mappe elettromagnetiche è stata effettuata attraverso il software Surfer 13 (Golden Software).

6.3 Modello geosismico del sottosuolo

La valutazione della risposta sismica locale, sia con approccio semplificato sia con modellazioni avanzate, non può prescindere da un'accurata ricostruzione del modello geosismico del sottosuolo tramite l'utilizzo di indagini geofisiche specifiche. Le misurazioni effettuate in array (Re.Mi.) ed a stazione singola (H.V.S.R.), hanno permesso di ricostruire con una certa precisione i modelli sismo-stratigrafici locali. Da una parte, i segnali si presentano con un'elevata coerenza nel modo fondamentale nelle misure Re.Mi. e, dall'altra, privi di rumore di fondo nelle misure a stazione singola. Inoltre, la presenza di un segnale caratterizzato da un ricco spettro frequenziale ha permesso di ottenere, nella maggior parte dei casi, un'elevata profondità di penetrazione per quanto riguarda le misure in array.

La profondità del *bedrock* sismico ed il grado di rigidità della copertura, come ben noto, contribuiscono in maniera determinante nella valutazione della risposta sismica locale, amplificando

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

gli effetti in modo considerevole. Tali amplificazioni saranno tanto più marcate quanto più elevati sono i contrasti di rigidità tra i vari sismo-strati.

I risultati hanno evidenziato un modello geologico del sottosuolo generalmente regolare, soprattutto per quanto riguarda le rigidità dei litotipi investigati e gli spessori della copertura più superficiale che, come ben noto, contribuisce in maniera determinante nella valutazione della risposta sismica locale, amplificando gli effetti in modo considerevole. Tali amplificazioni saranno tanto più marcate quanto più elevati sono i contrasti di rigidità tra i vari sismostrati.

L'integrazione di tutte le informazioni tratte dalla geologia di superficie e dai dati di sottosuolo provenienti dai sondaggi e dalle indagini realizzate nell'ambito del presente studio hanno permesso la ricostruzione di un modello geologico e sismo-stratigrafico del territorio comunale, le cui caratteristiche vengono esposte a seguire.

1. Il comune di Solagna è caratterizzato da una morfologia complessa, distinguibile in due distinte zone: una montuosa/collinare e una pianeggiante;
2. dal punto di vista litologico, nella zona settentrionale è caratterizzata da substrati geologici affioranti appartenenti alle diverse formazioni descritte nei paragrafi precedenti. Dal punto di vista sismico, non sono state evidenziate differenze in termini di velocità tra i vari litotipi indagati in quanto si presentano, generalmente, con un grado di rigidità di circa 500-600 m/s per 10-15 m di spessore e poi passano a velocità delle onde S maggiori di 800 m/s;
3. procedendo verso il raccordo pianura collina, i substrati appaiono celati da coperture ghiaiose-limose e/o ghiaiose argillose di falda detritica, eluvio-colluvio e di conoide con spessori variabili da pochi metri a circa 10-15 m dal p.c. locale. In tale contesto, le misure HVSR hanno evidenziato frequenze di risonanza maggiori di 7 Hz e con ampiezze elevate, associabili al contatto con il bedrock geofisico. Le velocità delle coperture sono variabili da 160-180 m/s nel primo sottosuolo, per poi aumentare a circa 350-380 m/s in profondità;
4. infine, per i materiali che costituiscono i terrazzi di divagazione del fiume Brenta e gli attuali depositi fluviali, si sono evidenziate condizioni stratigrafiche (copertura ghiaiosa di origine fluviale - sovrastante il substrato) tali da poter ipotizzare amplificazioni del moto sismico in superficie. Infatti, è presente una risonanza alle medio frequenze (circa 3-6 Hz) associabile al contatto stratigrafico tra la copertura sedimentaria, caratterizzata da una velocità di propagazione delle onde S variabile da 350 m/s e la sottostante formazione rocciosa più o meno alterata. Gli spessori massimi del materasso alluvionale sono prossimi a 25-35 m dal p.c. locale.

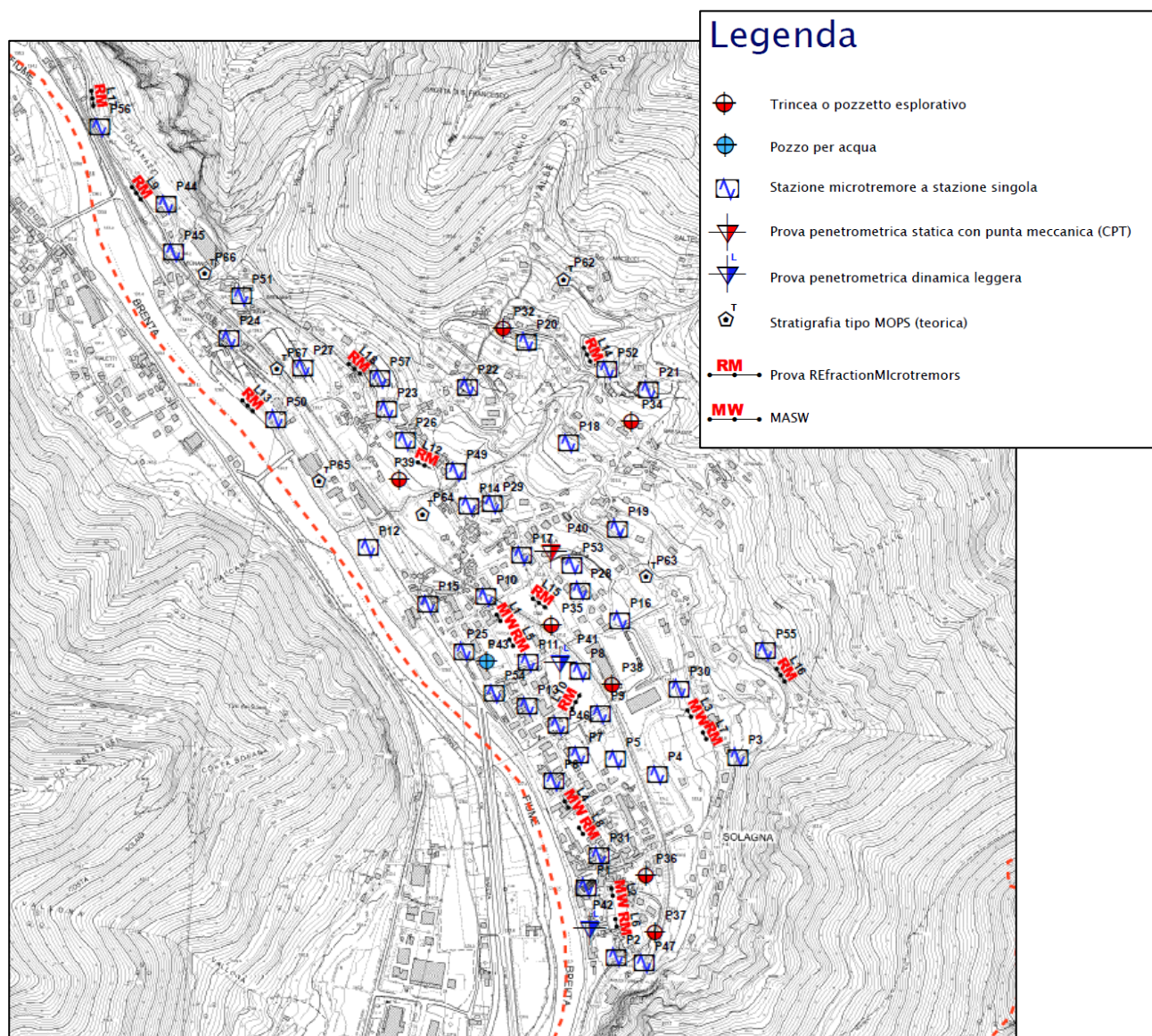
7 ELABORATO CARTOGRAFICI DI LIVELLO 1

7.1 Carta delle indagini

Si tratta della cartografia elaborata sulla base della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:10.000, con ubicate le indagini eseguite in questa fase e quelle desunte da lavori pregressi eseguiti nel comune di Solagna. In particolare, sono state ubicate le indagini provenienti da:

- Microzonazione sismica di Livello 1
- Studi geologici pregressi raccolti presso l'Ufficio Tecnico Comunale;
- Indagini geognostiche di nuova realizzazione.

Nella figura seguente si riporta un estratto della “Carta delle indagini” prodotta per il presente lavoro che dimostra come siano state indagate, in modo dettagliato, le aree oggetto del presente studio; le indagini di nuova realizzazione sono state schedate, informatizzate e allegate fuori testo mentre quelle pregresse inserite nel supporto informatico allegato.



7.2 Carta delle frequenze

La misura delle vibrazioni ambientali (note anche come rumore sismico ambientale o microtremori) o della sismicità di fondo (*weak motion*) consente di analizzare la variazione della risposta sismica di un sito al variare delle condizioni litostratigrafiche.

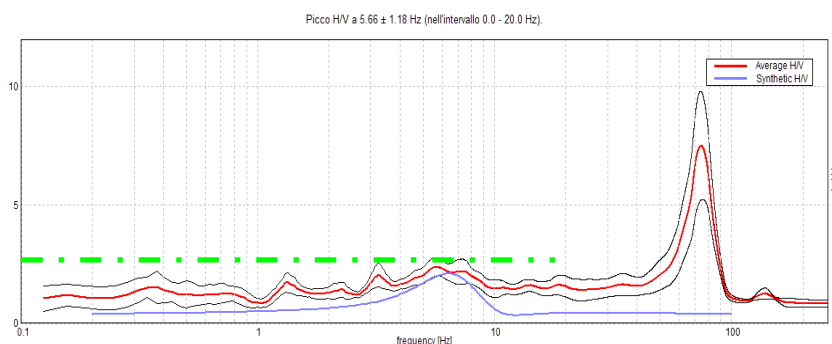
Durante le indagini di MS dell'area aquilana dopo il terremoto del 6 aprile 2009, i risultati di tali analisi si sono rilevati estremamente utili sin dalle prime fasi di elaborazione delle carte di Livello 1.

L'analisi dei microtremori attraverso la tecnica *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (H.V.S.R.) consente di mettere in luce fenomeni di risonanza sismica e di stimare le frequenze alle quali il moto del terreno può essere amplificato (frequenza fondamentale di risonanza del terreno, F_0). Il metodo consente inoltre di valutare qualitativamente l'entità dell'amplificazione (ampiezza del picco H.V.S.R. alla frequenza F_0) - anche se l'ampiezza del picco H.V.S.R. è una grandezza da interpretare con cautela - e di fornire una stima indicativa sulla profondità del contrasto di impedenza che causa la risonanza sismica. I risultati delle indagini H.V.S.R. da microtremori hanno consentito di realizzare la Carte delle Frequenze e hanno fornito informazioni utili a definire e delineare la Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS), hanno dato informazioni su locali criticità e sono stati utili nella pianificazione delle indagini lineari.

I siti selezionati per le indagini sismologiche sono stati distribuiti in corrispondenza delle differenti unità litologiche presenti nell'area, al fine di verificare e valutare l'influenza dei litotipi e delle loro geometrie, sulla risposta sismica locale. In allegato fuori testo sono riportate le schede di sintesi dei risultati di tali prove.

Dal punto di vista ingegneristico-strutturale il valore di risonanza del sottosuolo rappresenta un parametro fondamentale per una corretta progettazione sismica delle strutture. È ormai consolidata, sia a livello accademico sia professionale, l'ipotesi che le strutture subiscano le sollecitazioni sismiche maggiori quando c'è coincidenza tra la frequenza di vibrazione naturale del terreno investito da un'onda sismica e quella naturale dell'edificio. Si dovrà quindi porre estrema attenzione nell'edificare strutture aventi gli stessi periodi di vibrazione del terreno.

Tutte le valutazioni sulle condizioni di amplificazione di sito sono state effettuate considerando la finestra frequenziale di 0,1-20 Hz, in quanto tali frequenze risultano essere quelle di normale interesse ingegneristico-strutturale. Inoltre, le amplificazioni sismiche considerate nella curva H/V sono state quelle con un rapporto superiore a 2: infatti, in base al progetto [SESAME](#), che di fatto fornisce le linee guida per misure sismiche H.V.S.R., il rapporto sotto il quale non si devono considerare le amplificazioni sismiche dovute ad effetti locali è fissato a 2 (linea tratteggiata nella figura sotto).



Sono attribuite condizioni di amplificazione stratigrafica per quei siti in cui la curva mediana di interpolazione del grafico presenta picchi con ampiezza H/V superiore a 2 (criterio SESAME, 2004; Albarello e Castellaro, 2011) all'interno del campo di frequenze compreso tra 0,1 e 20 Hz

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

Nell'ambito del presente studio, le frequenze di risonanza sono state ottenute utilizzando il software applicativo Grilla in dotazione a Tromino®, secondo la procedura descritta in Castellaro et al. (2005) e Albarello e Castellaro (2011), che prevede quanto segue:

- larghezza delle finestre di analisi pari a 20 s;
- lisciamento secondo una finestra triangolare con ampiezza pari al 10% della frequenza centrale;
- rimozione delle finestre con rapporto STA/LTA (media a breve termine/media a lungo termine) superiore a 2;
- rimozione manuale di eventuali transienti ancora presenti;
- verifica dell'affidabilità delle curve H/V secondo i criteri di qualità SESAME (2004).

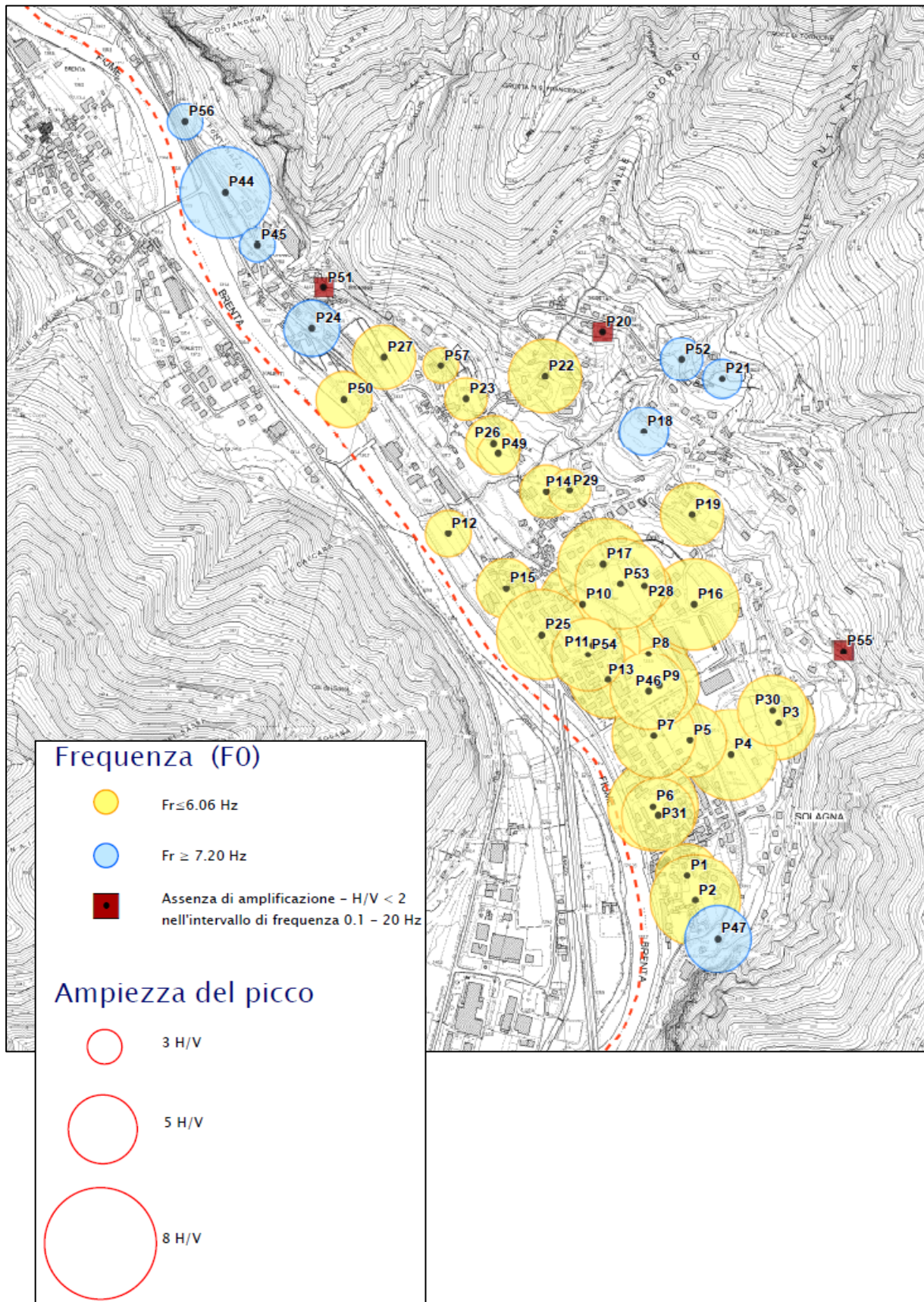
Sintesi dei risultati

In sostanza, questa carta, elaborata sulla base della C.T.R. alla scala 1:10.000, evidenzia come la frequenza caratteristica di risonanza di un sito sia variabile e condizionata dai rapporti litostratigrafici che si sviluppano con la profondità. Non viene considerata l'amplificazione dovuta agli effetti topografici e alle morfologie complesse sepolte.

I risultati delle analisi sono stati cartografati, come visibile nell'estratto della "Carta delle frequenze" riportata nella pagina seguente, tramite dei cerchi di diverso colore e con un diametro proporzionale all'ampiezza del picco. Le misure che non presentano frequenza di risonanza, sono state contrassegnate da un quadrato bordeaux.

Osservando la Carta delle frequenze, realizzata tramite le misure di rumore ambientale a stazione singola eseguite per il presente studio, è possibile formulare alcune interessanti osservazioni:

- il comune di Solagna presenta frequenze di risonanza caratterizzate da rapporti H/V elevati, per cui risulta possibile ipotizzare rilevanti amplificazioni del moto sismico in superficie;
- è evidente una differenza tra la zona collinare e la pianura alluvionale: in particolare, a ridosso dei rilievi montuosi, l'esigua copertura crea delle elevate risonanze con picchi a frequenze maggiori di 7 Hz, correlabili al passaggio copertura-substrato a profondità massime di 40 m dal p.c. locale;
- al contrario, man mano che procediamo verso -ovest, le misure HVSR mostrano picchi alle medio-basse frequenze, in quanto lo spessore dei depositi alluvionali a copertura del bedrock aumenta;
- infine, si evidenzia un'eccezione per la porzione a nord-ovest, in prossimità del confine comunale: in tal caso, nei depositi fluviali attuali e di conoide, si sono registrati picchi H/V alle alte frequenze con comportamento affine a quello osservato nei depositi di versante, a testimoniare spessori esigui della copertura rispetto al resto della pianura alluvionale.



Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

7.3 Carta geologico tecnica per la microzonazione sismica

La “Carta geologico-tecnica” (CGT) per la microzonazione sismica serve per individuare gli elementi geologici che, in prospettiva sismica, potrebbero assumere un ruolo rilevante nell’esaltazione degli effetti di un terremoto.

Questa carta, che dev’essere considerata una revisione di quella prodotta per il livello 1, è stata elaborata sulla base della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:10.000, e ha riguardato l’integrazione e la rivisitazione in chiave sismologica dei contenuti geolitologici, geomorfologici e idrogeologici contenuti nel P.A.T.I. comunale, alla luce anche delle nuove indagini condotte.

Per l’elaborazione della “Carta geologica-tecnica” sono state, quindi, analizzate le informazioni di carattere geologico disponibili e, sulla base delle caratteristiche meccaniche e degli ambienti genetico-deposizionali dei terreni, le varie unità litologiche sono state accorpate in classi distinte e rappresentative dei depositi costituenti Solagna.

Alla fine, sono state create due unità principali (“Terreni di copertura” e “Substrato geologico”) che contengono una serie di unità litologiche derivate dalla selezione e, talora, dall’accorpamento delle litologie locali.

Per evidenziare i possibili effetti di amplificazione stratigrafica (contrasto di impedenza tra mezzi geologici differenti) e predisporre le informazioni utili per la MOPS (Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica), sulla base degli studi specifici di carattere geofisico, sono stati individuati i contatti tra litologie che possono rispondere in modo differente alla sollecitazione sismica: le indagini hanno verificato che sono presenti risposte sismiche variabili in relazione ai differenti ambienti geomorfologici (orli di scarpate morfologiche, creste, terrazzi fluviali, anticlinali e sinclinali e valli sepolte).

In sostanza, per riconoscere, in via preliminare, le aree soggette o non soggette ad amplificazione sismica e quelle di attenzione per instabilità, in questa carta sono state indicate le seguenti situazioni:

- delimitazione del substrato geologico (roccia) dai terreni di copertura: le unità litologiche individuate dal P.A.T. e nella MS1 sono state riviste sulla base delle conoscenze dei luoghi, delle prove eseguite, ed uniformate alle indicazioni delle linee guida della Protezione Civile;
- irregolarità del rilievo marcate: orli di scarpata, creste, orli di terrazzo fluviale, che possono esaltare gli effetti di amplificazione topografica;
- elementi tettonico-strutturali ricavati dai cataloghi nazionali e faglie ricavate dal database ITHACA;
- informazioni sulla profondità della falda ricavate da indagini pregresse e sulla profondità di pozzi per acqua e sondaggi geognostici.

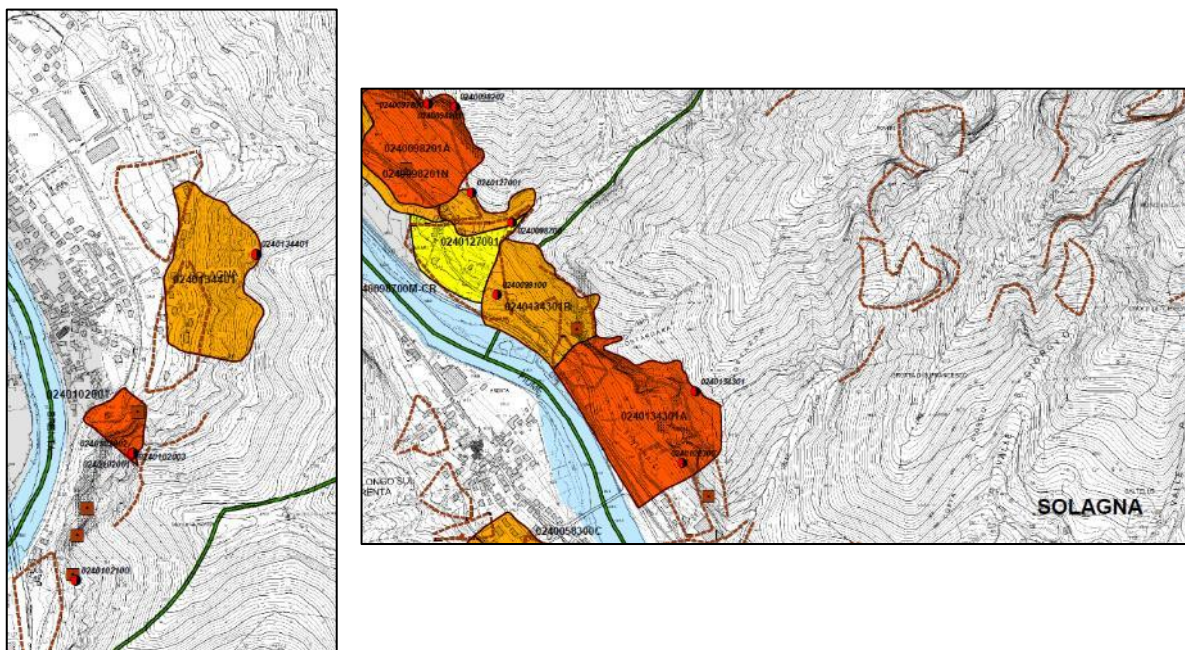
Per evidenziare i possibili effetti di amplificazione stratigrafica (contrasto di impedenza tra mezzi geologici differenti, ovvero effetti litologico-stratigrafici), sulla base delle carte litologiche del PAT associate alla consultazione della cartografia geologica generale, sono stati individuati i contatti tra litologie che possono rispondere in modo differente alla sollecitazione sismica.

Per la ricostruzione del modello geologico si sono, inoltre, consultate le sezioni geologiche redatte durante lo studio di Livello 1, a cui si rimanda per eventuali approfondimenti.

In conclusione, facendo riferimento alle descrizioni litologiche del paragrafo 3.2, e sulla base delle indagini geognostiche redatte, le unità riportate nella tabella precedente sono state accorpate e associate ai seguenti litotipi:

<i>Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica</i>	<i>Carta Geolitologica del P.A.T.I. ed MS1 (localmente modificata)</i>
LPS	<u>Formazioni del Rosso Ammonitico e del Biancone</u>
LP	<u>Dolomia, Calcari Grigi</u>
GMfd + GCec + GCcz	<u>Materiali sciolti per accumulo detritico di falda a pezzatura grossolana:</u> costituiscono i depositi maggiormente rappresentati, assieme ai depositi alluvionali, del fondovalle del Brenta. Sono rappresentati da depositi sciolti di materiale grossolano, con granulometria compresa tra le ghiaie ed i ciottoli, quasi sempre a spigoli vivi, con ottime caratteristiche geotecniche e permeabilità molto elevata.
GMfg + GCtf	<u>Materiali sciolti di deposito recente ed attuale dell'alveo mobile e delle aree di esondazione recente:</u> depositi di origine fluviale concentrati in corrispondenza dell'alveo attivo del Brenta, sono costituiti da ghiaie e sabbie con modeste frazioni di materiali fini non ancora stabilizzati dalla vegetazione o da interventi antropici di regimazione.
GPes	<u>Materiali sciolti di alveo fluviale recentemente stabilizzati dalla vegetazione:</u> si tratta di depositi analoghi ai precedenti ma non più soggetti a fenomeni di erosione e di trasporto grazie alla stabilizzazione ottenuta sia per la vegetazione sia per le opere di regimazione idraulica finalizzata alla riduzione del rischio.
RIzz	<u>Depositi di riporto antropico</u> in corrispondenza dei terrapieni ferroviari.

Per quanto riguarda le zone di versante potenzialmente instabili, sono state inserite le aree soggette a fenomeni gravitativi descritte nello studio di MS1 e, inoltre, si è consultato anche il P.A.I. del bacino idrografico del fiume Brenta, di cui si riporta un estratto nell'immagine seguente.



La focalizzazione delle onde sismiche in corrispondenza di creste, cime o cigli di scarpata è il fenomeno che sta alla base dell'amplificazione topografica. Nella carta prodotta sono state

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

evidenziate le irregolarità morfologiche più marcate che potrebbero produrre particolari amplificazioni sismiche inserendo gli orli di scarpata morfologica naturale, terrazzi fluviali, creste, e valli sepolte.

Relativamente ai lineamenti tettonico-strutturali, la consultazione del catalogo ITHACA ha permesso di ubicare all'interno del territorio comunale n°1 faglia attiva e capace. In accordo con quanto stabilito negli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008), è considerata attiva una faglia che si è movimentata almeno una volta negli ultimi 40.000 anni (parte alta del Pleistocene superiore-Olocene) ed è considerata capace una faglia attiva che raggiunge la superficie topografica, producendo una frattura/dislocazione del terreno; questa definizione si riferisce al piano di rottura principale della faglia (piano su cui avviene la maggiore dislocazione).

In conformità alle linee guida, nel livello 1 di MS, tale faglia era stata indicata come “FAC - Faglia attiva, presunta”, rimandando ad un livello successivo di approfondimento, il loro studio.

Da rilievi geologici condotti dallo scrivente e dall'analisi fotogrammetrica delle aree interessate dalla potenziale fagliazione, **non sono emerse evidenze morfologiche che dimostrano la recente attività ad opera della faglia stessa**. Inoltre, dall'analisi della bibliografia relativa alla faglia in oggetto, si è visto che l'età riportata nel database ITHACA è riferibile al “**Pleistocene generico**”. Dal momento che

- il Pleistocene generico è un'epoca geologica con durata da 2.58 milioni di anni a circa 11.700 anni fa,
- l'arco temporale in cui è collocabile l'ultima attività della faglia, affinché possano ritenersi attiva e capace, è di 40.000 anni,

la probabilità che il lineamento sia da considerarsi “attivo e capace” secondo la definizione degli ICMS è da ritenersi estremamente bassa. Quindi, si è deciso di assegnargli la “non attività” intesa come non capacità di creare deformazione in superficie negli ultimi 40.000 anni.

Per quanto riguarda le cavità sepolte, la consultazione di varie bibliografie e cartografie esistenti come il “catasto regionale per il censimento delle grotte e delle aree carsiche della Regione” ed il Geoportale della provincia di Venezia contenente le cartografie del P.T.C.P. (Piano Territoriale Comunale Provinciale), ha evidenziato la presenza di un notevole numero di cavità carsiche localizzate all'interno delle litologie LP ed LPS (*Dolomia Principale, Calcari Grigi, Rosso Ammonitico e Biancone*) che per la loro natura calcarea ben si prestano a fenomeni di questo tipo.

Pertanto, si è ritenuto importante riportare in carta tali informazioni indicando le litologie suddette come “aree soggetta a cavità” e segnando, come informazioni puntuali, gli imbocchi delle grotte. Inoltre, si è ritenuto opportuno approfondire lo studio di tale instabilità attraverso indagini di tipo elettromagnetico, come mostrato nei capitoli successivi.

Infine, nella CGT, come espressamente richiesto nelle linee guida della protezione civile e negli standard di rappresentazione e archiviazione informatica, è stata riportata la profondità della falda idrica recuperata in un pozzo per acqua.

7.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica

La “Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica” (MOPS) prodotta per il presente studio si presenta come una rivisitazione della MOPS prodotta al Livello 1, in virtù delle nuove indagini condotte, dei rilievi effettuati e delle modellazioni numeriche svolte. Tale carta ha come finalità la suddivisione del territorio comunale nelle seguenti aree:

1. Zone stabili
2. Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali
3. Zone di attenzione per instabilità

Inoltre, in essa sono state inserite le seguenti informazioni:

- misure di rumore ambientale H.V.S.R.;
- elementi morfologici superficiali e sepolti;
- traccia delle sezioni per gli approfondimenti delle amplificazioni topografiche.

La MOPS è stata ricostruita alla Scala 1:10.000 a partire dalla “Carta geologico-tecnica” per la microzonazione sismica precedentemente esposta, integrandone e rivedendone i contenuti.

1. ZONE STABILI

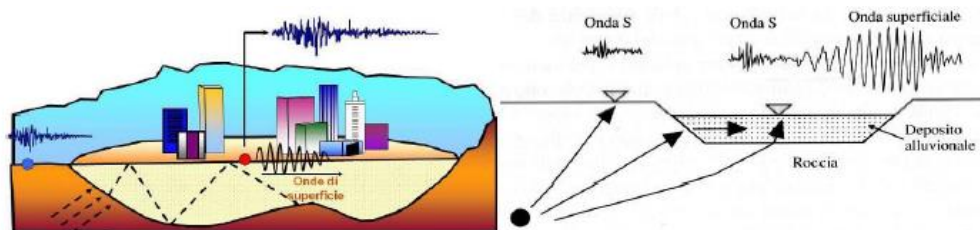
Nel comune di Solagna non sono state individuate zone “stabili”. In sostanza, si noti che l’intero territorio è considerabile come stabile suscettibile di amplificazione sismica.

Infatti, è stato verificato che il moto sismico è modificabile rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante, a causa delle caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche locali.

2. ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI

Il comune di Solagna risulterebbe suscettibile di amplificazioni locali per i seguenti motivi:

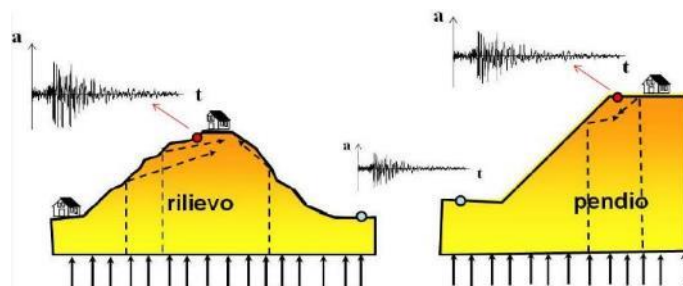
- A. **stratigrafia e caratteristiche dei litotipi**. Come evidenziato nella “Carta geologico-tecnica” e nelle considerazioni fin qui esposte, è stato accertato che sono presenti differenti risposte sismiche variabili in relazione ai diversi ambienti geomorfologici (detrito, roccia, eluvio-colluvio, fluvio-glaciale ecc.) ed al contatto tra le coperture ed il substrato roccioso che si ripercuotono sull’amplificabilità sismica del sito;
- B. **Forme sepolte ed effetti morfologici**. Nei fondivalle sono possibili sia “effetti di valle” associati alle riflessioni multiple causate dall’intrappolamento delle onde sismiche all’interno dei depositi che riempiono le valli, sia amplificazioni stratigrafiche causate dal contrasto di impedenza tra mezzi geologici diversi (per la presenza di materiali sciolti poggianti su substrato roccioso).



Effetti di valle e bordo (2D o 3D)

Effetti legati alla interazione tra onde sismiche e morfologia sepolta con effetti di focalizzazione delle onde sismiche e generazione di onde di superficie in prossimità dei bordi

- C. **amplificazione topografica.** Per quanto riguarda l'amplificazione topografica, è stato qualitativamente coinvolto l'intero territorio collinare/montuoso, senza fare particolari distinzioni, anche perché la normativa vigente in materia di costruzioni (D.M. 17.01.18) permetterebbe di suddividere omogeneamente le aree in condizioni geometriche ben ricostruibili: Solagna è costituito da terreni di natura litoide costituenti pendii con inclinazioni superiori a 15° e dislivelli superiori a 30 m. Il territorio è morfologicamente complesso, quindi non assimilabile ad una condizione monodimensionale e/o piano parallela, pertanto, secondo la normativa è necessario predisporre analisi specifiche di risposta sismica locale. Come anticipato al punto A), si ricorda che nell'ambito collinare/montuoso l'amplificazione sismica può essere legata, oltre che alle condizioni topografiche dei luoghi, anche a motivi di tipo stratigrafico (detrito su roccia, roccia meno competente su roccia compatta) e, spesso, tali effetti di sito sono associabili tra loro;



Effetti topografici 2D – 3D.

Effetti legati alla interazione tra onde sismiche e morfologia superficiale con effetti di focalizzazione delle onde sismiche

Si ritiene, pertanto, che tutto il territorio collinare/montuoso di Solagna sia assoggettabile ad amplificazione sismica per effetto topografico.

Per tale motivo, facendo riferimento sia alla normativa vigente in materia di costruzioni (NTC-18), sia alle esperienze condotte dagli scriventi in situazioni analoghe (mediante modellazioni numeriche avanzate per la verifica dell'amplificazione topografica), si ritiene che tutto l'ambiente studiato sia assoggettabile ad effetti legati alla interazione tra le onde sismiche e la morfologia superficiale.

Inoltre, sono state riportate le irregolarità del rilievo marcate costituite dalle linee di cresta, scarpate morfologiche e terrazzi fluviali, in cui sono ritenuti possibili effetti di amplificazione topografica. Nella MOPS sono stati inseriti gli elementi topografici desunti da fotointerpretazione.

Considerando che una zona omogenea, per definizione, è un'area che, sottoposta a sollecitazione sismica, risponde nello stesso modo in tutti i suoi punti e che tale comportamento dipenda dal grado di rigidità dei materiali, dallo spessore e dal contrasto sismico con quella sottostante, appare opportuno segnalare che i depositi appartenenti della pianura alluvionale (GMfg e GPes) sono stati tutti accorpati in un'unica Zona MOPS (Zona 2004) ad eccezione di una porzione nella parte nord-occidentale del comune (Zona 2005), in quanto, come evidenziato nella descrizione della carta delle frequenze, nonostante presentino lo stesso materiale, hanno una risposta sismica diversa in base ai loro spessori.

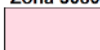
Pertanto, sulla base di quanto finora esposto, sono state create 6 zone ordinate dalla Zona 1 alla Zona 6 considerando le caratteristiche litologiche e genetiche dei terreni della "Carta geologico-tecnica" e le potenziali risposte sismiche locali dal punto di vista stratigrafico.

Ad ogni zona è stata assegnata una colonnina stratigrafica: fatto salvo qualche dubbio interpretativo, sono state rappresentate simbolicamente nella tabella che segue.

Si ricorda, tuttavia, che nonostante si sia cercato di creare differenti colonnine stratigrafiche per ciascuna combinazione dei terreni di copertura (e relativi spessori) e dei sottostanti substrati, resta comunque un certo grado di incertezza sulla tipologia del substrato al di sotto dei depositi sciolti dovuta all'assetto tettonico-stratigrafico dell'area caratterizzata da un complesso assetto strutturale.

Substrati geologici

Zona 3080



Substrato lapideo e lapideo stratificato instabile per cavità

LP e LPS: Substrato geologico costituito da litotipi dell'unità geologica LP (lapideo) e LPS (lapideo stratificato): Dolomia, Calcarei Grigi, Rosso Ammonitico, Biancone

Terreni di copertura

Zona 2001



10-15 m

GCec + GMfd: Depositi costituiti da ghiaie argillose, miscela di ghiaia, sabbia e argilla costituenti la copertura eluvio-colluviale. Si rivengono principalmente a ridosso del versante calcareo, con spessori massimi di 10-15 m a copertura del substrato geologico. Dal punto di vista sismico presentano velocità variabili tra 200-350 m/s e picchi H/V con ampiezze rilevanti alle alte frequenze.

Zona 2002



10-15 m

GCtf: Depositi costituiti da ghiaie argillose, miscela di ghiaia, sabbia e argilla costituenti i terrazzi fluviali di divagazione del Brenta. Dal punto di vista sismico, dopo un paio di metri con velocità prossime a 160-180 m/s, si riscontra uno spessore di circa 10-15 m a copertura del bedrock sismico con Vs di circa 350-380 m/s. Presentano picchi H/V con ampiezze elevate alle medio-alte frequenze.

Zona 2003



< 15 m



GCcz- Depositi costituiti da ghiaie argillose, miscela di ghiaia, sabbia e argilla costituenti depositi di conoide nella porzione centrale del capoluogo, allo sbocco di diverse valli incise. Dal punto di vista sismico, dopo un paio di metri con velocità prossime a 180 m/s, si riscontra uno spessore di circa 15 a copertura del bedrock sismico con Vs di circa 380-450 m/s. Presentano picchi H/V con ampiezze elevate alle medio-alte frequenze.

Zona 2004



20-30 m



GMfg + GPes - Depositi di copertura costituiti da ghiaie pulite con granulometria poco assortita, miscela di ghiaia e sabbia (GP) che compongono i depositi alluvionali dell'attuale corso del fiume e ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo di origine fluviale che caratterizzano la pianura alluvionale. Per questi depositi, le misure HVSR hanno evidenziato la presenza di picchi HVSR alle medio-basse frequenze (circa 3-4 Hz), associabili al passaggio con il substrato geologico. Le velocità delle onde S risultano di circa 200-250 m/s per i primi 2-5 m dal p.c. locale, per poi aumentare a circa 350-380 m/s fino a 25-30 m dal p.c. dove si passa al bedrock geofisico.

Zona 2005

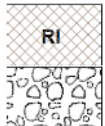
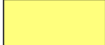


10-15 m

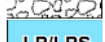


GCtf + GCcz + GMfg + GPes - Depositi ghiaiosi di diversa natura affioranti nella porzione a nord ovest del comune, in prossimità del confine comunale. Si differenziano dal resto dei depositi di fondovalle (zona 2004) per lo spessore ridotto a copertura del substrato: le indagini sismiche hanno, infatti, evidenziato picchi H/V con ampiezze rilevanti alle alte frequenze e depositi con Vs prossime a 350 m/s per circa 10-20 m a copertura del bedrock sismico.

Zona 2006



< 5 m



RI - Depositi di riporto di natura antropica inerte per il terrapieno ferroviario.

3. ZONE DI ATTENZIONE PER INSTABILITÀ

Per quanto riguarda le Zone di attenzione per instabilità, sono state inserite:

1. **aree di frana** che derivano da una verifica incrociata tra le cartografie del P.A.T.I., del PAI e dello studio di MS1. Le frane presenti nella MOPS coincidono perfettamente con quelle riportate nella "Carta geologico-tecnica";
2. **aree con cavità sepolte e le doline:** considerato il fenomeno carsico delle formazioni rocciose calcaree, si è deciso di assegnare l'attenzione per possibili crolli e/o cedimenti, come previsto dagli standard impiegati per il presente lavoro, alla litologia in cui tale fenomeno può verificarsi in accordo con quanto esposto nella "Carta Geologico Tecnica";
3. **aree con sovrapposizione di instabilità,** legate alla sovrapposizione delle zone instabili per la presenza di possibili cavità sepolte e i fenomeni franosi.

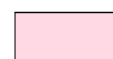
Zone di attenzione per instabilità



ZA/RK - Zona di attenzione per Instabilità di versante - Zona 2001



ZA/RK - Zona di attenzione per Instabilità di versante - Zona 2005



ZA/CD - Zona di Attenzione per Cedimenti Differenziali/crollo di cavità sotterranee /sinkhole



ZA/ID - Zona di Attenzione per sovrapposizione di Instabilità Differenti

7.5 Carta della pericolosità sismica locale (CPSL)

Le Linee Guida Regionali per la microzonazione sismica prevedono la realizzazione della “Carta di pericolosità sismica locale” (CPSL), nella quale vengono indicate le maggiori criticità del territorio e individuate le aree che richiedono approfondimenti per particolari tematiche e/o assetti stratigrafico-tettonici complessi. Nel territorio comunale è stato assegnato uno scenario di pericolosità sismica locale come riportato nella seguente descrizione.

In particolare, la zona P4a è stata associata a tutti i materiali sciolti presenti nel comune in sinistra idrografica come depositi alluvionali e fluvio-glaciali granulari e/o coesivi di fondovalle.

Mentre la zona P4c è stata assegnata ai depositi detritici di origine eluvio-colluviale e alle conoidi alluvionali presenti a nord del territorio comunale. Infine, la zona P2c è stata utilizzata per i depositi di riporto antropico. Sono state riportate, infine, le instabilità per frana e le irregolarità morfologiche con creste e scarpate.

Facendo riferimento alla tabella relativa alla procedura per la MS con i differenti livelli di approfondimento e per i differenti scenari di pericolosità sismica locale (fig. 2 nelle Linee Guida Regionali per la microzonazione sismica) si costata che **l’analisi di Livello 3 appare appropriata per il territorio comunale di Solagna** per quanto riguarda la stima dei fattori di amplificazione che saranno calcolati tramite modelli numerici bi-dimensionali.

SCENARIO DI PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE

P1 : Zone suscettibili di instabilità



Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi



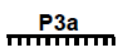
Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio frana

P2 : Zone suscettibili a liquefazione e cedimenti



Zona caratterizzata da coltri di terreno di riporto o che hanno subito riempimenti antropici

P3 : Zone suscettibili ad amplificazioni topografiche



Zona di ciglio H > 10 m (scarpata, bordo di cava, nicchia di distacco, orlo di terrazzo fluviale o di natura antropica...)



Zona di cresta rocciosa e/o cocuzzolo: appuntite – arrotondate

P4 : Zone suscettibili ad amplificazioni litologiche e geometriche



Zona di fondovalle ampie e di pianura con depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi



Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio-lacustre

P5 : Zone suscettibili a comportamenti differenziali



Zona ove sono presenti o potenzialmente presenti cavità sotterranee o sinkhole

PROCEDURA DI MICROZONAZIONE SISMICA								
SIGLA	SCENARIO PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE	Verifica di assoggettabilità	(soglia)	1°livello	(soglia)	2°livello	(soglia)	3°livello
P1a	Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi				cartografia			Analisi stabilità
P1b	Zona caratterizzata da movimenti franosi quiescenti				cartografia			Analisi stabilità
P1c	Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio di frana				cartografia	Analisi di stabilità	Fs prossimo a 1	Analisi stabilità
P2a	Zona con terreni di fondazione particolarmente scadenti quali depositi altamente compressibili, ecc.	zona 4 pga>0,100 zona 3 pga<0,100	pga di sito >0,125		raccolta dati - cartografia	Cedimenti Eventuale verifica	PREV.URBAN.*	Cedimenti
P2b	Zona con depositi granulari fini saturi	zona 4 pga>0,100 zona 3 pga<0,100	pga di sito >0,125		raccolta dati - cartografia	Liquefazione Eventuale verifica	PREV.URBAN.*	Liquefazione
P2c	Zona caratterizzata da coltri di terreno di riporto o che hanno subito riempimenti antropici	zona 4 pga>0,100 zona 3 pga<0,100	pga di sito >0,125		raccolta dati - cartografia	Cedimenti	PREV.URBAN.*	Cedimenti
P3a	Linea di ciglio H>10 m (scarpata, bordo di cava, nicchia di cava, orlo di terrazzo fluviale o di natura antropica, ecc...)				H=10 m; a>15°	Effetti topografici		
P3b	Zona di cresta e/o cocuzzolo: appuntita - arrotondata				h=1/3H; a e a2>15°	Effetti topografici		
P4a	Zona di fondovalle ampie e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi				Vs30<800m/s; C<0,25 Vs30<800m/s; C>0,25	Effetti litologici	h/t>0,65/(Cv-1)	Effetti lito-geometrici
P4b	Zona di fondovalle stretta (C>0,25) od in presenza di forme geometriche sepolte tali da non permettere di considerare il modello geologico monodimensionale				Vs30<800m/s- C>0,25			Effetti lito-geometrici
P4c	Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide dellizio-lacustre				Vs30<800m/s	Effetti litologici		
P4d	Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (compresi le coltri loessiche)				Vs30<800m/s	Effetti litologici		
P4e	Zona con presenza di argille residuali e terre rosse di origine eluvio-colluviale				Vs30<800m/s	Effetti litologici		
P5a	Linea di contatto stratigrafico e/o tettonico tra litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche molto diverse				cartografia	Comportamenti differenziali		
P5b	Zona ove sono presenti o potenzialmente presenti cavità sotterranee o sinkhole				cartografia			Comportamenti differenziali

8 APPROFONDIMENTI DI LIVELLO 3

Nel territorio comunale di Solagna, è stato eseguito dal Geol. Livio Sartor in data aprile 2014, uno studio aggiornato di MS di Livello 1.

L'obiettivo generale del presente lavoro è di compensare le incertezze del Livello 1 con approfondimenti conoscitivi e di fornire quantificazioni numeriche della modificazione locale del moto sismico in superficie a causa di assetti tettonico-strutturali "complessi" e dei fenomeni di deformazione permanente.

Da quanto emerso dallo studio di microzonazione sismica di Livello 1 condotto, è possibile affermare che il territorio comunale è da considerarsi stabile suscettibile di amplificazione. Infatti, è stato verificato che il moto sismico è modificabile rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante in tutto il territorio, a causa delle caratteristiche litostratigrafiche locali. Inoltre, per quanto riguarda le "Zone di attenzione per instabilità", nel territorio comunale sono presenti diverse zone di instabilità di versante, per crollo di cavità sotterranee e, come anticipato nei paragrafi precedenti, era stata indicata una FAC presunta da Catalogo Ithaca.

In merito alle instabilità di versante, le aree di studio con approfondimento di livello 3, comprendono varie zone di frane censite nel PAI e con pericolosità P2, P3 e P4. Nessuna di queste interessa aree oggetto di futura urbanizzazione e pertanto non sono state effettuate modellazioni di stabilità di versante finalizzate alla stima dei movimenti sismo-indotti, ma sono stati valutati esclusivamente i fattori amplificativi mediante opportune simulazioni numeriche.

Tuttavia, a ridosso di alcune frane, sono presenti delle aree di variante che potrebbero essere interessate dal movimento. Dal momento che si tratta di frane classificate come "crollo o ribaltamento", interessando prevalentemente il versante roccioso, sono state fatte delle valutazioni empiriche per definire il così detto "cono d'ombra", ovvero la zona in cui la maggior parte dei blocchi si dovrebbe arrestare.

Relativamente ai lineamenti tettonico-strutturali, come spiegato nei paragrafi precedenti, considerando le età dei depositi più recenti coinvolti nel processo di fagliazione, si è valutato di considerare tale lineamento tettonico "non attivo".

In merito alla presenza di cavità, è stata eseguita una campagna geofisica mediante l'applicazione della metodologia elettromagnetica allo scopo di individuare eventuali anomalie presenti nel sottosuolo dovute a vuoti e cavità. In particolare, lo studio del valore della conducibilità e della componente in fase del campo elettromagnetico attraverso la metodologia elettromagnetica, permette il riconoscimento di variazioni di resistività associabili a vuoti nel sottosuolo.

A seguito di quanto esplicitato, l'obiettivo principale del presente studio di MS3 sviluppato nei seguenti capitoli, è:

- condurre analisi di risposta sismica locale per la quantificazione numerica dell'effetto amplificativo del moto sismico di base stimando i fattori amplificativi FA (fattore di amplificazione in termini di accelerazione) negli intervalli 0.1-0.5s - 0.4-0.8s e 0.7-1.1s;
- valutare le instabilità sismo-indotte associabile alla presenza di cavità e alle instabilità di versante.

A tale scopo si utilizzeranno le indagini sismiche di nuova realizzazione condotte.

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

8.1 Analisi di risposta sismica locale

Come illustrato nelle pagine precedenti, il comune di Solagna non si presta ad analisi di Risposta Sismica Locale a strati piano-paralleli per la stima del fattore di amplificazione, a causa delle sue condizioni geologico-morfologiche, che non permettono l'instaurarsi di soli effetti monodimensionali.

Nel caso in esame, vista la morfologia dei luoghi, gli effetti bidimensionali possono giocare un ruolo dominante nell'amplificabilità dei depositi. In particolar modo, nelle zone di fondo valle e nelle aree di cresta si potrà generare un'amplificazione del moto sismico atteso in superficie, a causa delle articolate morfologie strutturali sepolte associate agli effetti legati sia alla stratigrafia sia alla topografia. Al contrario, nelle zone più distali della pianura alluvionale, l'effetto topografico può considerarsi nullo, e l'unico fattore che incide sull'amplificabilità del moto sismico di base, è il contrasto di impedenza sismica tra i vari litotipi.

Per questo, le quantificazioni della risposta sismica di sito (amplificazione stratigrafica + amplificazione topografica) sono state condotte utilizzando delle modellazioni bidimensionali lungo sezioni rappresentative del comune di Solagna. Tali valutazioni sono state realizzate in corrispondenza delle aree da microzonare al Livello 3, ed in generale su tutto il territorio urbano e urbanizzabile.

La tecnica di risoluzione numerica adoperata è quella alle differenze finite (FDM) implementata nel codice di calcolo FLAC 8.0 (Itasca, 2018), operante nel dominio del tempo. Il codice effettua un'analisi lagrangiana del continuo risolto mediante uno schema di avanzamento temporale di tipo esplicito.

In particolare, la quantificazione numerica degli effetti sarà rappresentata dai fattori amplificativi FA (fattore di amplificazione in termini di accelerazione) nell'intervallo 0.1-0,5s - 0.4-0.8s e 0.7-1.1s. A partire dai risultati di tali modellazioni e interpolando i valori ottenuti, è stata prodotta una "Carta dei fattori di amplificazione FA (0,1-0,5s)" una "Carta dei fattori di amplificazione FA (0,4-0,8s)" e una "Carta dei fattori di amplificazione FA (0,7-1,1s).

8.1.1 Descrizione del metodo

Il codice di calcolo FLAC 2D v.8.0 (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) della Itasca (2016) è basato sul metodo delle differenze finite con un procedimento di tipo esplicito. La flessibilità nella modellazione della geometria del problema, la disponibilità di elementi strutturali, l'elevato numero di modelli costitutivi implementati e la possibilità di svilupparne anche di nuovi, rendono FLAC idoneo allo studio di tutti i problemi riguardanti il comportamento meccanico di mezzi continui (terreni, rocce, ecc.) e di strutture interagenti. Sviluppato inizialmente per le applicazioni di ingegneria geotecnica e ingegneria mineraria in campo statico, esso ha trovato successivamente, con l'introduzione del modulo dinamico, largo impiego anche per la soluzione di problemi di risposta sismica locale. Il codice di calcolo FLAC, anche per i problemi in campo statico, risolve le equazioni di equilibrio dinamico di un mezzo continuo:

$$\rho \cdot \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial t} = \sum_j \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (8.1)$$

dove:

- ρ è la densità
- x_j la componente i - esima del vettore posizione
- $\dot{u}_i$ la componente i - esima del vettore velocità
- g_i la componente dell'accelerazione di gravità (forze di volume) lungo la direzione i

- τ_{ji} la generica componente del tensore degli sforzi.

Il comportamento meccanico dei materiali è espresso dalla legge costitutiva:

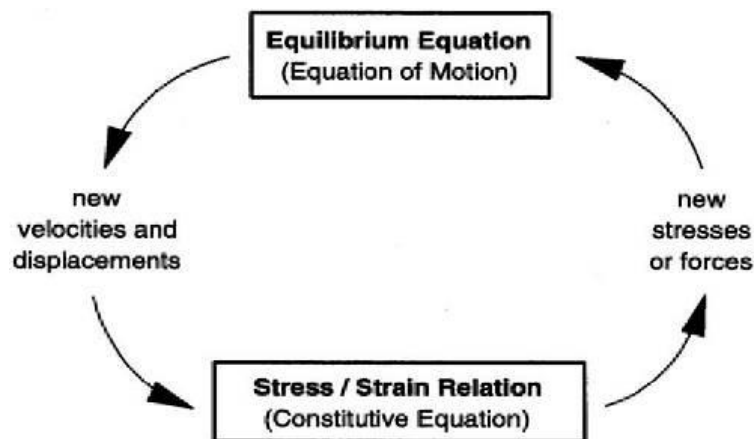
$$\tau_{ij} = M(\tau_{ij}; \dot{\epsilon}_{ij}; k) \quad (8.2)$$

dove k è un parametro che tiene conto della storia di carico, M un funzionale ed $\dot{\epsilon}_{ij}$ il tensore velocità di deformazione espresso dalla:

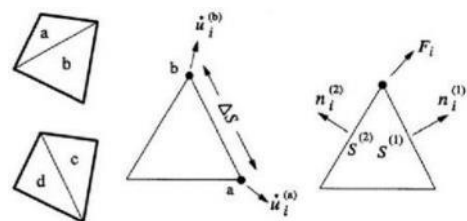
$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (8.3)$$

I materiali vengono rappresentati da elementi quadrilateri, o zone, che formano una griglia (*mesh*) che può essere configurata dall'utente in modo da modellare contatti stratigrafici e morfologie superficiali, anche complesse e irregolari. A ciascuna zona si assegnano le proprietà fisiche e meccaniche che ne caratterizzano il comportamento nell'analisi. I vertici di ogni zona costituiscono i nodi della griglia.

I metodi alle differenze finite come quelli agli elementi finiti traducono un sistema di equazioni differenziali come la (8.1) in un sistema di equazioni algebriche. Se i metodi agli elementi finiti hanno come punto centrale la definizione delle funzioni di forma, che descrivono la variazione delle grandezze che interessano il problema (tensioni, deformazioni) attraverso ciascun elemento, nei metodi alle differenze finite si prescinde da questa definizione della funzione di forma, e le equazioni algebriche vengono scritte direttamente in termini di variabili di campo (tensioni, spostamenti) definite nei nodi della *mesh*. In sintesi, l'algoritmo risolutivo dell'approccio esplicito si articola secondo il ciclo indicato nella seguente figura.



Ad ogni nuovo passo di calcolo (*step*), vengono risolte le equazioni di equilibrio dinamico, per cui dalle tensioni e dalle forze si ottengono i valori corrispondenti delle velocità di deformazione e degli spostamenti; successivamente, dalle velocità di deformazione e attraverso le equazioni dei legami costitutivi, si giunge a valori aggiornati delle tensioni. L'ipotesi base dell'approccio esplicito consiste nel fatto che, durante ciascuna fase, le grandezze vengono ricavate da altre grandezze i cui valori sono assunti costanti durante l'operazione. Ad esempio, attraverso le leggi



Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

costitutive, i valori delle velocità di deformazione sono considerati fissi durante l'operazione di calcolo delle tensioni: in altre parole, i nuovi valori calcolati delle tensioni non influenzano le velocità. Questo può apparire poco accettabile dal punto di vista fisico, poiché se c'è una variazione di tensione in un punto, questa necessariamente influenza i punti vicini alterandone le velocità di deformazione. Tuttavia, se l'intervallo di tempo Δ_t (*timestep*) corrispondente al singolo ciclo di calcolo è sufficientemente piccolo, tale alterazione non può propagarsi da un elemento all'altro in tale intervallo.

Tale approccio si è dimostrato particolarmente efficiente nella modellazione di problemi non lineari in presenza di grandi deformazioni. Per contro, essendo il Δ_t richiesto generalmente molto piccolo, sono necessari un gran numero di passi di integrazione cui corrispondono tempi di calcolo molto elevati.

Gli elementi quadrangolari della griglia vengono automaticamente suddivisi dal programma in due set sovrapposti di triangoli a deformazioni costanti.

Le equazioni alle differenze finite per ogni triangolo si ottengono dalla forma generalizzata del teorema della divergenza di Gauss:

$$\int_S \mathbf{f} \cdot \hat{\mathbf{n}} \cdot d\mathbf{s} = \int_A \text{div } \mathbf{f} \cdot dA \quad (8.4)$$

in cui:

- $\mathbf{n}$ è il versore normale al contorno S del dominio triangolare
- $\mathbf{f}$ la funzione generica (scalare, vettore o tensore)
- A la superficie del dominio triangolare di contorno S
- d_s la lunghezza incrementale lungo il contorno S .

Sostituendo ad $\mathbf{f}$ un valore medio del vettore velocità, la relazione precedente consente di scrivere:

$$\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_i} \cong \frac{1}{2A} \sum_s \left(\dot{u}_i^{(a)} + \dot{u}_i^{(b)} \right) n_j \Delta s \quad (8.5)$$

dove (a) e (b) sono due nodi consecutivi sul generico lato del triangolo. Attraverso la (8.3) e la (8.5) è, quindi, possibile calcolare tutte le componenti del tensore velocità di deformazione. La legge costitutiva è poi utilizzata per calcolare un nuovo valore del tensore delle tensioni. Calcolate le tensioni, vengono calcolate le forze equivalenti applicate ai nodi. Le tensioni agiscono in ciascun triangolo come trazioni sui lati del triangolo stesso; ogni trazione è considerata equivalente a due forze agenti sui due nodi all'estremità del lato. Su ogni nodo del triangolo agiscono, quindi, due forze relative ai due lati convergenti nel nodo stesso:

$$\mathbf{F}_i = \frac{1}{2} \tau_{ji} \left(n_i^{(1)} S^{(1)} + n_i^{(2)} S^{(2)} \right) \quad (8.6)$$

Infine, per ciascun nodo vengono sommate tutte le forze dovute ai triangoli convergenti nel nodo stesso, le forze dovute a eventuali carichi esterni applicati e le forze di volume dovute alla gravità. In tal modo viene determinata la forza nodale netta $\Sigma \mathbf{F}_i$; se $\Sigma \mathbf{F}_i = 0$, il nodo è in equilibrio, altrimenti

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

subirà un'accelerazione espressa dalla seconda legge di Newton, nient'altro che la (8.1) espressa in termini incrementali:

$$\dot{u}_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \left[\sum F_i^{(t)} \right] \frac{\Delta t}{m} \quad (8.7)$$

dove l'apice indica il tempo in corrispondenza del quale è valutata la variabile e m è la massa associata a ciascun nodo pari alla somma di un terzo delle masse dei triangoli convergenti nel nodo. Dalla relazione precedente si determinano nuovi valori della velocità e, quindi, del tensore velocità di deformazione per un nuovo ciclo.

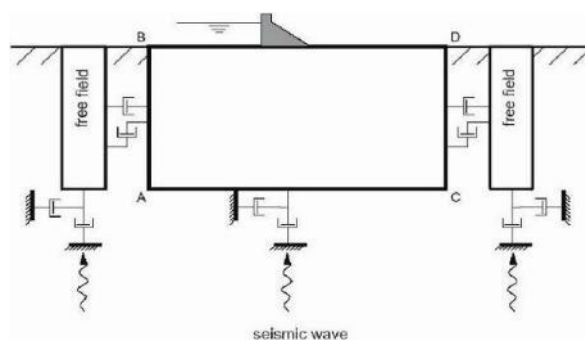
Come detto, condizione essenziale dell'algoritmo descritto è che il *time step* Δt , corrispondente al singolo ciclo di calcolo, sia sufficientemente piccolo da rendere accettabile l'approssimazione di tensioni e velocità costanti sul singolo *step* di calcolo. In particolare, Δt deve essere inferiore ad un *time step* critico Δt_{cr} definito dalla:

$$\Delta t_{cr} = \min \left\{ \frac{A}{V_p \Delta x_{max}} \right\} \quad (8.8)$$

dove A è la superficie del subelemento triangolare, Δx_{max} la dimensione massima della zona (in genere la diagonale) e V_p la velocità delle onde di compressione. La funzione minimo è presa su tutte le zone. Il *time step* critico è tanto più piccolo (e i tempi di calcolo quindi tanto più elevati) quanto più la rigidità del materiale è elevata e quanto più piccolo è l'elemento. Il Δt di calcolo viene determinato internamente da FLAC, applicando un coefficiente di sicurezza pari a 2 al valore fornito dalla (8.8). Particolare attenzione va posta nella scelta delle dimensioni degli elementi della *mesh*, in quanto queste condizionano in maniera fondamentale l'accuratezza numerica della trasmissione delle onde. In particolare, per un'accurata modellazione viene consigliato di scegliere una altezza degli elementi h almeno pari ad un valore compreso tra un decimo e un ottavo della minima lunghezza d'onda di interesse λ_{min} :

$$h \leq \frac{\lambda_{min}}{10} \quad (8.9)$$

La λ_{min} è la lunghezza d'onda che corrisponde alla massima frequenza di interesse ed è legata ad essa dalla velocità di propagazione delle onde di taglio. I metodi alle differenze finite, così come quelli agli elementi finiti, si basano sulla discretizzazione, tramite una *mesh* di nodi, di una porzione finita dello spazio, per cui appropriate condizioni al contorno vanno imposte ai confini artificiali di tale regione. In ogni problema di propagazione di onde sismiche, parte dell'energia si allontana indefinitamente dalla regione di interesse verso il semispazio circostante per fenomeni di diffrazione e riflessione, dando luogo ad una perdita di energia indicata come *smorzamento di radiazione*. Al fine di modellare correttamente questo fenomeno, FLAC consente di minimizzare la riflessione delle onde sui contorni della *mesh*, imponendo su questi condizioni di campo libero (*free field boundaries*) o



Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

viscose (*quiet boundaries*). La definizione delle condizioni al contorno è strettamente correlata all'applicazione della sollecitazione dinamica, come discusso in seguito.

I contorni *free-field* consistono sostanzialmente in colonne monodimensionali di larghezza unitaria, situate ai lati del modello, che simulano il comportamento di un mezzo infinitamente esteso (figura seguente).

In pratica, essi riproducono il moto libero del terreno che si avrebbe in assenza della configurazione bidimensionale e allo stesso tempo impediscono la riflessione ai bordi della *mesh* delle onde diffratte verso l'esterno. Come illustrato, i singoli nodi dei contorni laterali della griglia principale vengono accoppiati alla griglia *free-field* attraverso smorzatori viscosi che materialmente assorbono l'energia delle onde incidenti sui contorni, applicando delle forze viscose proporzionali alla differenza tra il campo di velocità esistente al bordo e quello in condizioni *free-field*. Prima dell'applicazione delle condizioni *free-field* durante l'analisi dinamica, il modello deve essere in condizioni di equilibrio statico, per cui è necessario eseguire una analisi statica preliminare per determinare lo stato tensionale e deformativo all'interno del modello. All'atto dell'applicazione delle condizioni *free-field*, tutte le variabili di stato determinate dall'equilibrio statico vengono quindi applicate alle colonne monodimensionali ai bordi del modello.

I contorni *free-field* sono di notevole utilità, in quanto consentono di evitare l'allontanamento dei confini laterali, altrimenti necessario in assenza di confini assorbenti, per la minimizzazione delle onde riflesse dai contorni.

I contorni *quiet* sono invece costituiti, secondo la formulazione di Lysmer e Kuhlemeyer (1969), da smorzatori viscosi attaccati alla griglia e agenti in direzione normale e tangenziale al contorno stesso; essi consentono un pressoché completo assorbimento delle onde di volume che incidono sul contorno. I contorni *quiet* possono essere applicati su contorni verticali, orizzontali o inclinati. Essi vanno applicati al confine inferiore della *mesh* per simulare la base elastica, mentre ai bordi del modello, come detto, è preferibile l'utilizzo dei contorni *free-field*.

Le sollecitazioni dinamiche possono essere applicate sia ai bordi della *mesh* sia ai suoi nodi interni in una delle seguenti forme:

- storia temporale di accelerazioni;
- storia temporale di velocità;
- storia temporale di tensioni;
- storia temporale di forze.

Nell'applicare la sollecitazione dinamica, bisogna però tenere conto di alcune limitazioni che derivano da particolari incompatibilità tra forme di applicazione dell'input e delle condizioni al contorno. Se, ad esempio, queste sono rappresentate da *quiet boundaries* (come avviene solitamente per il bordo inferiore della *mesh*), il loro effetto viene annullato se si applica un accelerogramma o una storia di velocità.

Quindi, in questo caso, la base è modellata come rigida, cioè perfettamente riflettente, dando luogo a irrealistiche sovrastime del moto sismico. Per simulare correttamente una base elastica occorre applicare ai *quiet boundaries*, alla base della *mesh*, una storia temporale di tensioni. A tal fine, un accelerogramma di input deve essere integrato per ottenere una storia temporale di velocità e questa viene infine convertita in tensioni tramite le seguenti relazioni:

$$\sigma_n = 2(\rho V_p) v_n \quad \sigma_s = 2(\rho V_s) v_s \quad (8.10)$$

dove:

- ρ è la densità;
- σ_n , σ_s rispettivamente tensione applicata in direzione normale e tangenziale al contorno;
- V_p , V_s rispettivamente velocità delle onde di compressione e di taglio del materiale che viene simulato al di sotto del contorno inferiore (costituente la base elastica);
- v_n , v_s rispettivamente la velocità di input normale e tangente al contorno.

In definitiva, un input costituito da onde S sarà quindi applicato come una storia temporale di tensioni tangenziali, mentre le onde P tramite una storia temporale di tensioni normali al contorno. Entrambe le sollecitazioni sono applicate con incidenza verticale.

La non linearità e le proprietà dissipative dei terreni possono essere modellate in FLAC secondo differenti modalità: attraverso l'adozione di un legame costitutivo propriamente non lineare o, a partire dalla versione 5.0 (Itasca, 2005), tramite semplici modelli di *smorzamento isteretico*. Le proprietà dissipative possono altresì essere modellate attraverso la formulazione di Rayleigh.

L'adozione di una legge sforzi-deformazione non lineare rappresenta, teoricamente, il modo più efficace per tenere conto della degradazione di rigidità al procedere della deformazione e della dissipazione di energia per isteresi. Questi modelli possono essere accoppiati con modelli di filtrazione per simulare la generazione e dissipazione di eccessi di pressioni neutre e/o fenomeni di liquefazione e consentono, inoltre, la valutazione delle deformazioni permanenti. Però, dal punto di vista pratico, i modelli non lineari sono spesso complessi e richiedono la definizione di molti parametri e lunghi processi di calibrazione.

La complessità dei modelli non lineari e la comodità di un utilizzo diretto delle curve di tipo G / G0 e D / D0, generalmente fornite dalle prove di laboratorio e dalle correlazioni empiriche, ha portato all'introduzione di semplici modelli di *smorzamento isteretico (hysteretic damping)* nella recente versione 5.0 del codice.

Durante ciascuno *step* di calcolo, in funzione del valore medio del tensore di velocità di deformazione, viene restituito un fattore moltiplicativo da usarsi nel legame costitutivo, in modo da correggere il valore del modulo tangente di taglio associato a ciascun elemento. Il modello isteretico implementato utilizza solo curve continue che esprimono la variazione del modulo di taglio con la deformazione tangenziale; pertanto, i parametri da fornire in input che definiscono la forma di tali curve vanno ricavati attraverso regressione dei dati sperimentali. Analisi di calibrazione dello smorzamento isteretico sono necessarie prima di un suo uso nella pratica corrente.

Nel caso di analisi lineari, o per modellare comunque lo smorzamento a basse deformazioni che spesso i legami costitutivi non lineari non riescono a cogliere, si può utilizzare la formulazione di Rayleigh. Essa conduce ad uno smorzamento dipendente dalla frequenza, in contrasto con le evidenze sperimentali sul comportamento dei terreni. Il suo impiego richiede, pertanto, una oculata scelta dei parametri che lo definiscono, per limitare la variazione dello smorzamento con la frequenza (Lanzo et al., 2003 e 2004). Lo smorzamento di Rayleigh è stato originariamente formulato per le analisi strutturali ed è espresso in forma matriciale attraverso la definizione di una matrice di smorzamento **C** proporzionale alla matrice di massa **M** e a quella di rigidità **K**:

$$\mathbf{C} = \alpha_R \mathbf{M} + \beta_R \mathbf{K} \quad (8.11)$$

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

dove α_R e β_R sono i coefficienti di Rayleigh che hanno dimensione rispettivamente di s^{-1} e s . È possibile dimostrare (Chopra, 1995) che lo smorzamento ξ_j associato al j -esimo modo di vibrazione del deposito è espresso dalla:

$$\xi_j = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_R}{\omega_j} + \beta_R \omega_j \right) \quad (8.12)$$

dove ω_j è la frequenza circolare relativa al modo j .

I coefficienti di Rayleigh vengono comunemente determinati attraverso due procedure, a seconda che si fissi il valore dello smorzamento modale in corrispondenza di una o due frequenze naturali opportunamente selezionate (dette frequenze di controllo). Il codice FLAC adotta la prima procedura in accordo alla quale i coefficienti di Rayleigh sono espressi dalle:

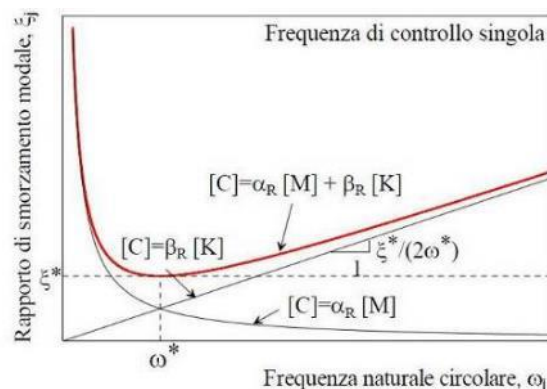
$$\alpha_R = \xi^* \omega^* \quad , \quad \beta_R = \frac{\xi^*}{\omega^*} \quad (8.13)$$

avendo fissato lo smorzamento modale al valore ξ in corrispondenza della singola frequenza ω .

Per ciascun elemento della *mesh* occorre specificare il rapporto di smorzamento ξ^* del materiale e la frequenza ω^* . A titolo di esempio, nel caso di smorzamento ξ^* e frequenza ω^* costante per tutto il deposito, è possibile dimostrare che un'analisi lineare eseguita con FLAC fornisce gli stessi risultati di un'analisi modale, con rapporto di smorzamento modale dell'intero sistema variabile con la frequenza circolare naturale ω_j secondo la:

$$\xi_j = \frac{\xi^*}{2} \left(\frac{\omega^*}{\omega_j} + \frac{\omega_j}{\omega^*} \right) \quad (8.14)$$

riportata nella figura seguente, nella quale si nota come ξ_j assuma un minimo (pari al valore imposto ξ^*) in corrispondenza della frequenza di controllo ω^* , mentre sia sovrastimato nel campo dei valori maggiori e minori di ω^* .



La formulazione di Rayleigh viene applicata a livello del singolo elemento della *mesh* per cui, tra i dati di input, occorre specificare per ciascun elemento il valore del rapporto di smorzamento del materiale che lo costituisce ξ^* e la frequenza di controllo ω^* (o meglio il valore f^*). La scelta di f^* è cruciale per fissare il campo di frequenza in corrispondenza del quale lo smorzamento mostra variazioni contenute rispetto a ξ^* .

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

In generale, f^* deve essere scelta nel campo di frequenza significativo per il problema in esame sia in termini di frequenze naturali del sistema che di frequenze predominanti dell'input. In prima approssimazione, si può collocare f^* tra la frequenza fondamentale del sistema e la frequenza predominante dell'input (frequenza corrispondente al massimo dello spettro di Fourier o di risposta). Se questi valori sono distanti è comunque opportuno esaminare con analisi parametriche l'influenza sui risultati delle diverse scelte di f^* . In definitiva, per ciascun materiale occorre fornire i seguenti parametri di input:

- peso dell'unità di volume;
- nel caso di analisi lineari modulo di taglio (G_0) e di elasticità volumetrico (k), o, in alternativa modulo di Young (E) e coefficiente di Poisson (ν);
- nel caso di analisi non lineari occorre fornire i parametri caratteristici del modello adottato;
- rapporto di smorzamento (ξ^*) e frequenza di controllo (f^*) se si adotta la formulazione di Rayleigh.

Il codice offre notevoli potenzialità di dati in output, potendo restituire la storia temporale di tutte le grandezze di interesse: spostamenti, velocità, accelerazioni, deformazioni e tensioni. L'interfaccia grafica consente, inoltre, di costruire ed esportare i grafici delle sopracitate grandezze, in funzione della profondità o lungo un generico profilo.

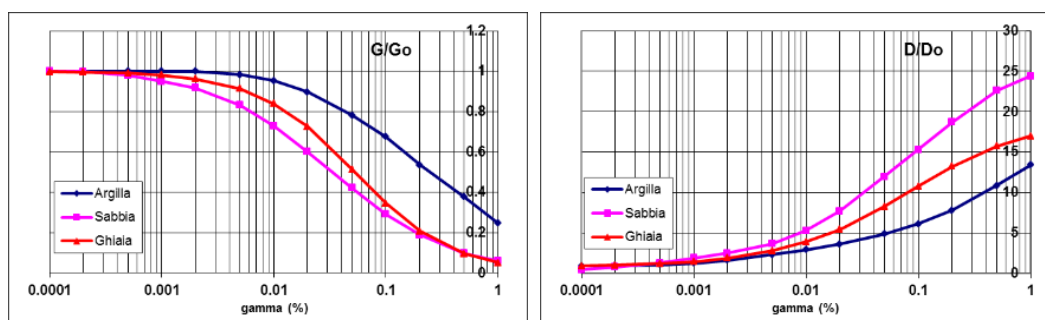
8.1.2 Casi applicativi nel Comune di Solagna

Per quantificare l'azione sismica in superficie sono state realizzate delle sezioni di rigidità del sottosuolo in corrispondenza delle aree da approfondire al Livello 3; su tali profili è stata successivamente condotta la modellazione numerica, come precedentemente spiegato. Le sismostratigrafie e i valori di rigidità utilizzati sono quelli ottenuti dalle indagini sismiche eseguite per il presente lavoro.

Il modello geometrico è stato discretizzato con una maglia ad elementi quadrangolari, le dimensioni dei quali sono state stabilite in funzione delle lunghezze d'onda minime caratterizzanti il fenomeno di propagazione sismica, determinabili con la relazione di Kuhlemeyer & Lysmer ($h_{max} < V_s / 10 * f_{max}$) in funzione delle velocità delle onde di taglio nei diversi terreni del modello e della frequenza massima di interesse dei segnali accelerometrici selezionati ($f_{max}=10$ Hz).

Lungo le frontiere laterali dei modelli sono stati introdotti particolari elementi assorbenti (*free - field* boundaries) che, oltre ad evitare la riflessione delle onde in maniera analoga agli smorzatori viscosi introdotti da Lysmer & Kuhlemeyer (1969), forzano i nodi delle frontiere laterali a riprodurre il moto di *free - field*, essenziale per le analisi di risposta sismica locale bidimensionale.

Per limitare la riflessione delle onde in corrispondenza della frontiera inferiore del modello, sono stati utilizzati degli smorzatori viscosi (*quiet boundaries*), mentre le proprietà dissipative dei materiali sono state ottenute attraverso la formulazione di Rayleigh per quanto riguarda il *substrato geologico* (smorzamento 0,02%); per i materiali di copertura è stato utilizzato lo *smorzamento isteretico* tramite le curve G/G_0 e D/D_0 indicate negli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica e sotto riportate.



Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

Nel rispetto della normativa vigente - D.M. 17/01/2018 - è stata assunta una severità dell'azione sismica con la probabilità di superamento (P) e con il periodo di ritorno (T_r) relativi allo stato limite considerato. In particolare, è stata considerata una vita nominale della costruzione (V_n) di 50 anni, un coefficiente d'uso (C_u) pari a II e quindi una vita di riferimento $V_r = 50$ anni. A partire da queste indicazioni, si è determinato un periodo di ritorno dell'azione sismica di 475 anni corrispondente ad una probabilità di superamento del 10% allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV).

L'input sismico utilizzato è rappresentato da una settupla di storie accelerometriche applicate alla base del modello e riferite agli spettri di normativa calcolati per il sito in esame, considerando un sottosuolo di roccia affiorante (classe A) con topografia orizzontale (T1) e correttamente deconvoluto (v. *Dynamic Analysis* della Itasca, 2016).

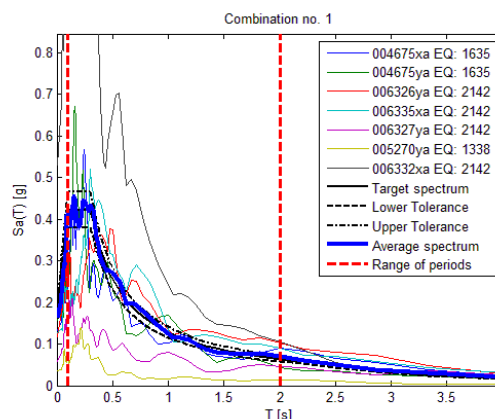
In particolare, gli accelerogrammi sono stati ricavati tramite l'utilizzo del software REXEL - *computer aided record selection for code - based seismic structural analysis*.

La *history* (storia temporale) ricavata al tetto del modello (per ogni input sismico applicato) rappresenta la storia accelerometrica orizzontale attesa nel sito d'indagine: ogni *history* è stata successivamente plottata in uno spettro di risposta elastico e mediata in una curva rappresentativa (accelerogramma medio).

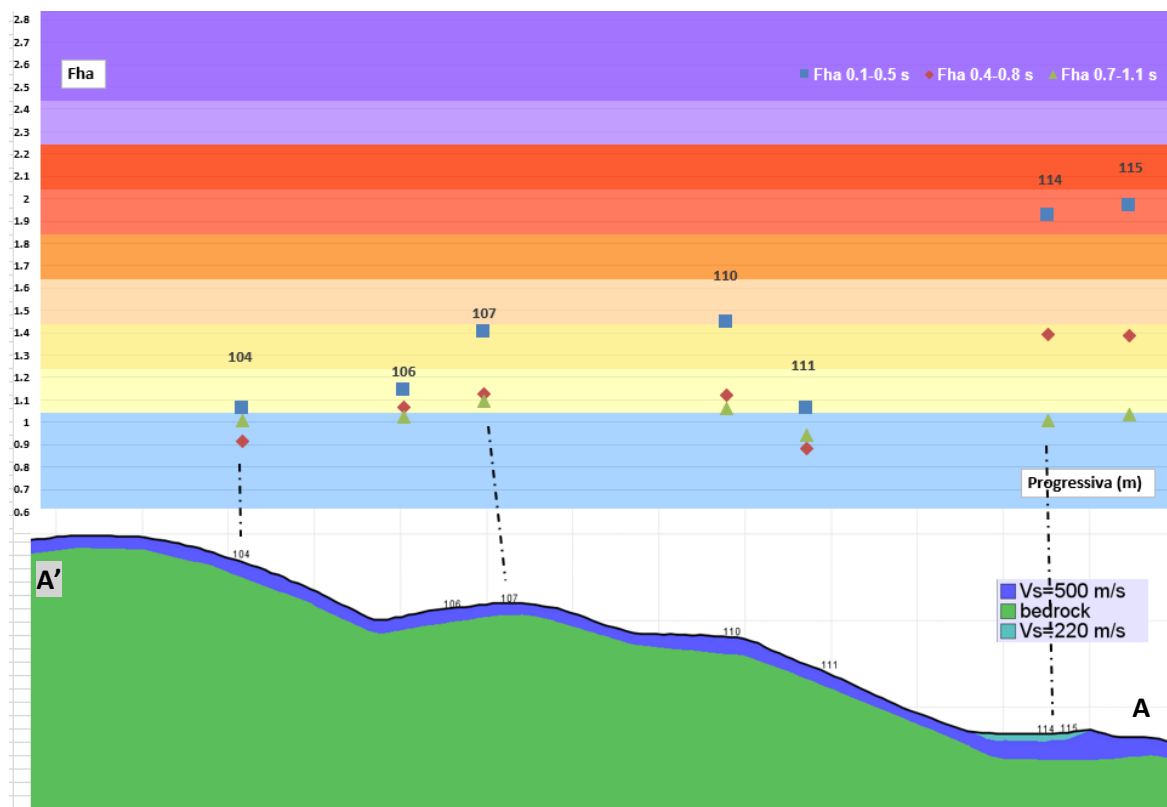
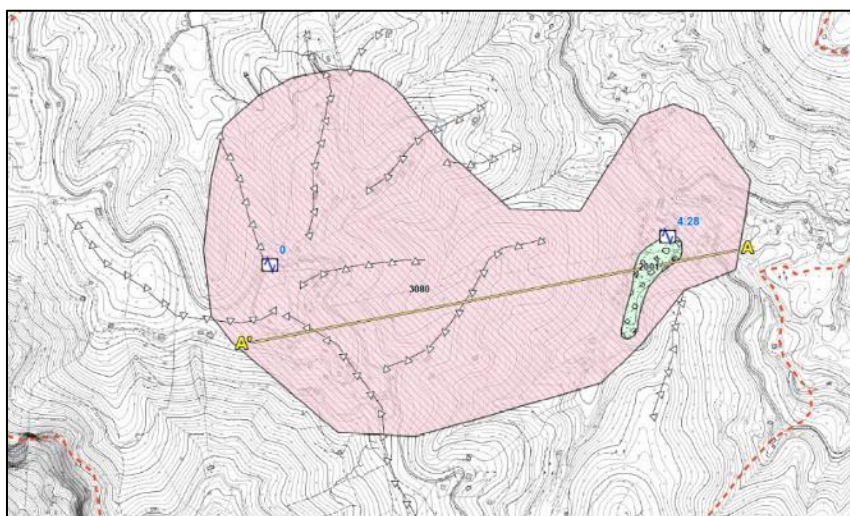
Infine, per calcolare il Fattore di Amplificazione (FA) si è confrontato lo spettro medio in ingresso con quello in uscita, calcolando il rapporto dell'intensità di *Housner* per periodi compresi tra 0,1 s e 0,5 s (FA), tra 0,4 s e 0,8 s e tra 0,7 - 1,1 s poiché, in tali intervalli, si ha la massima risposta in accelerazione.

Di seguito si riporta, per le n°7 sezioni analizzate, il modello sismo - stratigrafico utilizzato per le analisi, la traccia in pianta nella Carta MOPS e un profilo con i valori dei fattori di amplificazione FA in ciascun punto analizzato nella sezione.

Inoltre, come è possibile osservare dai profili di FA, all'interno di ogni area MOPS sono state inserite diverse *history*, che hanno fornito valori di amplificazione variabili a seconda delle condizioni morfologiche e topografiche. Successivamente, è stata fatta la scelta del fattore di amplificazione più rappresentativo per il sito e per le MOPS analizzate, e riportato nelle cartografie prodotte.

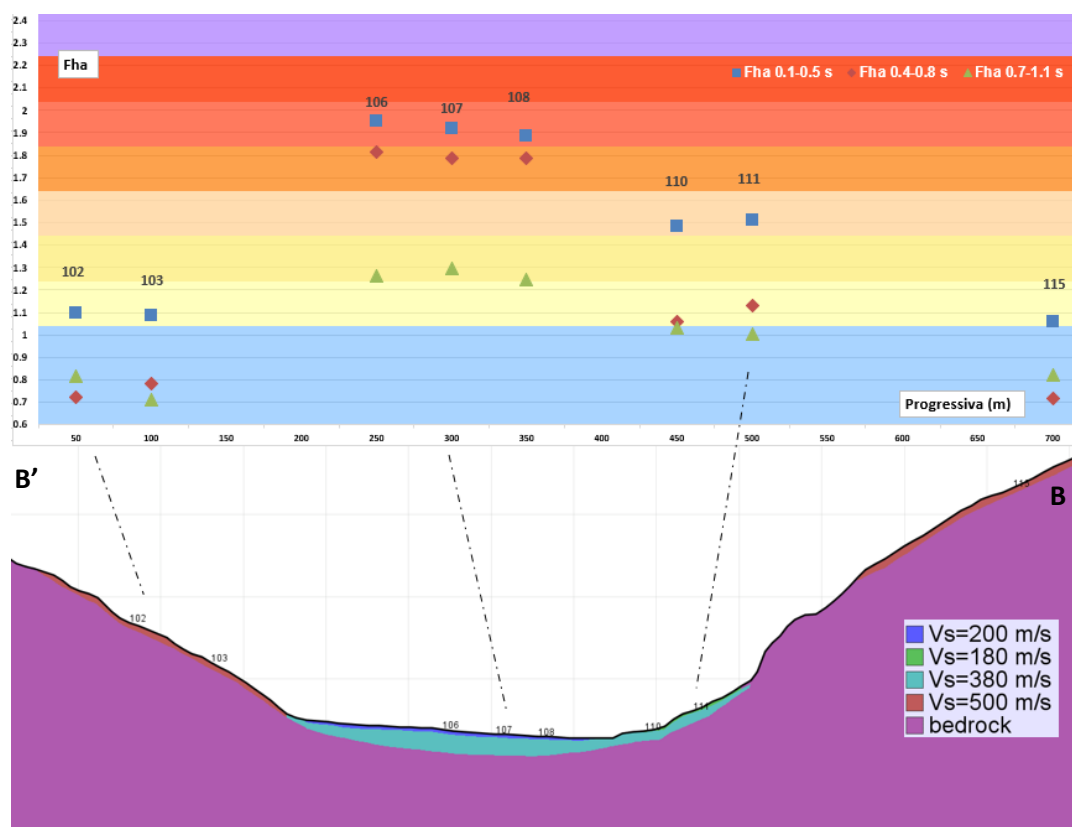
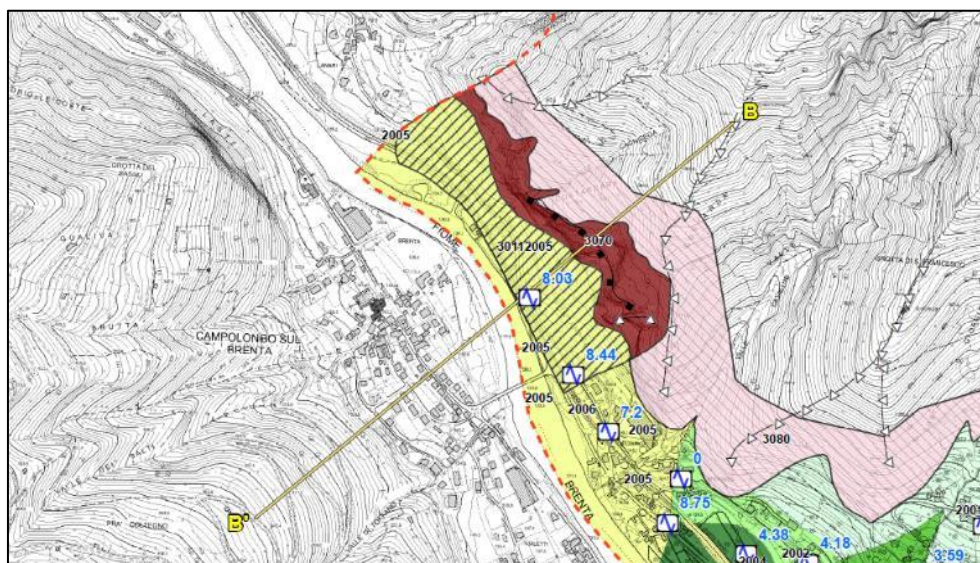


MODELLAZIONE A-A'



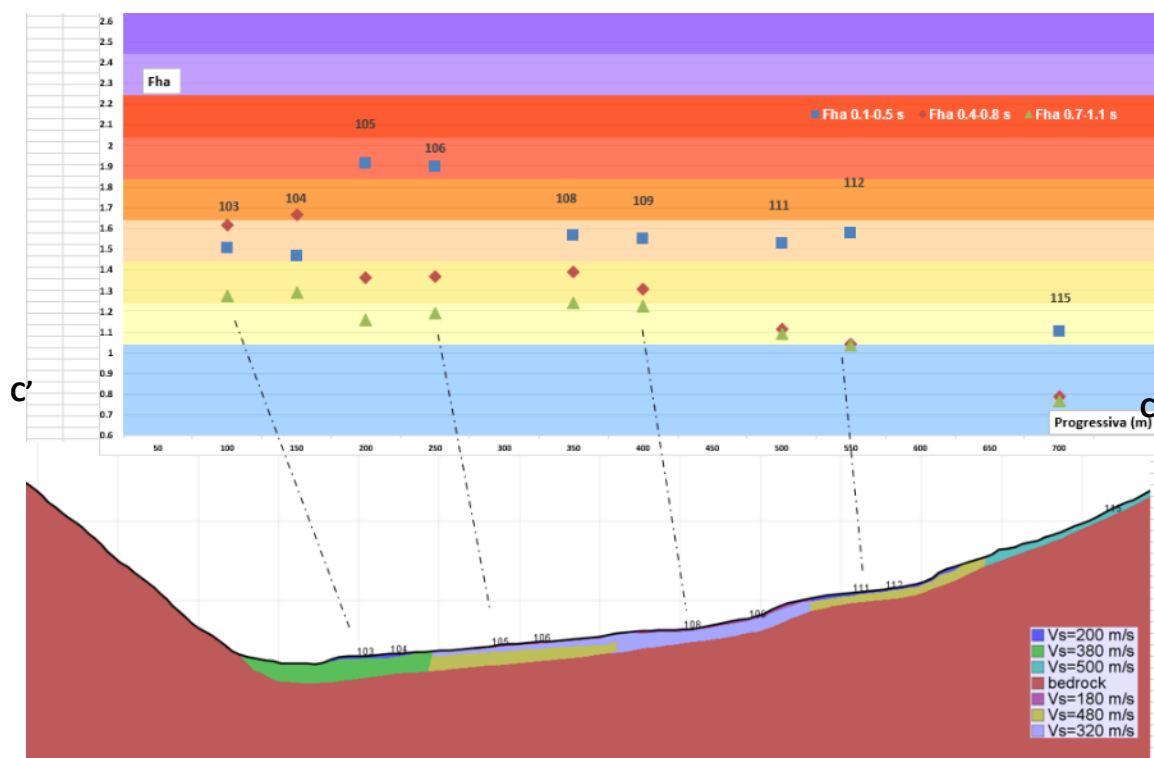
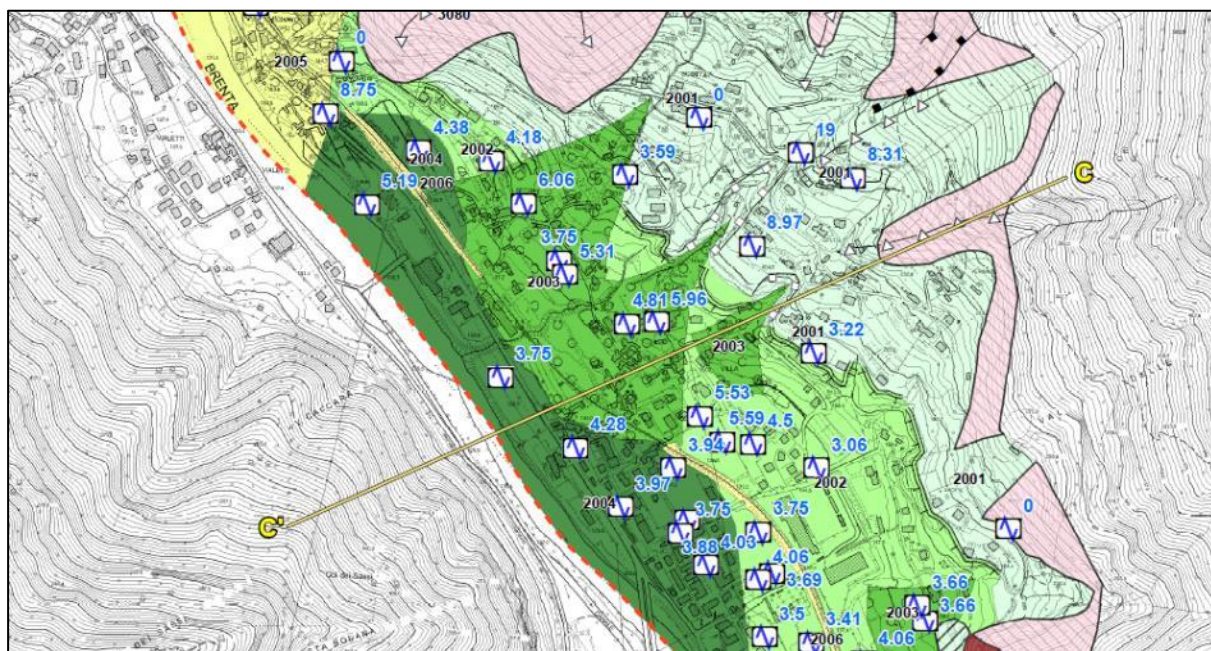
	FA 0,1-0,5s	FA 0,4-0,8s	FA 0,7-1,1
Mops 3080 cresta	1.4	1.4	1.4
Mops 3080 versante	1.1	1.0	1.0

MODELLAZIONE B-B'



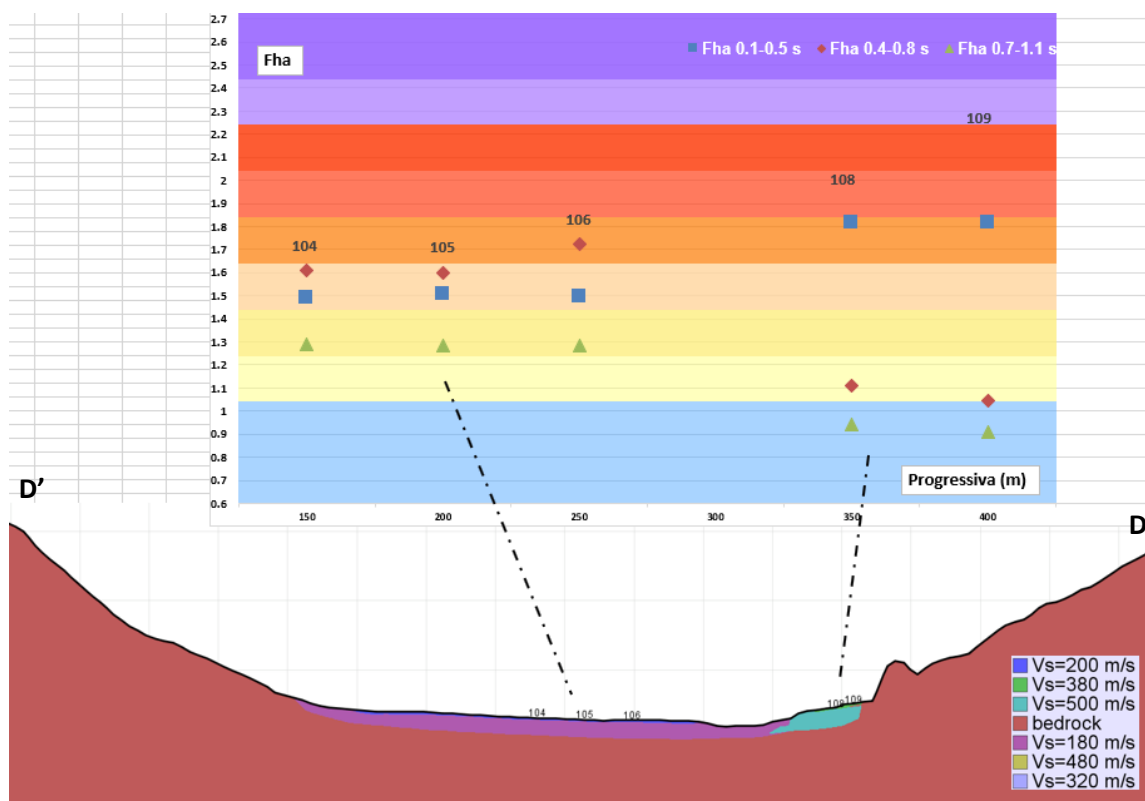
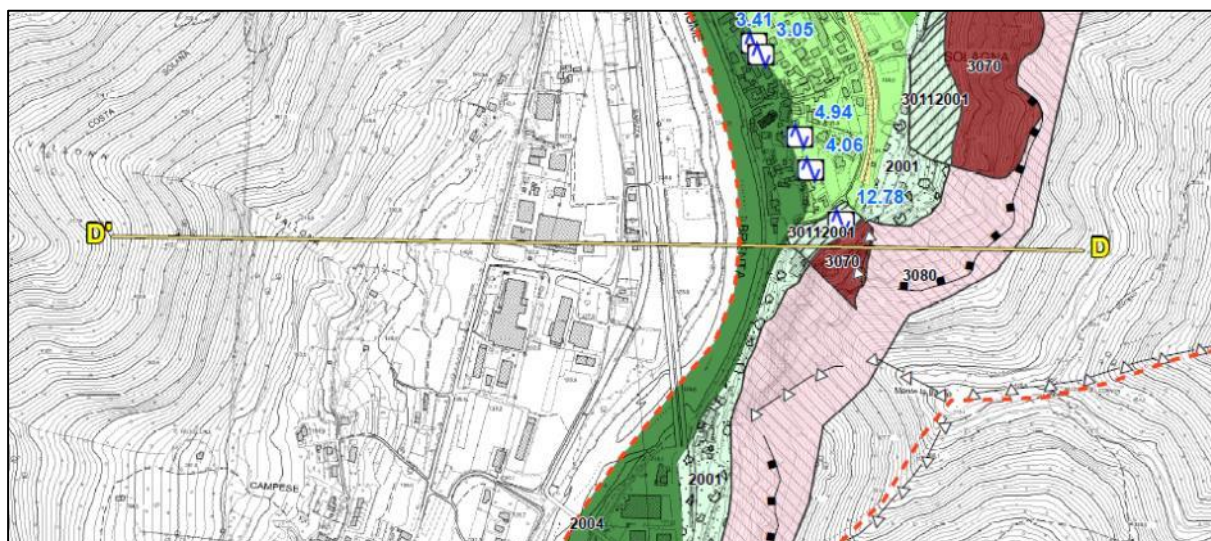
	FA 0,1-0,5s	FA 0,4-0,8s	FA 0,7-1,1
Mops 3080 versante	1.1	1.0	1.0
Mops 2005	1.9	1.8	1.3
Deposito di frana	1.5	1.1	1.0

MODELLAZIONE C-C'



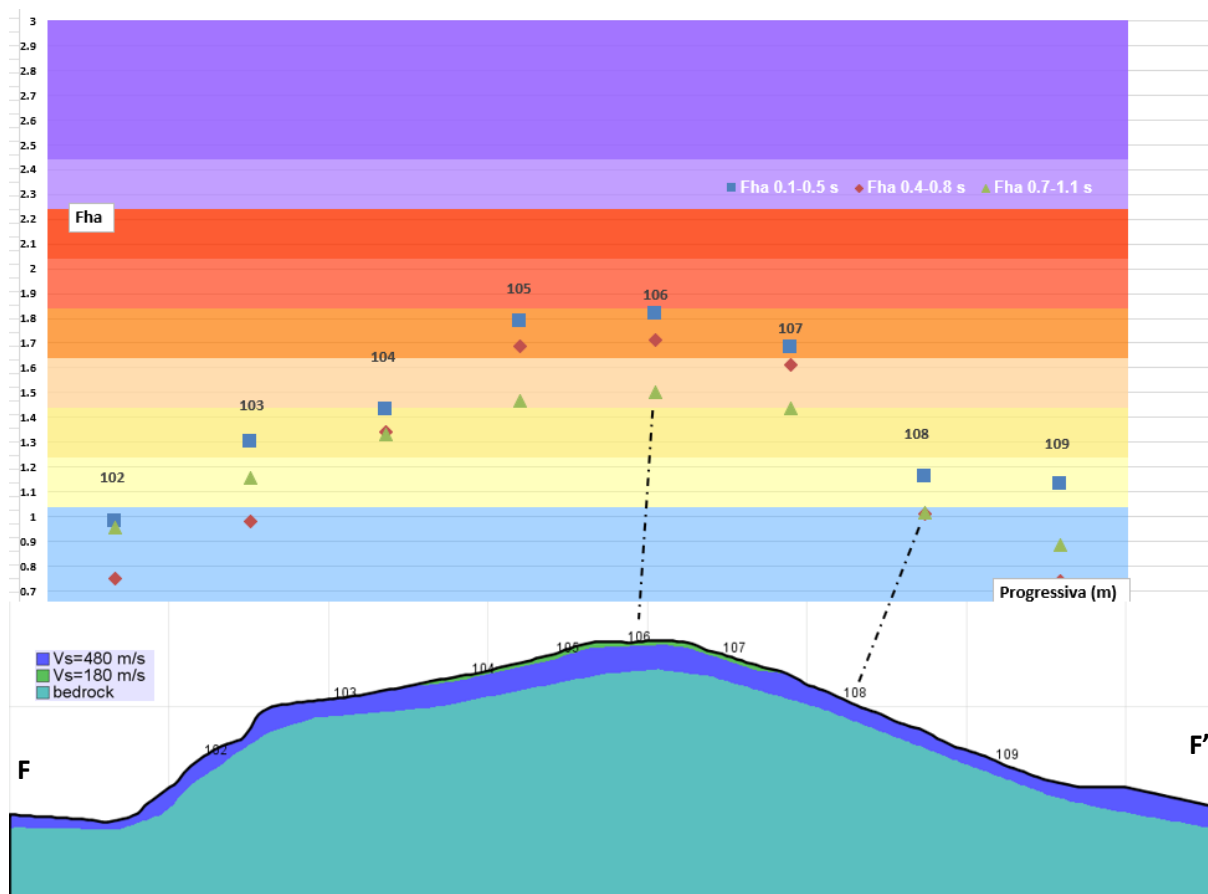
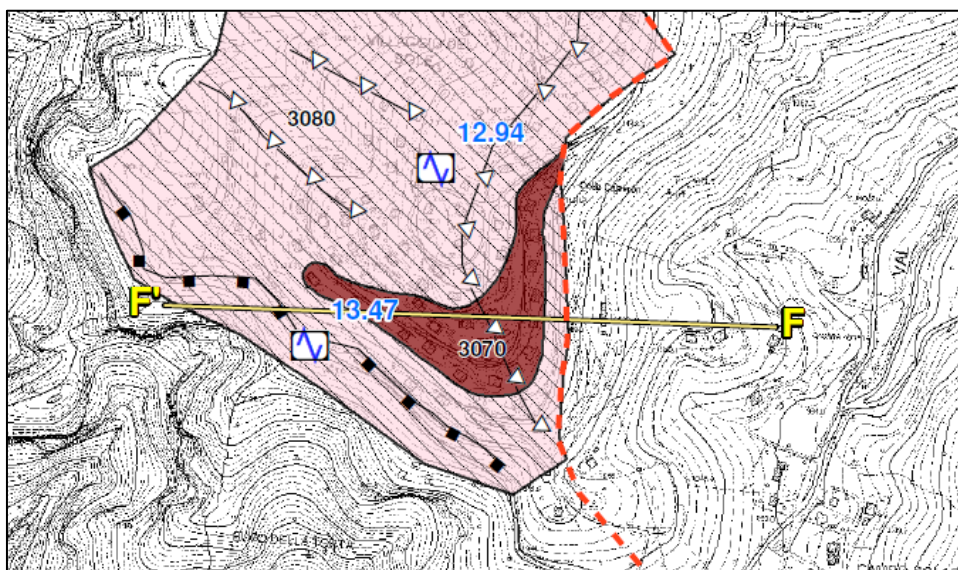
	FA 0,1-0,5s	FA 0,4-0,8s	FA 0,7-1,1
Mops 2004	1.5	1.6	1.3
Mops 2003	1.9	1.4	1.2
Mops 2002	1.6	1.4	1.3
Mops 2001	1.6	1.1	1.1

MODELLAZIONE D-D'



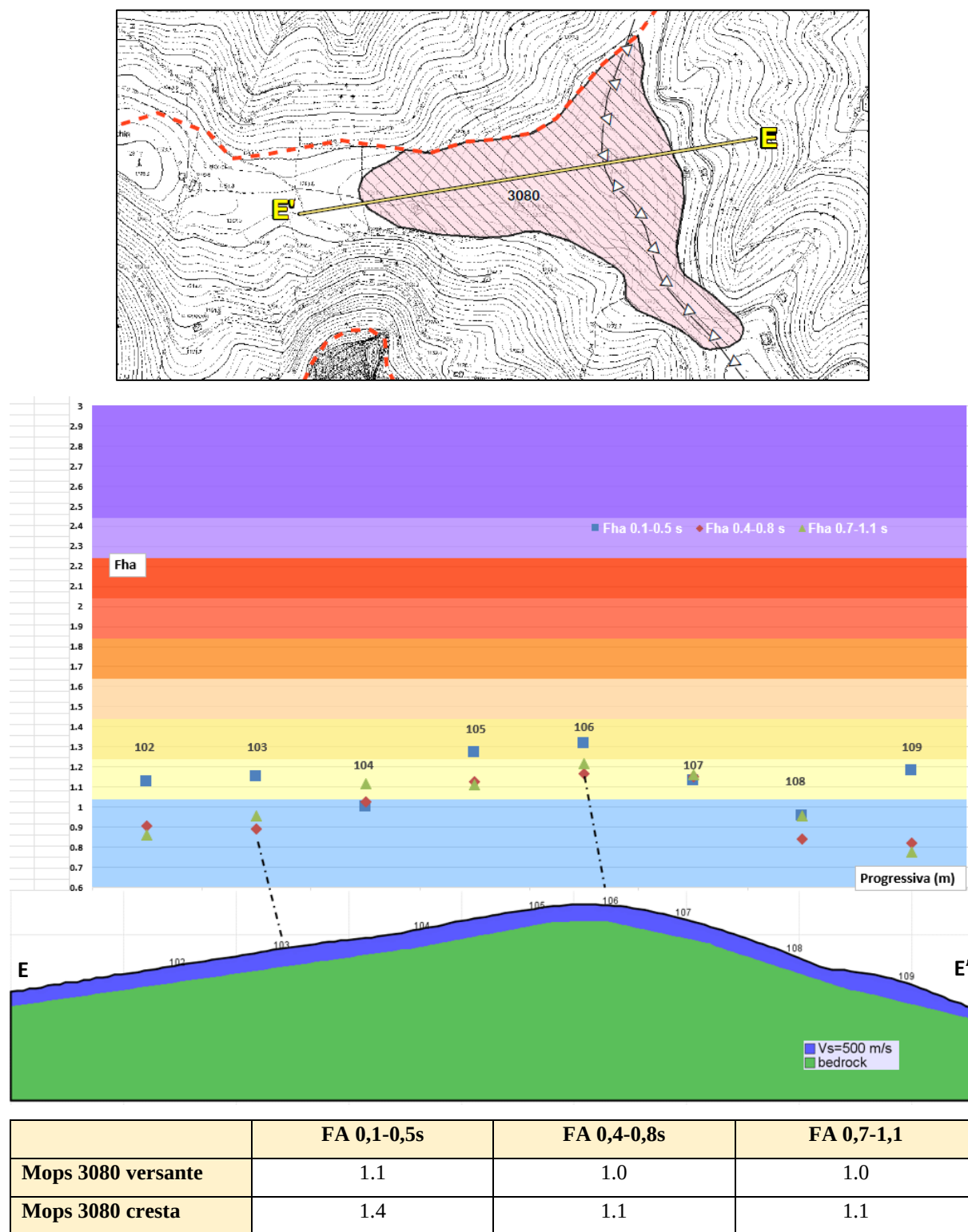
	FA 0,1-0,5s	FA 0,4-0,8s	FA 0,7-1,1
Mops 2004	1.5	1.6	1.3
Mops 2001	1.8	1.1	1.0

MODELLAZIONE F-F'

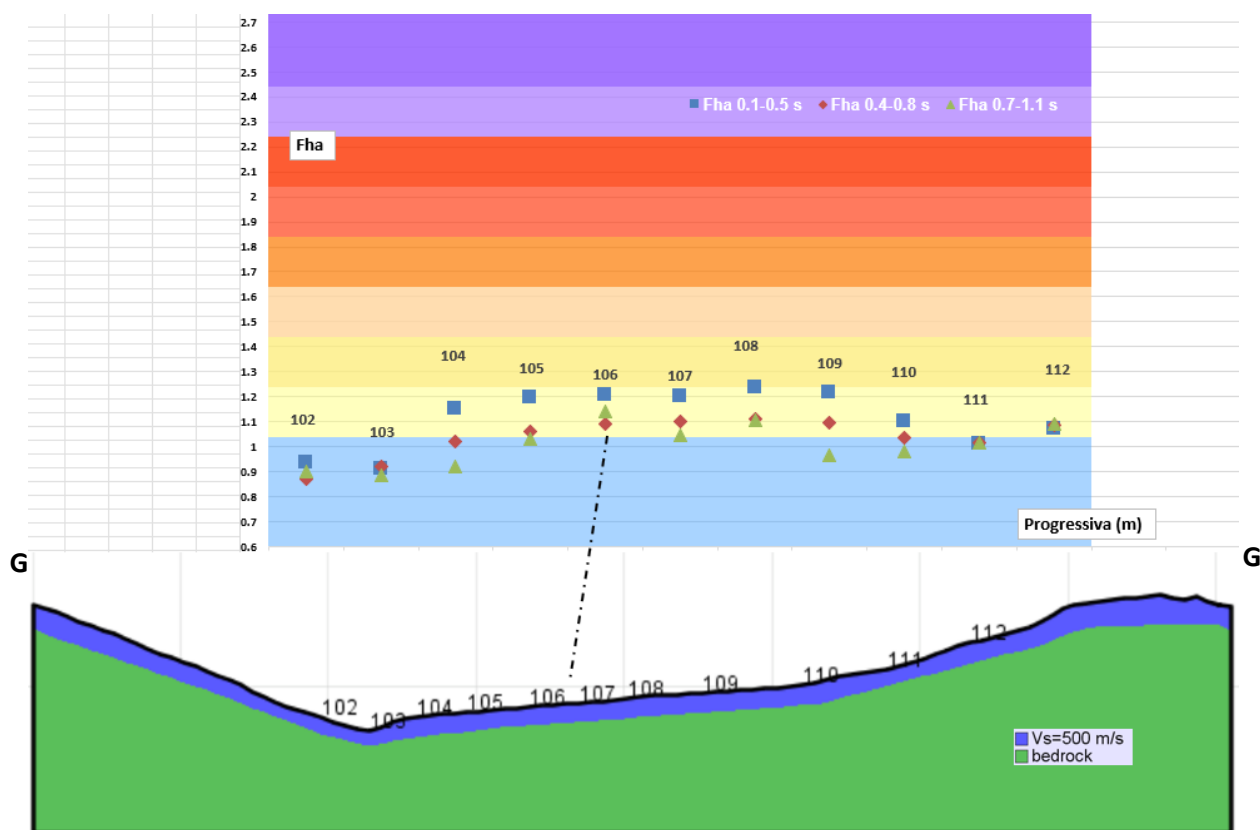
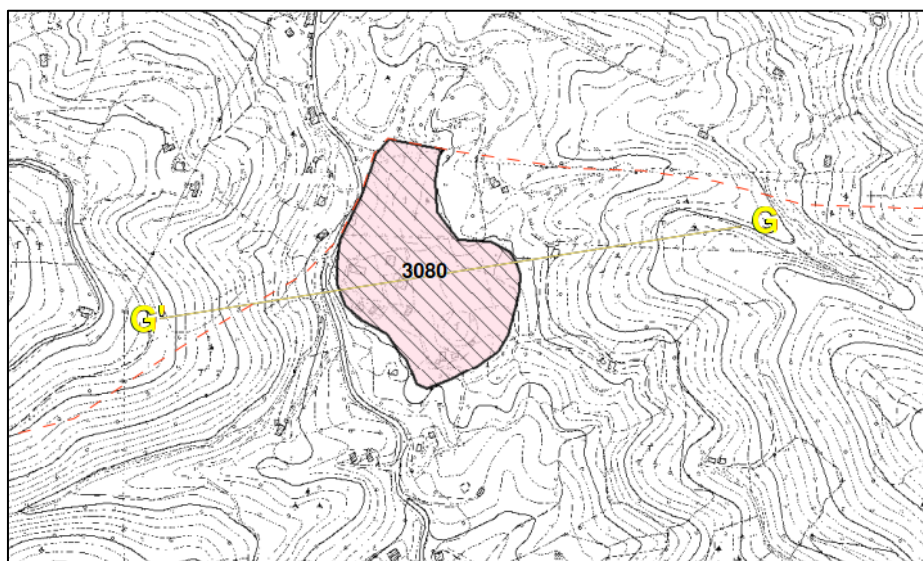


	FA 0,1-0,5s	FA 0,4-0,8s	FA 0,7-1,1
Mops 3070	1.8	1.7	1.4
Mops 3080 versante	1.1	1.0	1.0

MODELLAZIONE E-E'



MODELLAZIONE G-G'



	FA 0,1-0,5s	FA 0,4-0,8s	FA 0,7-1,1
Mops 3080	1.2	1.1	1.1

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

A partire dai risultati ottenuti è stato possibile ottenere la “Carta dei fattori di amplificazione FA(0,1-0,5s)”, la “Carta dei fattori di amplificazione FA(0,4-0,8s)”, e la “Carta dei fattori di amplificazione FA (0,7-1,1s)”, da cui si evince che:

- il comune di Solagna è caratterizzato da valori amplificati del moto sismico di base che variano da 1,0 a 1,9;
- i valori amplificativi massimi di Fa 0,1-0,5s (sensibili ai contrasti superficiali) sono associati alle aree detritiche con depositi eluvio-colluviali, e di falda detritica. Essendo gli spessori di copertura ridotti, i principali contrasti di impedenza sono a profondità minori di 15 m; pertanto, i fattori di amplificazione in questo range sono risultati massimi, mentre quelli ad alti periodi hanno valori di non amplificabilità (1.0);
- relativamente ai substrati, i fattori ottenuti sono correlati principalmente all’effetto topografico (amplificazione in corrispondenza di creste e/o picchi isolati), non avendo riscontrato contrasti di impedenza significativi al loro interno; anche in questo caso, i valori massimi si sono ottenuti nel range 0,1-0,5s;
- per quanto riguarda i depositi ghiaiosi della pianura alluvionale, anche i fattori di amplificazione hanno messo in evidenza quanto affermato nella carta delle frequenze e cioè che la zona 2005 presenta valori amplificativi maggiori rispetto alla 2004, ai bassi periodi, a causa dei contrasti di impedenza più superficiali tra copertura e substrato. Invece, nei depositi di valle (2004) FA 0,1-0,5s ed FA 0,4-0,8s mostrano valori simili, in quanto lo spessore di copertura aumenta fino a circa 30 m dal p.c. locale, influenzando le amplificazioni ai medi periodi.

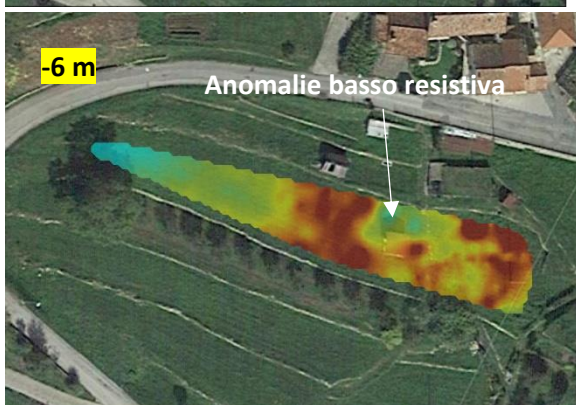
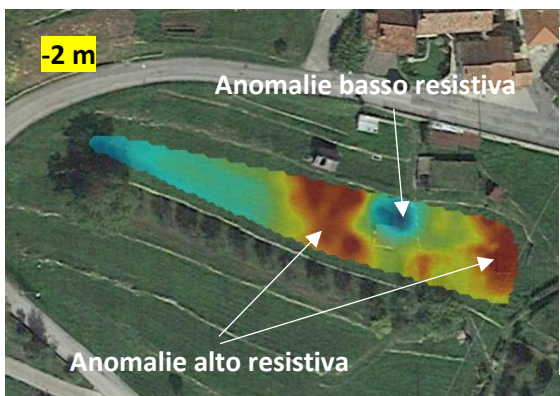
Si specifica che per quanto riguarda la zona MOPS 2009 (Materiali di Riporto), non avendo informazioni dettagliate sulla sismo-stratigrafia e sugli spessori dei riporti, non è stata studiata ad un livello 3.

8.2 Indagine elettromagnetica

Al fine di investigare la presenza di cavità nel substrato calcareo che potrebbe generare condizioni di instabilità, sono stati analizzati n. 9 punti sparsi nel territorio comunale e prossimi ad aree oggetto di future urbanizzazioni/varianti urbanistiche. A seguire, per ogni sito, si riporta una scheda sintetica con i risultati dell’interpretazione elettromagnetica, ubicazione e report fotografico.

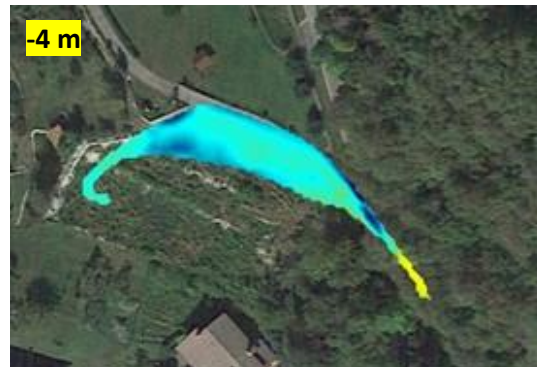
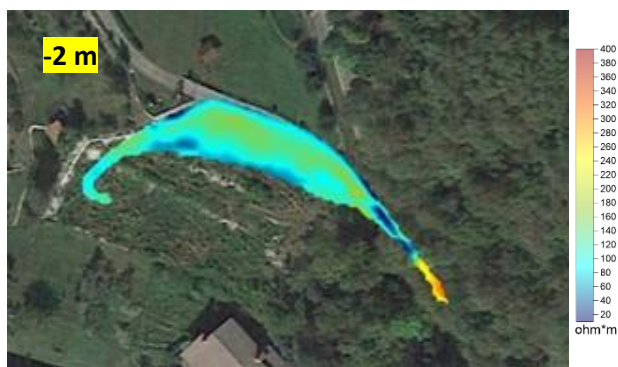
L’indagine ha consentito di misurare la distribuzione dei valori di resistività nelle aree indagate, fino alla profondità di circa 6 m da p.c. con una scala di colori che va dal blu (bassa resistività) al rosso (elevata resistività). In generale, in contesti come quello oggetto di studio, valori molto elevati di resistività, possono essere associabili alla presenza di cavità o fratture nel substrato calcareo o presenza di un materiale di copertura caotico o grossolano. Per quanto riguarda i valori di resistività più bassi, in questo caso, possono essere associabili a presenza di una circolazione idrica sotterranea, o ad un materiale più fine. La presenza di bassa resistività potrebbe essere anche legata ad una cavità, o ad una depressione, con un riempimento costituito da materiale fine conduttivo. Si descrivono di seguito i risultati delle singole indagini effettuate.

UBICAZIONE INDAGINE – in rosso perimetro aree di variante urbanistica



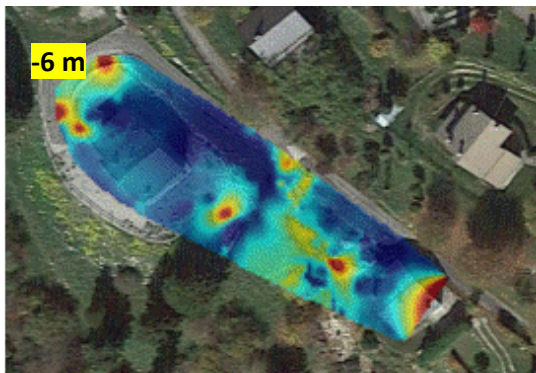
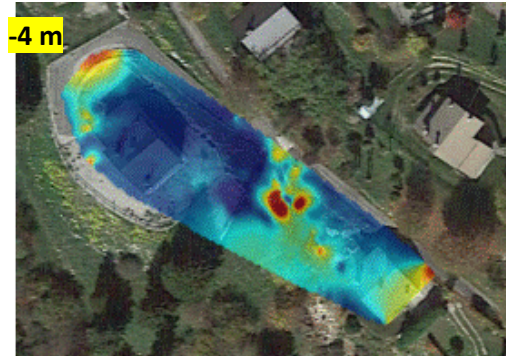
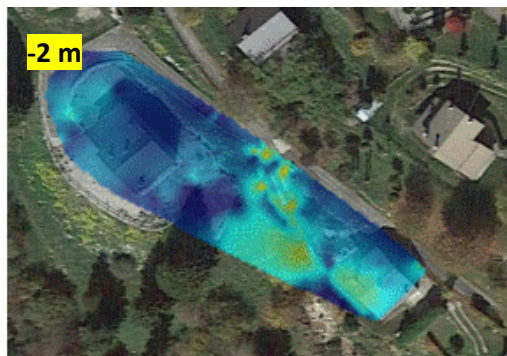
L'area presenta una variabilità nei valori di resistività misurati. Si evidenzia nel settore ad est, un'anomalia basso resistiva di forma circolare ($p < 25 \text{ ohm} \cdot \text{m}$), ben visibile nella mappa a 2 e a 6 m dal p.c. Quest'area è situata all'interno di un'area alto resistiva, con valori di p che superano i $200 \text{ ohm} \cdot \text{m}$.

UBICAZIONE INDAGINE – in rosso perimetro aree di variante urbanistica



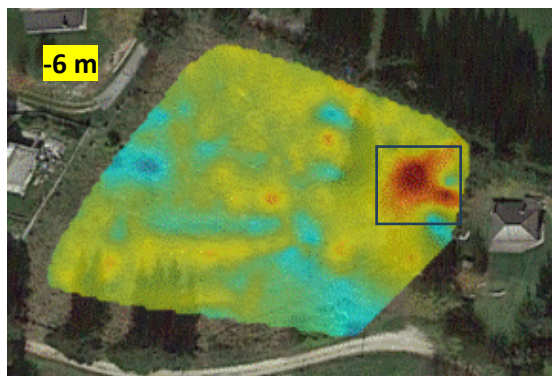
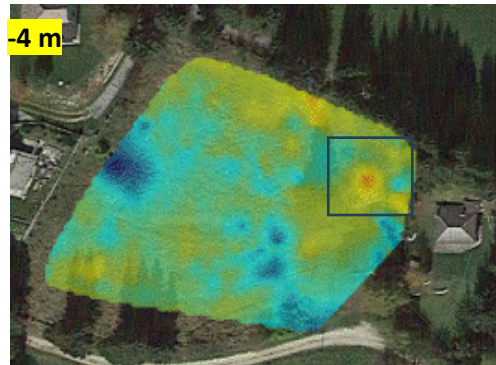
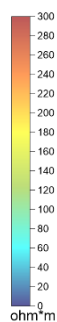
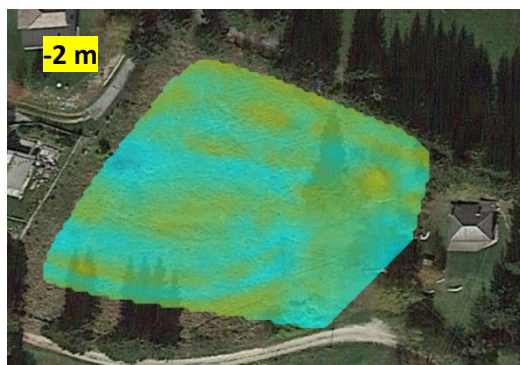
Il sito EM2, presenta una distribuzione piuttosto omogenea nei valori di resistività misurati. Non si evidenziano anomalie associabili a particolari criticità.

UBICAZIONE INDAGINE – in rosso perimetro aree di variante urbanistica



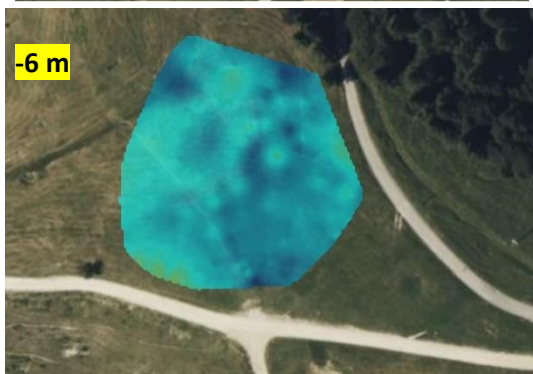
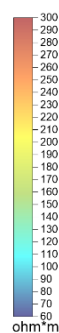
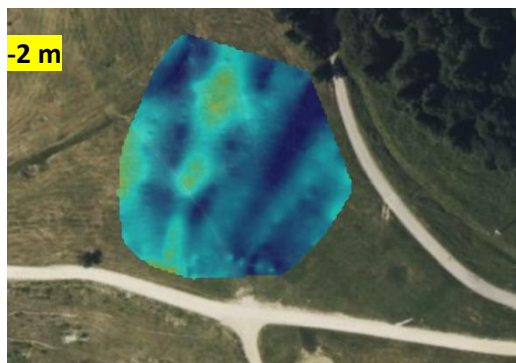
Anche in questo caso, si evince una distribuzione di valori di resistività abbastanza omogenea. Le aree ad elevata resistività, al centro e sui bordi delle mappe, sono associate agli elementi antropici superficiali, che hanno disturbato le misure.

UBICAZIONE INDAGINE – in rosso perimetro aree di variante urbanistica



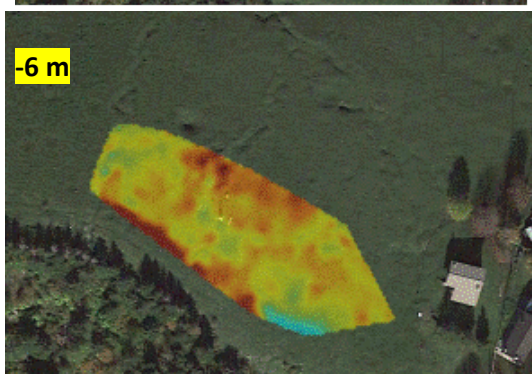
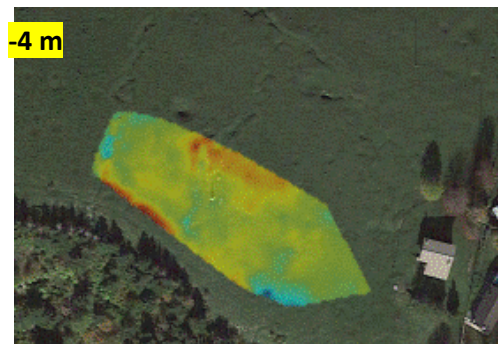
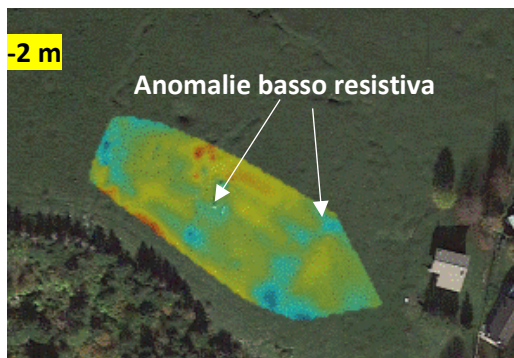
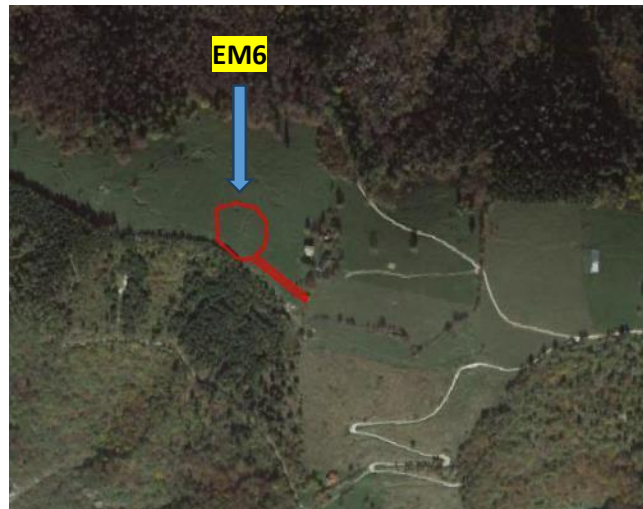
Le planimetrie di resistività presentano una certa variabilità nei valori di ρ . In particolare, è bene evidenziare la presenza di un'anomalia ad elevata resistività ($\rho > 200 \text{ ohm} \cdot \text{m}$) che è dovuta alla cavità presente in sito, rappresentata in foto. Il resto dell'area presenta delle variazioni di resistività ma non così elevate da poter essere riconducibili ad ulteriori cavità.

UBICAZIONE INDAGINE – in rosso perimetro aree di variante urbanistica



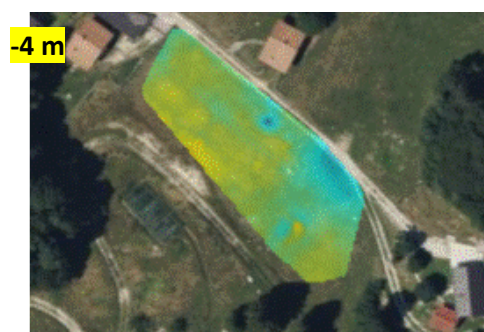
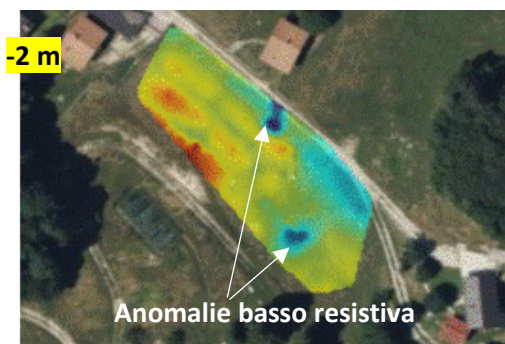
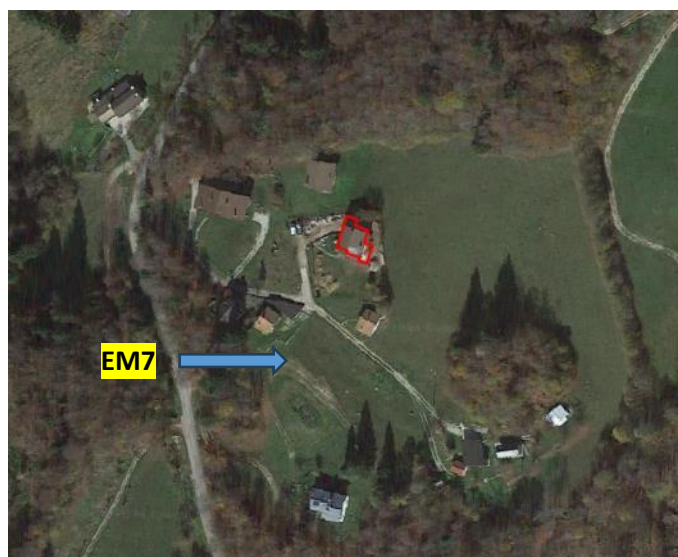
Le indagini non evidenziano variazioni particolari di resistività. I valori si attestano intorno a 80-100 ohm*m. Non si segnalano anomalie legate a presenza di cavità.

UBICAZIONE INDAGINE – in rosso perimetro aree di variante urbanistica



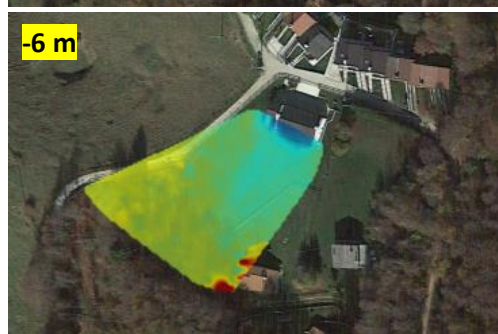
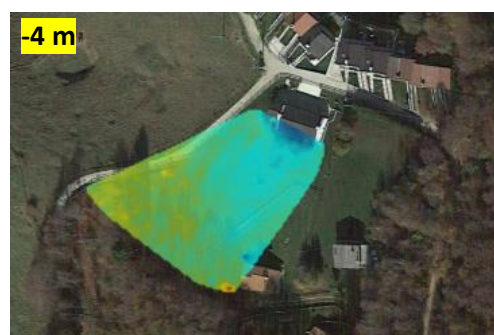
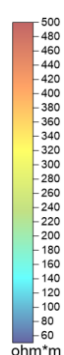
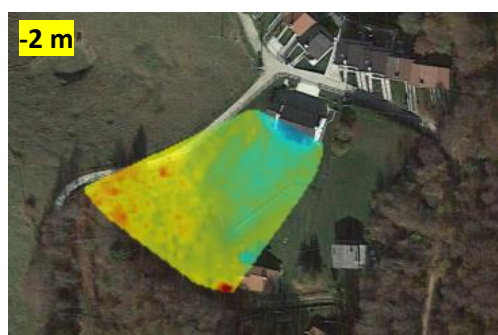
Le indagini presentano una distribuzione di resistività omogenea con valori che si attestano intorno ai 95 ohm*m. Si evidenzia la presenza di due anomalie di forma allungata con direzione nord -sud, che possono essere associabili alle trincee presenti nell'area.

UBICAZIONE INDAGINE – in rosso perimetro aree di variante urbanistica



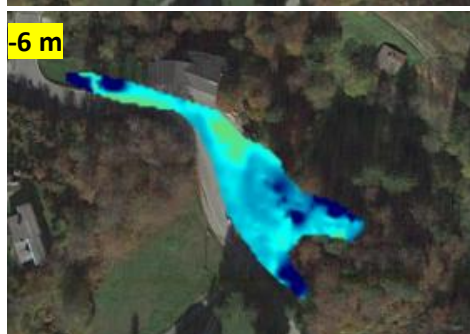
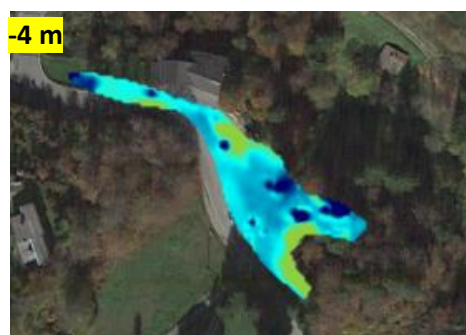
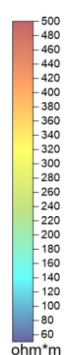
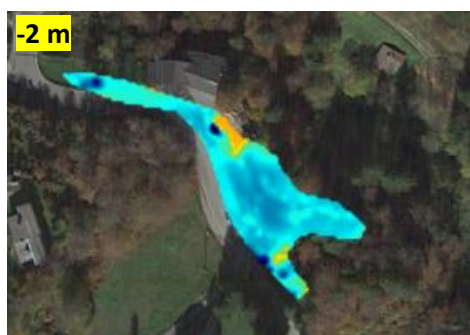
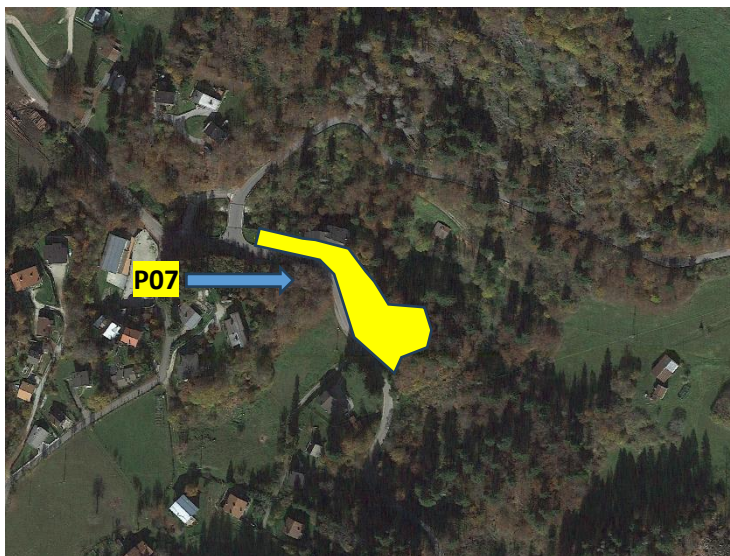
Per quanto riguarda il sito 7, si evidenzia la presenza di 2 anomalie, caratterizzate da bassa resistività ($\rho < 40 \text{ ohm} \cdot \text{m}$) a circa 2 m di profondità da p.c. Si evidenzia inoltre un'anomalia alto resistiva ($\rho > 500 \text{ ohm} \cdot \text{m}$) come indicato in immagine a 6 m di profondità. Considerando, l'elevato valori di resistività, non è da escludere che questa anomalia possa essere associabile alla presenza di una cavità nel sottosuolo.

UBICAZIONE INDAGINE



Nel sito E03, non si evidenziano particolari anomalie alto resistive associabili a presenza di cavità. Il modello di resistività evidenzia un graduale aumento di resistività verso il settore ovest dell'area investigata riconducibile probabilmente ad una variazione litologica nell'area. Nel settore nord si evidenzia invece un'anomalia conduttiva dovuta al disturbo generato dall'edificio presente.

UBICAZIONE INDAGINE

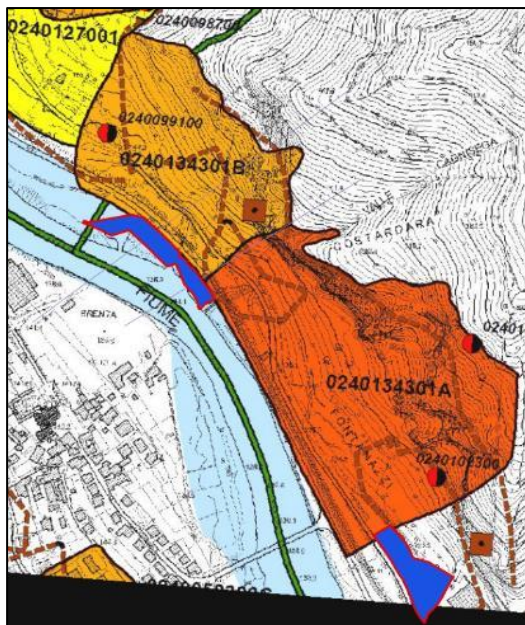


Nel sito P07, si evidenziano delle variazioni di resistività all'interno dell'area di indagine, legate però alla presenza di elementi di disturbo superficiali, quali tombini, pali della luce, ringhiere, ed elementi strutturali metallici, che hanno influito sulla misura.

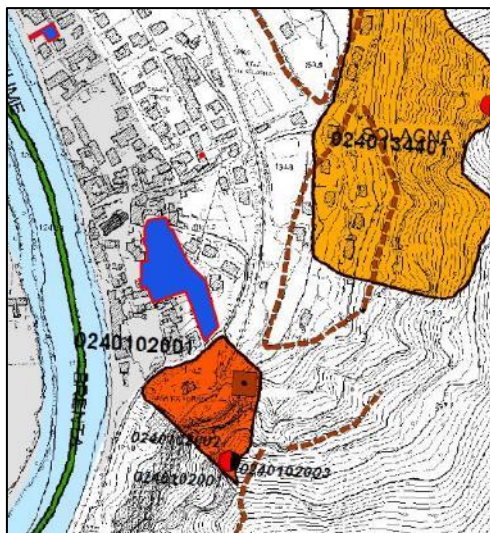
Non si evidenziano particolari anomalie alto resistive associabili a presenza di cavità nell'area

8.3 Definizione dell'area interessata dalla propagazione di fenomeni di crollo

In merito alle instabilità di versante, alcune aree di studio con approfondimento di Livello 3 oggetto di variante, si trovano ai piedi di versanti con elevate pendenze e soggetti a fenomeni di instabilità, come riportato nella cartografia del PAI comunale, di cui si riporta un estratto a seguire e in cui si sono sovrapposte in azzurro le aree in esame. Tali frane, nella documentazione che accompagna le carte, sono definite come “Aree di crollo / ribaltamento” con pericolosità variabile da P3 a P4.:



Estratto Carta PAI con, in aggiunte, le aree di variante

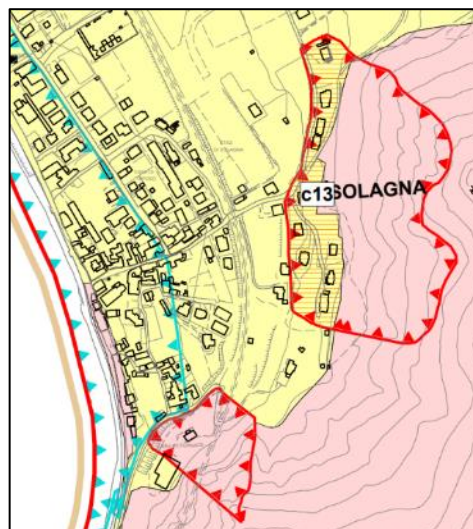
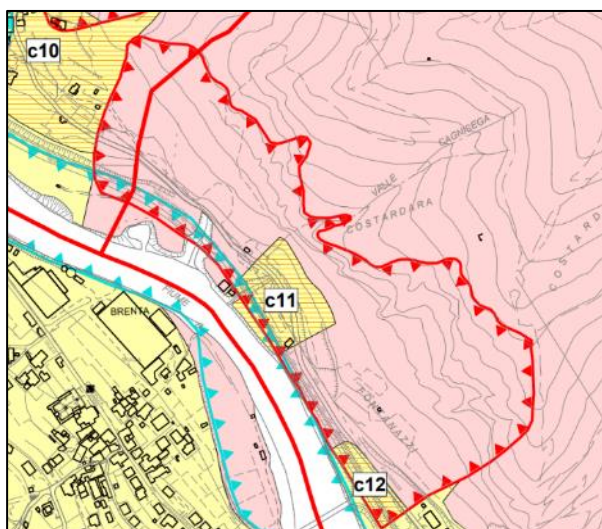


Inoltre, tali aree, relativamente alla compatibilità a fini edificatori, ricadono per gran parte in “Aree non idonee” o “Idonee a condizione tipo C” secondo l’Art. 15 delle Norme Tecniche di Attuazione di cui si riportano le prescrizioni in estratto a seguire:

CLASSE DI COMPATIBILITÀ III – TERRENI NON IDONEI

3. Terreni in cui per le particolari condizioni di pendenza, di situazione morfologica e di condizioni di pericolosità idrogeologica non sono ammessi interventi di nuova edificazione. Si applicano le disposizioni di cui all’art. 12 delle Norme di attuazione del PAI.

- c) Terreni idonei a condizione di tipo c): terreni la cui edificabilità è condizionata alla preliminare realizzazione di interventi di riduzione della pericolosità delle aree ed all’attuazione di un piano di manutenzione delle opere, nonché all’aggiornamento delle perimetrazioni, delle classi di pericolosità del PAI, secondo le procedure di cui all’art. 6 del PAI medesimo; gli interventi edilizi dovranno essere conformi a quanto prescritto dal PAI per le nuove classi di pericolosità assegnate. Tali aree sono le seguenti:



Estratto Carta delle Fragilità per il comune di Solagna

Le frane di crollo, in funzione della loro elevata velocità, costituiscono una grave minaccia per le infrastrutture e i centri abitati. Per tale motivo risulta estremamente importante riuscire ad analizzarne e valutarne la diffusione spaziale e l'eventuale interferenza con i sistemi antropici. Il movimento di caduta può esplicarsi secondo i moti gravitativi di caduta libera, rimbalzo, rotolamento e scivolamento. Il principio fondamentale che regola la caduta dei massi è comunque quello secondo il quale ogni blocco, soggetto ad un movimento su un pendio, rispetta, in ogni istante, la condizione di massima efficienza del moto. Di conseguenza sia le trattorie compiute da un blocco, sia il tipo di moto assunto durante il percorso sono quelli che determinano la minor perdita di energia cinetica.

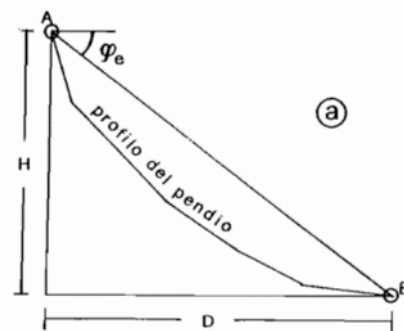
Per analizzare il movimento di caduta e tentare di individuare le aree maggiormente soggette a propagazione di massi si possono utilizzare diversi metodi che possono venir applicati per approssimare la situazione reale. Tali metodi possono essere suddivisi in due macrogruppi fondamentali: i modelli di tipo morfologico (o empirici) e i modelli fisicamente basati (o cinematici).

I **modelli morfologici** sono essenzialmente indicati per una prima valutazione del massimo avanzamento dei massi, dipendono dalla topografia del versante e si basano su analisi statistiche eseguite su crolli storici. Rappresentativi di questo tipo di modello sono i metodi zenitali sviluppati da diversi autori (Onofri & Candian, 1979; Heinimann et al., 1998; Jaboyedoff & Labiouse, 2003).

I **modelli cinematici** affrontano invece il problema della delimitazione del massimo avanzamento dei blocchi in modo analitico considerando la fisica del moto e le relative equazioni pur con qualche necessaria semplificazione. Sono basati su diversi algoritmi che descrivono le relazioni esistenti tra tipo di movimento (caduta, rimbalzo, rotolamento e scivolamento), energia del blocco e coefficienti di restituzione del versante.

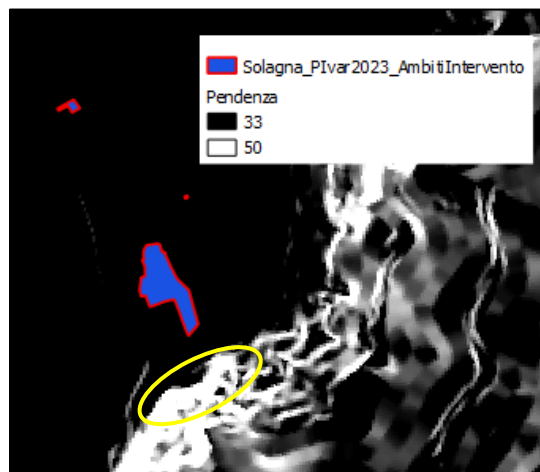
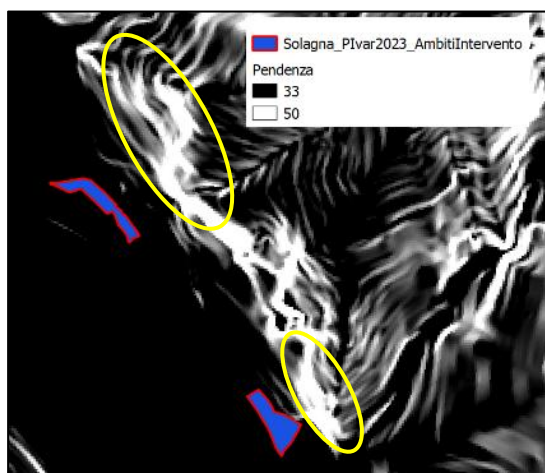
In tale contesto, si è optato per l'utilizzo di un metodo empirico, ovvero il così detto "*metodo zenitale*" proposto da Heinimann et al. (1998). Tale metodo, impostato su parametri di ingresso facilmente reperibili (modello digitale del terreno), consente infatti una **valutazione preliminare e indicativa** su vasta scala delle aree di massimo avanzamento dei massi considerando la dissipazione di energia proporzionale alla lunghezza del percorso, in rapporto alla differenza di quota tra il punto di distacco e di arrivo.

In particolare esso si basa sul concetto del "cono d'ombra" che delimita, orizzontalmente e verticalmente, l'area entro la quale si arresta la quasi totalità dei blocchi. Il "**cono d'ombra**" viene essenzialmente definito dall'angolo di scansione verticale ovvero dall'angolo del segmento congiungente il punto di distacco e il punto di arresto e, nello spazio tridimensionale, dall'angolo di scansione orizzontale ovvero dall'angolo di deviazione angolare rispetto alla massima pendenza.



In particolare il metodo è stato semplificato ed adeguato alle specifiche dell'area in esame, implementando procedure GIS e seguendo le diverse fasi spiegate a seguire:

1. Selezione possibili **aree di distacco**: dal momento che la litologia coinvolta nel processo è unica (substrato roccioso lapideo) si è passati direttamente ad individuare il valore di inclinazione ritenuto critico ai fini dell'innescio di fenomeni franosi. In accordo con i valori proposti da vari autori, sono state vagliate inclinazioni del pendio maggiori di 33° (Heinimann et al., 1998), 40° e 45° (Jaboyedoff e Labiouse, 2003). Dal confronto tra i vari andamenti delle pendenze, sono state selezionate come aree di potenziale distacco, in via cautelativa, le zone con valori maggiori di 40° .



2. Individuazione aree di possibile propagazione: Le zone di possibile propagazione di crolli sono state individuate, a partire dai punti di potenziale distacco, utilizzando il metodo zenitale sviluppato in tre dimensioni. Il valore dell'angolo di scansione verticale (φ) può essere stimato sulla base della relazione:

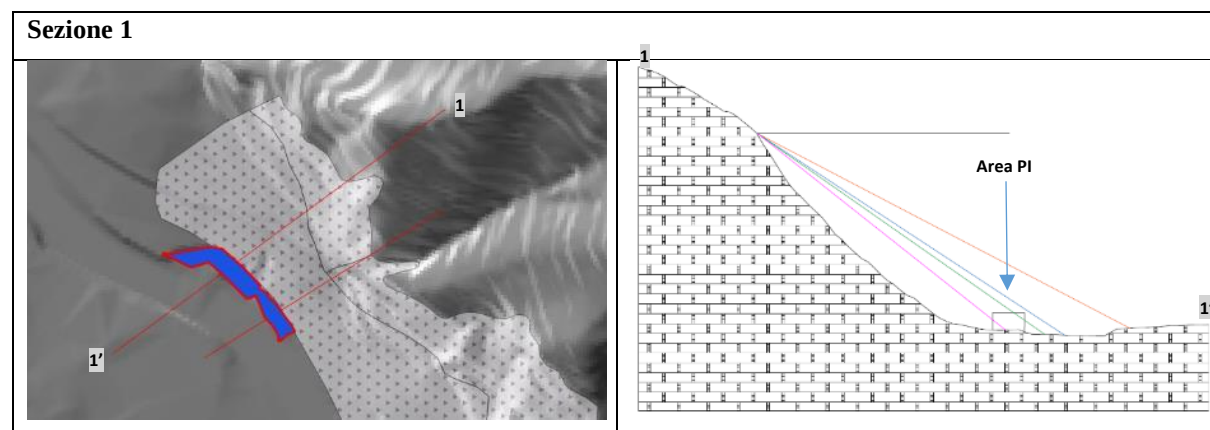
$$\varphi = \arctan(H/L)$$

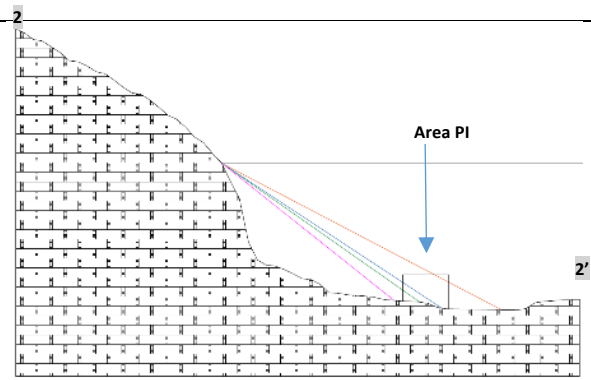
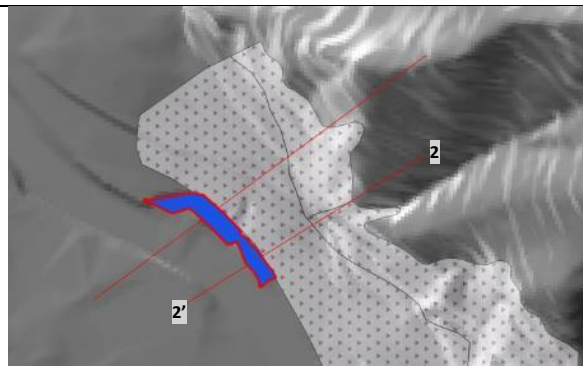
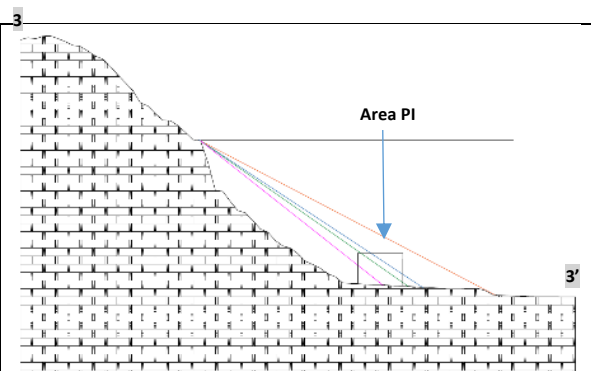
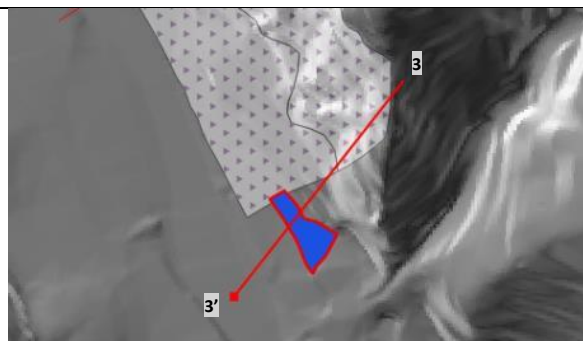
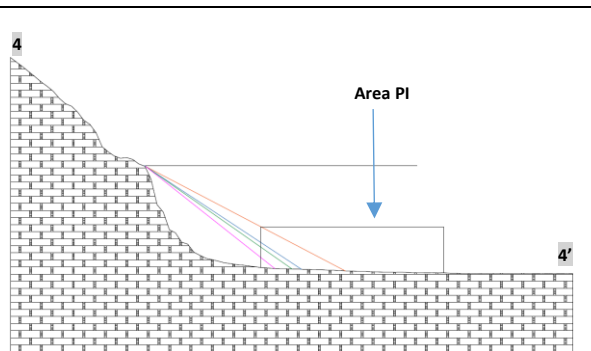
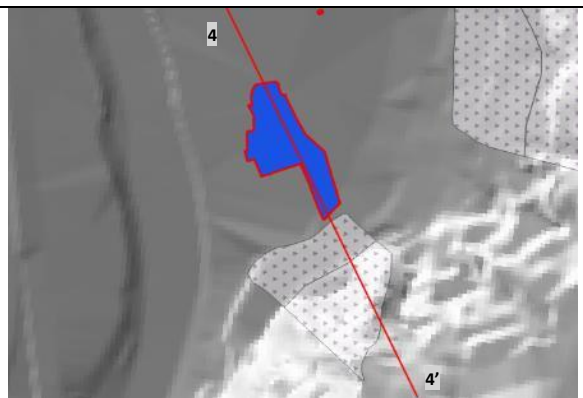
dove H=dislivello tra la zona di distacco e di arresto e L=massima distanza percorsa.

Vari autori hanno proposto, su base statistica in funzione di frane di crollo storiche, angoli di scansione verticale: Onofri e Candian (1979) 27°-41°; Toppe (1987) 32°; Heinimann et al (1998) 33°-37°; Focardi e Iotti (2001) 27°-29°; Jaboyedoff e Labouise (2003) 33°; Comminas (2003) 26°-54°.

Al fine di dare un'indicazione preliminare e indicativa dell'estensione del cono d'ombra, nella sezioni mostrate a seguire, si sono ipotizzati i seguenti valori di angolo di scansione verticale: 28° (linea rossa)-33° (linea blu)-35° (linea verde)-38° (linea viola).

3. Creazione profili 2D e individuazione delle traiettorie per diversi valori di φ : a partire dal DTM, si sono ricavati i profili di elevazione in cui sono state riportate le diverse traiettorie angolate sulla base di φ fino al punto di massimo arrivo. A seguire, per ogni sezione indagata, si riporta la traccia del profilo e il relativo grafico realizzato in Autocad.



Sezione 2**Sezione 3****Sezione 4**

Dalle analisi condotte è possibile osservare che le aree di PI rientrano, in tutti i casi, nel cono d'ombra e pertanto potrebbero essere interessate dai fenomeni franosi di caduta/rotolamento massi.

È importante sottolineare che il modello utilizzato fornisce una stima empirica delle aree di massimo avanzamento dei blocchi, senza descrivere in termini matematici e rigorosi la previsione del moto caduta massi. Pertanto, deve essere considerata come un'analisi preliminare volta principalmente ad evidenziare quali siano effettivamente le aree a maggior rischio rispetto a questo fenomeno ed indicare quali siano le zone da sottoporre a specifici studi di dettaglio da svolgere durante una successiva fase di progettazione.

9 PROPOSTA PER LE NORME TECNICHE OPERATIVE (NTO)

Nel presente capitolo viene proposta una norma di riferimento da inserire all'interno delle "Norme Tecniche Operative - NTO" del Comune di Solagna al fine di recepire e rendere operativo lo studio di Microzonazione Sismica condotto.

Art.X Riduzione del rischio sismico

Lavoro di riferimento: Studio di Microzonazione Sismica di Livello 3

Lo studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 identifica vari scenari di pericolosità sismica locale che concorrono alla definizione delle scelte di Piano.

Lo studio è parte integrante dello strumento urbanistico comunale, ma nel caso di esecuzione di opere o di interventi nel territorio non potrà in alcun modo sostituire le indagini e le elaborazioni puntuali, esplicitamente previste dalle vigenti Norme Tecniche sulle Costruzioni, con le successive modifiche e integrazioni.

Lo studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 ha chiaramente evidenziato le criticità sismiche del territorio comunale per quanto riguarda l'amplificazione sismica locale, a causa di un assetto tettonico-strutturale complesso e dei contatti sismo-stratigrafici tra litologie che possono rispondere in modo differente alla sollecitazione sismica. In particolare, lo studio ha mostrato che:

- Le zone collinari, caratterizzate da depositi eluvio-colluviali e detritici (falda detritica, conoidi) e le aree infra-vallive con spessori ridotti a copertura del substrato e morfologie articolate, hanno presentato amplificazioni massime nel range 0,1-0,5s, sensibile ai contrasti sismici superficiali, e nulle negli alti periodi (1.0);
- nelle zone di pianura alluvionale più distale, il progressivo aumento dello spessore di copertura al di sopra del substrato si traduce in valori levati dei fattori di amplificazione sia ai bassi che ai medi periodi (FA 0,1-0,5s e FA 0,4-0,8s); rimangono minimi gli FA tra 0,7-1,1s perché l'ultimo contrasto di impedenza registrato dalle misure geognostiche non è molto profondo (<30-40 m dal p.c. locale);
- relativamente ai substrati, i fattori ottenuti sono correlati principalmente all'effetto topografico (amplificazione in corrispondenza di creste e/o picchi isolati), non avendo riscontrato contrasti di impedenza significativi al loro interno.

Inoltre, l'analisi dei microtremori attraverso la tecnica Horizontal to Vertical Spectral Ratio (H.V.S.R.) ha consentito di stimare le frequenze di risonanza dei depositi, che dal punto di vista ingegneristico-strutturale rappresentano un parametro fondamentale per una corretta progettazione sismica delle strutture (cfr. Carta delle frequenze). In particolare, il Comune di Solagna presenta frequenze di risonanza caratterizzate da rapporti H/V molto elevati, per cui risulta possibile ipotizzare importanti amplificazioni del moto sismico in superficie.

Per questo, in fase di progettazione, attraverso la consultazione delle cartografie dello studio di MS, si dovranno valutare le condizioni di amplificabilità/risonanza del sito al fine di valutare la metodologia più appropriata per determinare l'azione sismica:

- modellazioni numeriche di Risposta Sismica Locale;
- approccio semplificato da Categoria di Sottosuolo e Categoria Topografica.

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

La determinazione della velocità delle onde di taglio V_s , indispensabili per la ricostruzione del modello sismo-stratigrafico, dovrà essere fatta utilizzando appropriate indagini sismiche, in foro (cross-hole, down-hole, cono sismico) o in superficie (MASW, Re.Mi., ESAC, sismica a rifrazione).

Alla luce di quanto sopra indicato si ritiene opportuno che in fase di progettazione si tengano in debita considerazione gli spettri di risposta sismica locale elaborati per questo studio per le varie microzone; il progettista attraverso il confronto tra gli spettri proposti (non utilizzabili per la progettazione delle opere) e quelli derivanti dall'utilizzo delle categorie di sottosuolo delle NTC18, valuterà se sia necessario o meno svolgere una analisi di RSL avanzata per l'intervento di progetto.

Anche per determinare l'accelerazione orizzontale al suolo (a_g), da utilizzare nelle fasi di verifica, si richiede un'attenta valutazione sulla metodologia più appropriata (approccio semplificato o modellazione numerica di RSL).

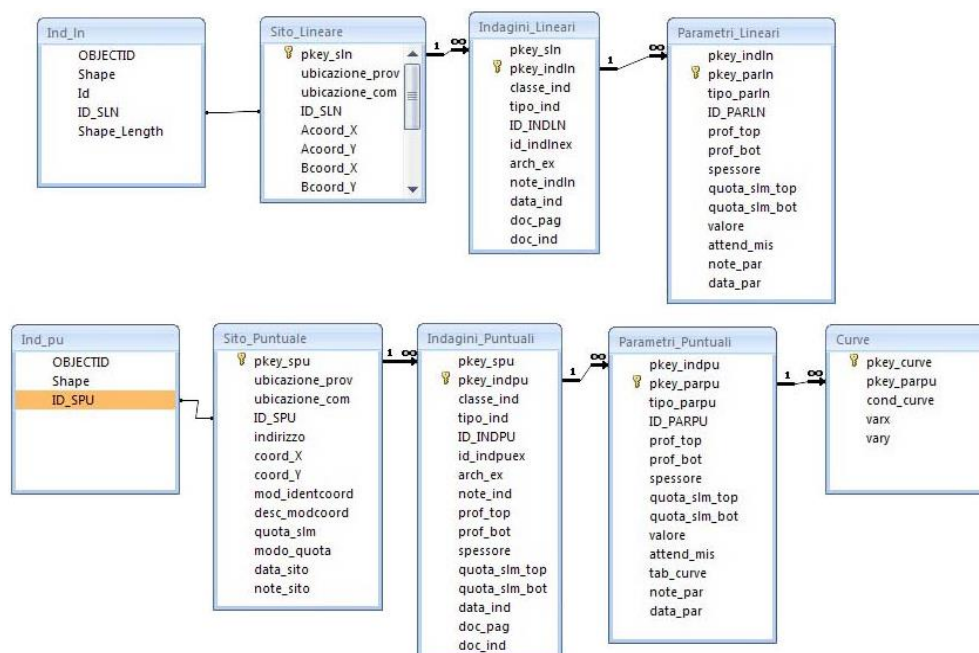
10 REDAZIONE CARTOGRAFICA E CREAZIONE BASI INFORMATIVE

L'analisi di MS ha prodotto informazioni che sono state cartografate secondo le indicazioni previste dalle linee guida emanate dalla Protezione Civile Nazionale.

I *layers* informativi prodotti sono stati organizzati secondo la banca dati geografica definita dagli “Standard di rappresentazione e Archiviazione Informatica” - versione 4.2 - emanati dalla “Commissione tecnica per il monitoraggio degli studi di Microzonazione Sismica”. Gli Standard sopracitati definiscono le specifiche tecniche per la redazione in ambiente GIS degli elaborati cartografici della MS.

Per quanto riguarda la rappresentazione cartografica, anch'essa è stata realizzata utilizzando le vestiture previste dagli “Standard di rappresentazione e Archiviazione Informatica” - versione 4.2.

Il contenuto informativo della “Carta delle indagini” si esplica attraverso la relazione tra gli *shapefiles* (Ind_pu e Ind_ln) e le tabelle ad essi collegate, appositamente strutturate per archiviare i dati alfanumerici dei siti, delle indagini e dei parametri delle indagini.



Relazione fra tabelle e shapefiles
(Figura 2.1-1 “Standard di Rappresentazione e archiviazione informatica” - versione 4.0b)

Lo *shapefile* Ind_pu rappresenta la primitiva puntuale che posiziona spazialmente il relativo punto d'indagine, identificato univocamente nel campo ID_SPU; quest'ultimo costituisce la chiave di collegamento (*join*) alla tabella **Sito_Puntuale**, destinata all'archiviazione dei parametri di georeferenziazione dei punti d'indagine.

La tabella **Indagini_Puntuale** descrive le tipologie d'indagine eseguite e le informazioni necessarie alla tracciabilità, mediante collegamento esterno con la relativa documentazione in formato pdf. Infine, nella tabella **Parametri_Puntuale** sono archiviati i parametri associati alle prove descritte nella tabella Indagini_Puntuale.

Lo *shapefile* Ind_ln costituisce la primitiva lineare che posiziona spazialmente le indagini lineari, identificati univocamente nel campo ID_SLN; quest'ultimo rappresenta la chiave di collegamento alla tabella **Sito_Lineare**, nella quale vengono archiviate le codifiche del tracciato. La tabella **Indagini_Lineari** definisce la tipologia d'indagine eseguita e le informazioni necessarie alla sua

Dott. Geol. Matteo Collareda	Dott.ssa Geol. Laura Guerra
con la collaborazione di:	Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli

tracciabilità, tramite un collegamento esterno con documentazione corrispondente, in formato pdf. Infine, la tabella **Parametri_Lineari** contiene i parametri definiti dalle prove descritte nella tabella **Indagini_Lineari**.

Il contenuto informativo riportato nella “Carta delle frequenze” è definito dal campo VALORE della tabella **Parametri_Puntuali**, dove viene specificato il valore della frequenza fondamentale di risonanza espresso in Hertz (Hz) nell’intervallo compreso tra 0,1 Hz e 20,0 Hz. La restituzione grafica dei valori di frequenza si riferisce a quanto proposto per la “Carta delle frequenze” di risonanza negli “Standard di rappresentazione cartografica e archiviazione informatica - versione 4.2.

Le suddette tabelle sono state compilate e archiviate nel database di Access **Cdl_tabelle.mdb** contenuto, assieme agli *shapefile* **Ind_pu** e **Ind_ln**, nella cartella **Indagini**.

La “Carta geologico-tecnica” e la “Carta delle microzonee omogenee in prospettiva sismica” sono state realizzate in formato vettoriale e rappresentano le informazioni contenute nelle cartelle **GeoTec** ed **MS1**.

La cartella **GeoTec** contiene i seguenti *layers* informativi.

Nome file	Tipo <i>shapefile</i>	Descrizione
Elineari	Lineare	Elementi lineari (escluse le isobate)
Epuntuali	Puntuale	Elementi puntuali
Geoidr	Puntuale	Elementi puntuali geologici e idrogeologici
Geotec	Poligonale	Unità geologico tecniche
Forme	Poligonale	Poligoni associati alle conoidi alluvionali

Nella cartella **MS1** sono invece contenuti i seguenti *shapefile*

Nome file	Tipo <i>shapefile</i>	Descrizione
Stab	Poligonale	Zone stabili suscettibili di amplificazione locale
Instab	Poligonale	Zone di attenzione per instabilità

Nella cartella **MS23** sono contenuti i seguenti *shapefile*

Nome file	Tipo <i>shapefile</i>	Descrizione
Stab	Poligonale	Zone stabili suscettibili di amplificazione locale
Instab	Poligonale	Zone stabili suscettibili di amplificazione locale

Tutti gli spetti di risposta elastici calcolati sono stati salvati nella cartella “MS23/Spettri” della struttura di archiviazione dei file. In particolare, secondo gli Standard, è necessario fornire, per ogni terna di fattori di amplificazione, lo spettro medio risultante.

Pertanto, nella cartella “MS23/Spettri”, si riporta n° 12 file .txt contenente lo spettro medio ottenuto dall’elaborazione numerica dei n.7 accelerogrammi di input (SolagnaPSAO01.txt..... SolagnaPSAO012.txt).

Quindi, dal punto di vista operativo, un professionista che necessita di recuperare lo spettro relativo ad una determinata area del comune di Solagna dovrà:

1. Aprire lo shp stab/instab e vedere in quale poligono ricade l'area di interesse

2. Aprire la tabella degli attributi dello shp e leggere il nome dello spettro associato al poligono di interesse (es. SolagnaPSAO02);

3. Andare nella cartella "Spettri" e cercare la cartella con il nome suddetto: al suo interno troverà lo spettro elastico medio e i n.7 spettri ottenuti dalla modellazione.

La cartografia di base utilizzata per l'elaborazione dello studio è la C.T.R. del Veneto, le cui coordinate sono espresse in WGS84 Zona 33N.

Infine, secondo quanto riportato nella Versione degli Standard 4.2, è stato necessario inserire, nella Carta delle Indagini, una serie di punti baricentrici dei poligoni riportati nello shp Stab, indicanti la stratigrafia rappresentativa della zona Mops di appartenenza. Ogni punto, inoltre, è stato archiviato nel software SoftMS e vi è stato associato un file pdf riportante una descrizione dettagliata delle aree omogenee dal punto di vista sismico che costituiscono il comune di Solagna.

11 BIBLIOGRAFIA

- ✚ A. Viganò, G. Bressan, G. Ranalli, S. Martin (2008) - Focal mechanism inversion in the Giudicarie - Lessini seismotectonic region (Southern Alps, Italy): Insight on tectonic stress and strain
- ✚ Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta - Bacchiglione. Piano Stralcio per l'assetto idrogeologico del bacino idrografico del fiume Livenza (P.A.I.L.).
- ✚ L. Benedetti, P. Tapponnier, C.P. Geoffroy King, M. Bertrand, I. Manighetti: "Growth folding and active thrusting in the Montello region, Veneto, northern Italy"
- ✚ C. Braitenberg, B. Grillo, I. Nagy, S. Zidarich, A. Piccin (2007) - La stazione geodetico-geofisica ipogea del Bus De La Genziana - Pian Cansiglio. Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan" pp. 105 - 120
- ✚ Brammerini F., Di Pasquale G., Naso G., Severino M. (2008) - Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica - Parti I e II - Gruppo di lavoro "Indirizzi e criteri generali per la Microzonazione Sismica" del Dipartimento della Protezione Civile
- ✚ Castellaro S., Albarello D. (2011). Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. Ingegneria sismica, pp. 32 - 62
- ✚ Castellaro S., Mulargia F., Bianconi L. (2005). Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique. Geologia tecnica & ambiente, pp. 77 - 102
- ✚ CERI Centro di ricerca "Previsione, Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici" (2004) - La microzonazione sismica. Metodi, esperienze e normativa
- ✚ Chopra L. (1995). Dynamic of Structures: theory and applications to earthquake engineering. Prentice Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics. Prentice - Hall
- ✚ Dey A. and Morrison H.F. (1979) - Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures. Geophysical Prospecting, 27, 1020-1036
- ✚ Facciorusso J. et al. (2012) - Microzonazione Sismica - Uno strumento consolidato per la riduzione del rischio - L'esperienza della Regione Emilia - Romagna - a cura del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia - Romagna
- ✚ Ghosh B.; Madabhushi S. P. G. (2003). A numerical investigation into effects of single and multiple frequency earthquake input motion. Soil Dyn. Earthquake Eng., 23(8), 691-704
- ✚ Gruppo di lavoro MPS (2004) - Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'OPCM 3274 del 20 Marzo 2003. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano - Roma
- ✚ Iervolino I., Galasso C., Cosenza E. (2009) - REXEL: computer aided record selection for code - based seismic structural analysis - Bulletin of Earthquake Engineering, 8: 339 - 362
- ✚ Itasca (2011). FLAC Fast Lagrangian Analysis of Continua. v.7.0. User's Manual
- ✚ Kuhlmeier R. L.; Lysmer J. (1969). Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, 99(5), 421-427
- ✚ Lanzo G., Pagliaroli A., D'Elia B. (2003). Numerical study on the frequency-dependent viscous damping in dynamic response analyses of ground. In Latini & Brebbia (eds), Earthquake Resistant Engineering Structures, WIT Press, Southampton, Boston, pp. 315-324
- ✚ Lanzo G., Pagliaroli A., D'Elia B. (2004a). Influenza della modellazione di Rayleigh dello smorzamento viscoso nelle analisi di risposta sismica locale. Atti XI Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", Genova, Italia, 25 - 29 Gennaio
- ✚ Lanzo G., Silvestri F. (1999) - Risposta Sismica Locale. Hevelius Ed.
- ✚ Louie, J. N. (2001). Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays, Bull. Seism. Soc. Am., 91, 347-364
- ✚ M. Locati, R. Camassi e M. Stucchi, 2015. DBMI15, la versione 2015 del Database Macrosismico Italiano. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI15>
- ✚ Mucciarelli M. e Gallipoli M.R. (2001) - A critical review of 10 Years of microtremor H.V.S.R. technique - Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 42, P. 255 - 266
- ✚ Mucciarelli M. e Gallipoli M.R. (2006) - Comparison between V_{s30} and other estimates of site amplification in Italy - Conf. Earthq. Eng. And Seismol., Ginevra, 3 - 8 Sept. no 270
- ✚ Mucciarelli M (2011) - Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici - Progetto ricerca 2007PTRC4C - Aracne editrice
- ✚ Paronuzzi P.(1987) - Modelli di calcolo per l'analisi della propagazione di blocchi rocciosi in frana. Rivista italiana di Geotecnica XXI n.4, 145-165
- ✚ Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G., Penna A. (2012) - "Mesozonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms", in stampa sul Bulletin of Earthquake Engineering
- ✚ SESAME Project (2005) - "Site Effects Assessment Using Ambient Excitations"
- ✚ Silvester P.P. and Ferrari R.L. (1990) - Finite elements for electrical engineers (2 nd ed.) Cambridge University Press.
- ✚ Slejko D. et al (1987) - Modello sismotettonico dell'Italia Nord - Orientale. CNR
- ✚ Spallarossa D. e Barani S. (2007) - Report, Disaggregazione della Pericolosità Sismica in Termini di M - R - ϵ - Progetto DPC-INGV S1, <http://esse1.mi.ingv.it/d14.html>
- ✚ Università degli studi di Modena e Reggio Emilia - Linee Guida - L'analisi e la perimetrazione delle aree di possibile propagazione crolli.

12 ALLEGATI FUORI TESTO

- | | |
|---|----------------|
| 1. Carta delle indagini | Scala 1:10.000 |
| 2. Carta geologico-tecnica | Scala 1:10.000 |
| 3. Carta delle frequenze | Scala 1:10.000 |
| 4. Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica | Scala 1:10.000 |
| 5. Carta della pericolosità sismica locale | Scala 1:10.000 |
| 6. Carta di microzonazione sismica FA 0,1-0,5s - Livello 3 | Scala 1:10.000 |
| 7. Carta di microzonazione sismica FA 0,4-0,8s - Livello 3 | Scala 1:10.000 |
| 8. Carta di microzonazione sismica FA 0,7-1,1s - Livello 3 | Scala 1:10.000 |
| 9. DVD contenente i file pdf dello studio e le basi informative | |