

Commissione tecnica per la microzonazione sismica
(articolo 5, comma 7, OPCM 13 novembre 2010, n. 3907)

Microzonazione sismica

**LINEE GUIDA PER LA REALIZZAZIONE DELLA
CARTA GEOLOGICO-TECNICA PER LA MICROZONAZIONE SISMICA
CON ADATTAMENTO AI CONTESTI VULCANICI**

Versione 1.0

Roma, 2021

Microzonazione sismica

Linee guida per la realizzazione della Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica con adattamento ai contesti vulcanici

Versione 1.0

A cura di

Gino Romagnoli, Marco Nocentini, Edoardo Peronace (CNR-IGAG)

Con il contributo di

Dario Albarello (Università degli Studi di Siena), Stefano Catalano (Università degli Studi di Catania), Giuseppe Cavuoto (CNR-ISMAR), Luca Martelli (Regione Emilia Romagna), Bruno Quadrio (libero professionista), Tito Sanò (libero professionista)

Gruppo di lavoro

Massimo Baglione (Regione Toscana), Daniele Bottero (Regione Liguria), Fabrizio Bramerini (DPC), Sergio Castenetto (DPC), Monia Coltella (CNR-IGAG), Iolanda Gaudiosi (CNR-IGAG), Paola Imprescia (CNR-IGAG), Federico Mori (CNR-IGAG), Massimiliano Moscatelli (CNR-IGAG), Giuseppe Naso (DPC), Alessandro Pagliaroli (Università degli Studi di Chieti-Pescara), Andrea Pietrosante (CNR-IGAG), Veronica Scionti (CNR-IGAG)

Versione realizzata nell'ambito del Programma per il supporto al rafforzamento della governance in materia di riduzione del rischio ai fini di protezione civile (PON governance e capacità istituzionale 2014-2020)

Approvato nell'ambito dei lavori della Commissione tecnica per la microzonazione sismica, istituita con DPCM 21 aprile 2011

Mauro Dolce (DPC, Presidente), Walter Baricchi (Consiglio Nazionale degli Architetti Pianificatori Paesaggisti Conservatori), Fabrizio Bramerini (DPC), Sergio Castenetto (DPC, segreteria tecnica), Enrico Rispoli (Collegio Nazionale Geometri), Giuseppe Ianniello (Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti), Luca Lo Bianco (UNCEN), Luca Martelli (Conferenza Unificata), Rossella Monaco (Conferenza Unificata), Domenico Angelone (Consiglio nazionale dei Geologi), Giuseppe Naso (DPC), Antonio Ragonesi (ANCI), Raffaele Solustri (Consiglio nazionale degli Ingegneri), Elena Speranza (DPC)

Rappresentanti delle Regioni e delle Province autonome

Maria Basi (Regione Abruzzo), Giovanni Di Bello (Regione Basilicata), Silvio Marsico (Regione Calabria), Crescenzo Minotta (Regione Campania), Luca Martelli (Regione Emilia - Romagna), Paolo Delfabro (Regione Friuli-Venezia Giulia), Giacomo Catalano (Regione Lazio), Daniele Bottero (Regione Liguria), Carlo Toffaloni (Regione Lombardia), Pierpaolo Tiberi (Regione Marche), Rossella Monaco (Regione Molise), Vittorio Giraud (Regione Piemonte), Tiziana Bisantino (Regione Puglia), Andrea Motti (Regione Umbria), Massimo Baglione (Regione Toscana), Massimo Broccolato (Regione Valle d'Aosta), Enrico Schiavon (Regione Veneto), Antonio Torrisi (Regione Sicilia), Saverio Cocco (Provincia Autonoma di Trento), Claudio Carrara (Provincia Autonoma di Bolzano)

Hanno inoltre partecipato, in tempi successivi, ai lavori della Commissione tecnica per la predisposizione delle diverse versioni degli standard

Giuliano Basso (Regione Veneto), Fernando Calamita (Regione Abruzzo), Giovanni Calcagni (Consiglio Nazionale dei Geologi), Paolo Cappadona (Consiglio Nazionale dei Geologi), Umberto Capriglione (Conferenza Unificata), Giuseppe Cerchiara (Regione Calabria), Antonio Colombi (Regione Lazio), Luigi Cotzia (Consiglio Nazionale degli Architetti Pianificatori Paesaggisti Conservatori), Marina Credali (Regione Lombardia), Silvio De Andrea (Regione Lombardia), Francesca De Cesare (Regione Lombardia), Eugenio Di Loreto (Consiglio Nazionale dei Geologi), Serafino Frisullo (Consiglio Nazionale Geometri), Giacomo Di Pasquale (DPC), Fiorella Galluccio (Regione Campania), Claudio Garlatti (Regione Friuli-Venezia Giulia), Raffaella Giraldi (Regione Calabria), Sebastiano Gissara (ANCI), Giuseppe Iiritano (Regione Calabria), Salvatore La Mendola (Consiglio Nazionale degli Architetti Pianificatori Paesaggisti), Angelo Lobefaro (Regione Puglia), Ruggero Moretti (Collegio nazionale geometri), Norman Natali (Regione Umbria), Rocco Onorati (Regione Basilicata), Giovanna Petrunaro (Regione Calabria), Fabio Sabetta (DPC), Adelaide Sericola (Regione Lazio), Giovanni Spampinato (Regione Sicilia), Antonio Torrisi (Regione Sicilia), Isabella Trulli (Regione Puglia), Ugo Ugati (Regione Campania), Giuseppe Zia (Consiglio Nazionale degli Ingegneri)

L'attività di supporto e monitoraggio è svolta in accordo con CNR-IGAG (responsabile scientifico Gian Paolo Cavinato, Massimiliano Moscatelli e Francesco Stigliano)

Struttura tecnica di supporto

Maria Sole Benigni, Gianluca Carbone, Monia Coltella, Margherita Giuffrè, Andrea Pietrosante, Paola Imprescia

Revisioni a cura di

D'Intinosante V. (Regione Toscana), Fabbroni P. (Regione Toscana), Pergalani F. (Politecnico di Milano), Scarascia Mugnozza G. (Università La Sapienza di Roma), Regione Toscana – Ufficio Prevenzione Sismica Regionale, Provincia Autonoma Trento – Servizio Geologico.

SOMMARIO

INTRODUZIONE	7
PARTE PRIMA	
1 La Carta Geologica e la Carta Geologico-Tecnica per gli studi di Microzonazione Sismica (CGT_MS)	8
1.1 La Carta Geologica (CG)	9
1.2 La Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica (CGT_MS)	12
1.2.1 Standard di rappresentazione e archiviazione informatica	14
1.2.1.1 Terreni di copertura e ambiente genetico deposizionale	14
1.2.1.2 Substrato Geologico	16
1.2.1.3 Elementi tettonico-strutturali	17
1.2.1.4 Elementi geologici e idrogeologici	18
1.2.1.5 Instabilità di versante	19
1.2.1.6 Forme di superficie e sepolte	19
1.2.1.7 CGT_MS e Unità litostratigrafiche	22
2 Rappresentazione del modello geologico di sottosuolo: sezioni geologiche e geologico-tecniche	23
2.1 Sezioni geologiche	23
2.2 Modello geologico di sottosuolo	26
2.3 Sezioni geologico-tecniche rappresentative e significative	27
3 Inquadramento della CGT_MS e delle sezioni geologico-tecniche nel percorso metodologico degli studi di MS	32
3.1 Studi per il livello 1: dalla CGT_MS e dalle sezioni geologico-tecniche alla Carta delle MOPS	33
3.2 Studi per il livello 2: dalla CGT_MS e dalle sezioni geologico-tecniche alla Carta delle MS	34
3.2.1 La CGT_MS come strumento di discriminazione tra livello 2 e livello 3	35
3.3 Studi per il livello 3: dalla CGT_MS e dalle sezioni geologico-tecniche alla carta MS (livello 3)	37
3.3.1 Amplificazione del moto sismico e risposta sismica locale	37
3.3.2 Deformazioni permanenti del terreno (Zone suscettibili di Instabilità)	38
4 I dati pregressi e le fonti	41
4.1 Carte geologiche	41
4.2 Carte geomorfologiche	42
4.3 Carte PAI	42
4.4 Carte IFFI	43

4.5	Informazioni di carattere morfologico	43
4.6	Elaborati e relazioni a corredo di piani urbanistici e pratiche edilizie (con indicazioni da NTC18)	43
4.7	Indagini di sottosuolo	44
4.8	Documentazione storica su effetti di deformazione permanente	44
5	Guida per la stesura della CGT_MS	45
6	Dalle informazioni geologiche alle informazioni geologico-tecniche: esempio di colonna stratigrafica e colonna geologico-tecnica rappresentativa del sottosuolo	46
7	Substrato geologico, substrato sismico e substrato di riferimento	49
7.1	Introduzione	49
7.2	Definizioni	49
7.2.1	Substrato geologico	49
7.2.2	Substrato sismico	51
7.2.3	Substrato di riferimento (o ingegneristico)	51
7.3	Applicazioni del substrato sismico e del substrato di riferimento	52
8	Schemi commentati di alcuni elementi morfologici pertinenti la pericolosità sismica	53
9	Esempi di studi di MS nelle aree vulcaniche etnee	55
10	Fratturazione degli ammassi rocciosi	63
11	Riporti antropici	63
12	Deformazioni cosismiche permanenti	66
13	Inversioni di velocità nelle carte di MS: alcune indicazioni per la CGT_MS finalizzate ad una corretta valutazione del problema	69
14	Gli elementi della CGT_MS e delle sezioni utili alla valutazione delle amplificazioni topografiche	70
BIBLIOGRAFIA		74

Introduzione

La Carta Geologico-tecnica per la Microzonazione Sismica (CGT_MS) è un documento preliminare previsto in tutti i livelli di approfondimento (1, 2 e 3) in cui si articolano gli studi di Microzonazione Sismica (MS). Il percorso metodologico degli studi di MS prevede in tutti i livelli la definizione del modello geologico di sottosuolo su cui basare la carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS), nel livello 1, o di Microzonazione Sismica (MS), nei livelli 2 o 3.

Alla definizione del modello geologico di sottosuolo si perviene attraverso le seguenti fasi (Figura 1):

- > raccolta, valutazione e selezione di tutti i dati cartografici, geologici, geotecnici, geofisici e idrogeologici, disponibili per il territorio comunale (dati di base pregressi e di nuova acquisizione);
- > informatizzazione e archiviazione dei dati di base tramite software GIS, ai fini dell'analisi geologica del sottosuolo; codifica e costituzione dei dataset di sintesi litostratigrafici, geotecnici, geofisici e idrogeologici (elementi areali, lineari e puntuali);
- > estrazione (scelta ponderata) dei dati di base geologici/geotecnici/geofisici utili alla ricostruzione del modello geologico di sottosuolo (stratigrafico-strutturale);
- > definizione dei rapporti stratigrafici, ovvero ricostruzione delle geometrie tra unità del substrato e terreni di copertura, fondamentale per la valutazione di effetti di amplificazione stratigrafica;
- > definizione degli elementi strutturali, geomorfologici e idrogeologici, al fine di valutare la presenza di effetti locali di amplificazione topografica e/o di fenomeni di instabilità;
- > caratterizzazione geologico-tecnica e geofisica dei litotipi individuati ai fini della microzonazione sismica;
- > ricostruzione della stratigrafia sintetica di ogni Microzona Omogenea in Prospettiva Sismica (MOPS), tenendo conto delle caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi individuati;
- > ricostruzione del modello geologico di sottosuolo di riferimento per l'area di studio.

La Carta Geologico-tecnica (CGT_MS) è il prodotto che sintetizza l'insieme delle informazioni geologiche-geomorfologiche-strutturali e idrogeologiche e, unitamente alle sezioni geologico-tecniche, permette la definizione del modello geologico di sottosuolo (Castenetto, 2013).

In questo documento si farà riferimento alle modalità di realizzazione della CGT_MS, così come definito nelle integrazioni (Martini G., 2011) agli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (ICMS08) (Gruppo di Lavoro MS, 2008) e negli "Standard di rappresentazione e archiviazione informatica degli studi di MS" approvati dalla Commissione Tecnica per la microzonazione sismica (articolo 5, comma 7, OPCM 13 novembre 2010, n. 3907) successivamente aggiornati.

Il documento intende fornire un aggiornamento delle metodologie operative, derivante dalle esperienze maturate in fase di realizzazione degli studi di MS e dalle indicazioni raccolte da Regioni, Università ed Enti di Ricerca, su tutti gli aspetti della realizzazione della CGT_MS e delle sezioni geologico-tecniche, non trattati in modo esaustivo negli aggiornamenti agli ICMS08 e negli "Standard di rappresentazione e archiviazione informatica degli studi di MS". Inoltre, nella trattazione dell'argomento si terrà conto della prassi, sempre più consolidata negli studi di MS, di realizzare preventivamente una Carta Geologica di base (CG) dalla quale derivare la CGT_MS. La CGT_MS è infatti il prodotto di sintesi (Figura 1) tra le Sezioni geologiche e la CG, frutto dell'integrazione tra i dati cartografici pregressi e i rilievi di terreno originali, con i dati di sottosuolo necessari a caratterizzare le diverse unità litologiche dell'area da microzonare.

La CGT_MS delinea quindi il quadro della distribuzione areale delle unità geologico-tecniche affioranti, la cui distinzione in terreni di copertura¹ e substrato geologico già fornisce una informazione qualitativa delle caratteristiche litologiche e giaciture, che saranno meglio espresse in termini quantitativi nelle elaborazioni cartografiche successive.

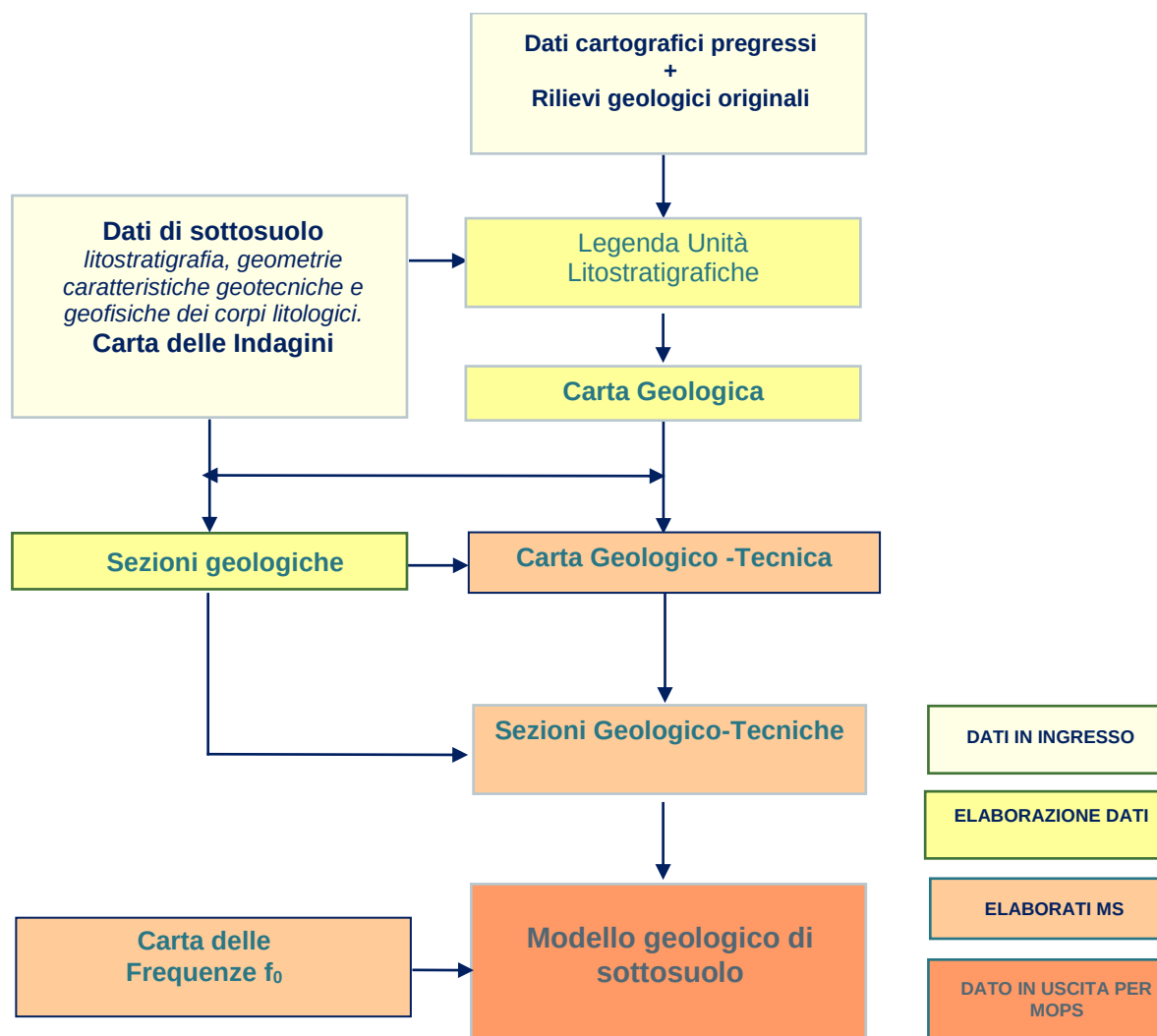


Figura 1 Percorso metodologico per produrre il modello geologico di sottosuolo. Da Castenetto (2013), modificato. Si noti come i dati del sottosuolo, contribuiscano sia alla stesura della CGT_MS che all'elaborazione delle sezioni geologiche tecniche. f_0 , frequenze fondamentali del terreno

Per rappresentare in maniera esaustiva la geometria di sottosuolo, la CGT_MS deve essere necessariamente corredata da sezioni geologico-tecniche, derivate da sezioni geologiche di estremo dettaglio, in numero adeguato alla complessità del modello geologico di sottosuolo.

Le Sezioni geologico-tecniche hanno lo scopo di illustrare l'andamento in profondità delle superfici di natura stratigrafica e tettonica, sede di contrasti di comportamento delle unità, significative ai fini della risposta sismica e quindi rilevanti per la

¹ Nel testo si adotta la classificazione che prevede le rocce divise in rocce lapidee e rocce sciolte (terreni). I terreni vanno intesi come un "aggregato di particelle minerali che possono essere separate le une dalle altre tramite semplice azione meccanica, quale per esempio l'agitazione in acqua" (Lancellotta, 2004). Se nel documento il termine "terreni" deve essere inteso con significato diverso verrà di volta in volta specificato.

definizione del modello di sottosuolo. Le sezioni geologico-tecniche consentono di ricostruire le stratigrafie di sintesi delle MOPS.

Il presente manuale è costituito da due parti.

Nella PARTE PRIMA sono definiti i contenuti e le modalità di rappresentazione della Carta Geologico Tecnica per la Microzonazione Sismica (CGT_MS).

Nella PARTE SECONDA, sono evidenziate le modalità con le quali il contenuto informativo della CGT_MS contribuisce alla definizione del modello di sottosuolo e quindi alla caratterizzazione della pericolosità sismica locale. A tale scopo vengono approfondite alcune problematiche specifiche che possono presentarsi nel corso della realizzazione di uno studio di MS, con particolare attenzione al contesto territoriale vulcanico, seguendo il percorso metodologico tracciato dagli ICMS08.

PARTE PRIMA

Generalità e descrizioni

1 La Carta Geologica e la Carta Geologico-Tecnica per gli studi di Microzonazione Sismica (CGT_MS)

Questo capitolo intende chiarire quali siano le informazioni da riversare nella CG e i relativi contenuti da trasferire alla CGT_MS, in quanto informazioni fondamentali per la realizzazione degli studi di MS.

Gli ICMS08 prevedono che il percorso di lavoro che porta alla redazione della carta delle MOPS, nel livello 1, e delle carte di MS, nei successivi livelli 2 o 3, inizi dall'acquisizione e dall'analisi dei dati geologici pregressi. I successivi aggiornamenti (Martini G., 2011) hanno introdotto come elaborato fondamentale, propedeutico agli studi di MS, la Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica (CGT_MS).

Nel corso dell'esecuzione degli studi di MS si sottolinea l'importanza di realizzare una Carta Geologica di base (CG) a scala adeguata (almeno 1:10.000, meglio se di maggior dettaglio) che, seppure non esplicitamente prevista tra i prodotti codificati, è indispensabile per inquadrare adeguatamente lo studio di MS nel contesto geologico complessivo. La CG, infatti, costituisce la sintesi dei dati cartografici, pregressi ed originali, alla quale riferire tutti i dati geologici, di superficie e di sottosuolo, disponibili. Essa rappresenta quindi un documento oggettivo dello stato delle conoscenze del territorio, rispetto al quale la CGT_MS rappresenta, invece, il frutto della interpretazione integrata di dati geologici, geotecnici e geofisici (di superficie e di sottosuolo) per la definizione delle unità geologico-tecniche e per la ricostruzione della loro geometria tridimensionale.

La significatività della CGT_MS è quindi fortemente dipendente dalla qualità della cartografia geologica e dei dati di sottosuolo pregressi da cui sono state attinte le informazioni in essa contenute, valutabile secondo la procedura semi quantitativa proposta da Albarello et al., (Albarello D., 2011).

Nella valutazione complessiva della qualità della cartografia geologica e geomorfologica pregressa utilizzabile per la stesura della CG a supporto degli studi di MS si devono tenere in considerazione i seguenti aspetti:

- > l'adeguatezza della scala di rilevamento e di rappresentazione dei dati di terreno;
- > l'anno di produzione e pubblicazione del dato cartografico;
- > affinità dello studio di provenienza dei dati cartografici utilizzati con gli scopi della MS.

La copertura della cartografia geologica sul territorio nazionale è fortemente disomogenea, sia in termini di aggiornamento temporale che di scala. Pertanto, ai fini della redazione della CGT_MS, seppure sia consentito l'utilizzo di dati di letteratura, è cruciale la preventiva valutazione della cartografia geologica esistente e la sua eventuale integrazione con rilievi geologici originali. Tale evenienza è necessaria laddove la cartografia pregressa risulti inadeguata per la scarsa qualità dei dati riportati e/o per l'uso di una scala di rilevamento e rappresentazione inferiore a 1:10.000. In generale la cartografia geologica disponibile, solitamente a piccola scala, è focalizzata alla ricostruzione delle geometrie di sottosuolo delle unità del substrato

geologico, spesso con una eccessiva semplificazione delle sovrastanti formazioni superficiali e una trattazione sommaria, per motivi di scala, delle aree urbanizzate. Sarà dunque necessario integrare i dati pregressi con un rilievo geologico e geomorfologico originale, svolto appositamente per lo studio di MS ad una scala $\geq 1:10.000$ ed esteso ad un areale significativo per la ricostruzione del modello geologico di sottosuolo, tale da coprire aree sufficientemente vaste che includano al loro interno quelle da microzonare.

La CG e la CGT_MS vengono spesso equiparate e considerate lo stesso elaborato, mentre in realtà presentano sostanziali differenze.

La CG è generalmente basata sulla distinzione di unità litostratigrafiche o unità tettoniche, definite sulla base delle proprie caratteristiche litologiche e della loro posizione nell'ambito di successioni stratigrafiche o di pile di unità tettoniche sovrapposte. La CG fornisce quindi gli elementi per una immediata individuazione dei rapporti geometrici tridimensionali tra le diverse unità.

La CGT_MS è una rielaborazione della CG nella quale le unità litostratigrafiche vengono ridefinite sulla base delle loro caratteristiche lito-tecniche e attribuite alle categorie dei Terreni di Copertura (depositi incoerenti e pseudo-coerenti poco consolidati) o del Substrato Geologico (depositi litoidi e pseudo-coerenti consolidati).

La distinzione in unità di substrato e terreni di copertura coincide ampiamente, talora, con quella normalmente riportata nelle carte geomorfologiche, nelle quali si propone la suddivisione tra "Substrato" e "Formazioni Superficiali", basata sull'evoluzione morfologica di una determinata area. Esiste inoltre un'ampia corrispondenza, anche se non sempre univoca, tra unità di Substrato Geologico e Terreni di Copertura rispettivamente con le unità di ambiente marino e continentale, spesso riportate nelle carte geologiche.

Fanno eccezione termini del substrato scarsamente compatti o poco consolidati (es. depositi marini Plio-Pleistocenici) e formazioni superficiali litoidi o ben cementate (es. conglomerati, brecce cementate, biocalcareni, colate laviche).

Le codifiche delle unità e la ricostruzione dei rapporti stratigrafici tra Terreni di Copertura e unità del Substrato Geologico, devono essere necessariamente operate nel corso della realizzazione degli studi di MS in funzione del modello geologico che si intende proporre, basandosi sulle definizioni riportate negli ICMS08 e negli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica.

1.1 La Carta Geologica (CG)

A completamento della fase di raccolta dei dati geologici pregressi propedeutici agli studi di MS (Figura 1), è indispensabile realizzare una Carta Geologica di base (CG), quale documento di sintesi della cartografia geologica esistente e di rilievi geologici originali, da utilizzare per l'inquadramento delle informazioni relative a tutti gli elementi geologici che, concorrendo alla risposta sismica locale, saranno in seguito trasferiti all'interno della CGT_MS. E' molto utile, inoltre, che nella "Relazione tecnica", elaborato di accompagnamento degli studi di MS, venga brevemente offerto un quadro sinottico delle carte geologiche disponibili per l'area, utilizzate per comporre la CG di base, nel quale vengano evidenziate le problematiche aperte che, nei casi più semplici, saranno risolte con la stesura della CGT_MS e la ricostruzione del modello di sottosuolo per gli studi di MS di livello 1 e, nei casi più complessi, richiederanno l'acquisizione di dati da nuove indagini da pianificare negli stadi di avanzamento successivi.

Nella CG di base andrebbero rappresentati complessivamente la geometria dei corpi ed i caratteri giacitureali delle differenti litofacies che compongono le unità litostratigrafiche o tettoniche del substrato, distinte sulla base della posizione stratigrafica e dei loro caratteri litologici e strutturali, tenendo conto anche dello stato di addensamento, di fratturazione e di alterazione.

Nella raccolta, selezione e rappresentazione dei dati geologici in carta è utile, per la futura trasposizione della CG in CGT_MS, fare riferimento ai criteri definiti negli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica per la designazione delle unità geologico-tecniche. Nella CG vanno preventivamente distinti e rappresentati, laddove è possibile, gli orizzonti litologici che andranno a costituire le future unità della CGT_MS (Figura 2). In molti casi, le formazioni o i membri riportati nelle carte geologiche disponibili potrebbero accorparsi, ad esempio per motivi di scala di rappresentazione, litofacies riferibili a diverse tipologie di unità geologico-tecniche che andrebbero, pertanto, distinte ai fini della trasposizione dalla CG alla CGT_MS. In tale evenienza, si interviene con la realizzazione di rilievi originali che allineino il dettaglio delle informazioni della CG a quelli richiesti per la realizzazione della CGT_MS. In particolare, di ogni intervallo litostratigrafico o di ogni litofacies è necessario determinare lo spessore e le sue variazioni nello spazio. In considerazione della scala di rappresentazione e della finalità degli studi è opportuno che nella CG siano riportati tutti gli orizzonti litologici omogenei del substrato con spessore >10 m, ritenuto lo spessore minimo rappresentabile per le unità del substrato. Qualora le formazioni fossero costituite da alternanze di livelli a diversa litologia di spessore minore, non cartografabili, questi vanno comunque opportunamente descritti in legenda, nei loro caratteri fondamentali quali elementi di una alternanza di litotipi (Figura 2). La CG deve inoltre riprodurre fedelmente la distribuzione e le geometrie delle formazioni superficiali di copertura aventi spessori > 3 m. Per ognuna delle coperture è necessaria una adeguata descrizione che permetta, oltre alla definizione dei caratteri litologici, anche l'univoca attribuzione ad un determinato ambiente genetico-deposizionale (Figura 2). Nell'esecuzione dei rilievi e nella rappresentazione in carta è opportuno, ove possibile, associare ai depositi di copertura le forme caratteristiche, diagnostiche della loro genesi (es. falda detritica, terrazzo alluvionale, ecc.). La CG, infatti, deve fornire tutti gli elementi utili alla comprensione dei rapporti geometrici tra substrato e formazioni superficiali, distinguendo tra queste quelle di accumulo su superfici piane (es. conoidi) e quelle di riempimento di antiche depressioni topografiche (es. valli sepolte), che possono essere successivamente rappresentati nella carta geologico tecnica con appositi elementi areali e lineari. Il dettaglio della carta geologica deve essere adeguato al riconoscimento dei rapporti geometrici, di lateralità e/o sovrapposizione, tra le diverse tipologie di formazioni superficiali (Figura 2). Nella realizzazione di una CG è utile abbinare alla raccolta e selezione dei dati geologici pregressi, un'accurata analisi di rilievi da remoto (immagini satellitari, foto aeree, rilievi LIDAR ecc.). Per la delimitazione degli elementi topografici e morfologici rilevanti ai fini della risposta sismica, con particolare riferimento all'individuazione delle forme associate ai depositi delle formazioni superficiali, risulta molto utile potersi avvalere di modelli digitali di elevazione ad alta risoluzione.

In aree vulcaniche va tenuto conto che la cartografia pregressa generalmente raggruppa i prodotti (es. lave massive e scorie) in unità relative a singoli o a più eventi eruttivi in intervalli temporali definiti, prescindendo dalla loro litologia. In questo caso la costruzione della CG, in prospettiva di una adeguata trasposizione nella CGT_MS, deve necessariamente richiedere il contributo di integrazioni con rilievi geologici originali che permettano di verificare se esistono le condizioni per distinguere in carta i livelli litoidi da quelli sciolti ad esempio prima della fase di trasposizione alla CGT_MS. Nelle aree vulcaniche, inoltre è frequente l'accostamento laterale tra prodotti di età differente, come ad esempio la canalizzazione all'interno di incisioni modellate su unità più antiche. In questi casi è necessario che nella CG siano raccolti gli elementi per poter ricostruire la complessità delle geometrie.

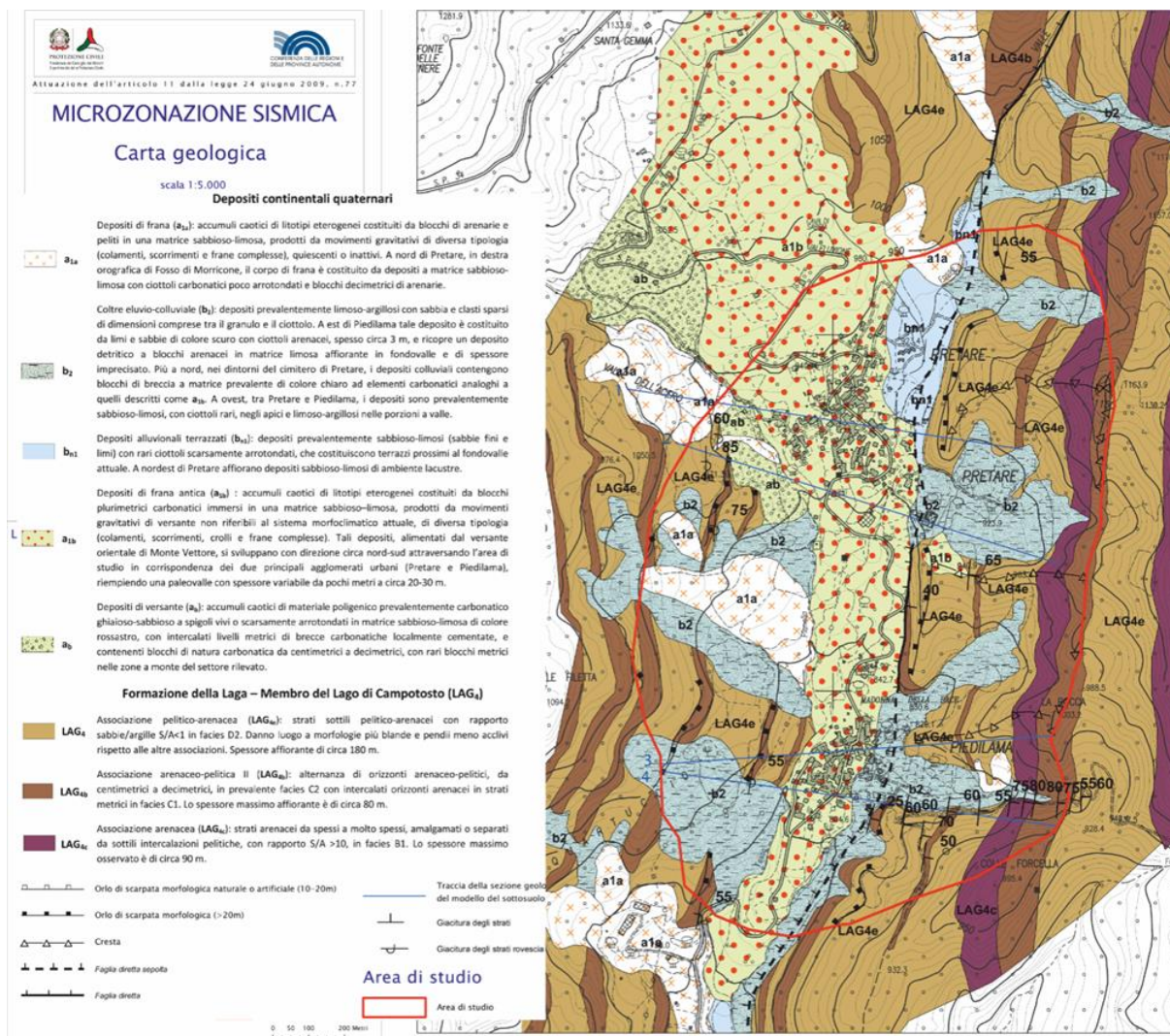


Figura 2 Carta geologica dell'area di Pretare e Piedilama, frazioni del Comune di Arquata del Tronto (AP) realizzata a seguito di un rilievo geologico condotto alla scala 1:5000, nell'ambito delle attività del Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni successive all'evento sismico dell'Italia centrale del 24 agosto 2016.

La qualità della trasposizione delle unità litostratigrafiche della CG in unità geologico-tecniche della CGT_MS, e la loro attribuzione al substrato geologico o ai terreni di copertura, è fortemente dipendente dalla quantità di dati utili alla caratterizzazione fisico-meccanica dei diversi tipi di orizzonti litologici rilevati. Operando generalmente in aree urbanizzate con scarsità di affioramenti, la descrizione delle unità e i relativi dati fisico-meccanici in gran parte derivano dalle stratigrafie di sondaggi e dalle analisi di campioni prelevati in perforazioni geognostiche. Nel caso di pochi dati pregressi di sottosuolo disponibili, sarebbe opportuno integrare gli studi con rilievi geologici originali su areali estesi anche al di fuori delle aree urbanizzate, in cui siano ben esposti in superficie, con le relative geometrie, gli stessi orizzonti che costituiscono il sottosuolo da investigare. Si introduce così il concetto di "areale significativo" della CG, la cui estensione minima è quella che comunque garantisca una soddisfacente ricostruzione delle geometrie tridimensionali del sottosuolo delle aree da microzonare e la possibilità di accesso ad affioramenti ben esposti degli orizzonti stratigrafici che lo costituiscono. Nell'"areale significativo" è auspicabile che sia possibile investigare in maniera diretta l'intera successione stratigrafica fino al substrato geologico e, se ne esistono le condizioni topografiche, fino al substrato sismico di riferimento.

I dati geologici raccolti e sintetizzati nella CG, integrati con i dati di sottosuolo, devono fornire gli elementi per la ricostruzione dell'interfaccia tra unità di substrato e formazioni superficiali che corrisponderà in gran parte al contatto tra substrato geologico e terreni di copertura della CGT_MS, ricostruiti e rappresentati nelle sezioni Geologiche e Geologico-tecniche. Nella CG vanno inoltre fedelmente cartografate le zone di alterazione delle unità del substrato se queste superano lo spessore di 3 m e ricostruita la geometria di eventuali discontinuità stratigrafiche, affioranti o attraversate dai sondaggi, che mettano a contatto unità litostratigrafiche del substrato recenti, poco compatte, con unità più antiche fortemente diagenizzate. Tali superfici, ricadenti all'interno del substrato geologico s.l., possono corrispondere fisicamente al tetto del substrato di riferimento ricoperto da unità di substrato a bassa velocità delle onde di taglio, rappresentando così elementi rilevanti ai fini della risposta sismica, da riportate necessariamente nella CGT_MS.

1.2 La Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica (CGT_MS)

Nella Carta Geologico Tecnica per la Microzonazione Sismica (CGT_MS), vanno selezionati e rappresentati, tra le informazioni geologiche disponibili ed eventualmente già riversate nella CG di base e nelle relative sezioni, solo quegli elementi che influenzano o possono essere influenzati dallo scuotimento sismico (Figura 3). La composizione della carta è il risultato della sovrapposizione di una serie di tematismi. Alcuni di essi, quali la "litostratigrafia", la "litotecnica" e la "petrofisica" concorrono alla definizione delle unità geologico-tecniche; altri, quali la "geomorfologia", la "geologia strutturale", e l'"idrogeologia" trovano diretto riscontro con specifici simboli negli standard rappresentazione da utilizzare nel campo carta.

Carta geologico tecnica per la microzonazione sismica (CGT_MS)	Terreni di copertura
	Ambiente genetico e deposizionale
	Substrato geologico
	Instabilità di versante
	Forme di superficie e sepolte, comprensive di alcuni elementi lineari e puntuali
	Elementi tettonico strutturali
	Elementi geologici e idrogeologici

Figura 3 Contenuti della CGT_MS da Standard di rappresentazione e archiviazione informatica Versione 4.2.

I temi "litostratigrafia", "litotecnica" e "petrofisica" fanno riferimento al riconoscimento e rappresentazione dei terreni sulla base dei caratteri litologici, stratigrafici e delle proprietà fisiche e geomeccaniche, nell'ottica della loro attribuzione al substrato geologico o alle coperture e successiva classificazione secondo le diverse tipologie previste.

Il tema "geomorfologia" riguarda sia le forme dei depositi superficiali di copertura, classificati per processi genetici e identificati da elementi puntuali, lineari ed areali, che l'individuazione di aree di instabilità di versante distinte sulla base della tipologia del dissesto e dello stato di attività.

Il tema "geologia strutturale" mira a ricostruire le geometrie secondarie, di origine tettonica, che hanno modificato l'assetto primario della successione stratigrafica, soprattutto in termini di anisotropia e grado di fratturazione delle unità geologico

tecniche, a supporto della caratterizzazione delle unità affioranti oltre a individuare la presenza di faglie definendone cinematica ed attività.

Per quanto riguarda la tematica “idrogeologia” lo scopo è quello di fornire gli elementi necessari per evidenziare la predisposizione di determinate aree a fenomeni di instabilità, quali liquefazioni, instabilità di versante e densificazione sismoindotta.

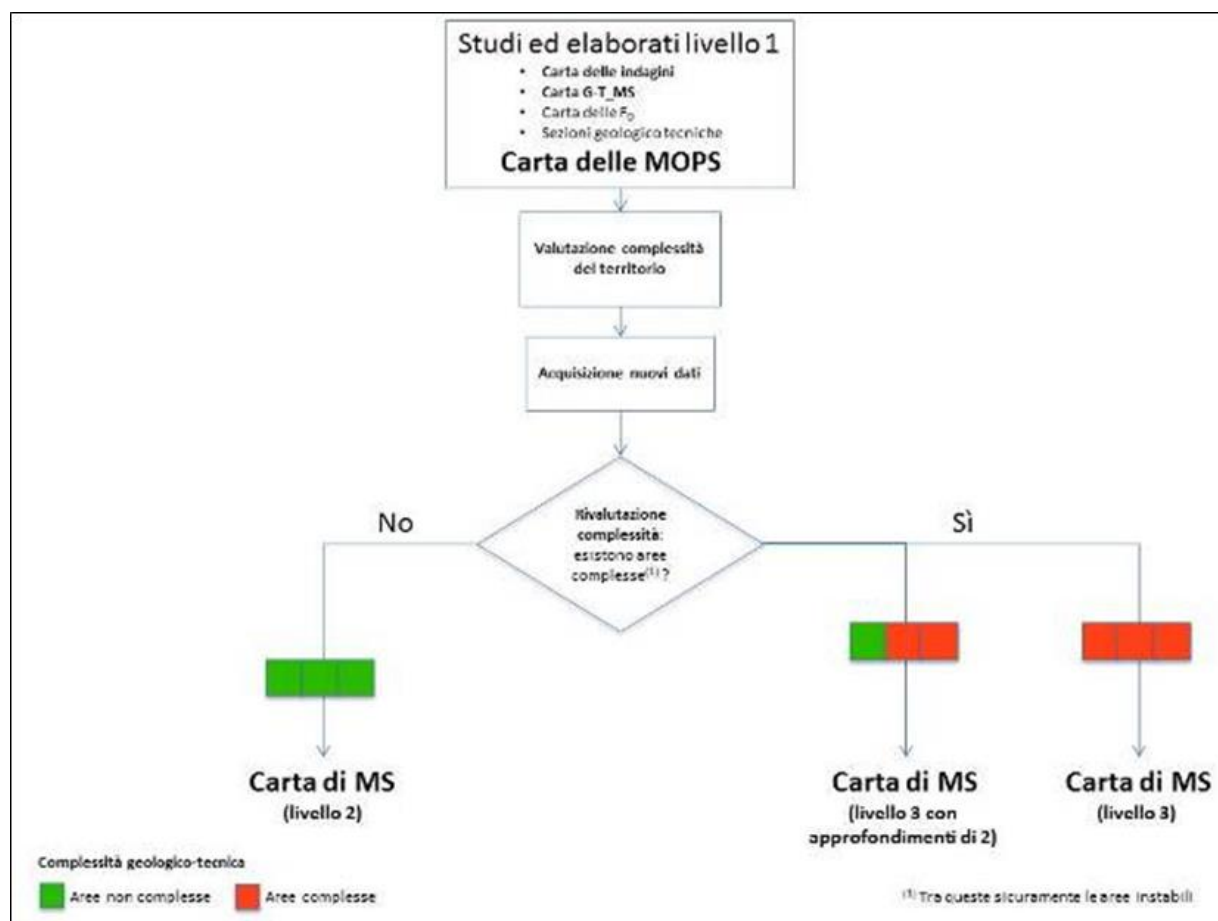


Figura 4 Percorso metodologico per l'elaborazione delle carte di MS e utilizzo della CGT_MS e delle sezioni geologico tecniche.

In estrema sintesi, i dati riportati nella CGT_MS sono necessari alla definizione di un modello di sottosuolo funzionale, in una prima fase, alla realizzazione della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica, (Carta delle MOPS) (Figura 1) e alla ricostruzione della stratigrafia di ognuna delle MOPS in termini di successioni di orizzonti geologico-tecnici previsti dagli standard. In seguito, lo stesso modello, opportunamente aggiornato e caratterizzato in termini di sismostrati, sarà utilizzato per l'esecuzione delle analisi richieste per la stesura delle Carte di MS di livello 2 e 3 (Figura 4). La difficoltà che presenta la realizzazione della CGT_MS risiede, quindi, nella esigenza di rappresentare non solo la distribuzione delle unità affioranti in superficie, ma di fornire anche informazioni relative alla loro disposizione reciproca e alle loro caratteristiche al di sotto della superficie, consentendo la ricostruzione di un modello integrato del sottosuolo. Per questo motivo è fondamentale corredare la CGT_MS con una serie di sezioni geologico-tecniche rappresentative e significative (Figura 1 e 4), nelle quali trovano

riscontro le stratigrafie proposte per ciascuna MOPS. Ai fini della ricostruzione delle geometrie 3D del sottosuolo, la CGT_MS stessa deve necessariamente essere letta alla luce delle sezioni geologico-tecniche. Nello schema di Figura 1 e 4 è riportata, tra gli elaborati di base anche la Carta delle Frequenze fondamentali del terreno F_0 . Questo elaborato, anche se non è previsto esplicitamente negli ICMS08, nelle esperienze di studi di MS svolte negli ultimi anni (anche a seguito degli eventi de L'Aquila, 2009 e dell'Emilia, 2012) si è rilevato determinante per la stesura della carta delle MOPS. Quindi si raccomanda fortemente di prevedere, nell'ambito degli studi di MS, questo genere di dato di base.

1.2.1 Standard di rappresentazione e archiviazione informatica

Secondo gli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica nella CGT_MS è possibile rappresentare le unità affioranti in un determinato territorio suddivise in unità geologico-tecniche attribuibili ai “terreni di copertura” o al “substrato geologico”. Inoltre gli standard prevedono per la stesura della CGT_MS l'uso di tematismi areali, lineari e puntuali per poter rappresentare gli elementi tettonico-strutturali, geologici e idrogeologici, le instabilità di versante, le forme di superficie e sepolte.

1.2.1.1 Terreni di copertura e ambiente genetico deposizionale

Per i terreni di copertura sono previsti codici derivanti dal Sistema di classificazione dei suoli (Unified Soil Classification System mod., ASTM, 1985), con i quali sono esclusivamente classificabili diversi tipi di formazioni superficiali clastiche non consolidate, sulla base dei loro caratteri granulometrici (Figura 5). Ulteriori informazioni sulle geometrie bidimensionali dei corpi litologici sono desumibili dall'attribuzione dei terreni di copertura a determinati ambienti genetico-deposizionali (Figura 6). Una tipologia di terreno di copertura è interamente identificata con un codice a quattro lettere. Le prime due, maiuscole, si riferiscono ai caratteri granulometrici, mentre le altre due, in minuscolo, designano l'ambiente genetico-deposizionale. Per la distinzione delle unità geologico-tecniche dei terreni di copertura è necessario che per ciascun orizzonte rilevato in affioramento e/o attraversato da dati di sottosuolo, siano disponibili le informazioni utili a definire i due parametri di classificazione (es. granulometria, analisi di facies e geomorfologiche). La designazione degli orizzonti non consolidati si riferisce alla granulometria dominante di miscele di materiale clastico di diverse dimensioni.

Negli standard di rappresentazione è prevista la codifica dei terreni vulcanici in funzione dell'ambiente genetico-deposizionale. Ciò presuppone una loro attribuzione ai terreni di copertura. La rappresentazione nella CGT_MS può essere effettuata per le litologie incoerenti e pseudocoerenti (ghiaie, sabbie, limi e argille), di natura vulcanoclastica ed epiclastica, per le quali è possibile fare riferimento alle sigle dei terreni di copertura (Figura 5). In alcuni studi di MS di livello 1 condotti nell'area etnea, per la rappresentazione di colate laviche come terreni di copertura è stata introdotta informalmente una nuova sigla nei terreni di copertura (LC = Lave di copertura indefinite su morfologie del substrato articolate) associata al codice “la” già previsto nell'ambiente genetico-deposizionale vulcanico. Sulla base di tale scelta, al fine di poter classificare all'interno dei terreni di copertura anche materiali consolidati e litoidi appartenenti a formazioni superficiali, viene introdotta una nuova tipologia di terreni denominata “Litoide di Copertura” a cui viene associata il codice LC (Figura 5). Tale tipologia permette di classificare diversi tipi di terreni di copertura di natura litoide, come ad esempio le colate laviche con il codice “LCla”, le ignimbriti litoidi con il codice “LCig”, le piroclastiti saldate con il codice “LCpc”, le brecce cementate di versante con il codice “LCfd”, le biocalcareni in facies di Panchina con il codice “LCtm”, i depositi di travertino con il relativo codice di ambiente genetico-deposizionale a seconda dei processi di formazione (idrotermali, di cascata/fluviali).

Terreni di copertura		
	RI	Terreni contenenti resti di attività antropica
	GW	Ghiaie pulite con granulometria ben assortita, miscela di ghiaia e sabbie
	GP	Ghiaie pulite con granulometria poco assortita, miscela di ghiaia e sabbia
	GM	Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo
	GC	Ghiaie argillose, miscela di ghiaia, sabbia e argilla
	SW	Sabbie pulite e ben assortite, sabbie ghiaiose
	SP	Sabbie pulite con granulometria poco assortita
	SM	Sabbie limose, miscela di sabbia e limo
	SC	Sabbie argillose, miscela di sabbia e argilla
	OL	Limi organici, argille limose organiche di bassa plasticità
	OH	Argille organiche di media-alta plasticità, limi organici
	MH	Limi inorganici, sabbie fini, Limi micacei o diatomitici
	ML	Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità
	CL	Argille inorganiche di medio-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre
	CH	Argille inorganiche di alta plasticità, argille grasse
	PT	Torbe ed altre terre fortemente organiche
	LC	Litoide di copertura

Figura 5 Legenda della CGT_MS: terreni di copertura. In rosso le modifiche apportate agli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica Versione 4.2.

Nell'ambito degli aggiornamenti degli standard sono stati anche definiti nuovi codici relativi all'ambiente genetico-deposizionale di tipo vulcanico (Figura 6).

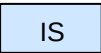
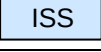
Ambiente vulcanico	
Colate/spandimenti/cupole/domi/dicchi/coni lavici	la
Piroclastiti	pc
Scorie laviche	sc
Coltri ignimbriche/tufi	ig
Lahar (colate di fango)	lh
Depositi epiclastici	ep
Ambiente di versante	
Falda detritica	fd
Conoide detritica	cd
Conoide di deiezione	cz
Eluvi/colluvi	ec
Ambiente fluvio - lacustre	
Argine/barre/canali	es
Piana deltizia	dl

Piana pedemontana	pd
Bacino (piana) intramontano	in
Conoide alluvionale	ca
Terrazzo fluviale	tf
Varve	va
Lacustre	lc
Palustre	pa
Piana inondabile	pi
Ambiente carsico	
Riempimento di dolina/ <i>karren</i> / <i>vaschetta/sinkhole</i>	do
Forme costruite presso sorgenti	so
Forme costruite in canyon carsici	cy
Croste calcaree	cc
Ambiente glaciale	
Morena	mr
Deposito fluvio glaciale	fg
Deposito lacustre glaciale	fl
<i>Till</i>	ti
Ambiente eolico	
Duna eolica	de
<i>Loess</i>	ls
Ambiente costiero	
Spiaggia	sp
Duna costiera	dc
Cordone litoraneo	cl
Terrazzo marino	tm
Palude/laguna/stagno/lago costiero	pl
Altro ambiente	zz

Figura 6 Codici relativi agli ambienti genetico-deposizionali dei terreni di copertura. In rosso le modifiche apportate agli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica Versione 4.2.

1.2.1.2 Substrato Geologico

Al substrato geologico sono assegnate tutte le unità geologico-tecniche costituite da rocce compatte, di natura lapidea (codice "LP") o granulare cementata (codice "GR") o coesiva sovraconsolidata (codice "CO"), o orizzonti caratterizzati da alternanze di litotipi in strati sottili non rappresentabili separatamente in carta (codice "AL")(Figura 7).

Substrato geologico		
	IS	Incoerente o poco consolidato
	LP	Lapideo
	GR	Granulare cementato
	CO	Coesivo sovraconsolidato
	AL	Alternanza di litotipi
	ISS	Incoerente o poco consolidato, stratificato
	LPS	Lapideo, stratificato

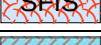
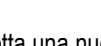
	GRS	Granulare cementato, stratificato
	COS	Coesivo sovraconsolidato, stratificato
	ALS	Alternanza di litotipi, stratificato
	SFIS	Incoerente o poco consolidato fratturato / alterato
	SFLP	Lapideo fratturato / alterato
	SFGR	Granulare cementato fratturato / alterato
	SFCO	Coesivo sovraconsolidato fratturato / alterato
	SFAL	Alternanza di litotipi fratturato / alterato
	SFISS	Incoerente o poco consolidato, stratificato fratturato / alterato
	SFLPS	Lapideo, stratificato fratturato / alterato
	SFGRS	Granulare cementato, stratificato fratturato / alterato
	SFCOS	Coesivo sovraconsolidato, stratificato fratturato / alterato
	SFALS	Alternanza di litotipi, stratificato fratturato / alterato

Figura 7 Legenda della CGT_MS: substrato geologico. In rosso le modifiche apportate agli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica Versione 4.2.

A essi è stata introdotta una nuova tipologia di substrato geologico definito "Incoerente o poco consolidato" a cui è associato il codice "IS", con lo scopo di poter classificare all'interno delle unità del substrato quei terreni incoerenti o poco consolidati (ad esempio sabbie incoerenti, semicoerenti e argille poco consolidate plio-pleistoceniche, vulcanoclastiti incoerenti o semicoerenti) che per la loro posizione stratigrafica fanno parte del substrato geologico. Per le unità del substrato geologico massive si usano i codici rispettivi a due lettere maiuscole (Figura 7). Gli stessi codici seguiti dalla "S" identificano orizzonti con analoghe caratteristiche litologiche, ma stratificati. Per indicare le unità del substrato geologico affette da alterazione/fratturazione si utilizza il prefisso SF da anteporre ai codici che designano la litologia (Figura 7).

Le stesse sigle possono essere utilizzate per designare terreni vulcanici attribuiti al substrato geologico, scegliendo a seconda dei casi, tra "ALS" per le successioni di colate massive alternate a livelli scoriacei, "LP" per rappresentare banchi lavici massivi e "GR" per tutti i depositi granulari, ed utilizzando l'eventuale prefisso "SF" per indicare gli orizzonti a elevata fessurazione.

1.2.1.3 Elementi tettonico-strutturali

Gli elementi tettonico-strutturali permettono di classificare le faglie presenti nelle aree da microzonare sulla base dello stato di attività, della cinematica e del grado di incertezza (Figura 8). Gli elementi di descrizione delle pieghe si limitano invece ai soli aspetti geometrici, espressi in termini di tracce assiali e di giaciture degli strati, senza alcun riferimento allo stato di attività e di incertezza.

Elementi tettonico strutturali	
	Faglia diretta non attiva (certa)
	Faglia diretta non attiva (incerta)
	Faglia inversa non attiva (certa)
	Faglia inversa non attiva (incerta)
	Faglia trascorrente/obliqua non attiva (certa)
	Faglia trascorrente/obliqua non attiva (incerta)
	Faglia con cinematismo non definito non attiva (certa)
	Faglia con cinematismo non definito non attiva (incerta)
	Faglia diretta attiva e capace (certa)
	Faglia diretta attiva e capace (incerta)
	Faglia inversa attiva e capace (certa)
	Faglia inversa attiva e capace (incerta)
	Faglia trascorrente/obliqua attiva e capace (certa)
	Faglia trascorrente/obliqua attiva e capace (incerta)

Elementi tettonico strutturali	
	Faglia con cinematismo non definito attiva e capace (certa)
	Faglia con cinematismo non definito attiva e capace (incerta)
	Faglia diretta potenzialmente attiva e capace (certa)
	Faglia diretta potenzialmente attiva e capace (incerta)
	Faglia inversa potenzialmente attiva e capace (certa)
	Faglia inversa potenzialmente attiva e capace (incerta)
	Faglia trascorrente/obliqua potenzialmente attiva e capace (certa)
	Faglia trascorrente/obliqua potenzialmente attiva e capace (incerta)
	Faglia con cinematismo non definito potenzialmente attiva e capace (certa)
	Faglia con cinematismo non definito potenzialmente attiva e capace (incerta)
	Sindrinale
	Anticlinale
	Giacitura strati

Figura 8 Legenda della CGT_MS: elementi tettonico strutturali, da Standard di rappresentazione e archiviazione informatica Versione 4.2.

Facendo riferimento agli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica per rappresentare le fessure eruttive di ambiente vulcanico verranno utilizzati gli stessi tematismi lineari degli elementi tettonico-strutturali relativi alle faglie. Per definire compiutamente la geometria delle fessure eruttive estensionali è necessario utilizzare la traccia relativa alla faglia diretta capace da estendere lungo entrambi i bordi della frattura, con i trattini rivolti verso l'interno. Fratture associate ad eventi eruttivi olocenici vanno indicate col simbolo di faglie attive e capaci, mentre fessure eruttive di età precedente vanno indicate col simbolo di faglie potenzialmente attive e capaci. Per le faglie capaci che bordano le caldere è opportuno l'utilizzo della simbologia relativa alle faglie dirette potenzialmente attive, in quanto non costituiscono l'effetto cumulato di più eventi ciclici nel tempo, bensì sono relative a singoli fenomeni di collasso vulcano-tettonico non prevedibili, e solo raramente possono essere parzialmente riattivate.

1.2.1.4 Elementi geologici e idrogeologici

Gli elementi geologici e idrogeologici (Figura 9) classificano i sondaggi geognostici e i pozzi tramite tematismi puntuali, definendo la profondità in m dal piano campagna del tetto del substrato geologico se raggiunto, o la massima profondità in m dal piano campagna raggiunta della perforazione nel caso essa rimanga all'interno dei terreni di copertura. La suddivisione delle due categorie deve essere coerente con le suddivisioni adottate nel modello geologico tra unità litostratigrafiche assegnate alle unità geologico-tecniche del substrato e quelle attribuite ai terreni di copertura. Altro tematismo puntuale, utilizzato solo per indicare la presenza di una falda idrica in sabbie e/o ghiaie e la profondità in m dal piano campagna della relativa superficie piezometrica, viene associato e sovrapposto graficamente a uno dei precedenti. In questa categoria di elementi rientra anche il tematismo lineare relativo alle tracce delle sezioni geologico-tecniche con le quali indicare nella

CGT_MS le tracce ritenute significative e rappresentative del modello geologico di sottosuolo, ciascuna etichettata alle due estremità con una lettera o un numero identificativo della sezione e del verso in cui essa è stata elaborata.

Elementi geologici e idrogeologici	
m	Pozzo o sondaggio che ha raggiunto il substrato geologico con indicazione della profondità (m) del tetto del substrato
m	Pozzo o sondaggio che non ha raggiunto il substrato geologico con indicazione della profondità (m) raggiunta
m	Presenza della falda in aree con sabbie e/o ghiaie con indicazione della profondità (m) del tetto della falda
	Traccia di sezione geologico-tecnica significativa e rappresentativa del modello del sottosuolo

Figura 9 Legenda della CGT_MS: elementi geologici e idrogeologici, da Standard di rappresentazione e archiviazione informatica Versione 4.2.

1.2.1.5 Instabilità di versante

Nella CGT_MS è possibile indicare i movimenti franosi come instabilità di versante designata sulla base della tipologia di frana, sul materiale coinvolto e sullo stato di attività (Figura 10). Nel campo carta vanno delimitate con il medesimo tematismo le aree di distacco e di accumulo, rappresentate con il fondo trasparente che si sovrappone al tematismo delle unità geologico-tecniche. Ai fini degli studi di MS è importante che le informazioni della CGT_MS siano integrate da elementi utili per definire la geometria e profondità della superficie di rottura da rappresentare nelle sezioni geologico-tecniche.

Instabilità di versante	1 - crollo o ribaltamento	2 - scorrimento	3 - colata	4 - complessa	5 - non definito
1 - attiva					
2 - quiescente					
3 - inattiva					
4 - non definita					

Figura 10 Legenda della CGT_MS: instabilità di versante, da Standard di rappresentazione e archiviazione informatica Versione 4.2.

1.2.1.6 Forme di superficie e sepolte

Nella CGT_MS è possibile inserire tematismi areali, lineari e puntuali relativi ad alcune forme di superficie e sepolte (Figura 11). Nella trasposizione dalla CG di base alla CGT_MS è possibile trasferire con l'utilizzo di appositi tematismi, le sole forme

di conoide alluvionale e falda detritica associabili ai terreni di copertura. Ulteriori specificazioni sulle geometrie dei terreni di copertura (es. terrazzi fluviali, piane alluvionali, ecc.) possono essere evidenziate utilizzando le sigle relative all'ambiente genetico deposizionale.

Un tematismo areale evidenzia le aree con cavità sepolte. Questo tematismo va utilizzato sia in aree soggette a fenomeni carsici che per indicare la presenza di cavità di natura antropica. In aree vulcaniche lo stesso tematismo va esteso alle porzioni di campi lavici la cui morfologia superficiale (es. volte, tumuli e bocche effimere) indica la presenza di canali ingrottati. È inoltre possibile fare riferimento a un tematismo puntuale per indicare la presenza di cavità isolate (Figura 11).

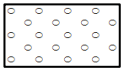
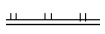
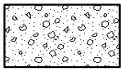
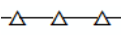
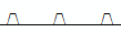
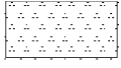
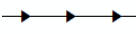
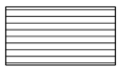
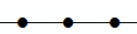
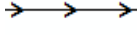
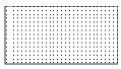
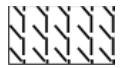
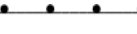
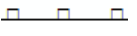
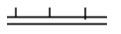
Forme di superficie e sepolte		Forme di superficie e sepolte	
	Conoide alluvionale		Orlo di terrazzo fluviale (>20m)
	Falda detritica		Cresta
	Area con cavità sepolte		Scarpata sepolta
	Ventaglio di lava al piede di pendii o scarpate sepolte		Asse di valle sepolta stretta ($C \geq 0.25$) ²
	Superficie sub-orizzontale sepolta		Asse di valle sepolta larga ($C < 0.25$) ²
	Cono o edificio vulcanoclastico sepolto		Asse di paleoalveo
	Depositi incoerenti sepolti		Limite di versante sepolto con inclinazione compresa tra 15° e 45°
	Campo di fratturazione cosmica		Limite di campo lavico
	Orlo di scarpata morfologica naturale o artificiale ³ (10-20m)		Picco isolato
	Orlo di scarpata morfologica naturale o artificiale ³ (>20m)		Cavità isolata /dolina/sinkhole
	Orlo di terrazzo fluviale (10-20m)		

Figura 11 Legenda della CGT_MS: forme di superficie e sepolte, da Standard di rappresentazione e archiviazione informatica Versione 4.2.

Morfologie superficiali che possono influenzare la risposta sismica sono rappresentabili con una serie di tematismi lineari e puntuali relativi (es. orlo di terrazzo, di scarpata e cresta in Figura 11) facilmente identificabili anche su basi topografiche,

² $C = H/L$ con H profondità della valle e L semi-larghezza della stessa.

³ Tra gli orli di scarpata artificiali si considerano anche i fronti di cava.

analisi di modelli digitali di elevazione del terreno e analisi di foto aeree. Per l'identificazione di morfologie sepolte altri elementi lineari (es. scarpata sepolta, asse di paleovalle sepolta, asse di paleovalveo, limite di versante sepolto in Figura 11) consentono la ricostruzione di paleotopografie nascoste da unità geologico-tecniche più recenti. Ad esempio, l'uso combinato del simbolo di asse di valle sepolta, stretta o larga, insieme al simbolo della scarpata sepolta (Figura 11), consente di ricostruire con esattezza la proiezione in pianta di paleovalli, utile per la stesura delle sezioni geologico-tecniche e per la definizione del modello geologico di sottosuolo.

In aree vulcaniche sono particolarmente frequenti casi di valli sepolte. La paleotopografia può contrassegnare il contatto tra substrato pre-vulcanico e vulcaniti o può separare vulcaniti di differente età, con quelle più recenti incanalate all'interno di depressioni modellate sulle lave più antiche. Per definire l'esatta ubicazione della valle sepolta, oltre all'asse, con indicazione del rapporto profondità/semi larghezza, negli studi di MS di livello 1 condotti nell'area etnea è introdotto il tematismo lineare relativo al "Limite di versante sepolto con inclinazione compresa tra 15° e 45°" (Figura 11, 28, 29).

Negli studi di MS di livello 1 condotti nell'area etnea sono state utilizzate anche altre forme di superficie e sepolte con l'introduzione di tematismi areali e lineari, finalizzati a rappresentare geometrie del sottosuolo ricorrenti potenzialmente significative per le amplificazioni del moto sismico (vedi PARTE SECONDA § 9). Nel dettaglio è stato utilizzato il tematismo lineare "Limite di campo lavico" (Figura 11) per indicare l'appoggio di colate laviche, contrassegnate dai pallini, su terreni più antichi. L'adozione di questo tematismo permette una immediata visualizzazione dell'ordine di sovrapposizione tra più colate. In più il simbolo permette di differenziare i bordi di colata (fianchi e fronte) esposti in superficie, generalmente caratterizzate da una notevole quantità di materiale scoriaceo fittamente alternato a livelli di lave massive, in contrapposizione alle porzioni centrali di riempimento di canali, dove possono prevalere lave massive sormontate da uno spessore variabile di scorie. Nell'esperienza degli studi di MS nell'area etnea il limite stratigrafico è stato utilizzato solo per indicare la sovrapposizione di terreni non vulcanici su colate laviche più antiche. In questi casi, le facies di margine della colata sono nascoste al di sotto dei terreni sovrastanti.

I tematismi areali sono stati introdotti quali strumenti di rappresentazione in pianta di geometrie di sottosuolo ricorrenti e particolarmente significative per le ricostruzioni di sezioni geologiche e geologico-tecniche (§ 9). Il "ventaglio di lava al piede di pendii o scarpate sepolte" (Figura 11) è una tipica forma di accumulo di colate che si sviluppa su una superficie sub-pianeggiante. L'utilizzo della forma di superficie può guidare il lettore della CGT_MS a identificare le zone di massimo e minimo spessore rispettivamente poste nella parte centrale e nei bordi della forma. L'introduzione del tematismo "Superficie di spianamento o di abrasione marina sepolta" (Figura 11), consente di visualizzare in pianta la presenza in sottosuolo di una superficie di discontinuità sub-pianeggiante. La forma può essere abbinata al tematismo lineare della "Scarpata sepolta" (Figura 11), quale rappresentativa del bordo interno della superficie sub-pianeggiante. Utilizzata per definire la tipologia della topografia pre-vulcanica alla base delle lave di copertura alla periferia dell'Etna, il tematismo potrebbe essere esteso anche a contesti geologici differenti per identificare in generale terreni di copertura di superfici terrazzate sub-pianeggianti. Il ricorso a questo tematismo è particolarmente utile nella ricostruzione delle geometrie 2D di sottosuolo nelle sezioni geologico-tecniche. Nelle aree etnee è stato necessario prevedere un tematismo areale per indicare la presenza in sottosuolo di edifici vulcanoclastici sepolti da lave più recenti (Figura 11). Nei casi riscontrati, la forma sepolta ha agito come barriera ai flussi delle colate laviche che si sono accumulate lungo il fianco a monte degli edifici contribuendo a definire forti discontinuità laterali tra terreni a differente comportamento (es. colate laviche e piroclastiti). Il tematismo areale "Depositi incoerenti sepolti" permette di identificare la presenza di orizzonti clastici sepolti (depositi alluvionali, marini terrazzati, epiclastici, ecc.) che possono dar luogo a inversioni di velocità con la profondità. Infine, anche se non si tratta di una vera e propria forma di superficie, viene

2 Rappresentazione del modello geologico di sottosuolo: sezioni geologiche e geologico-tecniche

2.1 Sezioni geologiche

In prospettiva della ricostruzione del modello geologico e dei caratteri stratigrafici delle MOPS, è necessario prevedere la realizzazione di più sezioni geologiche da cui trarre le sezioni geologico-tecniche a supporto della CGT_MS. Le sezioni geologiche sono lo strumento più efficace per rappresentare la distribuzione delle diverse unità litostratigrafiche nel sottosuolo. È pertanto necessario costruire le sezioni lungo transeiti che siano effettivamente significativi per sintetizzare le caratteristiche locali dell'assetto geologico e geomorfologico che possono influenzare la risposta sismica locale (Figura 13).

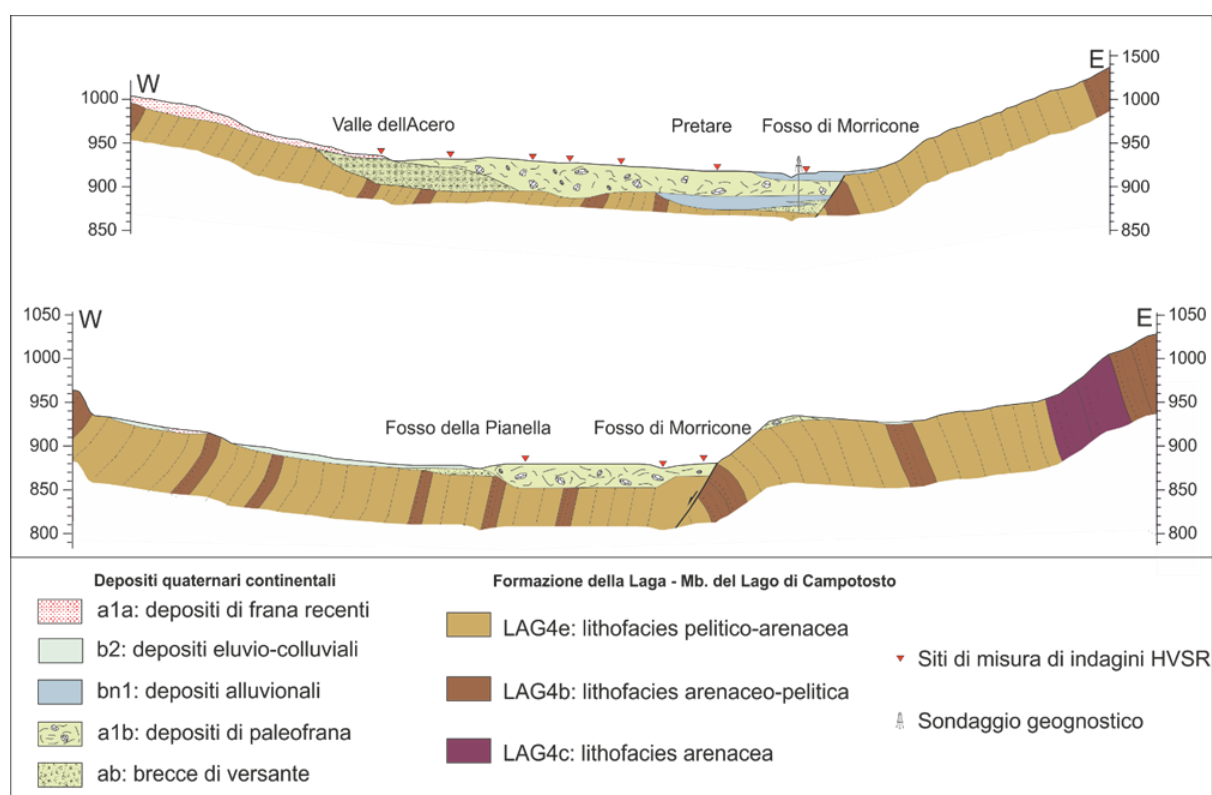


Figura 13 Sezioni geologiche di Pretare in alto e Piedilama in basso realizzate nell'ambito delle attività del Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni, successive all'evento sismico dell'Italia centrale del 24 agosto 2016.

A tal fine è opportuno preventivamente introdurre alcune definizioni relative al modello di sottosuolo, obiettivo finale delle analisi geologiche.

Il sottosuolo, ai fini degli studi di MS, è un volume costituito da terreni e rocce caratterizzati da diversa rigidità, densità e resistenza, sotteso a una predefinita area di indagine. Gran parte dei sottosuoli sono costituiti da rocce generalmente compatte, non alterate, che costituiscono la base di rocce meno compatte e alterate o di sedimenti sciolti non litificati. Ciò si traduce nella distinzione di un substrato geologico caratterizzato generalmente da una "rigidità significativamente maggiore" rispetto alle

sovrastanti coperture (Gruppo di Lavoro MS, 2008)⁴. Eccezioni a questa regola si possono presentare in diversi ambienti. In ambiente vulcanico, le coperture laviche possono essere più rigide delle unità sedimentarie su cui poggiano (es. colata lavica su terrazzo marino sabbioso). Situazioni simili sono anche riscontrabili in successioni quaternarie di ambiente costiero, laddove orizzonti calcarenitici cementati possono ricoprire o passare lateralmente ad orizzonti detritici sciolti o terreni coesivi poco consolidati. Analogamente, corpi detritici grossolani ben cementati in falde detritiche al piede di versanti possono frequentemente ricoprire terreni sciolti.

Esistono notevoli differenze nelle caratteristiche tipiche del sottosuolo in funzione della tipologia di contesto geologico in cui esso si è originato. Nel caso più comune, il sottosuolo è composto, a scala locale, da un substrato geologico sedimentario, generalmente caratterizzato dalla continuità laterale degli orizzonti litologici che lo compongono, la cui rigidità è in stretta relazione con l'entità e la durata del carico subito. Da un punto di vista della risposta sismica locale, ciò si traduce in una omogeneità laterale dei caratteri stratigrafici del substrato geologico su vasti areali e una tendenza generalizzata all'aumento della rigidità con l'aumentare della profondità degli orizzonti. In questi casi, le principali variazioni laterali della risposta sismica locale sono da imputare alla variabilità laterale delle caratteristiche litotecniche dei terreni di copertura o a locali fenomeni di degradazione o fratturazione del substrato.

Al contrario, esistono contesti geologici in cui il sottosuolo mostra caratteristiche profondamente diverse da quelle che comunemente contraddistinguono le unità di origine sedimentaria. Tra questi, le aree vulcaniche meritano una particolare attenzione, in quanto non esplicitamente trattate negli ICMS08 e integrazioni, e negli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica, seppure molto diffuse sul territorio nazionale.

I sottosuoli composti da successioni vulcanostratigrafiche sono caratterizzati da una notevole varietà della continuità laterale (minima per le colate laviche ed i depositi di flusso piroclastico canalizzati e massima per i depositi piroclastici di caduta), dello spessore dei singoli strati (da decametrici a centimetrici), associati a caratteristiche meccaniche dipendenti da fattori primari connessi alla tipologia dei prodotti e ai relativi meccanismi di messa in posto (es. lave massive, depositi piroclastici saldati o sciolti). In generale, i sottosuoli di tipo vulcanico si caratterizzano per frequenti inversioni del valore della rigidità con la profondità associate a notevoli variazioni laterali, connesse alle discontinuità di alcuni orizzonti stratigrafici. Nelle aree prossimali di edifici vulcanici prevale l'aggradazione verticale dei prodotti che, accumulandosi, danno luogo ad un substrato con caratteristiche peculiari. Nelle aree periferiche degli edifici, i prodotti di natura vulcanica, se distribuiti su topografie pre-vulcaniche piane (es. Vesuvio) tendono ad assottigliarsi progressivamente fino a interdigitarsi con livelli di origine sedimentaria. In altri casi (es. Etna), i prodotti invece sigillano superfici topografiche estremamente articolate, modellate sia su prodotti vulcanici più antichi che su un substrato geologico pre-vulcanico. Gli orizzonti lavici più recenti, tendono ad accumularsi negli antichi bassi topografici, formando una varietà di geometrie tridimensionali di sottosuolo (es. valli, pendii, scarpate o versanti terrazzati) delimitate da superfici sepolte lungo le quali si realizzano improvvise discontinuità e/o variazioni laterali dei livelli stratigrafici. Pertanto, negli studi di MS in aree vulcaniche è sempre necessario ricorrere ad una densità di dati di sottosuolo maggiore dell'usuale, a supporto della CG e delle relative sezioni.

⁴ In accordo con la letteratura scientifica e con le principali normative nazionali e internazionali, il diverso valore della rigidità tra substrato e terreni di copertura si riflette in una differenza di velocità delle onde S (V_s) che è maggiore nei terreni più rigidi. Variazioni repentine delle V_s all'interfaccia substrato/copertura, quantificate mediante il rapporto di impedenza sismica tra i 2 mezzi, in funzione della morfologia della superficie di contatto e delle proprietà fisico-meccaniche, può causare complessi fenomeni di riflessione, diffrazione e rifrazione delle onde di volume e la generazione di onde superficiali, che possono dar luogo ad amplificazioni del moto sismico al passaggio dal substrato ai terreni di copertura (quantificate con studi di risposta sismica locale).

Tenendo conto che la sezione geologica mostra geometrie apparenti in 2D, per una completa rappresentazione della variabilità tridimensionale del sottosuolo è necessaria l'esecuzione di sezioni geologiche secondo una griglia, ad esempio a maglie ortogonali. La griglia, estesa almeno quanto l'area da microzonare e preferibilmente quanto l'"areale significativo" investigato, deve essere orientata con i lati paralleli e ortogonali ai lineamenti geologico-morfologici caratteristici. Le sezioni dovranno necessariamente attraversare le aree urbanizzate o urbanizzabili e seguire i tracciati esplicativi dal punto di vista della risposta sismica in superficie (es. per effetti litologici e /o morfologici superficiali e/o sepolti). Gli aspetti principali da considerare durante il tracciamento delle sezioni, per eventuali e conseguenti fenomeni di focalizzazione e polarizzazione delle onde sismiche, sono:

- > individuazione delle aree dove illustrare in dettaglio i rapporti tra substrato e copertura con prevedibili differenze di rigidità sismica;
- > rappresentazione degli elementi morfologici superficiali (valli fluviali, conoidi, falde di detrito) e delle zone caratterizzate da ammassi rocciosi molto fratturati, da investigare mediante tracce di sezioni che dovranno essere perpendicolari ad esempio alla linea di cresta o alla linea che identifica la scarpata o il terrazzo con una lunghezza significativa per la descrizione del rilievo (da una rottura di pendio all'altra);
- > rappresentazione degli elementi morfologici sepolti (substrato roccioso con morfologia sepolta molto accidentata, scarpate, paleovalle e/o paleovalle, presenza di cavità sotterranee).

Le dimensioni della maglia vanno scelte sulla base della complessità del sottosuolo da rappresentare, in modo da evidenziare la variabilità di tutti gli elementi sepolti che possono condizionare la risposta sismica. Una maglia inadeguata potrebbe comportare un'errata rappresentazione della complessità laterale che si rifletterebbe in una errata suddivisione delle MOPS. Queste infatti sono designate sulla base di una stratigrafia del sottosuolo caratteristica e si estendono lateralmente per tutto l'areale in cui la successione stratigrafica e la geometria dei singoli orizzonti nel sottosuolo rimangono sostanzialmente omogenei. La griglia delle sezioni, quindi, costituisce lo strumento più efficace per definire le stratigrafie delle MOPS e visualizzare le loro estensioni lungo le direzioni, da cui vincolare le tracce dei limiti in pianta. Una maglia della griglia di profili troppo ampia potrebbe non campionare correttamente la variabilità laterale di determinati orizzonti stratigrafici, comportando una sovra semplificazione della suddivisione delle MOPS. Una maglia eccessivamente piccola potrebbe invece comportare un'eccessiva ridondanza di informazioni. In ogni caso, la seconda opzione è sempre da preferire, in quanto più cautelativa rispetto ai rischi della prima.

Considerato che le sezioni geologiche dovrebbero riprodurre depositi delle formazioni superficiali fino a un minimo di 3 m di spessore, è opportuno che esse siano realizzate a una scala adeguata ($\geq 1:5.000$). Nelle sezioni geologiche, la suddivisione degli orizzonti stratigrafici deve essere funzionale alla rappresentazione delle geometrie delle principali superfici di discontinuità riconosciute in affioramento o attraversate dai sondaggi disponibili (Figura 13), come di seguito elencate:

- > interfaccia substrato-formazioni superficiali di copertura;
- > superfici di contatto tra diverse tipologie di formazioni superficiali di copertura;
- > discordanze all'interno del substrato geologico;
- > discontinuità tettoniche

Non sempre l'interfaccia substrato/copertura è marcata da contrasti di impedenza significativi ai fini della pericolosità sismica locale. Contrasti di impedenza possono essere estrapolati mediante indagini geofisiche lungo eventuali superfici di

discontinuità differenti dall'interfaccia substrato-terreni di copertura, corrispondenti al contatto tra diverse tipologie di coperture, a discontinuità all'interno del substrato o non coincidenti con alcun limite di contatto tra unità geologico-tecniche.

In aree vulcaniche, per la ricostruzione della topografia sub-vulcanica è molto indicativa la morfologia dei sovrastanti campi lavici, la loro estensione laterale e forma, e la giacitura degli orizzonti. Nella costruzione del modello geologico complessivo, in aree vulcaniche, è molto importante se non indispensabile, la conoscenza dell'evoluzione morfologica regionale da cui trarre indicazioni sulla tipologia di forme che possono essere state sepolte nelle aree di espansione dei prodotti lavici, in relazione alla loro età.

2.2 Modello geologico di sottosuolo

Il modello del sottosuolo è una rappresentazione dei rapporti geometrici tra le unità geologico-tecniche, delle caratteristiche fisico-meccaniche delle unità, e degli elementi tettonici che caratterizzano nel complesso l'area soggetta a studi di MS. Il modello del sottosuolo rappresenta il documento di sintesi dal quale derivano le stratigrafie delle singole microzone omogenee e deve essere il risultato dell'integrazione di dati provenienti da diverse fonti informative (geologia, idrogeologia, geofisica e geotecnica).

Nella stesura del modello di sottosuolo devono essere utilizzati tutti i dati geognostici, geotecnici e geofisici riportati nella Carta delle Indagini e archiviati secondo gli "Standard di rappresentazione e archiviazione informatica". La raccolta ex novo di questa tipologia di informazioni avverrà anche nei livelli di studio 2 e 3 e quindi la CGT_MS dovrà essere successivamente integrata e aggiornata. Nell'ottica degli aggiornamenti della CGT_MS nei livelli di approfondimento successivi, sarebbe molto utile, anche se non previsto dagli ICMS08, allegare agli studi di primo livello la CG di base dalla quale è stata ricavata la CGT_MS.

Il ricorso alla raccolta di misure di rumore ambientale già nel primo livello può costituire un metodo speditivo di indagine a supporto dei dati geologici, utili per una verifica delle stratigrafie desumibili dalla CGT_MS. Il dato geologico deve comunque rimanere un elemento indipendente e di confronto con il dato geofisico. In tal senso la CGT_MS e ancor più le sezioni geologico-tecniche devono assolutamente privilegiare le rappresentazioni (es. spessori o geometrie sepolte) derivanti dai dati di terreno e da indagini dirette (es. sondaggi geognostici), piuttosto che ricavate dall'estrapolazione di interpretazioni di dati geofisici (es. rumore ambientale) senza gli opportuni vincoli sulle diverse variabili (es. stratigrafia, profilo Vs).

In particolare, il processo di costruzione del modello di sottosuolo, attraverso l'integrazione delle diverse informazioni, dovrà definire:

- > le geometrie e i limiti latero-verticali delle unità geologico tecniche; in particolare, è importante stabilire il rapporto geometrico tra terreni di copertura e substrato, definendo l'andamento morfologico del tetto del substrato sepolto;
- > l'assetto strutturale degli ammassi rocciosi, inteso sia come descrizione della loro giacitura complessiva che come descrizione quantitativa dello stato di fratturazione e della distribuzione spaziale delle discontinuità;
- > le proprietà fisiche e meccaniche alle quali possono essere associate leggi di variazione spaziale e valutazioni di incertezza;
- > la posizione delle falde acquifere e le loro eventuali oscillazioni stagionali, con definizione delle condizioni idrodinamiche e di pressione interstiziale.

È importante qui ricordare che i corpi geologici di copertura caratterizzati da litologie omogenee possono assumere forme complesse. In questo senso, il limite latero-verticale dell'unità geologico-tecnica è da intendersi come un "contenitore" che

conferisce la forma al corpo geologico e che può indurre, a causa della sua geometria, effetti di amplificazione del moto sismico. Il riconoscimento, la mappatura e la ricostruzione in sezione di tali limiti costituisce pertanto un elemento importante per la definizione del modello di sottosuolo e, quindi, degli effetti locali.

A un modello così concepito, che è cosa ben diversa da un modello ottenuto sommando o semplicemente sovrapponendo, a posteriori, i singoli modelli tematici, è attribuito il significato di “modello integrato del sottosuolo”.

Le finalità per le quali viene realizzato il modello integrato del sottosuolo condizionano la scelta dei dati di base, le metodologie di analisi, il tipo di risultati attesi e in definitiva la costruzione del modello stesso. Per la MS, ad esempio, il modello integrato del sottosuolo deve consentire di identificare corpi geologici omogenei, ovvero caratterizzati da valori simili dei parametri che ne descrivono il comportamento in condizioni dinamiche.

È importante, infine, sottolineare come le scale di risoluzione spaziale delle informazioni e dei parametri del modello, derivanti da diverse fonti informative, possano essere molto variabili. In conseguenza di ciò, il processo iterativo di costruzione del modello integrato del sottosuolo deve tendere a garantire una risoluzione idonea al particolare uso, finalità e livello di approfondimento. Per la MS la scala di rappresentazione delle sezioni geologico-tecniche non può essere inferiore a 1:5.000.

La definizione del modello geologico di sottosuolo per gli studi di MS avviene attraverso l'integrazione tra:

- > dati geologici e geomorfologici pregressi analizzati e successivamente revisionati con nuovi rilievi di terreno e analisi geomorfologiche originali;
- > interpretazione delle indagini dirette ed indirette di sottosuolo pregresse, integrate con nuove indagini di numero adeguato, opportunamente previste secondo un apposito piano di indagini.

La risoluzione del modello geologico deve essere adeguata al livello di approfondimento degli studi di MS:

- > per gli studi di MS di livello 1 (MS1), il modello geologico deve essere funzionale alla individuazione di zone a comportamento omogeneo in prospettiva sismica (MOPS);
- > nelle fasi di studio successive, livello 2 o 3 (MS2 o MS3), il modello geologico deve contenere tutti gli elementi di ulteriore conoscenza, acquisiti mediante le analisi specifiche condotte (prove geofisiche, prove in foro), e si deve concretizzare in un modello geologico-tecnico 1D o 2D, in funzione delle condizioni di sottosuolo, dove siano riportati i valori delle velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) assegnato ai diversi orizzonti stratigrafici, in maniera da essere facilmente convertibile in un modello geotecnico da utilizzare per le modellazioni delle amplificazioni di sito.

2.3 Sezioni geologico-tecniche rappresentative e significative

Le sezioni geologico-tecniche corredano la CGT_MS e derivano dalla rielaborazione delle sezioni geologiche i cui contenuti e distribuzione sono stati già ampiamente descritti.

Poiché la CGT_MS di riferimento è finalizzata alla MS, le sezioni ad essa associate devono essere orientate in modo da evidenziare tutti gli elementi sepolti che possono indurre effetti locali. Per tale motivo, in relazione al contesto geologico-tecnico, l'operatore deve valutare, volta per volta, quali siano gli elementi che maggiormente condizionano la risposta sismica locale, orientando le sezioni in modo tale che siano perpendicolari e parallele alla direzione di massimo sviluppo degli elementi che possono indurre amplificazione, quali ad esempio valli e scarpate sepolte, oppure zone con intensa fratturazione.

In assenza di elementi strutturali rilevanti e in presenza di paleovalli sepolte, ad esempio, l'operatore potrà scegliere orientazioni che siano indipendenti dallo stile strutturale tipico dell'area in studio, ma che meglio si adattano all'orientazione delle morfologie vallive sepolte.

La scelta di sezioni geologico tecniche rappresentative e ben orientate condiziona non solo la Carta delle MOPS, ma anche la carta di MS, poiché tali sezioni costituiranno la base per la modellazione numerica e la restituzione dei fattori di amplificazione.

La definizione di una griglia di profili sui quali rappresentare le geometrie di sottosuolo, ortogonali e paralleli ai lineamenti geologico-morfologici caratteristici del territorio da analizzare, con maglia di dimensioni dipendenti dalla complessità del sottosuolo da modellare, potrebbe costituire un elemento di riferimento utile per la pianificazione dei piani delle indagini nelle fasi di approfondimento successivi. Le tracce dei profili potrebbero infatti costituire allineamenti sui quali concentrare le indagini necessarie alla caratterizzazione dei terreni, alla definizione del modello di geologico del sottosuolo, da utilizzare come base per il modello geotecnico per la modellazione numerica della risposta sismica locale.

Le sezioni geologico-tecniche sono utilizzate per trasferire in profondità le informazioni presenti nel campo cartografico, vincolate sulla base della correlazione con le stratigrafie di pozzi, sondaggi e risultati di indagini geofisiche (Figura 14). Seguendo le indicazioni degli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica, tali sezioni significative e rappresentative delle aree a maggiore criticità dal punto di vista della risposta sismica in superficie, andrebbero rappresentate in scala negli elaborati cartografici, o in un elaborato a parte, e ampiamente descritte all'interno della "Relazione illustrativa", documento tecnico che accompagna gli elaborati cartografici richiesti per gli studi di MS, evitando riduzioni dalla scala originaria.

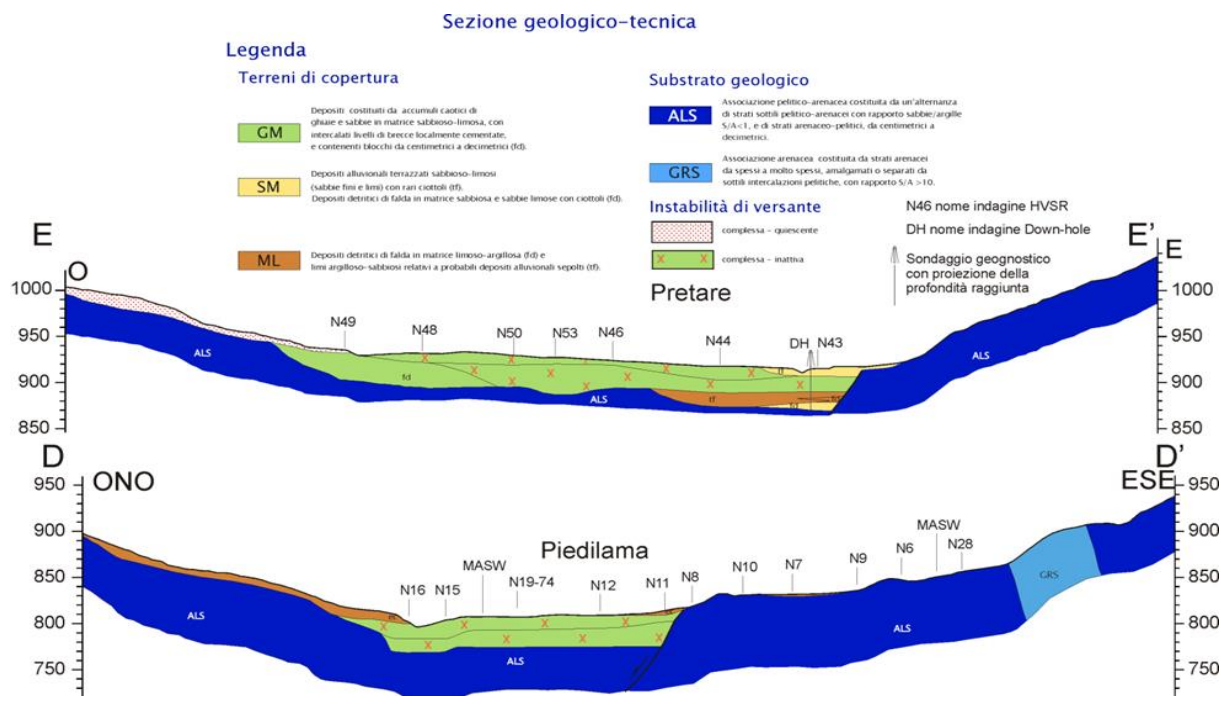


Figura 14 Sezioni Geologico-Tecniche dell'area di Pretare e Piedilama, realizzate nell'ambito degli Studi Microzonazione Sismica di III livello del Comune di Arquata del Tronto.

Da <http://www.halleygov.it/c044006/zf/index.php/trasparenza/index/index/categoria/210> (Relazione Illustrativa) modificato

Per una corretta rappresentazione delle sezioni geologico-tecniche sono di seguito elencate alcune indicazioni:

- > le tracce delle sezioni geologico-tecniche più significative e rappresentative del modello di sottosuolo devono essere contenute nella carta CGT_MS;
- > le sezioni dovranno essere riconducibili in modo univoco alle tracce presenti nel campo cartografico attraverso l'inserimento di elementi di congiunzione quali riferimenti alfabetici (A-A', A-B, etc.) o numerici (1-1, 1-2 oppure I-I, IV-V, etc.) sia ai limiti delle tracce presenti nel campo cartografico sia ai lati del disegno della singola sezione. Le lettere o i numeri posti a fianco delle sezioni dovranno essere consequenziali nella disposizione sulla carta;
- > è necessario orientare il punto di vista, apponendo agli estremi della sezione disegnata l'indicazione della posizione di vista rispetto all'orientamento geografico. Sono ammesse indicazioni tipo SSE (sud-sud est) qualora permettano la migliore individuazione della posizione;
- > è opportuno che le sezioni siano realizzate a una scala adeguata ($\geq 1:5.000$) per riuscire a rappresentare lo spessore minimo di 3 m delle unità geologico-tecniche cartografate e il rapporto tra la scala verticale e quella orizzontale della sezione disegnata è fissato in 1/1 (lunghezze uguali ad altezze);
- > le sezioni che sono state tarate con uno o più sondaggi geognostici e/o con indagini geofisiche, proiettati o ricadenti sulla traccia della sezione, dovranno riportare la posizione relativa dei/le sondaggi/indagini di taratura, la loro profondità in sottosuolo e un codice di riferimento sondaggi/indagini al fine di risalire alla documentazione dell'indagine utilizzata (ad esempio il numero corrispondente al pkey_spu). Le indagini proiettate, ovvero non coincidenti con la traccia planimetrica di sezione, vanno riportate in parentesi tonda. Si rammenta che qualora la traccia di sezione intercetti uno o più punti indagine con indicazione della profondità in metri della falda, la stessa deve essere riportata in sezione. Dovranno essere riportati anche gli eventuali incroci con altre sezioni e adeguatamente verificata la loro congruenza in termini di spessori e geometria;
- > le sezioni vanno corredate con i principali riferimenti toponomastici presenti nel campo della carta;
- > le sigle delle Unità visibili nel campo cartografico devono essere riportate in sezione. Nel caso in cui nella CGT_MS vengano abbinate alle codifiche delle unità del substrato geologico le sigle CARG dell'unità litostratigrafica di derivazione, bisogna utilizzare la stessa codifica anche nelle sezioni geologico-tecniche;
- > i colori delle unità rappresentate nelle sezioni geologico-tecniche devono necessariamente coincidere con quelli del campo cartografico corrispondente della CGT_MS, descritti negli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica;
- > la lunghezza della sezione disegnata deve corrispondere alla traccia riportata su carta;
- > la profondità della sezione geologico-tecnica deve possibilmente spingersi fino al raggiungimento del substrato sismico di riferimento;
- > nelle sezioni geologico-tecniche andrebbero proiettati i limiti delle MOPS attraversate, avendo cura che ognuno di essi coincida con la chiusura di orizzonti affioranti o sepolti che determinano variazioni nella litostratigrafia significative ai fini della MS;
- > è utile, per un controllo ulteriore, che le tracce delle sezioni siano riportate anche nella Carta della MOPS, al fine di controllare la congruenza tra i limiti riportati nelle sezioni geologico-tecniche e quelli rappresentati in carta. Le geometrie di sottosuolo raffigurate nei tratti delle sezioni ricadenti in ciascuna MOPS devono rientrare tra quelle previste dalle colonnine relative agli schemi dei rapporti litostratigrafici delle stesse.

Gli elementi che, in ogni caso, dovrebbero essere rappresentati in una sezione geologico-tecnica finalizzata a studi di MS sono:

> Andamento dell'interfaccia substrato-coperture.

La ricostruzione dell'andamento del contatto tra substrato e coperture consente:

- di definire lo spessore delle coperture, parametro necessario per definire qualitativamente le MOPS e quantitativamente l'amplificazione del moto sismico degli studi di MS di livello 2 e/o 3;
- di definire le eventuali articolazioni del substrato per motivi tettonici o morfologici che possono comunque condizionare la risposta sismica in superficie;
- di eseguire una prima valutazione sulla rigidità del substrato (vedi PARTE SECONDA), se si hanno già a disposizione dati geotecnici e geofisici sul substrato.

Nel caso di substrato profondo (dell'ordine di alcune centinaia di metri), difficilmente rappresentabile nelle sezioni geologico-tecniche, l'operatore deve comunque indicarne la profondità, stimata o misurata, nella "Relazione illustrativa". Non sempre l'interfaccia substrato/copertura è marcata da contrasti di impedenza significativi ai fini della pericolosità sismica locale. Contrasti di impedenza possono essere estrapolati mediante indagini geofisiche lungo eventuali superfici di discontinuità differenti dall'interfaccia substrato-terreni di copertura, corrispondenti al contatto tra diverse tipologie di coperture, a discontinuità all'interno del substrato o non coincidenti con alcun limite di contatto tra unità geologico-tecniche.

> Discontinuità, geometrie sepolte e di superficie

Alcune delle condizioni rilevanti ai fini della valutazione degli effetti locali di amplificazione possono essere riconducibili alle seguenti tipologie:

- Discontinuità litostratigrafiche - acquisiscono un significato rilevante nel caso di morfologie sepolte articolate, che separano unità caratterizzate da forti contrasti di impedenza sismica, come nel caso di paleo-valli sepolte, che possono indurre fenomeni di amplificazione complessi (2D e 3D), i quali devono essere accuratamente valutati negli studi di MS di livello 3. Discontinuità litostratigrafiche articolate possono svilupparsi sia al contatto tra substrato geologico e coperture, sia all'interno delle coperture stesse. Nel caso di aree urbane con forti stratificazioni antropiche, particolare rilevanza assume la morfologia sepolta sotto la coltre antropica, che deve essere adeguatamente rappresentata nelle sezioni geologico-tecniche (vedi PARTE SECONDA).
- Morfologie sepolte - Morfologie sepolte rilevanti ai fini della MS sono quelle che separano unità geologico tecniche caratterizzate da valori di V_s molto diversi tra loro. Morfologie significative in tal senso si sviluppano, ad esempio, al contatto tra substrato e coperture alluvionali o detritiche recenti, oppure tra substrato naturale e coperture di origine antropica. Tali morfologie, che possono localmente corrispondere a discontinuità litostratigrafiche (nel caso, ad esempio, di orli di scarpate o di terrazzi, oppure di bordi di valli sepolte), devono essere rappresentate in sezione in modo tale che il loro andamento corrisponda al loro sviluppo piano-altimetrico sulla CGT_MS.
- Morfologie di superficie - Tali morfologie, quali scarpate, creste, picchi isolati, orli di scarpata, orli di terrazzo, acquisiscono significato rilevante quando hanno caratteristiche tali da poter condizionare la risposta sismica locale. In particolare acclività superiori a 10° - 15° assumono importanza nella valutazione delle amplificazioni topografiche. Come per le morfologie sepolte, delle quali possono rappresentare la

prosecuzione verso l'alto (ad esempio scarpate parzialmente sepolte da depositi), la geometria e posizione in sezione delle morfologie di superficie devono corrispondere al loro sviluppo piano-altimetrico sulla CGT_MS.

> Spessori significativi delle unità geologico-tecniche omogenee

Nelle sezioni geologico-tecniche devono essere rappresentate tutte le unità omogenee che abbiano spessori significativi ai fini della valutazione degli effetti di superficie. Ciò potrebbe imporre la necessità di restituire le sezioni ad una scala di dettaglio maggiore ($\geq 1:5.000$) rispetto alla stessa CGT_MS. I litotipi con spessori inferiori ai 3 m non devono essere rappresentati nella CGT_MS e, quindi, nelle sezioni, come indicato dagli ICMS2008. Fanno eccezione le aree potenzialmente suscettibili di fenomeni di liquefazione, dove spessori inferiori ai tre metri possono essere rappresentati. I criteri di rappresentazione e di eventuale accorpamento con altri litotipi devono essere adeguatamente spiegati nella "Relazione illustrativa".

> Zone interessate da instabilità

Le zone interessate da instabilità (instabilità di versante, faglie attive e capaci, liquefazione, cedimenti) devono essere rappresentate nelle sezioni geologico-tecniche. Tutte le informazioni geognostiche disponibili devono essere integrate con quelle di superficie, per definire l'estensione in profondità di tali zone.

> Elementi tettonici e strutturali rilevanti

Le faglie ritenute più significative ai fini della MS sono quelle "attive e capaci".

Faglie "non attive e capaci" possono acquisire un significato rilevante ai fini della MS quando interessano un substrato rigido e sono associate ad un'intensa fratturazione oppure costituiscono l'interfaccia ad alto angolo tra substrato e copertura (esempio paraboldi sepolte da detrito di versante o fianchi di depressioni tettoniche riempite da depositi alluvionali). In entrambi i casi, i forti contrasti laterali di impedenza possono indurre fenomeni di amplificazione del moto sismico. Per tale motivo, ove queste condizioni si verificassero, nella sezione geologico-tecnica l'operatore deve rappresentare la porzione di substrato interessato dalla fratturazione e il suo andamento in profondità o l'andamento della superficie di faglia sepolta dai depositi di copertura.

Altre faglie rilevanti (es. non attive o attive sepolte) possono essere quelle che deformano fortemente il substrato condizionandone la geometria e dando origine a morfologie sepolte che possono determinare effetti 2D o 3D.

Se le informazioni disponibili lo permettono, le sezioni devono riprodurre anche l'assetto giaciturale delle unità di substrato che, in caso di strati molto inclinati di successioni stratigrafiche con forti variazioni litologiche, possono produrre discontinuità laterali di comportamento da tenere in debita considerazione.

> Andamento della superficie piezometrica

L'andamento della superficie piezometrica deve essere rappresentato nella sezione geologico-tecnica. Tale andamento acquisisce un'importanza rilevante per definire la suscettibilità alla liquefazione, nel caso siano presenti depositi sabbiosi incoerenti ad una profondità minore di 20 metri dal p.c. e una falda con una profondità media stagionale inferiore a 15 metri dal p.c.

3 Inquadramento della CGT_MS e delle sezioni geologico-tecniche nel percorso metodologico degli studi di MS

Nella Figura 4 è sintetizzato il percorso metodologico per produrre le carte di MS nei tre livelli previsti dagli ICMS08. Come si può notare, la CGT_MS e le sezioni geologico-tecniche sono determinanti nella stesura della Carta delle MOPS. Le indicazioni che forniscono sulla complessità geologica del sottosuolo sono anche di indirizzo nella scelta dei metodi da adottare per gli studi di livello 2 e 3.

La CGT_MS e le sezioni geologico-tecniche sono elaborati suscettibili di aggiornamento a seguito della raccolta di ulteriori informazioni acquisite attraverso gli studi dei vari livelli di approfondimento della MS. Nella programmazione degli studi di livello successivo è quindi fondamentale che il piano delle indagini sia mirato, oltre che alla completa caratterizzazione dei terreni in prospettiva di risposta sismica, anche ad eliminare o ridurre le incertezze ereditate dagli studi di MS di livello 1. Nella stesura del piano delle indagini si devono tenere conto anche tutti i possibili dati di altra provenienza prodotti tra la fine degli studi di MS di livello 1 e le successive fasi di approfondimento. Un aggiornamento della CGT_MS sulla base dei dati raccolti potrebbe consentire una rivalutazione, con una maggiore affidabilità, del modello geologico di sottosuolo e può portare, avendo più chiaro il quadro dell'assetto del sottosuolo, a economie su ulteriori indagini e/o elaborazioni numeriche previste nei livelli di approfondimento successivi.

Un'area è definibile come "geologicamente complessa" quando, in superficie e nel sottosuolo, sono presenti elementi, descrivibili con assetti 2D, che possono indurre amplificazione del moto e deformazioni permanenti durante un evento sismico. Il grado di complessità di un'area dipende dalla sovrapposizione, ossia dalla compresenza, di elementi predisponenti all'amplificazione e all'instabilità.

In particolare, si possono schematizzare le seguenti situazioni geologico-tecniche tipo che determinano la scelta del percorso metodologico per l'elaborazione della carta di MS (Figura 4):

- > Sulla base dei risultati dello studio di MS di livello 1, il territorio non presenta aree complesse per cui viene effettuata una acquisizione di nuovi dati per la realizzazione di un livello 2. I dati acquisiti confermano l'assenza di aree geologicamente complesse, anche piccole, per cui è sufficiente l'esecuzione di un livello 2;
- > Sulla base dei risultati dello studio di MS di livello 1, il territorio non presenta aree complesse per cui viene effettuata una acquisizione di nuovi dati per la realizzazione di un livello 2. I dati acquisiti indicano però la presenza di piccole aree complesse dal punto di vista geologico-tecnico, per cui è sufficiente effettuare uno studio di livello 2 nella maggior parte del territorio (non complesso), ma è necessario un approfondimento di livello 3 nelle aree complesse individuate;
- > Sulla base dei risultati dello studio di MS di livello 1, il territorio presenta aree complesse per cui viene effettuata una acquisizione di nuovi dati per la realizzazione di un livello 3. I dati acquisiti indicano la presenza di piccole aree non complesse dal punto di vista geologico-tecnico in corrispondenza delle quali è sufficiente effettuare un approfondimento di livello 2. Approfondimenti di livello 3 sono invece necessari nella maggior parte del territorio, caratterizzato da aree a differente complessità;
- > Sulla base dei risultati dello studio di MS di livello 1, il territorio presenta aree complesse per cui viene effettuata una acquisizione di nuovi dati per la realizzazione di un livello 3. I dati acquisiti confermano l'estesa complessità geologico-tecnica per cui è necessario effettuare studi di livello 3 su tutta l'area;

Le carte di MS finali saranno, dunque, il risultato dei diversi livelli di approfondimento: solo livello 2, livello 2 con approfondimenti di livello 3, livello 3 con approfondimenti di livello 2, solo livello 3.

3.1 Studi per il livello 1: dalla CGT_MS e dalle sezioni geologico-tecniche alla Carta delle MOPS

La stesura della Carta delle MOPS prevede l'analisi e integrazione dei dati geognostici e geofisici rappresentati nella Carta delle Indagini, con i dati rappresentati nella CGT_MS, elaborati al fine di ricostruire le geometrie di sottosuolo nelle sezioni geologico-tecniche. L'utilizzo congiunto di questi dati, pregressi e di nuova acquisizione, permette di suddividere qualitativamente il territorio in zone a comportamento sismico omogeneo (Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica, MOPS) classificandole come Zone Stabili, Zone Stabili suscettibili di Amplificazione locale e Zone Suscettibili di Instabilità.

La CGT_MS è un elaborato di base di fondamentale importanza per la redazione della Carta delle MOPS, in quanto rappresenta la distribuzione in superficie delle unità geologico-tecniche omogenee, corredata da informazioni sugli elementi litostratigrafici, tettonico-strutturali, geomorfologici, idrogeologici geotecnici e geofisici (se disponibili), nonché le forme sepolte e di superficie e le aree di instabilità presenti nell'area di studio.

Le informazioni contenute nella CGT_MS, insieme ai dati della Carta delle Indagini, consentono di risolvere alcune delle problematiche che possono presentarsi nella realizzazione della Carta delle MOPS, ricordando comunque che una MOPS si caratterizza non solo sulla base del terreno affiorante, ma soprattutto per la omogeneità della colonna stratigrafica rappresentativa composta dalla successione verticale di unità geologico-tecniche (Terreni di copertura e Substrato Geologico).

Aree con differente litologia, ma caratteristiche litotecniche simili

In primo luogo, a differenza di una comune carta geologica, la CGT_MS, sulla base dei dati raccolti attraverso le indagini geognostiche e geofisiche (Carta delle Indagini), può accorpare aree adiacenti caratterizzate dall'affioramento di unità litostratigrafiche diverse, ma con caratteristiche litotecniche simili. Queste costituiranno una unica MOPS se caratterizzate da una successione verticale di terreni omogenea.

Aree con stessa litologia, differente spessore delle coperture

I dati ottenuti da misure di rumore ambientale e sondaggi geognostici possono fornire informazioni utili per individuare l'andamento del substrato e, quindi, lo spessore dei terreni di copertura. In alcune aree, pur essendo presente il medesimo litotipo, potrebbe essere necessario distinguere diverse microzone in funzione della variazione di spessore delle coperture, che determina un comportamento dinamico differente. Va rilevato che spesso le variazioni di spessore sono graduali (es. fianchi di paleovalli, edifici vulcanici sepolti). In questi casi esiste un problema oggettivo di reale comportamento omogeneo delle MOPS. Solo effettuando una modellazione 2D attraverso la MOPS in uno studio di MS di livello 3 ad esempio sarà possibile definire l'estensione delle aree a risposta sismica locale omogenea.

Substrato con stessa litologia, differente rigidezza

Le informazioni contenute nella CGT_MS, integrate con i risultati delle misure di rumore ambientale e i dati geognostici, geotecnici e geofisici (se disponibili), permettono anche le prime valutazioni sulla rigidezza del substrato presente. In particolare, nella CGT_MS è possibile distinguere le porzioni di substrato geologico caratterizzate da un alto grado di alterazione e/o fratturazione. Questa distinzione consente di separare le aree con medesima litologia, ma differente comportamento in termini di rigidezza al taglio, da riferire, pertanto, a microzone differenti.

Presenza di terreni liquefacibili

Nella CGT_MS la presenza di terreni limosi e sabbiosi associata alle informazioni sulla profondità di un'eventuale falda in essi contenuta, permette di individuare le Zone di Attenzione per liquefazione (ZA_{LQ}), che andranno segnalate nella Carta delle MOPS e per le quali dovrà essere valutata la possibilità che si inneschi un tale fenomeno seguendo le indicazioni riportate nel documento "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazione (LQ)" (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2017)

Presenza di faglie attive e capaci

Eventuali faglie classificate come attive e capaci nella CGT_MS, devono essere rappresentate e trattate come Zone di attenzione per faglia attiva e capace (ZA_{FAC}) nella carta delle MOPS, secondo quanto indicato nel documento "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC)" (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015a). Le faglie di altra natura rappresentate solo nella CGT_MS sono comunque ritenute significative negli studi di MS, quando sono associate a zone con intensa fratturazione (segnalate nella CGT_MS) e/o modificano significativamente la geometria del substrato sepolto.

Aree interessate da fenomeni di instabilità di versante e altri fenomeni di instabilità (crolli di cavità, densificazione sismoindotta)

Tutte le aree interessate da fenomeni franosi attivi o quiescenti all'interno della CGT_MS andranno classificate come Zone di attenzione per instabilità di versante (ZA_{FR}) nella carta delle MOPS, secondo quanto indicato nel documento "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte (FR)" (Commissione tecnica per la microzonazione sismica 2015b). La CGT_MS contiene altresì le informazioni riguardanti altre forme di instabilità, quali le Densificazioni indotte dall'azione Sismica (ZA_{DAS}) e/o la sovrapposizione di instabilità differenti (ZA_{ID}).

3.2 Studi per il livello 2: dalla CGT_MS e dalle sezioni geologico-tecniche alla Carta delle MS

Gli ICMS08 prevedono un livello 2 di approfondimento degli studi di MS, basato su indagini a basso costo e poco invasive, che consentono di meglio definire il modello integrato del sottosuolo e di fornire per ciascuna microzona identificata una quantificazione numerica degli effetti di amplificazione del moto sismico, ottenuta con metodi semplificati (abachi). Le indagini consistono fondamentalmente in prove di tipo geofisico per la stima del profilo delle Vs, quali la sismica a rifrazione, i metodi basati sull'analisi della propagazione delle onde di superficie con tecniche attive e passive (MASW, array sismici), più raramente prove geofisiche in foro (*Down Hole*, *Cross Hole*).

Il livello 2 è applicabile esclusivamente in aree geologicamente non complesse, individuate dai risultati degli studi di MS di livello 1. I fattori di amplificazione possono essere valutati attraverso abachi costruiti per un modello ideale di sottosuolo (Figura 15), costituito da depositi essenzialmente omogenei o a strati orizzontali, piani e paralleli, di estensione infinita, poggianti su un substrato.

Tipicamente l'utilizzo di un abaco prevede la definizione dei seguenti elementi, desunti dalle informazioni contenute nella CGT_MS, eventualmente aggiornata sulla base dei nuovi dati raccolti, unitamente ai risultati delle indagini geognostiche e geofisiche:

- > litotipo prevalente dei terreni di copertura (ghiaia, sabbia, argilla), deducibile dalla CGT_MS;
- > spessore stimato della copertura, deducibile dalle sezioni geologico-tecniche;

- > V_s media o equivalente della copertura;
- > tipo di profilo di V_s , idealizzato mediante un andamento costante con la profondità o crescente secondo due gradienti (gradiente massimo, gradiente intermedio).

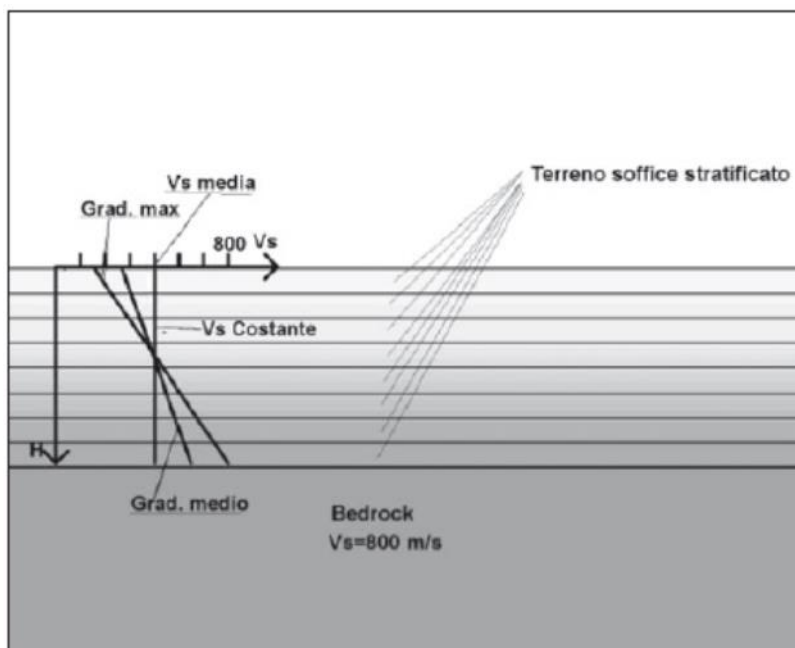


Figura 15 Modello ideale di sottosuolo, come riportato in ICMS08, per la definizione degli abachi per il calcolo dell'amplificazione litostratigrafica negli studi di MS di livello 2.

Le informazioni contenute nella CGT_MS, insieme ai dati della Carta delle Indagini, consentono di risolvere alcune problematiche che possono presentarsi nella realizzazione della Carta di MS.

3.2.1 La CGT_MS come strumento di discriminare tra livello 2 e livello 3

Gli abachi possono essere applicati solo in aree geologicamente non complesse e non sono pertanto considerati affidabili nel caso di presenza di morfologie (superficiali e sepolte) articolate, responsabili di fenomeni di amplificazione 2D/3D, inversioni di velocità (terreni rigidi sovrastanti terreni più deformabili), fenomeni di instabilità e di deformazioni permanenti del suolo. In questi casi occorre passare a studi di MS di livello 3.

È fondamentale quindi che la CGT_MS e le sezioni geologico-tecniche evidenzino le aree interessate da forme di superficie (es. scarpate, creste, picchi isolati) e sepolte (es. valli, scarpate sepolte, contatti tettonici) che possono dar luogo a complessi fenomeni 2D/3D di modifica del segnale sismico e per le quali occorrerà realizzare studi di livello 3. Allo stesso modo, la presenza di litotipi incoerenti più grossolani (sabbie e ghiaie) e/o litoidi al tetto di terreni più deformabili (argille, limi), evidenziata nelle sezioni geologico-tecniche, indicherà aree presumibilmente caratterizzate da inversione di velocità anche in assenza di dati geofisici, il cui studio dovrà essere approfondito nel livello 3. Analoghe considerazioni sono valide per le Zone di Attenzione per instabilità riportate nella carta delle MOPS.

Le aree, invece, caratterizzate da un assetto essenzialmente a strati piani e paralleli con velocità delle onde di taglio costante o crescente con la profondità, si prestano ad essere trattate anche nel livello 2 (Figura 15).

Litotipo prevalente della copertura

Utilizzando le informazioni contenute nella CGT_MS e nelle sezioni geologico-tecniche rappresentative per l'utilizzo degli abachi degli ICMS08, dovrà essere individuato il litotipo prevalente (ghiaia, sabbia, argilla) che costituisce le coperture. Questo elemento caratterizza il comportamento non lineare dei terreni sotto carichi ciclici. A tal fine le sezioni geologico-tecniche dovranno indicare gli spessori presunti dei vari litotipi. Lenti e intercalazioni di spessore fino a 3 metri possono, in linea generale, essere trascurate in quanto non interagenti significativamente con le lunghezze d'onda associate alle frequenze di interesse ingegneristico.

Spessore stimato della copertura

Lo spessore totale della copertura è un altro parametro necessario per l'utilizzo degli abachi del livello 2. Tale informazione dovrà essere dedotta dalle sezioni geologico-tecniche in cui saranno rappresentate la profondità e l'andamento dell'interfaccia substrato-coperture. Indicazioni indirette sullo spessore delle coperture possono essere desunte dalle misure di rumore ambientale, elaborate mediante la tecnica HVSR. Questa tecnica consente di stimare la frequenza fondamentale di vibrazione del sito (f_0), legata alla VS media e allo spessore totale H dei depositi, dalla ben nota relazione $f_0 = VS/(4H)$. Stimata la VS a partire da misure geofisiche, la relazione precedente consente di valutare lo spessore totale del deposito H.

Vs media della copertura

La VS media delle coperture è ottenuta da indagini geofisiche che, nel livello 2, consistono in metodi basati sulla sismica a rifrazione, sull'analisi della propagazione delle onde di superficie con tecniche attive e passive (MASW, array sismici) e più raramente sulle più costose prove geofisiche in foro (Down Hole, Cross Hole). Una stima approssimativa e con una affidabilità bassa della VS può essere ottenuta a partire dalla frequenza fondamentale di vibrazione del deposito f_0 misurata attraverso microtremori, noto lo spessore totale H del deposito (ricavato da sondaggi geognostici) mediante la relazione di cui al punto precedente. È opportuno ricordare che tale stima è affidabile solo in condizioni 1D, caratterizzate cioè da strati omogenei piani e paralleli che ricoprono il substrato. Tale condizione sarà accertata attraverso le sezioni geologico-tecniche.

Profilo di Vs

Il profilo di VS è ottenuto a partire dalle indagini geofisiche. In prima approssimazione, e solo in caso di stratificazione 1D, essendo disponibile unicamente una stima della VS media a partire da misure di rumore, indicazioni sulla scelta del profilo (costante, gradiente a diverse pendenze) possono essere fornite, con una affidabilità bassa, dalla distribuzione dei litotipi con la profondità, evidenziata nelle sezioni geologico-tecniche. Solo a titolo esemplificativo, un deposito omogeneo, costituito da litotipi argillosi sovraconsolidati, è caratterizzato da un profilo di VS costante anche per molte decine di metri. Strati omogenei di litotipi argillosi normalconsolidati e sabbiosi sono generalmente caratterizzati da modesti gradienti di VS con la profondità, mentre la presenza di litotipi argillosi al tetto di strati sabbioso-ghiaiosi determina forti gradienti di VS.

In conclusione, le informazioni che devono essere contenute nella CGT_MS e nelle sezioni geologico-tecniche per l'utilizzo degli abachi nel livello 2 sono:

- > andamento dell'interfaccia tra terreni di copertura e substrato;
- > distribuzione in superficie e in profondità delle unità geologico-tecniche (spessore e geometria) e, conseguentemente, definizione della complessità geologica dell'area di studio;
- > forme di superficie (es. scarpate, creste, picchi isolati) e sepolte (es. valli, scarpate sepolte, contatti tettonici);
- > elementi tettonici;
- > aree interessate da fenomeni di instabilità e di possibile deformazione permanente del suolo.

3.3 Studi per il livello 3: dalla CGT_MS e dalle sezioni-geologico tecniche alla carta MS (livello 3)

3.3.1 Amplificazione del moto sismico e risposta sismica locale

Il livello 3 è basato su approfondite indagini geologiche, geotecniche e geofisiche e sull'esecuzione di modellazioni numeriche finalizzate alla quantificazione dei fattori di amplificazione del moto al suolo e sulla caratterizzazione quantitativa delle Zone suscettibili di Instabilità (deformazioni permanenti), anche in situazioni geologiche complesse. Le analisi numeriche sono effettuate mediante codici di calcolo che simulano la propagazione di onde sismiche nel sottosuolo, dal substrato fino alla superficie. In generale, esse si sviluppano attraverso tre fasi principali (Figura 16):

- > determinazione delle azioni sismiche di ingresso al substrato (definizione dell'evento sismico di riferimento e del moto sismico di input);
- > definizione del modello integrato di sottosuolo dalle informazioni fornite dalla CGT_MS e dalle sezioni geologico-tecniche, aggiornate sulla base dei dati raccolti nel corso degli studi di MS nei vari livelli di approfondimento;
- > scelta del codice di calcolo (monodimensionale o bidimensionale, lineare o non lineare, modello costitutivo) ed elaborazione dei risultati (ad es. in termini di fattori di amplificazione del moto sismico, spettri di risposta, deformazioni permanenti).

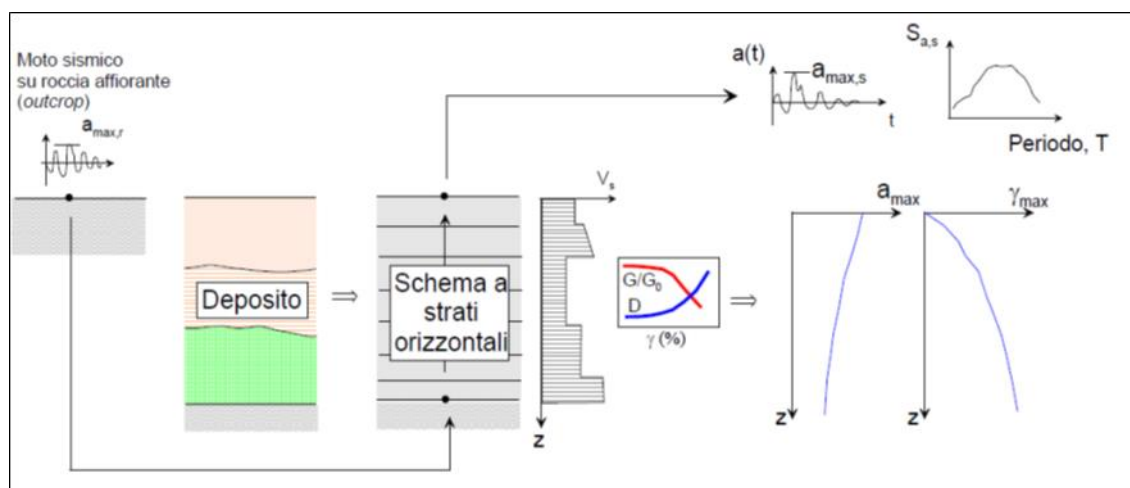


Figura 16 Esempio di analisi 1D. Un moto sismico su roccia affiorante (moto di riferimento) si applica a una colonna rappresentativa del modello del sottosuolo (litologia, profilo di V_s , curve di degrado dei terreni). La risposta sismica in superficie può essere espressa con accelerogrammi e spettri di risposta. I codici numerici possono anche calcolare l'andamento di alcuni parametri sismici in profondità (in questo caso: a_{max} e γ_{max}).

Il modello integrato del sottosuolo, ossia la rappresentazione qualitativa e quantitativa del sottosuolo, definisce le geometrie delle unità omogenee, l'assetto strutturale, le proprietà fisico-meccaniche, la presenza della falda acquifera, l'interfaccia tra substrato e copertura.

Il modello si costruisce attraverso indagini geologiche, geofisiche e geotecniche, che consentono di identificare le unità omogenee, attribuendo loro parametri geotecnici e geofisici. Le sezioni geologico-tecniche saranno parte integrante del modello numerico da utilizzarsi per le analisi dinamiche.

Le indagini da realizzare consistono in campagne di acquisizione di dati sismometrici, di rumore ambientale, associate a sondaggi geognostici, prove in foro e in superficie per la determinazione di profili di Vs, prove geotecniche in situ e in laboratorio.

Le sezioni geologico-tecniche, assieme alla CGT_MS, rappresentano uno strumento fondamentale per la definizione del modello integrato di sottosuolo e devono, il più compiutamente possibile, individuare l'interfaccia tra copertura e substrato e le geometrie delle unità omogenee, la cui caratterizzazione meccanica condurrà al modello numerico. La CGT_MS di livello 3 dovrebbe essere una rielaborazione di una carta geologica aggiornata, sulla base dei nuovi dati raccolti, e non una semplice eredità della CGT di livello 1. Analogamente, le sezioni geologico-tecniche dovrebbero derivare da profili geologici elaborati dalla carta geologica di livello 3.

Gli elementi stratigrafici, geomorfologici e strutturali riportati nella CGT_MS (forme di superficie e sepolte, elementi tettono-strutturali) e rappresentati nelle sezioni geologico-tecniche, anche caratterizzati quantitativamente (ad es. distinguendo valli strette e larghe sulla base del relativo fattore di forma) sono fondamentali per la scelta del codice di calcolo da utilizzare (1D o 2D).

Il modello mono-dimensionale si basa sull'ipotesi che la superficie del piano campagna e la successione di unità geologico tecniche (unità di copertura e di substrato) siano orizzontali e di estensione infinita. Dal punto di vista applicativo, il modello 1D è applicabile anche in condizioni meno restrittive, purché ci si mantenga sufficientemente lontani dai limiti laterali delle unità di copertura (es., aree centrali di valli larghe). Se la superficie libera, ovvero la successione di unità geologico-tecniche (terreni di copertura e/o il substrato) presentano un andamento non riconducibile all'orizzontale (es., aree di bordo di valli larghe, valli strette, creste, rilievi, ecc.), l'assunzione di un modello monodimensionale è poco realistica in quanto, alle amplificazioni 1D, si sommano altri effetti connessi alle geometrie complesse di sottosuolo (focalizzazione delle onde sismiche, generazione di onde di superficie e loro interazione con onde dirette, risonanza 2D) che determinano una maggiore amplificazione e una durata più lunga del moto sismico rispetto al caso 1D.

Quando i rapporti geometrici tra le unità omogenee e/o la topografia variano significativamente nelle tre direzioni, sono teoricamente necessari modelli tridimensionali. Questi modelli, tuttavia, sono attualmente poco diffusi in campo applicativo in quanto richiedono conoscenze estremamente dettagliate sia sui rapporti stratigrafici che sulle geometrie di sottosuolo e sulla variabilità spaziale dei parametri geotecnici e geofisici nonché lunghi tempi computazionali.

In conclusione, le informazioni contenute nella CGT_MS e nelle annesse sezioni geologico-tecniche, utili per le analisi numeriche previste al livello 3, sono:

- > andamento dell'interfaccia tra terreni di copertura e substrato;
- > distribuzione in superficie e in profondità delle unità geologico-tecniche (litologia, spessore e geometria);
- > forme di superficie (es. scarpate, creste, picchi isolati) e sepolte (es. valli, scarpate sepolte, contatti tettonici);
- > elementi tettonici;
- > aree interessate da fenomeni di instabilità e di possibile deformazione permanente del suolo.

3.3.2 Deformazioni permanenti del terreno (Zone suscettibili di Instabilità)

La Carta di MS (livello 3) viene elaborata nei casi di situazioni geologiche e geotecniche complesse o nel caso in cui sia stata prevista la realizzazione di opere di particolare importanza. In tali casi, il livello 3 di approfondimento interessa le zone stabili suscettibili di amplificazioni locali e le zone suscettibili di instabilità, particolarmente gravose sia per la complessità del fenomeno, sia per la distribuzione areale dell'evento.

Le informazioni contenute nella CGT_MS, insieme ai dati della Carta delle Indagini, consentono di risolvere alcune problematiche che possono presentarsi nella realizzazione della Carta MS (livello 3).

Liquefazione

Per quanto concerne la liquefazione dei terreni, la CGT_MS rappresenta un elaborato propedeutico e necessario per individuare la presenza o meno dei seguenti elementi:

- > paleoalvei, paludi e cordoni di dune, affioranti o sepolti, ed eventuali strutture antropiche di interesse (argini fluviali, aree di bonifica);
- > terreni granulari (orizzonti di argilla sabbiosa, limi sabbiosi, sabbie, sabbie limose, sabbie ghiaiose, sabbie argillose e ghiaie sabbiose), saturi nei primi 20 m di sottosuolo;
- > falda ad una profondità media stagionale inferiore ai 15 m dal piano campagna.

Eventuali segnalazioni di liquefazioni osservate in occasione di terremoti storici costituiscono un'ulteriore informazione indicativa della possibilità che si determinino tali fenomeni cosismici.

Una volta individuata una Zona di Attenzione nel livello 1 di approfondimento, grazie anche alle informazioni tratte dalla CGT_MS, viene predisposto un programma di indagini da eseguire nel livello 3 al fine di delineare in modo più preciso la suscettibilità alla liquefazione delle aree individuate, attraverso analisi semplificata o, analisi numeriche dinamiche. Le zone così identificate dovranno essere necessariamente trattate seguendo le indicazioni previste dalle "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazione (LQ)" (Commissione tecnica per la microzonazione sismica 2017).

Faglie Attive e Capaci (FAC)

Per quanto riguarda le analisi delle FAC, la CGT_MS assieme alle sezioni geologico-tecniche è fondamentale poiché consente di desumere le informazioni indicative dell'attività recente di una faglia. Tali informazioni si distinguono in:

- > informazioni geologico-geomorfologiche: anomalie nelle forme del paesaggio, diversione di corsi d'acqua o di altri elementi lineari e scarpate di faglia;
- > informazioni tettoniche: dislocazioni di terreni di copertura tardo pleistocenici-olocenici.

L'individuazione di tali elementi è necessaria per predisporre un piano di indagini da eseguirsi nel livello 3 di approfondimento, al fine di caratterizzare la faglia in superficie, accertandone l'attività recente e delineandone la traccia plano altimetrica certa.

Una volta definite e caratterizzate la potenzialità e la capacità di tale struttura, la stessa dovrà essere rappresentata e delineata seguendo le indicazioni previste dalle "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC)" (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015).

Instabilità di versante

Nella Carta delle MOPS, grazie alle informazioni desunte dalla CGT_MS, tutte le aree che mostrano fenomeni di instabilità di versante (osservati in campagna o desunti dai prodotti e dalle banche dati disponibili, quali IFFI e PAI) sono definite come Zone di Attenzione per instabilità di versante. Tali aree sono descritte secondo le indicazioni previste negli ICMS08, sulla base della tipologia del dissesto e sullo stato di attività.

La CGT_MS rappresenta uno strumento propedeutico e necessario per individuare la presenza, anche non concomitante, di elementi predisponenti fenomeni franosi, quali:

- > frane inattive e forme associate a movimenti gravitativi profondi, ecc.;
- > terreni sciolti su pendii acclivi;

- > falda ad una profondità media stagionale superficiale.

Eventuali segnalazioni di frane attivate in occasione di terremoti storici costituiscono un'ulteriore informazione indicativa della possibilità che si determinino tali fenomeni cosismici.

Nel livello 3 è opportuno predisporre un piano di indagini finalizzato all'acquisizione di dati morfologici, geologici, pluviometrici, stratigrafici, geotecnici, attraverso i quali aggiornare la CGT_MS e ricostruire il modello cinematico della frana. Una volta definita e caratterizzata l'area in frana, questa dovrà essere rappresentata e descritta seguendo le indicazioni previste dalle "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte (FR)" (Commissione tecnica per la microzonazione sismica 2015b).

Nella PARTE SECONDA è riportato un paragrafo di sintesi sulle modalità di studio delle instabilità cosismiche e deformazioni permanenti nell'ambito degli studi di MS.

PARTE SECONDA

Approfondimenti

4 I dati pregressi e le fonti

Nella CGT_MS e nelle sezioni geologico-tecniche, elaborate con i dati raccolti da indagini e studi pregressi, sono riportate tutte le informazioni di base (geologia, geomorfologia, caratteristiche litotecniche, geotecniche e idrogeologiche). Questi dati sono necessari per la definizione del modello integrato del sottosuolo e funzionali alla realizzazione della Carta delle MOPS (Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica). Di seguito vengono riportate alcune delle principali fonti, a scala nazionale, da cui desumere altre informazioni funzionali alla realizzazione della CGT_MS. Si sottolinea che l'attendibilità delle informazioni desunte dalla cartografia di base è strettamente correlata alla scala e alla data di realizzazione di tali elaborati.

Al fine di integrare i dati raccolti, dove possibile, è opportuno far riferimento anche alle informazioni reperibili in ambito comunale, provinciale e/o soprattutto regionale; infatti, numerose Regioni mettono a disposizione banche dati che, per scala di rappresentazione e per dettaglio, sono molto utili per ricostruzioni di modelli geologico tecnici del sottosuolo. Altri dati sono ovviamente disponibili in pubblicazioni scientifiche e siti internet di Enti ed Istituzioni di Ricerca Pubblici e Privati.

Si sottolinea ancora l'importanza del rilievo geologico, geologico-tecnico e geomorfologico da effettuare in tutti i livelli di approfondimento. Le informazioni tratte dalle fonti di letteratura possono, infatti, solo integrare i dati raccolti in situ, assolutamente necessari per garantire la qualità dei risultati finali.

4.1 Carte geologiche

La CG rappresenta uno strumento di base essenziale per la conoscenza fisica del territorio e per la stesura della CGT_MS. Il riferimento fondamentale in termini metodologici è il progetto CARG CARTografia Geologica (ISPRA, CARG, Cartografia Geologica e Geotematica, 1988), avviato nel 1988, che prevede la copertura dell'intero territorio nazionale attraverso 652 fogli geologici e geotematici alla scala 1:50.000 ognuno accompagnato da note illustrative. Il Progetto contempla anche la realizzazione di una banca dati dalla quale poter ricavare carte geologiche e geotematiche di maggiore dettaglio, per consentire l'utilizzo del dato cartografato in modo più adeguato alle diverse molteplici applicazioni. Sul sito dell'ISPRA (attualmente al link: <http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/index.html>) sono visionabili, in formato Flash, le carte geologiche fino ad ora realizzate. L'incompletezza della copertura cartografica aggiornata e lo scarso utilizzo delle preziose banche dati fin qui realizzate costituiscono limiti oggettivi nella disponibilità di dati geologici di base ai fini della redazione delle CGT_MS. Oltre alla cartografia geologica ufficiale sono disponibili numerose altre carte geologiche e in generale tematiche (carte morfotettoniche, geomorfologiche, ecc.) pubblicate nella letteratura scientifica.

Le principali informazioni desumibili dalle carte geologiche, funzionali alla realizzazione della CGT_MS, sebbene spesso solo di carattere generale se non suffragate da rilievi originali, riguardano:

- > la descrizione dei litotipi e dei relativi ambienti genetici e deposizionali. Tali informazioni sono funzionali all'individuazione delle varie tipologie dei terreni di copertura e delle unità del substrato geologico rigido o non rigido;
- > l'individuazione degli elementi tettonici e dei rapporti geometrici delle unità litostratigrafiche;
- > l'individuazione di fenomeni di instabilità dei versanti;
- > l'individuazione delle forme e processi di superficie.

4.2 Carte geomorfologiche

Nell'ambito del Progetto CARG è stata prevista anche la realizzazione di cartografia geotematica sperimentale alla scala 1:50.000, con l'obiettivo di fornire ulteriori informazioni, essenziali per la conoscenza delle condizioni generali di pericolosità del territorio. La carta geomorfologica del territorio consiste nella rappresentazione di tutti gli elementi aventi significato geomorfologico, cioè le forme (naturali e antropiche) che costituiscono il rilievo del territorio, investigandone l'origine e l'evoluzione. In particolare, studia le correlazioni tra la morfologia del terreno, le sue caratteristiche litologiche e gli agenti che lo hanno modellato. Sul sito dell'ISPRA (attualmente al link: http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/index_tematiche.html) sono visionabili, in formato Flash, alcune carte geomorfologiche alla scala 1:50.000. Anche in questo caso la copertura molto parziale del territorio nazionale è una limitazione oggettiva all'utilizzo di queste carte ai fini della microzonazione sismica. Le principali informazioni desumibili dalla carta geomorfologica, funzionali alla realizzazione della CGT_MS, riguardano:

- > forme di superficie e sepolte;
- > identificazione delle varie tipologie di instabilità di versante e stato di attività.

4.3 Carte PAI

Il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) ha valore di piano territoriale di settore e rappresenta lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo mediante il quale l'Autorità di Bacino, nell'ambito del territorio di propria competenza, pianifica e programma le azioni e le norme d'uso finalizzate alla tutela e alla difesa delle popolazioni, degli insediamenti, delle infrastrutture, del suolo e del sottosuolo (PAI, 2001). In particolare, il PAI riguarda sia l'assetto geomorfologico, relativo alla dinamica dei versanti e al pericolo d'erosione e di frana, sia l'assetto idraulico, relativo alla dinamica dei corsi d'acqua e al pericolo d'inondazione.

Sulla base delle caratteristiche dei fenomeni rilevati o attesi, il Piano disciplina l'uso del territorio in funzione di tre classi di pericolosità.

Le principali informazioni desumibili dalle carte PAI, funzionali alla realizzazione della CGT_MS, riguardano:

- > individuazione di aree soggette ad instabilità di versante con definizione della tipologia del dissesto e dello stato di attività;
- > informazioni sulle caratteristiche idrauliche di un'area;
- > assetto geomorfologico (forme).

4.4 Carte IFFI

Il Progetto IFFI (ISPRA, IFFI- Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, 2007) costituisce un inventario omogeneo e aggiornato dei fenomeni franosi sull'intero territorio nazionale. Il Progetto IFFI ha lo scopo di:

- > fornire un quadro completo ed aggiornato della distribuzione dei fenomeni franosi sull'intero territorio nazionale secondo procedure standardizzate;
- > realizzare un Sistema Informativo Territoriale Nazionale contenente tutti i dati sulle frane censite in Italia;
- > offrire uno strumento conoscitivo di base per la valutazione della pericolosità e del rischio da frana, per la programmazione degli interventi di difesa del suolo e per la pianificazione territoriale.

La cartografia tematica del Progetto IFFI è consultabile online tramite il Sistema applicativo dedicato Cart@net-IFFI o i Servizi WMS. Attualmente, sul sito dell'ISPRA, al seguente link vengono illustrate le modalità per accedere all'applicazione WebGis ed al servizio WMS: <http://www.progettoiffi.isprambiente.it/cartanetiffi/cartografia.asp#SistemaAppl>. Le principali informazioni desumibili dalle carte IFFI, funzionali alla realizzazione della CGT_MS, riguardano la definizione dello stato di attività dei versanti, frane, tipo di frane, ecc.

4.5 Informazioni di carattere morfologico

Servizi di rete di tipo WMS disponibili presso il Geoportale Nazionale (<http://www.pcn.minambiente.it/mattm/servizio-wms/>) permettono la consultazione di immagini satellitari, foto aeree e ortofoto di diversa data di realizzazione, i prodotti interferometrici, immagini SAR e modelli digitali di terreno con risoluzione a 75, 40 e 20 m.

Un modello digitale di elevazione (anche noto come DEM, dall'inglese Digital Elevation Model) è la rappresentazione della distribuzione delle quote di un territorio, o di un'altra superficie, in formato digitale. Il modello digitale di elevazione viene in genere prodotto in formato raster associando a ciascun pixel l'attributo relativo alla quota assoluta.

Recentemente la combinazione di GPS e dati lidar aerotrasportati è diventata uno degli strumenti principali per il rilevamento di faglie, subsidenze e altri movimenti geologici: la combinazione di queste due tecnologie può fornire mappe altimetriche del terreno estremamente accurate, che possono rivelare l'elevazione del suolo anche attraverso la copertura degli alberi.

Tutti questi prodotti, se impiegati in un ambiente GIS, hanno numerose applicazioni negli studi di MS con particolare riguardo all'individuazione di forme di superficie, di aree sensibili a fenomeni di amplificazioni topografiche e di frane sismoindotte.

4.6 Elaborati e relazioni a corredo di piani urbanistici e pratiche edilizie (con indicazioni da NTC18)

Secondo quanto disposto dal DM 11.03.1988, riguardante le norme tecniche per la disciplina delle costruzioni che si applicano a tutte le opere pubbliche e private da realizzare nel territorio della Repubblica (art.1 della legge 2 febbraio 1974, n.64), "le scelte di progetto, i calcoli e le verifiche devono essere sempre basati sulla caratterizzazione geotecnica del sottosuolo ottenuta per mezzo di rilievi, indagini e prove". Ciò implica che tra la documentazione richiesta a corredo di piani urbanistici e pratiche edilizie vi sia anche la relazione geologica/geotecnica corredata delle relative indagini geognostiche. Tali elaborati possono

quindi fornire informazioni relative alle caratteristiche geotecniche e litotecniche dei terreni e delle rocce, utili alla realizzazione della CGT_MS.

Particolarmente utile ai fini degli studi di MS risulta essere lo studio geologico comunale a supporto del Piano Regolatore Generale (P.R.G.), sia per la possibilità di avere elaborazioni cartografiche di dettaglio (carta geologica, litotecnica, geomorfologica, idrogeologica, ecc., in scala 1:10000, 1:5000 e/o 1:2000) per l'intero territorio comunale, sia per l'utilizzo di indagini pregresse in esso contenute. Naturalmente, nella stesura della CTG_MS il peso delle informazioni di maggiore dettaglio risulta essere preponderante.

Altrettanto utili sono ovviamente gli studi geologici di dettaglio a scala urbana, relativi a progetti per la costruzione di infrastrutture e edifici pubblici, eventuali studi e indagini realizzate per lavori pubblici sia per la progettazione, l'adeguamento e miglioramento sismico di caserme, ospedali, scuole, chiese, edifici strategici di protezione civile, che per la mitigazione del rischio idrogeologico in versanti instabili, con informazioni utili all'applicazione delle NTC 2018.

4.7 Indagini di sottosuolo

Presso il Portale del Servizio Geologico d'Italia dell'ISPRA al link <http://portalesgi.isprambiente.it/it/elenco-base-dati/13> è possibile consultare l'"Archivio nazionale delle indagini di sottosuolo (Legge 464/1984)" (<http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicita-legale/adempimenti-di-legge/trasmissione-informazioni-legge-464-84/index>), un database stratigrafico a servizio delle risorse idriche sotterranee, realizzato per l'acquisizione di "elementi di conoscenza relativi alla struttura del sottosuolo nazionale", rendendo obbligatoria, a chiunque esegua indagini nel sottosuolo, la comunicazione dei risultati acquisiti. Le informazioni sono quindi relative a studi o indagini nel sottosuolo effettuate per scopi di ricerca idrica o per opere di ingegneria civile spinti a profondità maggiori di 30 metri dal piano campagna e, nel caso delle gallerie, maggiori di 200 metri di lunghezza.

Un'altra banca dati consultabile sempre presso Portale del Servizio Geologico d'Italia dell'ISPRA è quella relativa ai sondaggi profondi per la ricerca e l'esplorazione petrolifera al link <http://sgi2.isprambiente.it/sondaggi/>.

Sempre nel Portale del Servizio Geologico d'Italia dell'ISPRA <http://portalesgi.isprambiente.it/it/elenco-base-dati/16> al link <http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/il-progetto-sinkhole> è consultabile anche il Database Nazionale dei Sinkhole, un inventario dei dati raccolti dall'ISPRA relativi al censimento dei fenomeni naturali di sprofondamento, in aree di pianura, sul territorio italiano consultabile nel visualizzatore tematico, e utilizzabile come servizio OGC.

4.8 Documentazione storica su effetti di deformazione permanente

Le informazioni desumibili dalla documentazione storica, funzionali alla realizzazione della CGT_MS, riguardano principalmente l'individuazione e la caratterizzazione degli effetti cosismici primari e secondari.

La ricostruzione degli effetti di deformazione permanente indotti da un terremoto, effettuata mediante l'analisi delle fonti storico-archivistiche e di contributi tecnico-scientifici, può portare alla individuazione e caratterizzazione di un gran numero di fenomeni geologici che includono effetti primari, come la fagliazione superficiale, ed effetti secondari, come la fratturazione, la liquefazione, i fenomeni gravitativi e le variazioni idrologiche. La rilettura in chiave sismotettonica degli effetti geologici

rappresenta un valido strumento di back-analysis per la previsione di un futuro comportamento del territorio sottoposto ad azione sismica.

Informazioni su tali fenomeni possono essere ricavate consultando il:

- > Catalogo italiano degli Effetti Deformativi del suolo Indotti dai forti Terremoti (CEDIT) del CERI, continuamente revisionato e integrato, in cui sono riportati gli effetti indotti sul terreno da terremoti storici verificatisi in un arco temporale che va dall'anno 1000 d.C. al 2016, disponibile al link http://www.ceri.uniroma1.it/index_cedit.html (Fortunato C., 2012)

Informazioni su possibili faglie attive e capaci possono essere ricavate consultando le seguenti banche dati:

- > Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), consultabile al link <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, in continuo aggiornamento, giunto alla versione 3.2.1 (DISS, 2018), che rappresenta una raccolta delle potenziali sorgenti sismogeniche di terremoti caratterizzati da $M > 5.5$ in Italia e nelle aree circostanti;
- > Catalogo delle faglie capaci ITHACA (ITaly HAZard from CApable faults) dell'ISPRA ((ISPRA, ITHACA - Catalogo delle faglie capaci), anch'esso in continuo aggiornamento, consultabile al seguente link <http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/ithaca-catalogo-delle-faglie-capaci> rappresenta le faglie capaci potenzialmente presenti sul territorio nazionale per le quali esiste uno studio, anche di livello minimo e quindi un riferimento bibliografico. ISPRA declina ogni responsabilità in merito ad un utilizzo delle informazioni contenute per la caratterizzazione di dettaglio della pericolosità da fagliazione superficiale negli studi di MS;

Tali database devono comunque essere utilizzati soltanto come fonti informative, rimandando in ogni caso a studi, rilievi e osservazioni di dettaglio, la mappatura nella CGT_MS di eventuali faglie attive e capaci presenti sul territorio.

5 Guida per la stesura della CGT_MS

Il seguente schema può essere utilizzato come una guida a carattere generale, non necessariamente completa, delle informazioni utili all'elaborazione della CGT_MS:

1. Substrato:
 - a. litologia;
 - b. informazioni cronostratigrafiche e, dove è possibile, correlazione con formazioni o altre unità cronostratigrafiche già descritte in letteratura;
 - c. caratteristiche fisiche: colore, granulometria, tipo di stratificazione, competenza, variabilità latero-verticale;
 - d. distribuzione, grado ed estensione delle zone intensamente fratturate (vedi oltre);
 - e. distribuzione, grado ed estensione delle zone di degradazione ed erosione;
 - f. suscettibilità al franamento.
2. Terreni di copertura: alluvionali, colluviali, lacustri, marini, residuali, eolici, glaciali, vulcanici, riporti e riempimenti antropici:
 - a. tipo di terreno, granulometria, informazioni cronostratigrafiche e, dove è possibile, correlazione con formazioni o altre unità cronostratigrafiche già descritte in letteratura;
 - b. distribuzione, variazioni di spessore, grado di sviluppo dei suoli;

- c. caratteristiche fisiche: colore, granulometria, tipo di stratificazione, competenza, stato di addensamento/consistenza, cementazione, variabilità latero-verticale;
 - d. presenza di terreni granulari suscettibili alla liquefazione;
 - e. presenza di terreni di copertura instabili: litologia, acclività dei versanti, attività dei fenomeni di instabilità (fenomeno attivo, quiescente, inattivo, stabilizzato);
 - f. caratteristiche fisiche e/o chimiche peculiari (es. variazioni di volume delle argille).
3. Caratteristiche strutturali e fratturazione del substrato e delle coperture:
- a. presenza, distribuzione, dimensioni, orientazioni, variabilità e densità dei sistemi di frattura;
 - b. informazioni cronostratigrafiche ai fini delle datazioni delle strutture;
 - c. caratteristiche peculiari della fagliazione: espressioni topografiche, presenza di zone di gouge o di brecce;
 - d. eventuale presenza di faglie attive e capaci (FAC) e di faglie potenzialmente attive e capaci (FPAC);
 - e. caratteristiche delle zone intensamente fratturate: distribuzione, grado ed estensione (indicare il tipo di classificazione utilizzato).
4. Elementi morfologici superficiali pertinenti la pericolosità sismica
- Geometrie in pianta e in sezione di:
- a. corpi di frana,
 - b. conoidi alluvionali,
 - c. falde detritiche,
 - d. scarpate morfologiche e tettoniche,
 - e. terrazzi fluviali e marini (orli).
5. Elementi morfologici sepolti, pertinenti la pericolosità sismica
- Geometrie in pianta e in sezione di:
- a. scarpate morfologiche e tettoniche,
 - b. terrazzi fluviali e marini (orli),
 - c. valli (paleovalli) sepolte (asse e bordi).
6. Elementi idrologici e idrogeologici:
- a. identificazione e caratterizzazione degli acquiferi: profondità della falda e fluttuazioni stagionali, gradienti;
 - b. relazioni con i terreni di copertura: corpi di frana e terreni granulari sottofalda.

6 Dalle informazioni geologiche alle informazioni geologico-tecniche: esempio di colonna stratigrafica e colonna geologico-tecnica rappresentativa del sottosuolo

Uno dei grandi problemi della CGT_MS è come rappresentare la grande quantità di informazioni in maniera sintetica e in un formato grafico immediatamente comprensibile ed esplicativo.

La colonna stratigrafica (o log stratigrafico), strumento tradizionalmente utilizzato per rappresentare le informazioni geologiche, può essere adottata, con le necessarie modifiche e integrazioni, per rappresentare le problematiche geologico-tecniche locali

connesse alla pericolosità sismica. Una colonna costruita con questi obiettivi dovrà rappresentare il tipo di litologia, la densità delle fratture, la posizione delle falde idriche, la permeabilità dei terreni di copertura e la suscettibilità alle instabilità permanenti legate al terremoto.

Ogni colonna sintetizza le caratteristiche geologico-tecniche di una verticale del sottosuolo e queste caratteristiche possono essere estese, con le dovute accortezze, ad altre parti del territorio.

Di seguito si commenta la costruzione di una colonna geologico-tecnica finalizzata a studi di MS, partendo da una colonna litostratigrafica ("geologica"). In questa illustrazione sono contenuti anche alcuni dei metodi e delle valutazioni con cui è possibile passare da una carta geologica s.s. a una CGT_MS.

In Figura 17 sono rappresentate due colonne virtuali: a) colonna stratigrafica, b) colonna geologico-tecnica.

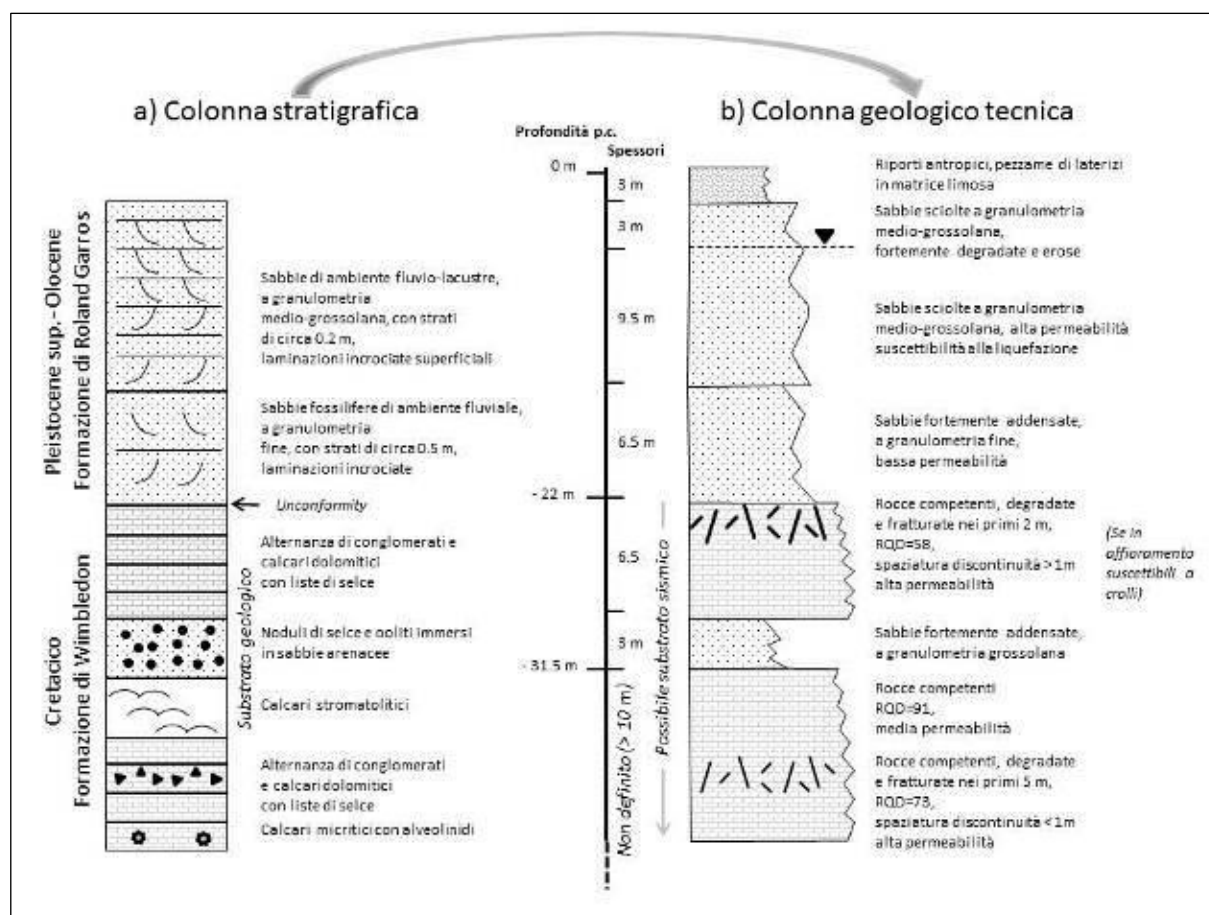


Figura 17 Esempio di colonna stratigrafica (a) e colonna geologico-tecnica (b) a confronto.

Le informazioni della colonna litostratigrafica (colonna a sinistra) sono improntate a definire l'assetto geologico e l'evoluzione del territorio. In particolare, sono riportate:

- > le informazioni cronostratigrafiche delle formazioni e il loro nome
- > la litologia e la tessitura
- > la presenza di fossili nei vari strati
- > la segnalazione di componenti mineralogiche minori
- > le strutture sedimentarie

- > gli ambienti deposizionali
- > l'identificazione del substrato geologico
- > i caratteri dei passaggi tra le formazioni

In estrema sintesi, nell'esempio illustrato, la colonna litostratigrafica evidenzia che, dopo una iniziale sedimentazione marina del Mesozoico (substrato geologico), il territorio è stato sottoposto a un lunghissimo periodo di erosione subaerea, fino all'impostazione, in tempi geologici recenti, di ambienti deposizionali lacustri e fluviali.

La colonna geologico-tecnica (colonna b, a destra) ha chiaramente delle finalità applicative, le informazioni in essa contenute infatti riguardano:

- > la litologia e la granulometria
- > gli spessori delle unità litologiche
- > le profondità di livelli particolarmente rilevanti ai fini applicativi
- > l'identificazione di un possibile substrato sismico
- > una valutazione (anche solo indicativa) sulla resistenza dei terreni e delle rocce
- > il grado di degradazione ed erosione
- > il grado e le modalità di fratturazione dei terreni e delle rocce più competenti
- > il grado di addensamento (anche solo qualitativo) dei terreni sciolti
- > il livello della falda acquifera più superficiale
- > la permeabilità dei terreni di copertura e delle rocce
- > l'eventuale segnalazione della suscettibilità a instabilità permanenti legata al sisma.

In testa alla colonna è riportato uno spessore di riporti antropici che non compariva nella colonna litostratigrafica, riconosciuto in fase di redazione della carta CGT_MS grazie alla disponibilità di prove geotecniche in sito, segnalato in quanto di particolare importanza per eventuali effetti amplificativi del moto sismico.

In sintesi, la colonna geologico-tecnica, nell'esempio, ci illustra una situazione particolarmente interessante dal punto di vista sismico. Sono presenti 22 m di terreni sciolti (sabbie) poggianti su un substrato di roccia competente. Sulla base di questa stratigrafia è possibile ipotizzare un accentuato contrasto di impedenza che potrebbe provocare amplificazioni sismiche al contatto sabbie/roccia). Sono inoltre da valutare, in prospettiva sismica, il ruolo dei 3 m di riporti antropici e l'effetto del contrasto di impedenza al contatto sabbie sciolte e sabbie fortemente addensate, che potrebbe produrre effetti di amplificazione a frequenze differenti da quelle relative al contrasto di impedenza più profondo. Le unità litologiche sabbiose sono in gran parte sottofalda, sono quindi da studiare nell'ottica della suscettibilità alla liquefazione. Il substrato, sia nel sottosuolo che in affioramento, presenta alcuni orizzonti con intensa fratturazione che dovranno essere analizzati sia in termini di profilo di Vs, sia di suscettibilità alle frane di crollo.

Un'ultima osservazione riguarda la natura della superficie di unconformity e gli ambienti di deposizione che sono riportati nella colonna stratigrafica. La presenza di una superficie di discontinuità con una potenziale profonda erosione del substrato può essere l'indizio della presenza di morfologie sepolte articolate, che devono essere quindi attentamente valutate ed eventualmente rappresentate nella CGT_MS e nelle sezioni geologico tecniche. La segnalazione che i terreni sciolti sono di ambiente fluvio-lacustre o più schiettamente fluviale, inoltre, potrà aiutare a disegnare le corrette geometrie (probabilmente corpi con una buona continuità laterale nel primo caso, più discontinue nel secondo caso) di queste unità, quando si appronteranno le sezioni geologico tecniche 2D.

7 Substrato geologico, substrato sismico e substrato di riferimento

7.1 Introduzione

A seguito di numerosi studi, convegni e riunioni su tematiche riguardanti la MS si è spesso acceso un dibattito sulla definizione e sul significato di “substrato” o “bedrock” seguito da uno dei 3 aggettivi: “geologico” (a volte definito “rigido”), “sismico” e “di riferimento” (a volte detto anche “ingegneristico”).

Ovviamente, come è facile intuire, talora l’uso di una definizione piuttosto che di un’altra dipende dal campo disciplinare a cui appartiene chi la sta utilizzando. Ma molto più spesso la terminologia è legata agli obiettivi e ai temi trattati (carta geologica, carta strutturale, carta geologico-tecnica, carta di MS, suolo di fondazione per opere antropiche, ecc.).

In questo capitolo si tenterà di fornire, in modo sintetico, delle definizioni condivisibili, di esplorare le possibili contraddizioni e di identificare, nel campo degli studi di MS, le giuste applicazioni di ognuno dei “substrati” definiti.

7.2 Definizioni

7.2.1 Substrato geologico

Costituito generalmente da roccia compatta, perlopiù a rigidità elevata, che non ha subito deformazioni tettoniche pervasive in ambiente fragile che costituisce la base di rocce meno compatte o della stessa roccia di substrato alterata o di sedimenti sciolti, questi ultimi chiamati con il termine generale di terreni di copertura. Il substrato geologico si intende affiorante se le coperture sovrastanti presentano spessore inferiore ai 3 m.

Nel caso specifico di problemi legati alla risposta sismica locale nel contesto italiano, il substrato geologico si riferisce ad unità con successioni di rocce competenti di età meso-cenozoica, molto più raramente quaternaria. Esempi possono essere le rocce carbonatiche mesozoiche e i flysch cenozoici dell’Appennino, le rocce metamorfiche mesozoiche delle Alpi, le rocce cristalline della Calabria o le Argille Azzurre plio-pleistoceniche che caratterizzano tutto il margine appenninico padano-adriatico dal Monferrato alla Puglia, i bacini peritirrenici e le avanfosse della Sicilia. Più problematica è la definizione del substrato geologico in ambiente vulcanico, come nel caso delle aree etnee. Studi condotti nelle zone pedemontane dell’Etna hanno infatti proposto una distinzione tra lave di substrato, poggianti sulle unità sedimentarie subvucaniche tramite superfici sub-orizzontali e caratterizzate da spessore e continuità laterale elevati, e lave di copertura, contenute in valli sepolte generalmente strette e caratterizzate da notevole variabilità laterale delle facies. In molti casi, il contatto lave-substrato è marcato da una evidente inversione di velocità delle onde sismiche, che richiederanno un approfondimento di livello 3 per la determinazione della risposta sismica locale.

Rilievi di campagna e prove meccaniche in situ non sono sufficienti a verificare se un substrato geologico sia anche un substrato sismico e/o un substrato di riferimento; a questo fine sono indispensabili caratterizzazioni geotecniche e geofisiche.

Negli studi di MS, il substrato geologico viene riportato nella CGT_MS; le stesse aree, nella Carta delle MOPS possono essere cartografate sia come Zone Stabili quando le informazioni disponibili supportano tale classificazione (Figura 18) che come Zone Stabili suscettibili di Amplificazioni quando il substrato non ha un comportamento da bedrock sismico.

Infine, è da notare che nei livelli 2 e/o 3, è opportuno comunque che le Zone Stabili (affioramenti di substrato geologico) ereditate dal livello 1, laddove non vi sia certezza che il substrato affiorante abbia un comportamento da bedrock sismico siano trattate come Zone Stabili suscettibili di Amplificazioni, al fine di verificare il reale comportamento della MOPS.

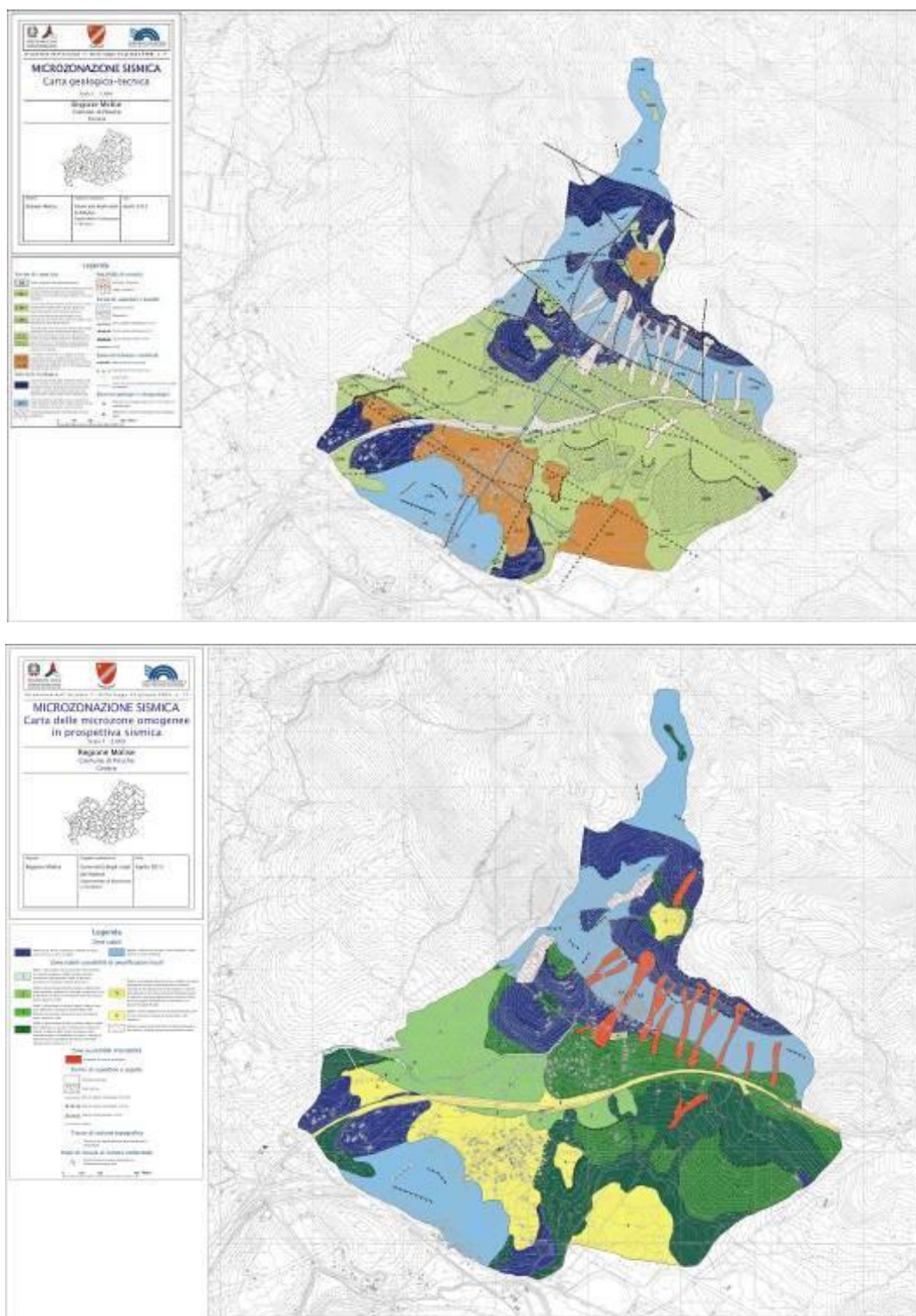


Figura 18 a) Carta geologico-technica con affioramenti di substrato geologico; b) Carta delle MOPS con zone stabili (affioramenti del substrato geologico).

7.2.2 Substrato sismico

È costituito da una successione litostratigrafica che non induce effetti di amplificazione o modificazioni in frequenza del segnale sismico. In questo caso, il segnale sismico è determinato solo dal tipo di sorgente e dal percorso delle onde all'interno della crosta, dall'ipocentro alla superficie di affioramento della successione, escludendo l'eventuale presenza di terreni di copertura soffici (a bassa rigidità; Figura 19).

Questa definizione è vincolata ad alcune condizioni:

- > il substrato sismico può essere presente in affioramento o in profondità (quindi ricoperto da terreni soffici con bassa rigidità);
- > la successione litostratigrafica che lo compone deve avere valori di rigidità elevati;
- > la superficie di affioramento non deve presentare morfologie capaci di determinare amplificazione per effetti topografici.

Negli studi di valutazione della risposta sismica di un sito generalmente si considera come valore di rigidità minimo $V_s \geq 800$ m/s, ma questo valore è assolutamente convenzionale. In altri contesti geologici questo valore può essere sensibilmente diverso (un esempio è quello delle normative statunitensi che prevedono $V_{s,30} \geq 1500$ m/s).

Negli studi di livello 2 e/o 3, il substrato sismico viene riportato, se in affioramento o sub affiorante (copertura < 3 m), come zona stabile; viene invece utilizzato, se in profondità, per il calcolo della risposta del sito, applicando sulla sua superficie l'input sismico di eccitazione del modello numerico. I risultati delle simulazioni numeriche sono riportati nelle carte di MS, generalmente, sotto forma di fattori di amplificazione. Il fattore di amplificazione è il rapporto tra il segnale registrato nel sito posto su terreni soffici e il segnale registrato all'affioramento del substrato sismico.

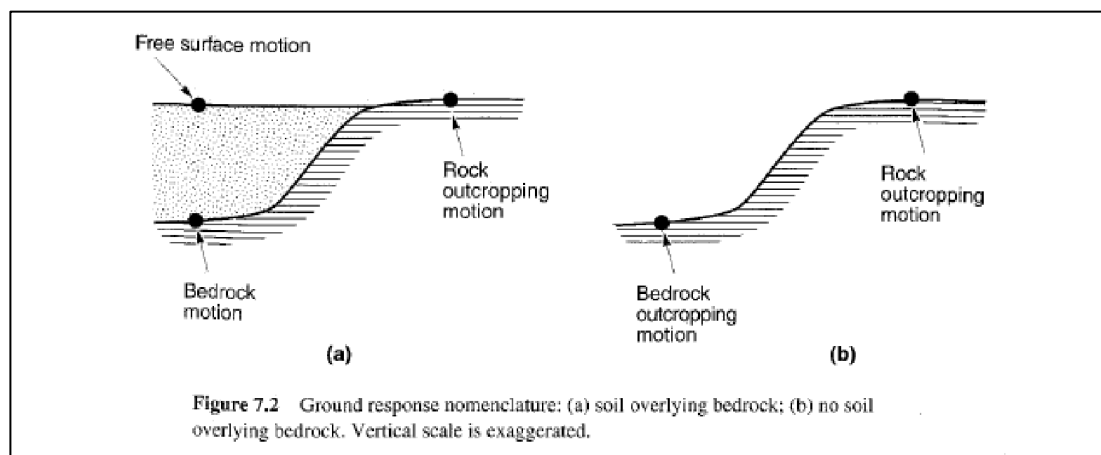


Figura 19 Esempi di substrato. La figura è ripresa da (Kramer, 1996). Interessante è la nomenclatura adottata dall'Autore; free surface: punto sommitale della successione dei terreni soffici; bedrock: substrato sismico al di sotto della successione dei terreni soffici; rock outcropping: roccia affiorante; bedrock outcropping: substrato sismico affiorante (non sovrastato da terreni soffici).

7.2.3 Substrato di riferimento (o ingegneristico)

Per la definizione di substrato di riferimento ci si può riferire alle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC18, 2018). Nel capitolo 3.2.2 - Categorie di sottosuolo - è riportata la seguente definizione per la categoria di sottosuolo A: "Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.". Questa definizione viene

lievemente integrata nel capitolo 7.11.3.1 - Amplificazione stratigrafica - nel quale si specifica che “Nelle analisi di risposta sismica locale, l'azione sismica di ingresso è descritta in termini di storia temporale dell'accelerazione (accelerogrammi) su di un sito di riferimento rigido ed affiorante con superficie topografica orizzontale (sottosuolo tipo A del § 3.2.2)” (Figura 20).

Come si può notare dalla descrizione, le caratteristiche che consentono di individuare il substrato ingegneristico sono fondamentalmente tre:

- > essere in affioramento;
- > avere rigidezza, in termini di V_s non inferiore a 800 m/s;
- > avere una superficie topografica orizzontale.

Si sottolinea che il valore di $V_s \geq 800$ m/s è anche in questo caso assolutamente convenzionale. Come già scritto, in normative di altre nazioni questo valore può essere sensibilmente diverso (può variare da 750 m/s a 1500 m/s).

Negli studi di MS (livelli 2 e/o 3) il substrato di riferimento è assimilato al substrato sismico e, se gli studi di MS sono utilizzati a supporto della progettazione, le aree di affioramento del substrato di riferimento sono considerate zone stabili.

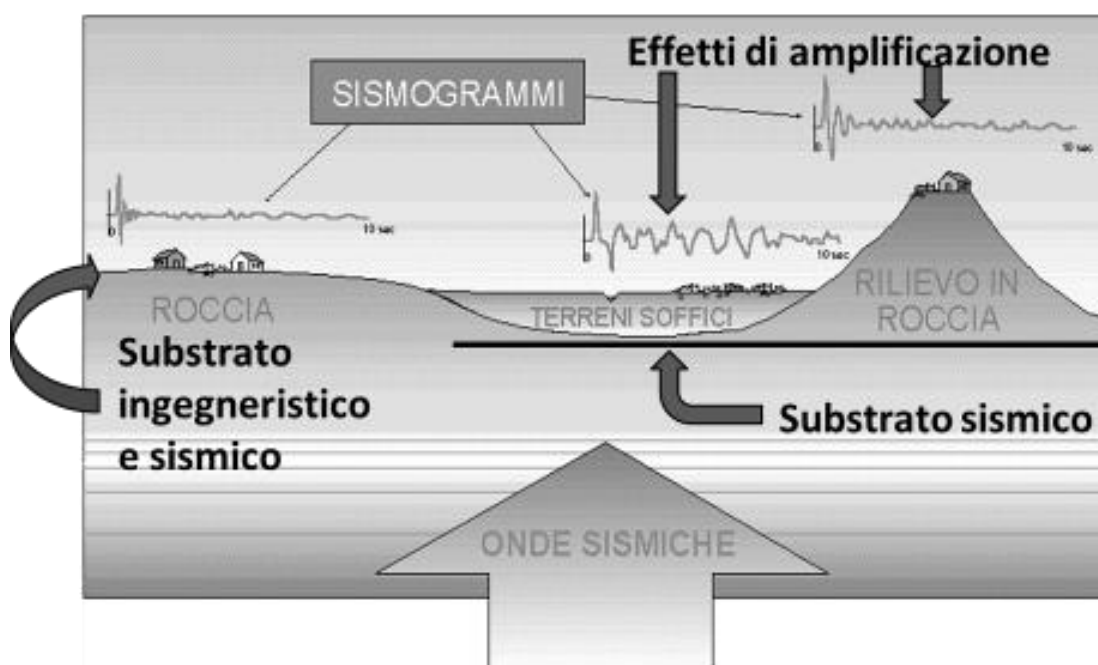


Figura 20 Esempi di substrato sismico e di riferimento (ingegneristico).

7.3 Applicazioni del substrato sismico e del substrato di riferimento

Con riferimento alla Figura 21, i fattori di amplificazione nel punto S possono essere calcolati come rapporto tra lo spettro di risposta elastico del punto S e quello del punto R (S/R) o tra lo spettro del punto S e quello del punto A (S/A). Il rapporto S/R è più corretto dal punto di vista fisico, perché spiega le modificazioni in ampiezza e contenuto in frequenza che subisce il moto sismico quando passa attraverso gli stati di terreno soffici.

Il rapporto S/A è invece preferito in campo ingegneristico in quanto descrive adeguatamente la differenza tra il progettare e costruire su un ipotetico o reale substrato in affioramento e il progettare e costruire su una successione di terreni soffici, con tutto quello che ne consegue in termini di sicurezza e di costi.

Nell'ottica della CGT_MS e delle sezioni geologico-tecniche, si sottolinea ancora una volta l'importanza dell'informazione sulla profondità del substrato, che, come si vede dallo schema di Figura 21, diventa decisiva nella valutazione degli spettri di risposta.

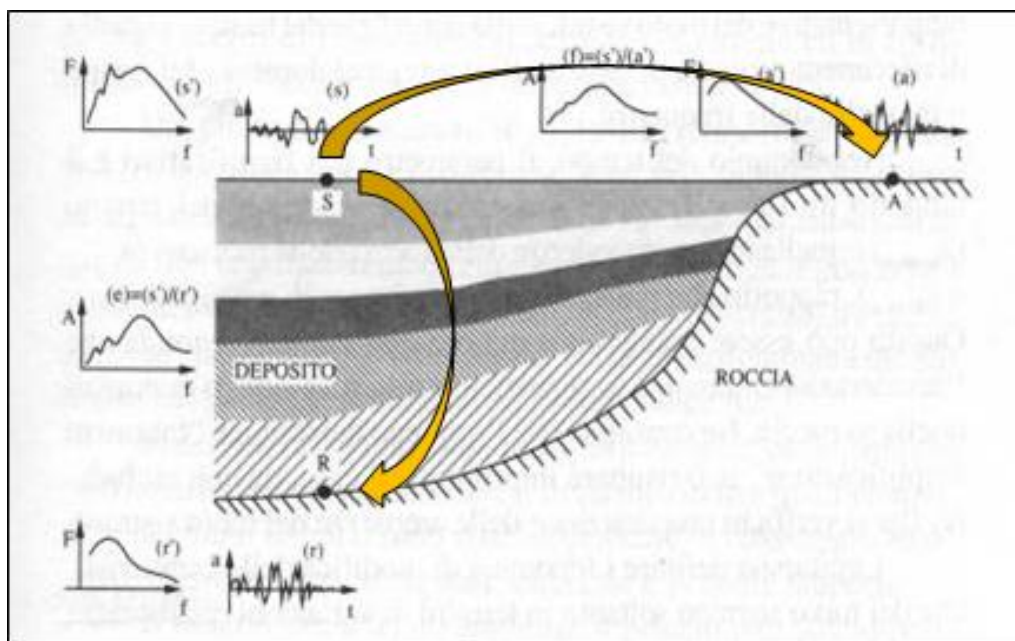


Figura 21 Substrato sismico e substrato di riferimento. Il substrato in affioramento (A) può essere definito sia sismico che di riferimento, mentre nel punto R c'è un substrato sismico. L'amplificazione è calcolata in S (punto posto in cima a una successione di terreni soffici). Da (Lanzo G., 1999) leggermente modificato.

8 Schemi commentati di alcuni elementi morfologici pertinenti la pericolosità sismica

Nella CGT_MS devono essere evidenziati gli elementi morfologici che possono determinare modificazioni locali del segnale sismico ed effetti di instabilità e che pertanto devono essere caratterizzati.

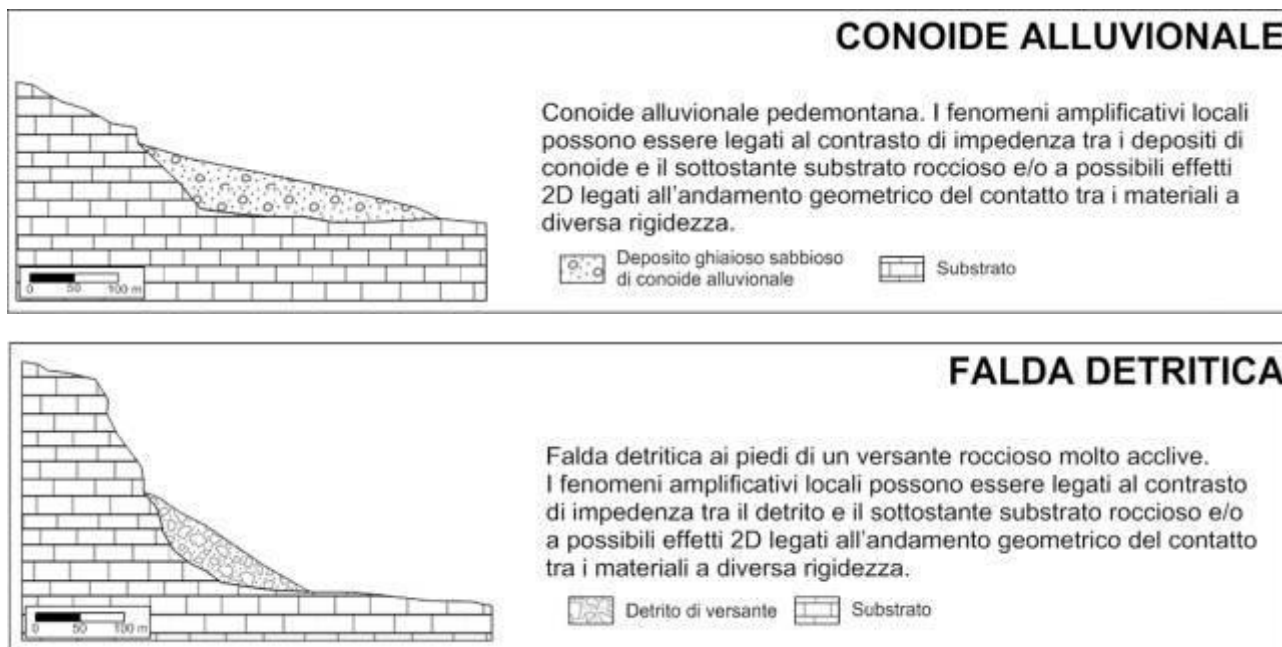
Nella valutazione degli elementi morfologici è molto importante definire se il modellamento è avvenuto su roccia o su terreni di copertura. In questo secondo caso, il rilevamento di campagna deve essere finalizzato alla individuazione dei processi responsabili del modellamento e alla definizione dello spessore delle coperture. Nel caso di forme in roccia si veda l'approfondimento sulle amplificazioni topografiche.

Gli elementi morfologici rilevanti ai fini della valutazione della pericolosità sismica locale possono essere classificati in tre gruppi:

- a. Elementi puntuali (superficiali o sepolti):

- picchi/poggi isolati
- cavità/sinkhole/doline isolate
- b. Elementi lineari (superficiali o sepolti):
 - creste/dorsali con altezza costante o variabile
 - scarpate morfologiche e tettoniche (orli)
 - terrazzi fluviali e marini (orli)
 - valli (paleovalli) strette o larghe/paleovalvei (assi e bordi)
- c. Elementi areali
 - conoidi alluvionali;
 - falde detritiche;
 - aree interessate da cavità/sinkhole/doline.

Nella Figura 22 sono riportati, come esempio, alcuni schemi commentati relativi agli elementi morfologici citati.



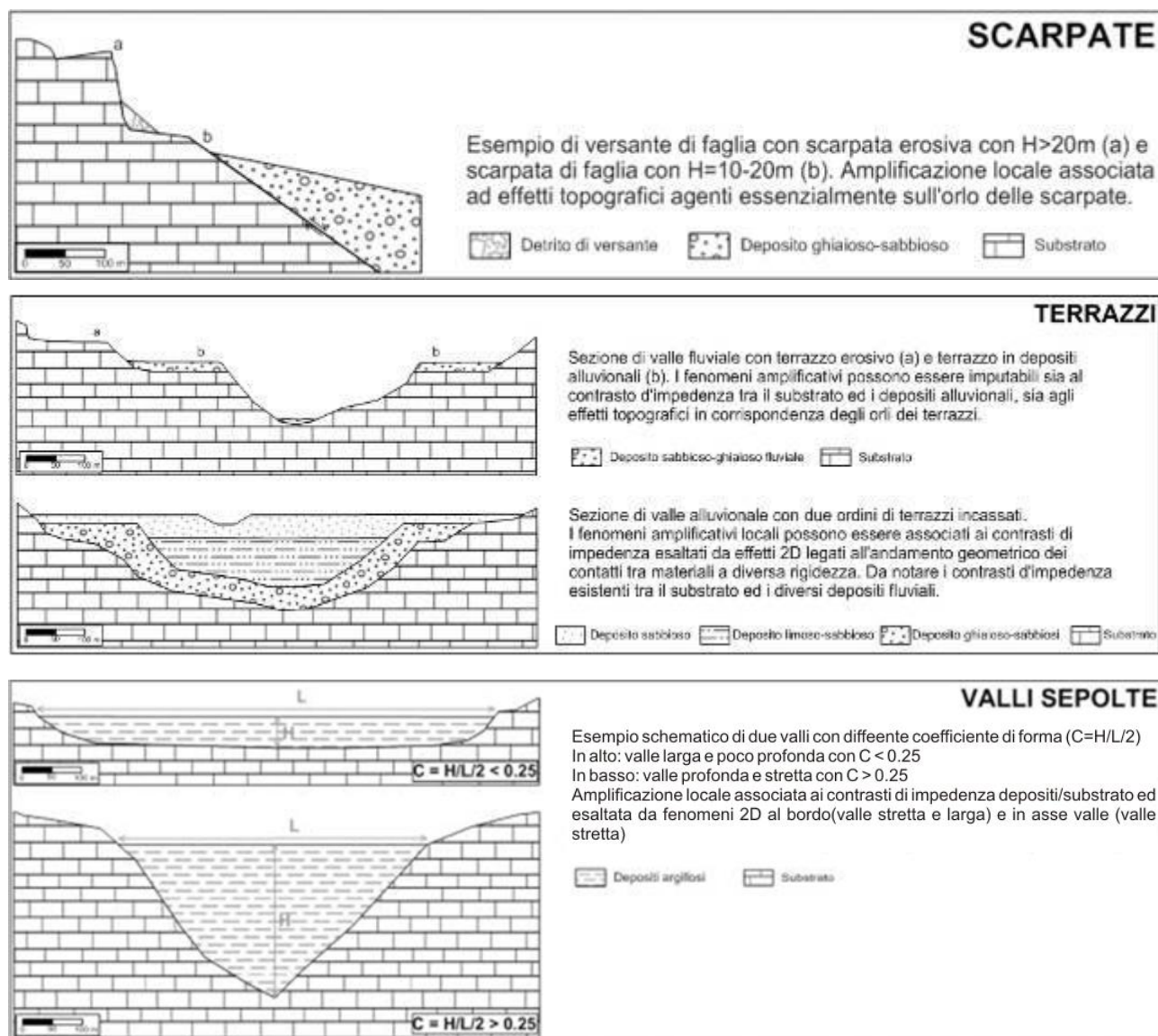


Figura 22 Esempi semplificati di assetti morfologici e geologici che possono condizionare la risposta sismica in superficie.

9 Esempi di studi di MS nelle aree vulcaniche etnee

Gli Studi di MS di livello 1 effettuati nelle aree vulcaniche etnee hanno evidenziato alcune problematiche strettamente connesse alle peculiarità dei prodotti vulcanici, caratterizzati da successioni con repentine variazioni laterali e verticali delle litofacies. In tali aree il rapido accumulo di prodotti vulcanici in tempi ristretti su superfici topografiche preesistenti estremamente articolate, modellate sia su prodotti più antichi che su un substrato geologico pre-vulcanico, dà luogo a geometrie del sottosuolo complesse. L'interazione tra vulcanismo e morfogenesi definisce dunque una varietà di geometrie tridimensionali di sottosuolo (es. valli, pendii, scarpate o versanti terrazzati sepolti) che non solo causano improvvise discontinuità dei livelli stratigrafici, ma ne influenzano anche le loro caratteristiche litologiche e meccaniche (Figura 23). Pertanto, ai fini degli studi di MS in aree vulcaniche, per la definizione del modello geologico di sottosuolo, è di fondamentale importanza riconoscere e ricostruire le

articolazioni geometriche che potrebbero dar luogo ad amplificazioni del moto sismico al passaggio tra terreni e rocce caratterizzati da diversa proprietà quali rigidità, densità e resistenza. Nei contesti urbani che ricadono in aree perivulcaniche o di piedimonte degli edifici vulcanici, dove la complessità di sottosuolo è in generale più comune, diventa quindi necessario porre molta attenzione nel rilevamento e nelle interpretazioni dell'affiorante.

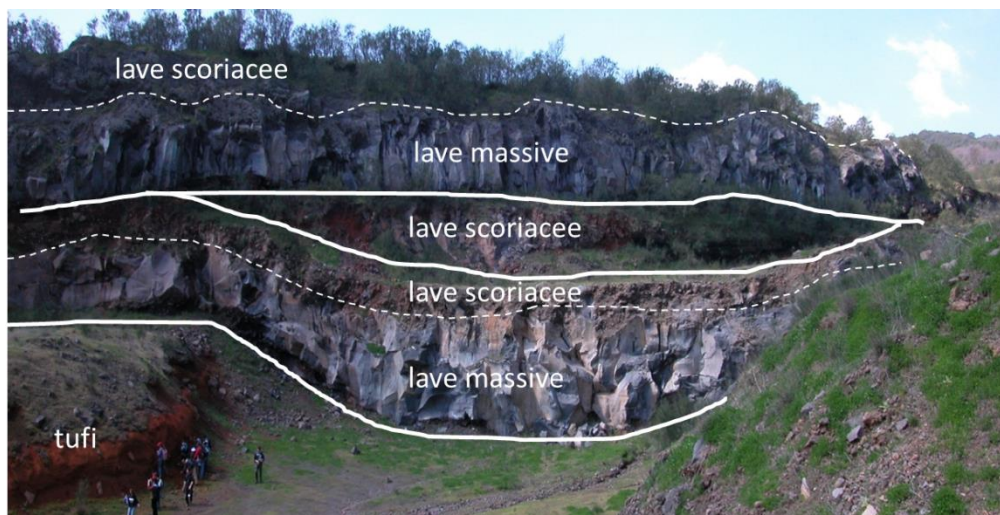


Figura 23 Fronte di cava nei pressi di Milo (fianco orientale dell'Etna) caratterizzato dalla presenza di tre distinti orizzonti lavici: quello più basso, costituito da una porzione inferiore litoide massiva e da una superiore scoriacea che mantella una paleovalle incisa sui tufi; la colata intermedia scoriacea che colma la paleovalle, mentre la colata superiore, anch'essa costituita da una porzione inferiore litoide e una superiore scoriacea, ricopre una topografia tabulare.

Nell'area etnea i dati cartografici pregressi sono risultati essere inadeguati per la realizzazione degli studi di MS, sia per qualità che per la scala di dettaglio, solitamente inferiore a 1:25.000. Essendo la cartografia geologica di riferimento basata su suddivisioni dei terreni lavici in unità litostratigrafiche che raggruppano più colate laviche senza fornire comunque alcun dettaglio sulla variabilità laterale e verticale dei prodotti, fatta eccezione per le colate storiche per le quali vengono tracciati i limiti, è stato necessario integrare i dati cartografici pregressi con rilievi geologici e geomorfologici originali mirati ad una dettagliata suddivisione dei prodotti vulcanici tentando di individuare, laddove possibile, i contorni delle singole colate.

Nella CGT_MS degli studi di MS di livello 1 effettuati nell'area etnea sono stati ricostruiti, con un grado di affidabilità dipendente dalle effettive esposizioni in superficie, i limiti delle singole colate laviche mediante il tematismo lineare "Limite di campo lavico" (Figura 24) che permette di indicarne anche l'ordine di sovrapposizione. Tale simbolo è costituito da una linea che separa i limiti delle diverse colate con i pallini neri rivolti verso il campo più recente. Considerando l'estrema variabilità laterale delle litofacies che compongono le diverse parti di una singola colata, il limite di campo lavico, oltre a fornire una lettura immediata delle relazioni tra le diverse colate, permette di identificare discontinuità quali i fianchi e il fronte delle colate, che possono costituire elementi di concentrazione dell'amplificazione sismica in quanto generalmente caratterizzati da una notevole quantità di materiale scoriaceo fittamente alternato a livelli di lave massive, a differenza alle porzioni centrali di riempimento di canali dove solitamente prevalgono le porzioni litoidi massive su quelle scoriacee.

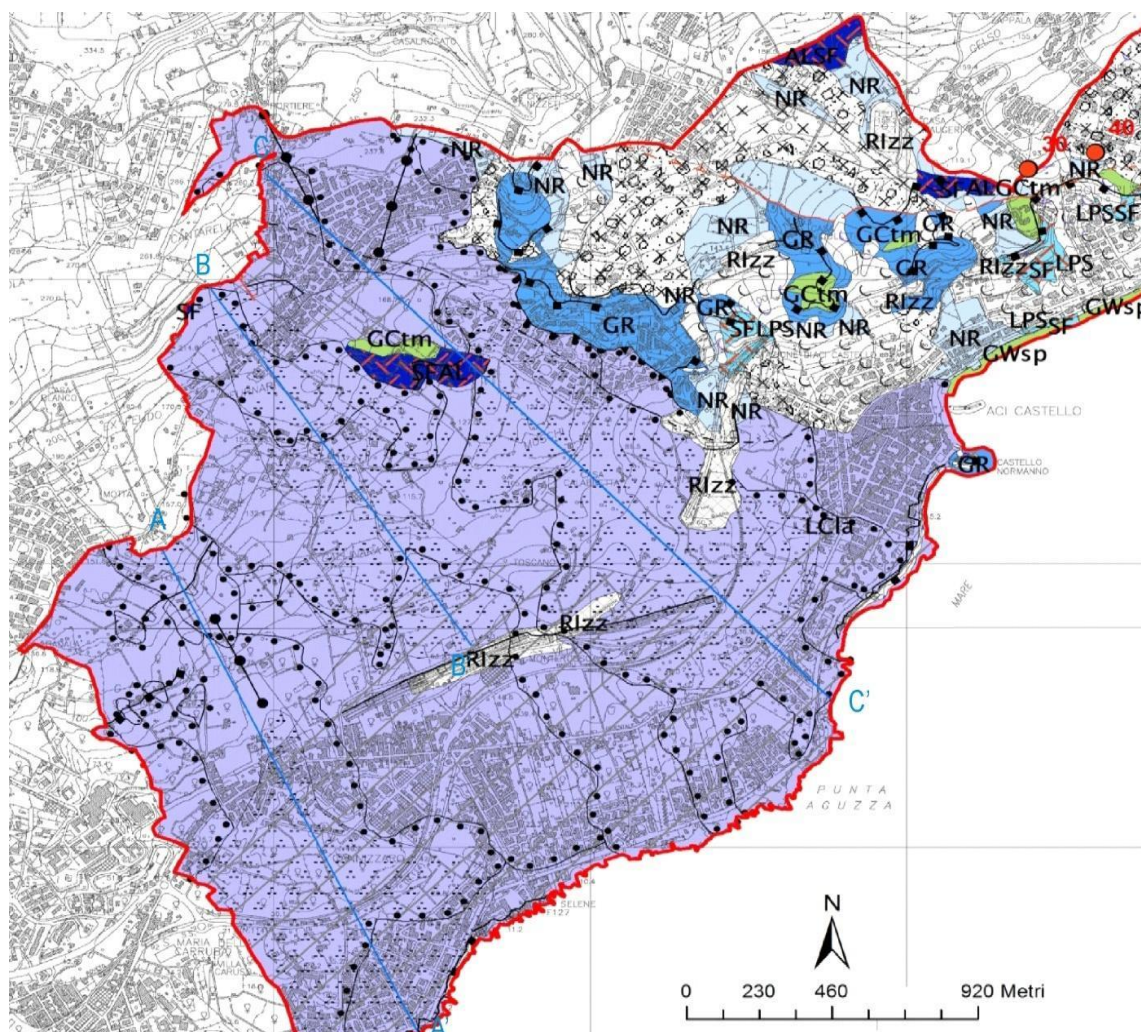
I criteri per la definizione della morfologia subvulcanica e possibilmente dell'andamento del substrato sedimentario al di sotto della unità vulcaniche, vanno riferiti all'evoluzione tettonica e morfologica dell'area che deve necessariamente essere ricostruita. La morfologia e le caratteristiche litologiche delle colate laviche permette di avere indicazioni sulla paleotopografia sepolta: le colate che tendono ad assumere una forma stretta ed allungata solitamente sono caratterizzate da una potente

copertura scoriacea, suggerendo la presenza nel sottosuolo di un substrato ad elevata acclività; ampi campi lavici caratterizzati da banchi litoidi massivi metrici sub-orizzontali con copertura scoriacea limitata o assente, invece, suggeriscono la presenza nel sottosuolo di un substrato a bassa acclività. Tali morfologie sono particolarmente diffuse nel basso versante orientale dell'Etna, in prossimità della costa ionica, per la presenza di una paleotopografia terrazzata del substrato sedimentario.

Ad esempio, nella zona del Comune di Aci Castello le coperture laviche, classificabili come "Litoidi di copertura" (LCIa) danno luogo a tipiche forme di superficie di accumulo di colate al di sopra di una superficie sub-pianeggiante posta al piede di una scarpata, classificate mediante il tematismo areale "Ventaglio di lava al piede di pendii o scarpate sepolte" (Figura 24). A tale morfologia superficiale si associa anche la forma sepolta relativa al tematismo areale "Superficie sub-orizzontale sepolta" (Figura 24). L'utilizzo di entrambe le forme di superficie e sepolte permette di identificare direttamente nella CGT_MS le diverse tipologie di geometrie di sottosuolo caratteristiche dei corpi lavici rilevati, ben evidenti nelle tre sezioni geologiche (Figura 25), dove sono state ricostruite le variazioni di spessore delle colate: spessori minimi si hanno in corrispondenza degli apici del ventaglio, dove la paleotopografia è più acclive; spessori massimi, invece, sono rappresentati nella parte centrale del ventaglio, in corrispondenza della verticale del piede del pendio sepolto dalle lave.

Nell'area urbana di Catania, a causa della diffusissima antropizzazione, avendo a disposizione solo pochi affioramenti, è stato possibile ricostruire le geometrie del sottosuolo sepolte mediante l'interpolazione dei dati delle stratigrafie dei numerosi sondaggi a disposizione, interpretati tenendo conto anche dei caratteri morfologici e litologici delle lave sovrastanti che mostrano differenti geometrie, in funzione sia delle caratteristiche reologiche degli originali flussi lavici, che del gradiente della paleotopografia. Nell'area a est (sezione geologica A-A' Figura 26) è stato ricostruito un contatto sub-orizzontale delle colate laviche su un substrato sabbioso-ghiaioso, interpretato come il settore sepolto della piana costiera e dell'adiacente spiaggia emersa. Tale settore è stato evidenziato direttamente nella CGT_MS con la forma "Superficie sub-orizzontale sepolta" abbinata (Figura 26).

A ovest dell'elemento lineare "Scarpata sepolta" orientato circa N-S, che rappresenta la posizione della paleolinea di costa ricoperta dalle lave (Figura 27), sono invece rappresentate due valli sepolte al di sotto di potenti accumuli di prodotti vulcanici misti a terreni di copertura incoerenti (depositi alluvionali, depositi marini terrazzati, ecc.). Oltre all'asse della paleovalle che permette di avere indicazioni sull'ampiezza della valle sepolta, per definire e visualizzare direttamente nella CGT_MS la proiezione dei fianchi della valle è stato utilizzato il tematismo lineare relativo al "Limite di versante sepolto con inclinazione compresa tra 15° e 45°" (Figura 24). L'attribuzione del riempimento delle paleovalli ai terreni di copertura o al substrato geologico deve tenere conto della natura dei terreni modellati dalla paleovalle e della natura dei terreni intercalati o alternati alle colate di riempimento. Se la paleovalle è incisa nel substrato pre-vulcanico e/o le lave di riempimento sono alternate a terreni incoerenti di copertura, è opportuno classificare le lave tra le coperture con l'unità "Litoide di copertura" LCIa (Figura 27).



Terreni di copertura

- RI Materiale di riporto eterogeneo in matrice sabbiosa e argillosa (zz)
- GW Depositi di spiaggia costituiti da blocchi e ciottoli di natura vulcanica (sp)
- GC Depositi marini terrazzati costituiti da ghiaie e clasti vulcanici, in matrice argillosa (tm)
- LC Lave di copertura indefinite su morfologie del substrato articolate

Substrato geologico

- SE Substrato geologico rigido molto fratturato
- NR Argille marose grigio-azzurre
- GR Breccie a pillows
- LPS Lave massive con fratture colonnari
- AL Alternanza di colate laviche di base e prodotti piroclastici

Instabilità di versante

- crolio o ribaltamento - attiva
- scorrimento - attiva
- colata - attiva
- complessa - attiva
- scorrimento - inattiva
- scorrimento - non definita
- colata - non definita
- complessa - non definita

Forme di superficie e sepolte

- Falda detritica
- Ventaglio di lava
- Superficie di spianamento o di abrasione marina sepolta
- Orio di scarpata morfologica (10-20m)
- Orio di scarpata morfologica (>20m)
- Scarpata sepolta
- Valle sepolta (C<0.25)
- Limite di versante sepolto con inclinazione compresa tra 15° e 45°
- Limite di colata lavica

Elementi tettonico strutturali

- Faglia diretta attiva (certa)
- Faglia diretta attiva (presunta)
- Faglia trascorrente/obliqua attiva (certa)
- Faglia trascorrente/obliqua attiva (presunta)
- Faglia trascorrente/obliqua non attiva (presunta)
- Traccia della sezione geologica rappresentativa del modello del sottosuolo

Elementi geologici e idrogeologici

- Sondaggio o pozzo che non ha raggiunto il substrato rigido

Area di studio

- Area di studio

Figura 24 Stralcio della CGT_MS realizzata nell'ambito degli studi di MS di livello 1 del Comune di Acì Castello (http://sit.protezionecivilesicilia.it/index.php?option=com_content&view=article&id=62&Itemid=185)

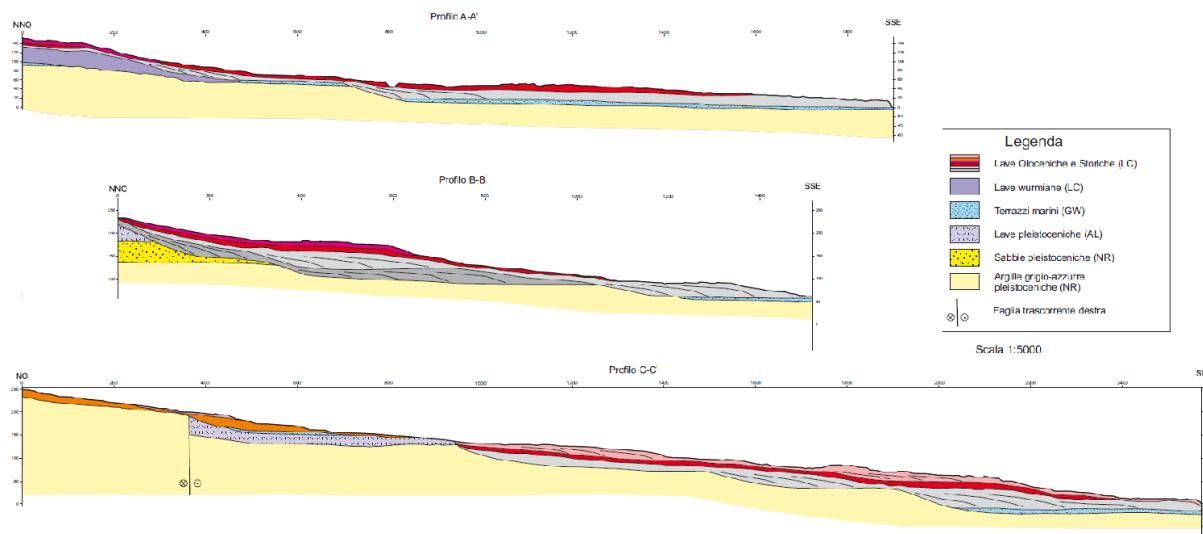


Figura 25 Sezioni geologiche realizzate nell'ambito degli studi di MS di livello 1 del Comune di Aci Castello (http://sit.protezionecivilesicilia.it/index.php?option=com_content&view=article&id=62&Itemid=185)

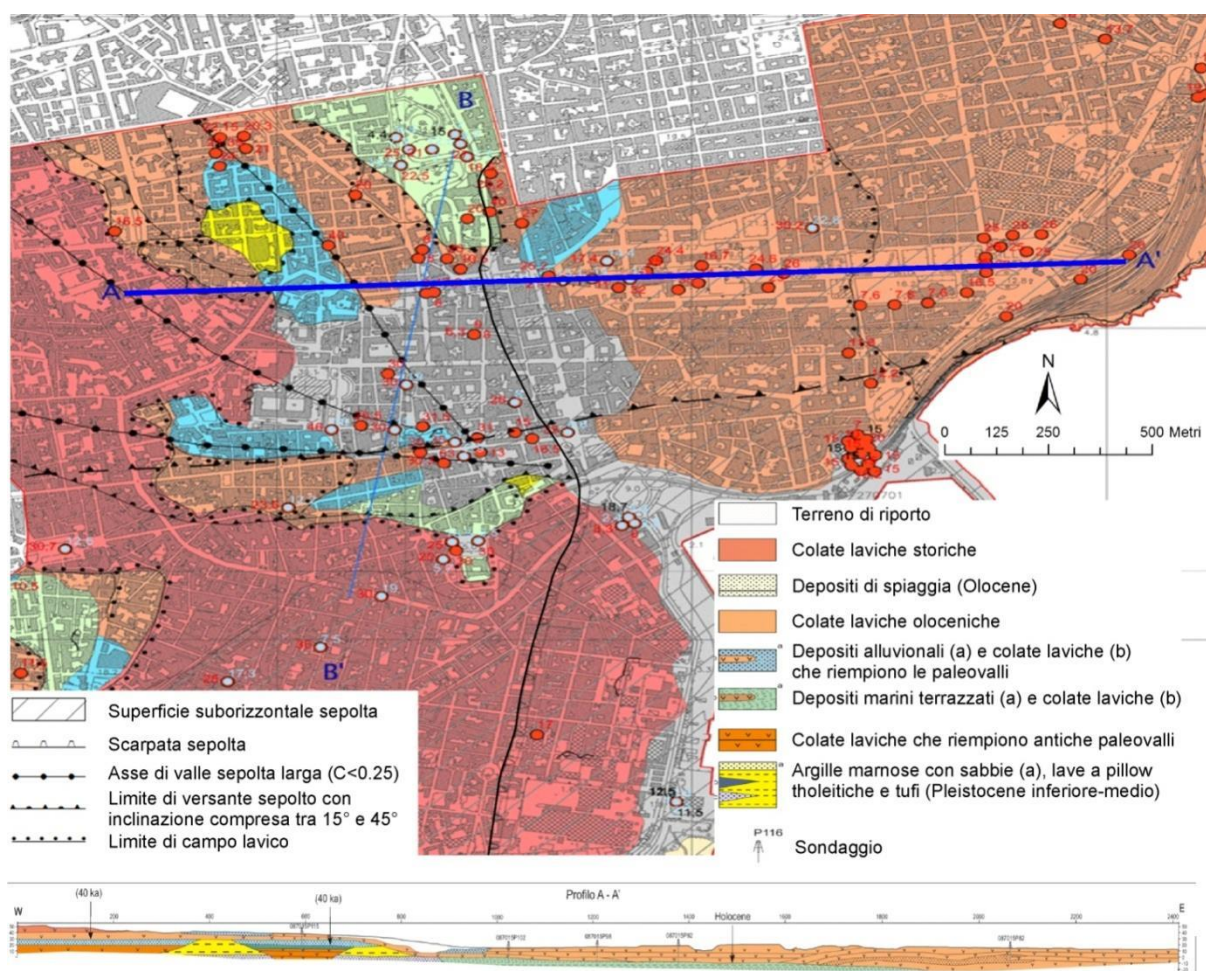


Figura 26 Stralcio di Carta Geologica(CG) realizzata nell'ambito degli studi di MS di livello 1 dell'area urbana di Catania e sezione geologica A-A' (http://sit.protezionecivilesicilia.it/index.php?option=com_content&view=article&id=70&Itemid=187, modificato).

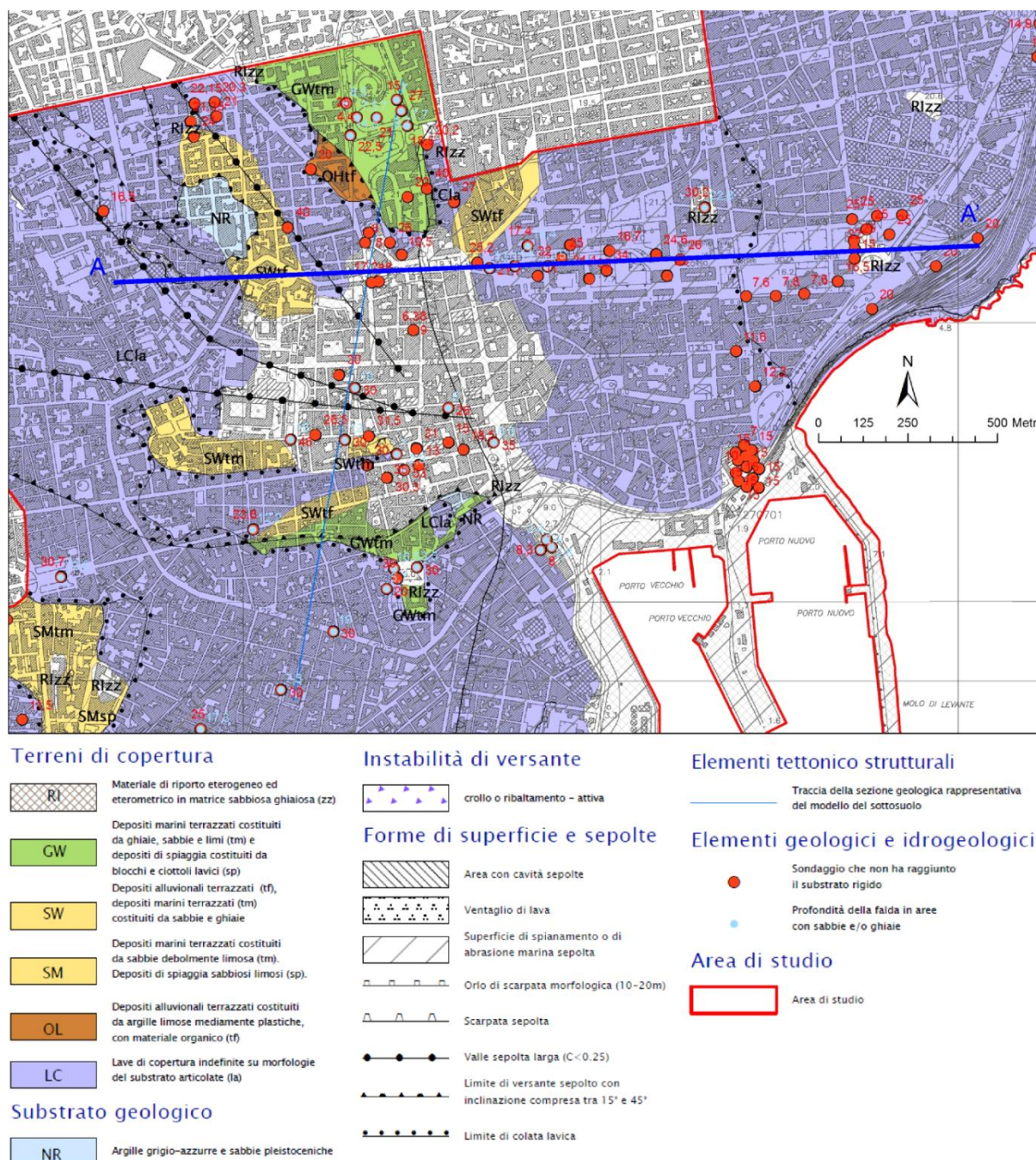


Figura 27 Stralcio di CGT_MS realizzata nell'ambito degli studi di MS di livello 1 dell'area urbana di Catania (http://sit.protezionecivilesicilia.it/index.php?option=com_content&view=article&id=70&Itemid=187, modificato).

Altra forma caratteristica introdotta negli studi di MS di livello 1 di alcuni comuni etnei (Trecastagni e Mascalucia) è quella relativa al tematismo areale "Cono o edificio vulcanoclastico sepolto" (Figura 28), utilizzata per indicare la presenza nel sottosuolo di edifici vulcanoclastici sepolti da lave più recenti. Tale forma permette di visualizzare direttamente in pianta l'estensione in sottosuolo degli edifici vulcanoclastici sepolti, consentendo di localizzare la proiezione in superficie del limite di contatto obliquo contro il quale avviene l'aggradazione delle lave di copertura sui depositi vulcanoclastici, contatto caratterizzato dal repentino passaggio laterale dai livelli prevalentemente massivi delle colate laviche ai depositi incoerenti degli edifici sepolti (Figura 28). Le diverse colate laviche sono state classificate in unità geologico-tecniche distinte sulla base

della loro posizione stratigrafica: le colate laviche storiche e le lave intermedie, di età protostorica, sono state classificate come terreni di copertura con la codifica LCla ad indicare la loro discontinuità laterale, raffigurata nelle due sezioni, connessa all'appoggio e sovrapposizione verso est a un edificio vulcanoclastico in parte sepolto costituito da depositi piroclastici ghiaioso sabbiosi incoerenti, classificati anch'essi come terreni di copertura (GMpc). L'unità lavica sottostante su cui poggiano entrambi i terreni di copertura, è stata invece classificata come unità geologico-tecnica di substrato con la sigla SFAL (alternanza di litotipi fratturata).

A seguito dell'attività sismica e vulcanica che ha interessato l'Etna nel 2002 e nel 2018 sono stati documentati fenomeni di fratturazione cosismica al suolo, caratterizzati da campi di fratturazione aventi lunghezza variabile dal centinaio di metri a qualche chilometro. Lo sviluppo di tali fenomeni ha prodotto evidenze di incremento del danneggiamento con l'aumentare dell'entità del fenomeno di fratturazione (<http://www.regione.sicilia.it/presidenza/protezionecivile/documenti/documenti/Lineeguidamicrozon.pdf>). Inoltre, è stata verificata una corrispondenza tra le zone di massimo danneggiamento e l'area interessata dai campi di fratturazione cosismica. Questi fenomeni, ampiamente documentati e particolarmente diffusi in aree vulcaniche attive, ai fini degli studi di MS necessitano di una mappatura nella CGT_MS con il tematismo areale "Campo di fratturazione cosismica". Nel caso in cui siano direttamente associate a un piano di faglia attiva e capace, tali aree verranno trattate nella carta delle MOPS come aree di Instabilità per Faglie Attive e Capaci. Essendo queste delle aree di deformazione diffusa, non associabile ad un singolo lineamento, la costruzione delle zone di instabilità (ZA_{FAC} , ZS_{FAC} e ZR_{FAC}) dovrà effettuarsi a partire dal limite dell'area, seguendo quanto riportato nelle apposite "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC)" (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015 a).

Terreni di copertura

-  RI Materiale di riporto eterogeneo a prevalente componente vulcanica costituito da blocchi e ciottoli lavici eterometrici in una matrice sabbiosa e localmente limosa.
-  GM Depositi vulcanoclastici inferiori costituiti da blocchi, ciottoli e ghiaie in matrice sabbiosa e talvolta limosa.
-  SW Depositi vulcanoclastici superiori costituiti principalmente da sabbie e ghiaie
-  LC Lave di copertura indefinite su morfologie del substrato articolate (la)

Substrato geologico

-  AL Alternanza di colate laviche di base fratturate e prodotti piroclastici
-  SF Substrato geologico molto fratturato

Forme di superficie e sepolte

-  Ventaglio di lava
-  Edificio vulcanoclastico sepolto
-  Orlo di scarpata morfologica (10-20m)
-  Orlo di scarpata morfologica (>20m)
-  Limite di colata lavica

Elementi tettonico strutturali

-  Faglia diretta attiva (certa)
-  Faglia diretta attiva (presunta)
-  Traccia della sezione geologica rappresentativa del modello del sottosuolo

Elementi geologici e idrogeologici

-  Sondaggio o pozzo che non ha raggiunto il substrato rigido
-  Area di studio

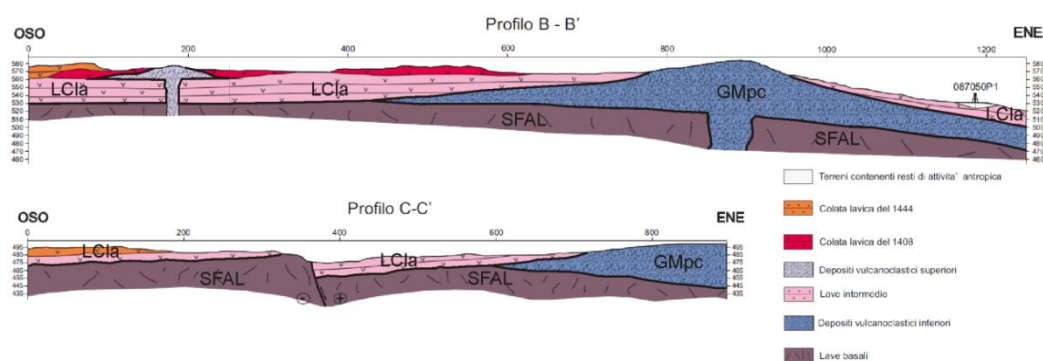
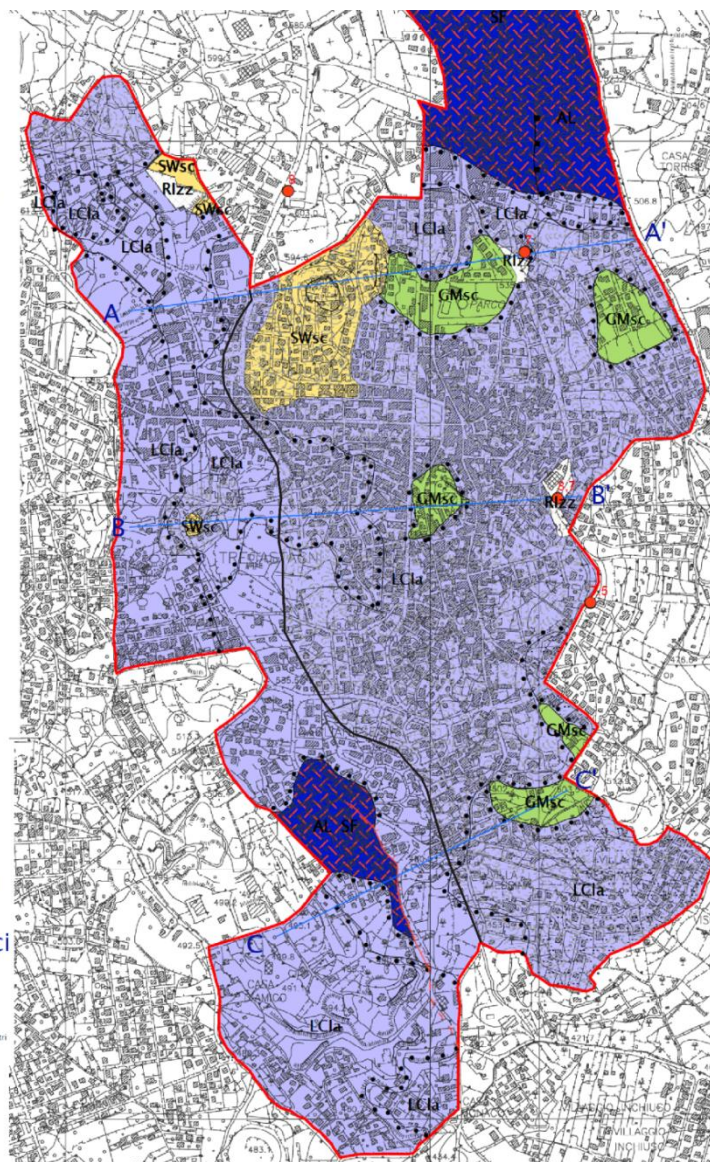


Figura 28 Stralcio di CGT_MS realizzata nell'ambito degli studi di MS di livello 1 del Comune di Trecastagni (http://sit.protezionecivilesicilia.it/index.php?option=com_content&view=article&id=70&Itemid=187, modificato).

10 Fratturazione degli ammassi rocciosi

I fenomeni di amplificazione del moto sismico in corrispondenza di aree di affioramento di rocce intensamente fratturate sono ampiamente trattati in letteratura e, recentemente, sono stati dimostrati dagli studi di MS realizzati a seguito del terremoto aquilano del 2009 (Gruppo di Lavoro, 2010).

In particolare, la problematica si manifesta in quelle zone di affioramento del substrato roccioso, interessato da discontinuità tettoniche (faglie, sistemi e famiglie di fratture, ecc.) e/o intense deformazioni (es. assi di pieghe, ecc.), che rendono tali aree con un differente comportamento dinamico nei confronti delle sollecitazioni sismiche rispetto al substrato roccioso integro (non fratturato o poco fratturato).

In queste zone si manifestano fenomeni amplificativi del moto sismico sia a causa del contrasto d'impedenza esistente tra lo strato di roccia fratturata e la roccia integra, sia a causa dell'intrappolamento, nel volume di roccia fratturata, delle onde sismiche che vengono polarizzate lungo le direzioni preferenziali di fratturazione (direzione principale della faglia e/o delle famiglie di fratturazione).

È fondamentale pertanto che, nelle zone di affioramento della roccia fratturata, il rilevamento geologico tecnico per la realizzazione della CGT_MS sia realizzato mediante il rilievo geomeccanico, che ha come obiettivo la raccolta di dati che descrivono il comportamento meccanico e forniscono una parametrizzazione quantitativa dell'ammasso roccioso, delle sue discontinuità e del suo stato di fratturazione.

Per una corretta caratterizzazione dell'ammasso roccioso sarà necessario definire, in funzione dell'area da investigare, un numero congruo di stazioni di misura rappresentative delle differenti zone con caratteristiche di fratturazione omogenee.

Le zone di intensa fratturazione devono essere segnalate già nella CGT_MS e nelle sezioni geologiche-tecniche perché contribuiranno a individuare zone suscettibili di amplificazione nell'ambito di affioramenti del substrato geologico nella Carta delle MOPS e forniranno indicazioni agli operatori delle simulazioni numeriche nei livelli di approfondimento superiori.

In particolare, per classificare un substrato come fratturato, viene suggerito di adottare il metodo previsto nelle Linee Guida degli studi di MS della Regione Abruzzo (Sismica G. d., 2012) dove, facendo riferimento al valore del grado di fratturazione J_v (Volumetric Joint Count, ISRM 1978), un substrato viene classificato come fratturato se $J_v > 30$.

11 Riporti antropici

Le aree con forte stratificazione antropica interessano, in particolare, i centri storici delle città. In prospettiva, lo sviluppo di aree metropolitane molto estese renderà le aree con forte stratificazione antropica sempre più frequenti (Figura 29).

La presenza di uno strato antropico di spessore elevato condiziona la pericolosità sismica del sito e costituisce un elemento di criticità, poiché:

- > impedisce l'osservazione diretta del substrato geologico;
- > può impedire la restituzione di una cartografia geologico-tecnica adeguata;
- > condiziona l'amplificazione del moto sismico per l'eterogeneità interna dello strato antropico;
- > condiziona la risposta del territorio in termini di deformazioni permanenti.

Un'ideale caratterizzazione della coltre antropica, quindi, è fondamentale ai fini della preservazione del patrimonio sociale e culturale sovrastante e, più in generale, della mitigazione del rischio sismico in aree caratterizzate da una forte pressione antropica.

Gli aspetti critici principali dell'analisi dello strato antropico in prospettiva sismica sono:

1. analisi degli spessori dello strato e della morfologia geologica (naturale e/o artificiale) sepolta e restituzione di questi elementi nella CGT_MS
2. codifica dei terreni di copertura di origine antropica in termini di litotipi prevalenti
3. contributo alla costruzione delle Carte delle MOPS e delle Carte di MS.

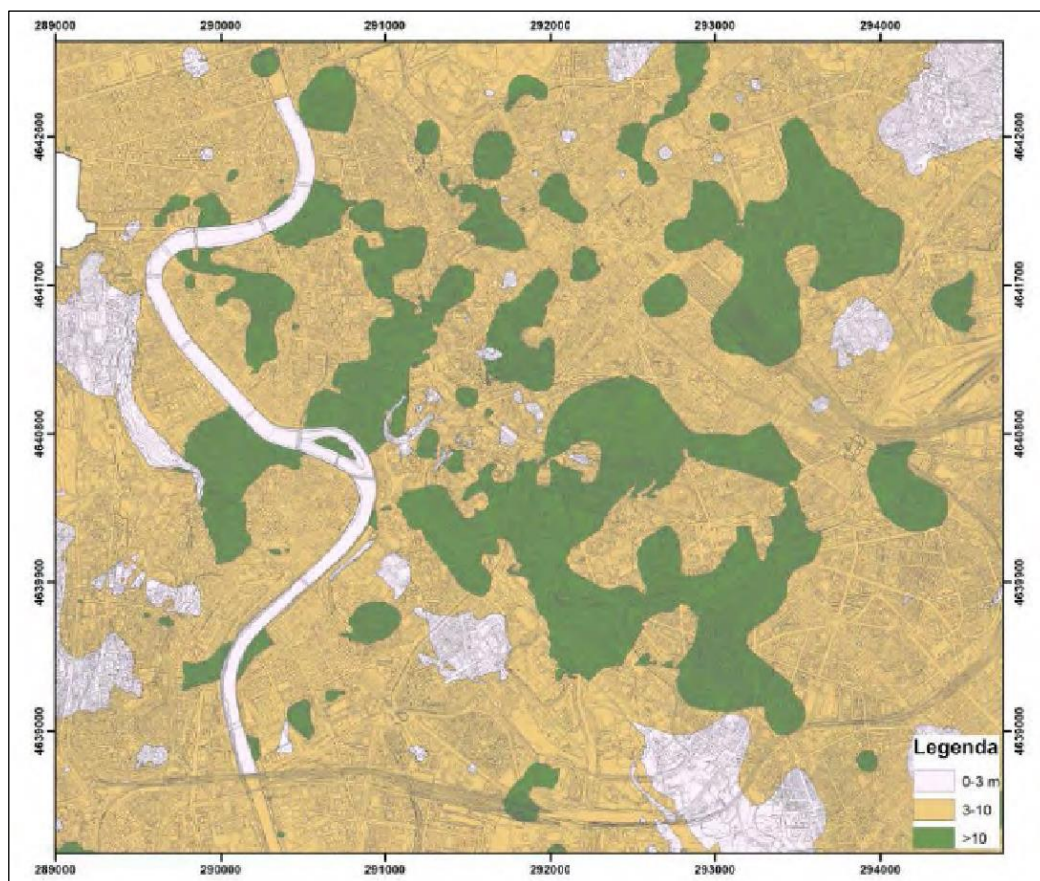


Figura 29 Cartografia dello strato antropico del centro storico di Roma. Da (Moscatelli et al., 2013).

Analisi degli spessori dello strato antropico della morfologia sepolta e restituzione di questi elementi nella CGT_MS ai fini della Carta delle MOPS

Per la mappatura della coltre antropica e della morfologia sepolta si utilizza la cartografia tematica disponibile in letteratura e, soprattutto, i dati di perforazione (Figura 30). Nei casi più complessi, oppure ove ci fosse bisogno di ridurre le incertezze associate al modello di sottosuolo, la mappatura della coltre antropica, in termini sia di spessore sia di elementi morfologici sepolti, deve essere realizzata a partire dallo studio della cartografia topografica storica, ad integrazione dei dati di perforazione.

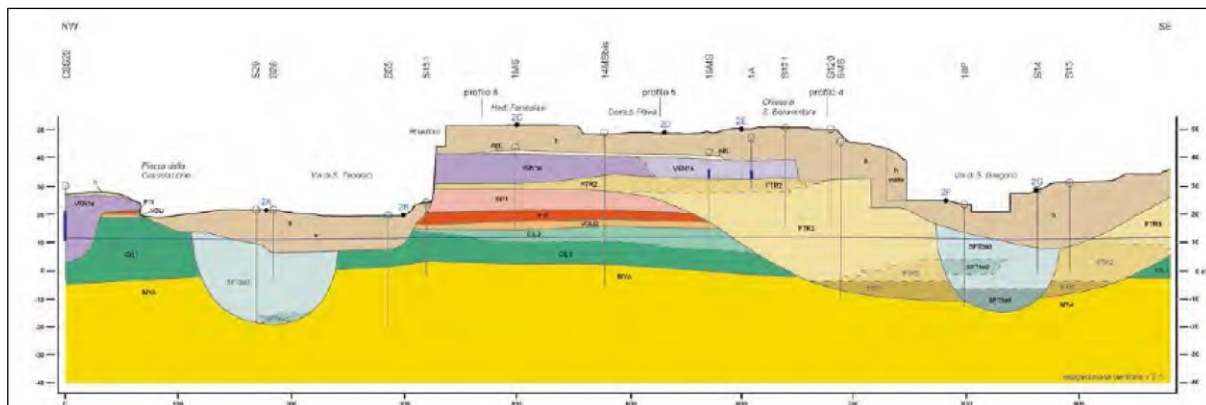


Figura 30 Sezione geologica tecnica attraverso l'Area Archeologica Centrale di Roma (M. Palatino). Si noti lo spessore della coltre antropica e l'estensione areale che copre completamente il substrato naturale e le morfologie sepolte (Moscatelli et al., 2012)

Codifica dei terreni di copertura di origine antropica in termini di litotipi prevalenti nella CGT_MS

Il primo problema con cui ci si scontra nella caratterizzazione della coltre antropica, ai fini della CGT_MS è la codifica in sondaggio dei litotipi prevalenti. Questo può costituire un elemento di forte criticità, quando lo strato antropico (in termini di «pieni» e di «vuoti») rappresenta un corpo geologico tecnico di importanza primaria nella successione. Infatti, quello che genericamente si identifica come strato antropico può essere costituito da:

- > terreni di riporto, asportati da un altro sito
- > pezzame di manufatti in una matrice litologica omogenea
- > pezzame di manufatti in una matrice composta da più litologie
- > resti di edifici più o meno antichi, completamente interrati
- > resti di edifici più o meno antichi, parzialmente interrati con vuoti e cavità

È importante qui sottolineare che, data la forte eterogeneità latero-verticale delle coltri di origine antropica, non è sempre possibile mappare tali coltri in termini di litotipi prevalenti nei tempi richiesti dagli studi di MS.

Come la mappatura della coltre antropica contribuisce alla mappatura della Carta delle MOPS e alla realizzazione delle Carte di MS

La litologia, il suo stato di addensamento e gli spessori dello strato antropico influenzano la risposta sismica locale. Nella Figura 29, tratta da uno studio di microzonazione sismica dell'Area Archeologica Centrale di Roma (Moscatelli et al., 2012), si nota come lo spessore dello strato antropico può condizionare lo spettro del sito, definendo una frequenza di risonanza con ampiezza considerevole su frequenze di interesse ingegneristico.

Ovviamente la carta delle MOPS dovrà tener conto di questi risultati che marcheranno l'assetto del sottosuolo, definendo una colonna rappresentativa caratteristica del sito.

Le metodologie di elaborazione, invece, devono necessariamente basarsi su documentazione tecnico-scientifica condivisa a livello nazionale (NTC18, 2018) (Associazione Geotecnica Italiana, 2005), rimandando ad altri contesti la verifica di metodologie innovative.

Lo studio e caratterizzazione dei fenomeni di deformazione permanente in condizioni sismiche consente di identificare zone di territorio per le quali le conoscenze disponibili sono diverse e per le quali diverso sarà l'approccio alla pianificazione e agli interventi per la riduzione del rischio sismico.

In Figura 32 è rappresentato uno schema, applicabile a tutte le instabilità cosismiche (instabilità di versante, liquefazioni, faglie attive e capaci e cedimenti differenziali), che sintetizza le attività, i risultati attesi e il tipo di zona nell'ambito del percorso metodologico degli studi di MS.

L'obiettivo è quello di rendere totalmente omogenea, per le diverse instabilità, l'identificazione, il significato e la denominazione delle zone che, come si evince dallo schema, sono di tre tipi:

- > Zone di Attenzione (ZA) nel livello 1
- > Zone di Suscettibilità (ZS) nel livello 3
- > Zone di Rispetto (ZR) nel livello 3.

Concettualmente, il significato dei tre tipi di zone è il seguente:

- > Zone di Attenzione (ZA): sono zone nelle quali i dati a disposizione indicano la presenza di condizioni predisponenti l'instabilità in esame ma non sono sufficienti, in quantità e tipologia, per definire se l'instabilità possa effettivamente verificarsi in caso di evento sismico; è possibile, tuttavia, ad esempio attraverso la consultazione di inventari, stabilire la presenza e/o l'accadimento di eventuali fenomeni in occasione di eventi sismici passati.
- > Zone di Suscettibilità (ZS): sono zone nelle quali, a seguito di una raccolta dati specifica per l'instabilità in esame e l'applicazione di metodi di analisi il più delle volte semplificati (per permettere un'applicazione dei risultati a un'area estesa), è possibile fornire una stima quantitativa della pericolosità.
- > Zone di Rispetto (ZR): sono zone nelle quali, a seguito di una raccolta dati specifica per l'instabilità in esame e l'applicazione di metodi di analisi il più delle volte avanzati (per analizzare dettagliatamente aree limitate e/o particolarmente importanti), è possibile quantificare in modo affidabile la pericolosità.

La differenza tra Zona di Suscettibilità e Zona di Rispetto, al termine dello studio, è data dall'applicazione di metodi diversi di analisi ("avanzati" in ZR) per definire il livello di pericolosità, espresso attraverso uno specifico parametro descrittivo dell'instabilità considerata (faglia attiva e capace, liquefazione, instabilità di versante).

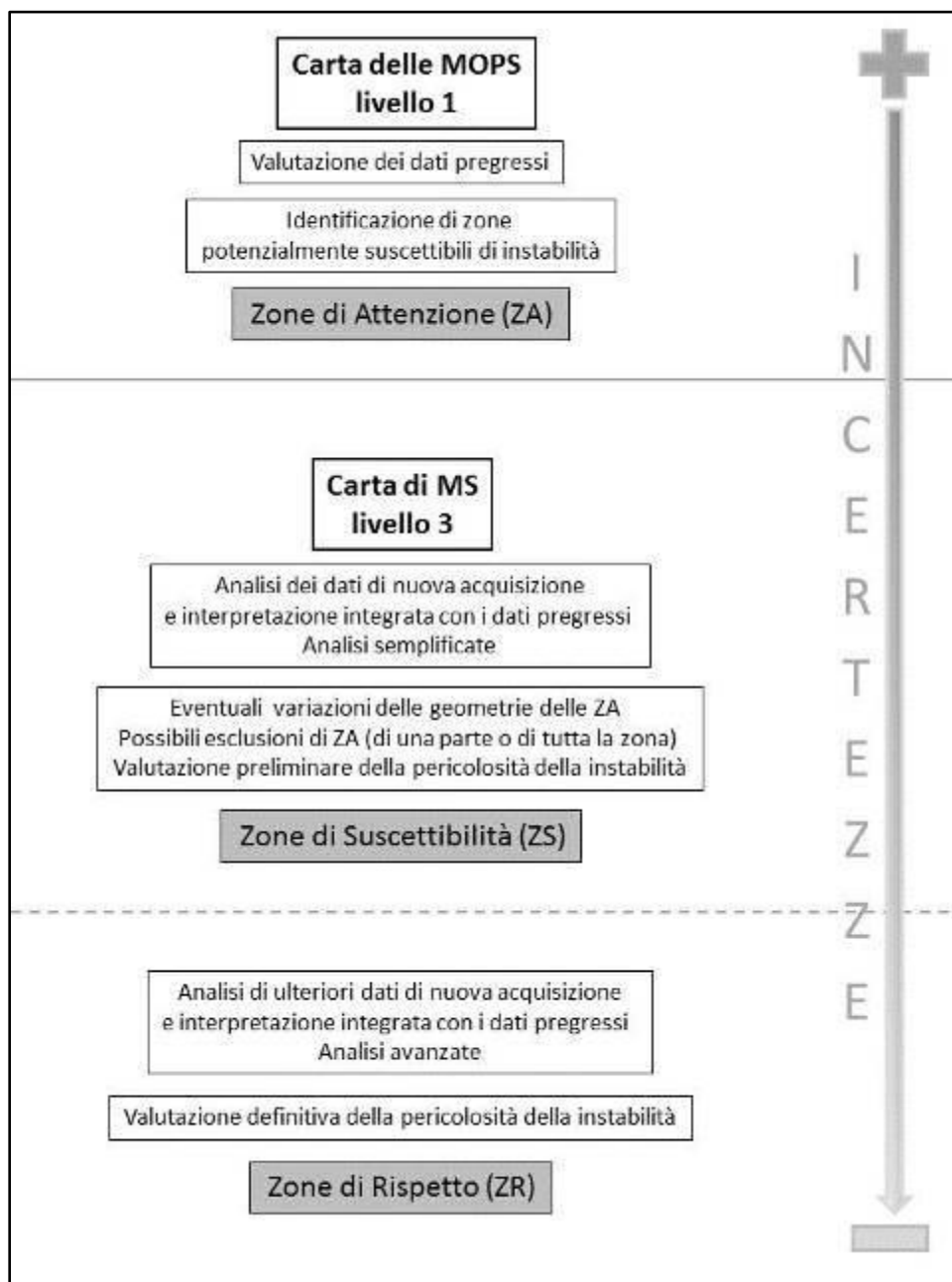


Figura 32 Schema che illustra i livelli di MS per la definizione delle zone suscettibili di instabilità. La raccolta dati e le analisi permettono di ridurre le incertezze dal livello 1 al livello 3.

13 Inversioni di velocità nelle carte di MS: alcune indicazioni per la CGT_MS finalizzate ad una corretta valutazione del problema

In alcuni contesti (es. aree con affioramenti di natura vulcanica) nella successione litologica è molto comune la presenza di strati di terreno più soffici contenuti in terreni più rigidi (o viceversa). Questa condizione è nota come “inversione di velocità”, intendendo che le velocità delle onde S non aumentano monotonicamente con la profondità, ma possono essere presenti degli strati di terreno più lenti rispetto agli strati sovrastanti (Figura 33).

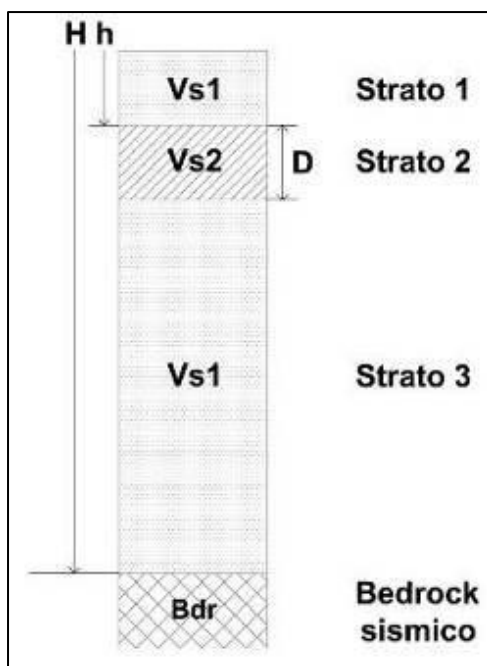


Figura 33 Esempio di colonna geologico-tecnica con inversione di velocità. Legenda simboli: H) profondità (m) rispetto al p.c. del tetto del bedrock sismico; h) profondità (m) rispetto al p.c. del tetto dello strato 2 (+soffice/+rigido); D) spessore (m) dello strato 2 (+soffice/+rigido); Vs1) velocità delle onde S (m/s) dello strato 1 e dello strato 3; Vs2) velocità delle onde S (m/s) dello strato 2 (+soffice/+rigido); Bdr) bedrock sismico. Il testo fa riferimento alla simbologia riportata in figura.

A questo proposito, si ricorda che secondo gli ICMS08, per poter classificare un'inversione di velocità nel profilo delle Vs di una successione litostratigrafica come significativa, è necessario che un terreno rigido sovrasti stratigraficamente un terreno meno rigido (soffice), con un rapporto $Vs_{rig}/Vs_{sof} > 2$, con la Vs dello strato più rigido maggiore di 500 m/s. In tali casi gli ICMS08 suggeriscono di evitare di utilizzare gli abachi del livello 2, e di passare dunque a un livello di approfondimento superiore essendo necessarie le analisi numeriche proprie del livello 3. L'uso degli abachi è consentito comunque se l'inversione è dovuta a uno strato più rigido di spessore minore di $Vs/60$, dove Vs è la velocità media di tutta la copertura al di sopra del basamento sismico espressa in m/s.

Riguardo alla presenza di inversioni, nell'ambito dei rilievi di campagna e durante la realizzazione della CGT_MS e delle sezioni geologico tecniche è possibile fornire indicazioni di massima agli operatori che dovranno realizzare le Carte di MS.

Per favorire una corretta rappresentazione delle unità affioranti nella CGT_MS e un'appropriata definizione delle geometrie sepolte nelle sezioni geologico-tecniche, facendo riferimento a esperienze di studio svolte presso il Dipartimento della Protezione Civile (Quadrio B., 2011), si forniscono indicazioni sul modo in cui alcuni elementi intervengono nell'elaborazione dei risultati delle simulazioni numeriche relative a successioni con inversioni di velocità:

- > Substrato più o meno rigido.
La velocità del bedrock sismico di 800 m/s porta a un valore medio dei risultati e comunque, anche aumentando o diminuendo il valore di velocità, i risultati non variano significativamente;
- > Profondità del substrato.
Le profondità critiche del substrato sismico (H in Figura 33) sono tra 30 e 60 m;
- > Corretta descrizione della successione litologica: posizione dei litotipi.
Se lo strato intermedio (Strato 2) è più soffice, si verificano amplificazioni maggiori rispetto al modello "omogeneo equivalente" fino a profondità (h in Figura 33) di $h=15-20$ m; con $h>15-20$ m si verificano amplificazioni minori rispetto al modello "omogeneo equivalente" e per $h>20-30$ si hanno deamplificazioni ($F_a<1$). Per modello "omogeneo equivalente" si intende un modello che presenti, nel profilo di velocità, un solo strato (oltre al bedrock) con la stessa velocità media pesata (sulla base dello spessore degli strati) del modello con inversione.
- > Corretta descrizione della successione litologica: spessori delle unità litologiche.
Se lo strato intermedio è più soffice si possono riscontrare i pochi casi in cui è apprezzabile l'amplificazione rispetto al caso "omogeneo equivalente", almeno per un input energetico; la presenza dello strato soffice è significativa quando è poco profondo ($h<10$ m). La tendenza all'amplificazione sparisce quando aumenta lo spessore (D in Figura 33) dello strato soffice ($D>20$ m) e quando questo si approfondisce ($h>10-15$ m).

Infine, i risultati dello studio prevedono che le situazioni nelle quali è possibile trascurare la presenza dell'inversione e utilizzare un modello omogeneo sono quelle in cui si verificano le seguenti tre condizioni:

- > è presente uno strato soffice tra due strati rigidi ($V_{s2}<V_{s1}$);
- > lo strato soffice è a profondità modesta ($h=5-10$ m);
- > lo spessore dello strato soffice non è molto grande ($D>3$ m e $D<15$ m).

14 Gli elementi della CGT_MS e delle sezioni utili alla valutazione delle amplificazioni topografiche

Per quanto riguarda le amplificazioni topografiche, si evidenziano i seguenti punti:

- > le modellazioni numeriche mostrano amplificazioni dovute a rilievi topografici;
- > gli studi sperimentali, anche se mostrano amplificazioni, non riescono a discernere quanto dell'amplificazione è dovuta al rilievo topografico e quanto a fattori geologici (es. sovrapposizione di terreni con differenti impedenze sismiche);
- > l'interpretazione degli studi sperimentali, in generale, è complicata in quanto è difficile trovare nei pressi dei rilievi studiati stazioni di riferimento esenti da effetti di sito (substrato sismico);

- > i risultati sperimentali possono anche essere condizionati da fratturazione della roccia, successione litostratigrafica con contrasti di impedenza (es. terreni di copertura su substrato sismico), differente rigidità tra rilievo e terreni circostanti;
- > modellazioni numeriche e studi sperimentali mostrano un generale accordo in tre situazioni:
 - amplificazioni della cresta rispetto alla base
 - deamplificazioni ai piedi del rilievo (considerazione desunta esclusivamente attraverso simulazioni numeriche)
 - amplificazioni e deamplificazioni lungo i fianchi (interazione tra onde incidenti e diffratte; considerazione desunta esclusivamente attraverso simulazioni numeriche)
- > le ampiezze delle amplificazioni sono più grandi per topografie più acclivi;
- > l'amplificazione spettrale in corrispondenza della cresta del rilievo si osserva in una ristretta banda di frequenza; tali frequenze risultano corrispondenti a lunghezze d'onda confrontabili con la dimensione del rilievo;
- > eventi con lunghezza d'onda pronunciata (bassissima frequenza) non "vedono" il rilievo e quindi gli effetti topografici sono trascurabili;
- > l'amplificazione in sommità è più elevata, quanto maggiore è il fattore di forma H/L;
- > le ampiezze delle amplificazioni sono funzione dell'azimut, in particolare l'amplificazione spettrale risulta più pronunciata in direzione perpendicolare all'asse di allungamento del rilievo.

Tenendo conto di questi assunti, gli ICMS08 prevedono di fornire, già nella Carta delle MOPS, indicazioni generali sulla presenza di rilievi in roccia (creste e pendii) o terrazzi/scarpate morfologici in roccia che possono dare effetti topografici.

Gli "Standard di rappresentazione e archiviazione informatica degli studi di MS vers.4.0" (Commissione Tecnica MS, 2015) hanno previsto, a questo scopo, la "traccia di sezione topografica". Le tracce di sezioni topografiche e un loro intorno (indefinito, siamo ancora nel livello 1 e quindi si forniscono solo indicazioni) indicano aree di attenzione rispetto alle amplificazioni topografiche da analizzare nel livello 2, parametrizzando le sezioni topografiche con il supporto di abachi, e/o nel livello 3, con simulazioni numeriche analitiche delle stesse sezioni.

Le tracce di sezione topografica sono costruite con i seguenti criteri:

- > le aree nelle quali saranno riportate le tracce saranno definite dal realizzatore della carta con giudizio esperto;
- > il numero delle tracce sarà stabilito dal realizzatore della carta con giudizio esperto, avendo l'obiettivo di descrivere compiutamente la forma del rilievo e/o del terrazzo in esame;
- > le tracce dovranno essere perpendicolari alla linea di cresta o alla linea che identifica il terrazzo;
- > le tracce avranno una lunghezza significativa per la descrizione del rilievo (da una rottura di pendio all'altra) o del terrazzo;
- > le tracce dovranno passare esclusivamente per le aree urbanizzate o urbanizzabili.

Nella CGT_MS sarà quindi indispensabile segnalare con grande attenzione le linee di cresta, i picchi isolati e gli orli di terrazzi o scarpate. Intorno a questi elementi nella Carta delle MOPS si dovranno definire le tracce di sezione topografica, che saranno studiate nei livelli 2 e 3. Anche le analisi delle sezioni geologico-tecniche potranno contribuire alla valutazione di queste aree critiche.

Bibliografia

Albarelo D., C. S. (2011). Procedura semiquantitativa per stabilire la qualità di una carta di MS di livello 1. in "Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica". *Ingegneria sismica*, a. XXVIII, n. 2, 63-64.

Associazione Geotecnica Italiana, A. (2005). *Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica*. Roma.

Castenetto S., N. G. (2013). La Carta Geologico Tecnica per gli studi di Microzonazione Sismica. *Atti del 32° Convegno Nazionale GNGTS Trieste 19-21 novembre 2013, Tema 2: Caratterizzazione sismica del territorio*, (p. 195-202).

Commissione Tecnica MS. (2020). *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica degli studi di MS vers.4.2*.

Commissione tecnica per la microzonazione sismica. (2015a). *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC), versione 1.0*. Roma: Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della protezione civile.

Commissione tecnica per la microzonazione sismica. (2015b). *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte (FR), versione 1.0*. Roma: Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della protezione civile.

Commissione tecnica per la microzonazione sismica (2017). *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni (LQ), versione 1.0*. Roma: Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della protezione civile.

DISS. (2018). *DISS Working Group*. Tratto da Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas: <http://diss.rm.ingv.it/diss/>,

Fortunato C., M. S. (2012). New release of the Italian catalogue of earthquake-induced ground failures (CEDIT). *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*.

Gruppo di Lavoro MS. (2008). *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica. Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e Province autonome*. 3 vol. e 1 DVD. http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137.

Gruppo di Lavoro, M.-A. (2010). *Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana*. 3 vol. e DVD Rom. L'Aquila: Regione Abruzzo - Dipartimento della Protezione Civile.

ISPRA. (1988). *CARG, Cartografia Geologica e Geotematica*. Tratto da ISPRA: <http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/progetto-carg-cartografia-geologica-e-geotematica>

ISPRA. (2007). *IFFI- Inventario dei Fenomeni Franos in Italia*. Tratto da <http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/iffi-inventario-dei-fenomeni-franos-in-italia>

ISPRA. (s.d.). *ITHACA - Catalogo delle faglie capaci*. Tratto da <http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/ithaca-catalogo-delle-faglie-capaci>

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. New Jersey: Pentice-Hall.

Lancellotta, R. (2004). *Geotecnica*. Bologna: Zanichelli.

Lanzo G., S. F. (1999). *Risposta Sismica Locale. Teoria ed Esperienze*. Hevelius Edizioni.

Martini G., C. S. (2011). La carta geologico tecnica per gli studi di MS, in "Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e Criteri per la microzonazione sismica". *Ingegneria sismica*, a. XXVIII, n. 2.

Moscatelli, M., Pagliaroli, A., Mancini, M., Stigliano, F., Colombi A. (2013). Microzonazione Sismica Di Livello 1 Del Centro Storico Di Roma. GNGTS 2013 Sessione 2.2, presentazione
<http://www3.inogs.it/gngts/files/2013/S22/Presentazioni/Moscatelli.pdf>

Moscatelli M., Pagliaroli A., Mancini, M., Stigliano, F., et al., (2013). Integrated subsoil model for seismic microzonation in the Central Archaeological Area of Rome (Italy). *Disaster Advances*, Vol. 5 (3) July 2012

NTC18. (2018). *Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni"*, NTC (2018) - DM 17 gennaio 2018. Gazzetta Ufficiale, n. 42 del 20 febbraio 2018, Supplemento Ordinario n. 42, <http://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2018/02/20/42/so/8/sg/pdf>.

PAI. (2001). Piano stralcio Assetto Idrogeologico. *Gazzetta Ufficiale n. 183 dell'8 agosto 2001. Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 24 maggio 2001, adottato con Deliberazione del Comitato Istituzionale n. 18 del 26 aprile 2001.*

Quadrio B., S. T. (2011). *Risposta sismica locale: effetti dell'inversione di velocità. Rapporto interno dell'Ufficio Rischio sismico e vulcanico.* Dipartimento della Protezione Civile.

Sismica, G. d. (2012). *Linee guida "standard di rappresentazione cartografica e archiviazione informatica specifiche tecniche per la redazione degli elaborati cartografici ed informatici relativi al primo livello delle attività di microzonazione sismica" versione 1.2.* Regione Abruzzo.