

# GEOLOGIA

## TECNICA & AMBIENTALE

### In questo numero

Carta geologica della Campania: nota illustrativa sintetica

Lo scavo della galleria idraulica Pavoncelli bis

Studio geomeccanico e di caduta massi nell'area di Forza d'Agrò finalizzato alla richiesta di variante al pai dei bacini

Analisi di risposta sismica locale bidimensionale. Un caso di studio: vulnerabilità sismica di un edificio rilevante posto a Sant'Elpidio a mare (FM)

Preliminary evaluation of the reliability, through simulation with numeric code (JDEC), of the stabilization measures suggested by SMR for a slope affected by rockfalls

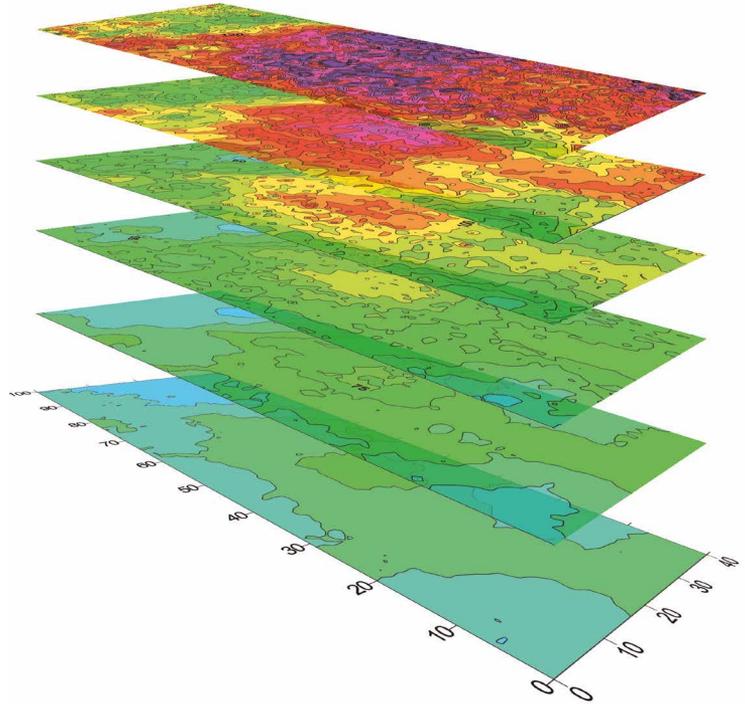
Geo-archeositi ipogei dei territori ibleo e maltese

Prima ricostruzione dei valori di fondo di arsenico, ferro e manganese nell'acquifero sotterraneo della zona industriale (ex SIR) della piana di Lamezia Terme (CZ)



La famiglia degli **elettromagnetometri CMD** lavora per profondità da 0.15 a 60 m. È utile per indagini rapide e accurate di strutture e oggetti sepolti nell'ambito di indagini geologiche, geotecniche, archeologiche per ricerche di ordigni bellici, rilievi ambientali e stratigrafici.

# Sottocontrollo.



## Strumenti ad alta tecnologia anche a noleggio per:

### Studio dei fondali e delle coste

Multibeam, SSS, SBP, sismica marina ...

### Monitoraggio ambientale

Magnetometri, interferometri da terra ...

### Studio del sottosuolo

Georadar, sismica, geoelettrica ...

### Ingegneria civile

Georadar 3D, laser scanner, inclinometri ...

### Monitoraggio sismico

Sismometri, strong motion, reti early warning ...

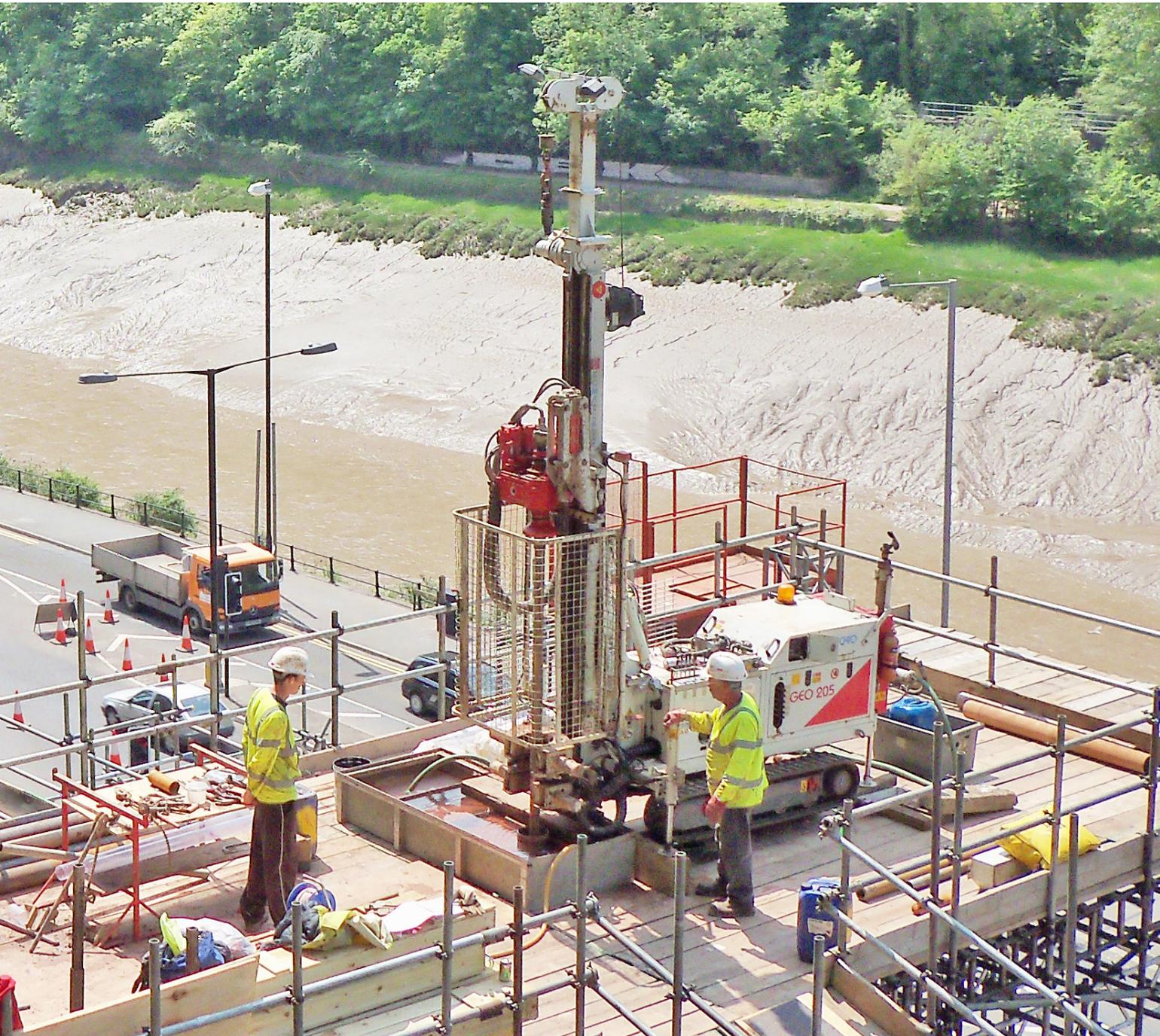


# CODEVINTEC

Tecnologie per le Scienze della Terra

tel. +39 02 4830.2175 | info@codevintec.it | www.codevintec.it

# PART OF YOUR SUCCESS



Dal 1986, mettiamo le esigenze dei nostri clienti al centro del nostro lavoro, offrendo un servizio personalizzato basato sul continuo miglioramento e sviluppo dei nostri prodotti. Lo facciamo grazie a una gamma completa e innovativa di prodotti e soluzioni hi-tech, progettati e realizzati per soddisfare al meglio i requisiti operativi di cantiere e affrontare in tutta sicurezza anche le applicazioni più impegnative.



## COMACCHIO

DRILLING HI-TECH

Scopri come affianchiamo i nostri clienti nel loro lavoro

[comacchio.com](http://comacchio.com)





### CTD Logger multiparametrico (conduttività, temperatura, pressione)

- Precisione / scala di conduttività del sensore:  
 $\pm 1\%$  max. / 0,2...200 mS/cm
- Precisione / sensore Pt1000 per monitorare la temperatura:  
 $\pm 0,1$  °C / -10...40 °C
- Precisione / campo di pressione (profondità):  
 $\pm 0,02$  %FS max. / 5...200 m
- Applicazioni:  
monitoraggio della qualità dell'acqua e del livello



## Competenza nella idrologia

### Unità di trasmissione dati a distanza GSM

- Logger multiparametrico
- Trasmissione dei dati via e-mail, FTP oppure SMS
- Multifunzionale
- Durata della batteria fino a 10 anni
- Facilità d'installazione
- Software incluso

### Logger di pressione e temperatura

- Autonomo
- Di facile uso
- Durata della batteria fino a 10 anni
- Applicazioni:
  - Acqua dolce
  - Acqua salata
  - Acqua sporca
- Ottenibile in acciaio Inox, Hastelloy oppure in Titanio





# Indagini GEOFISICHE



## GECO-DMC

[www.geco-dmc.com](http://www.geco-dmc.com)

instagram: GECO-DMC

Tomografia Elettrica 2D/3D/4D

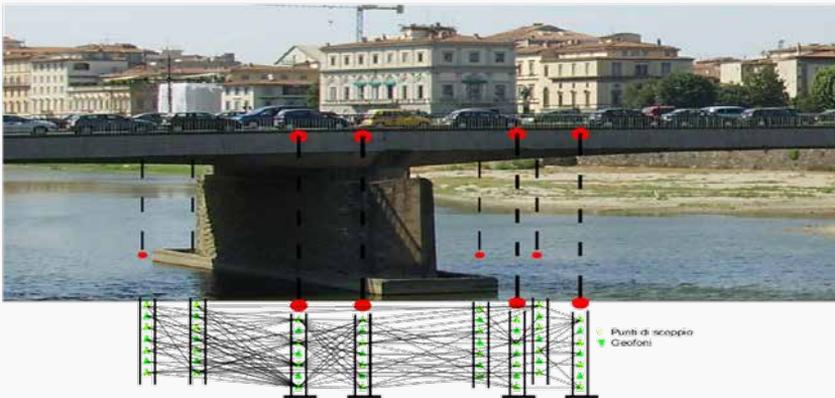
Indagini Sismiche 2D/3D

Elettromagnetismo

Rilievi GPR



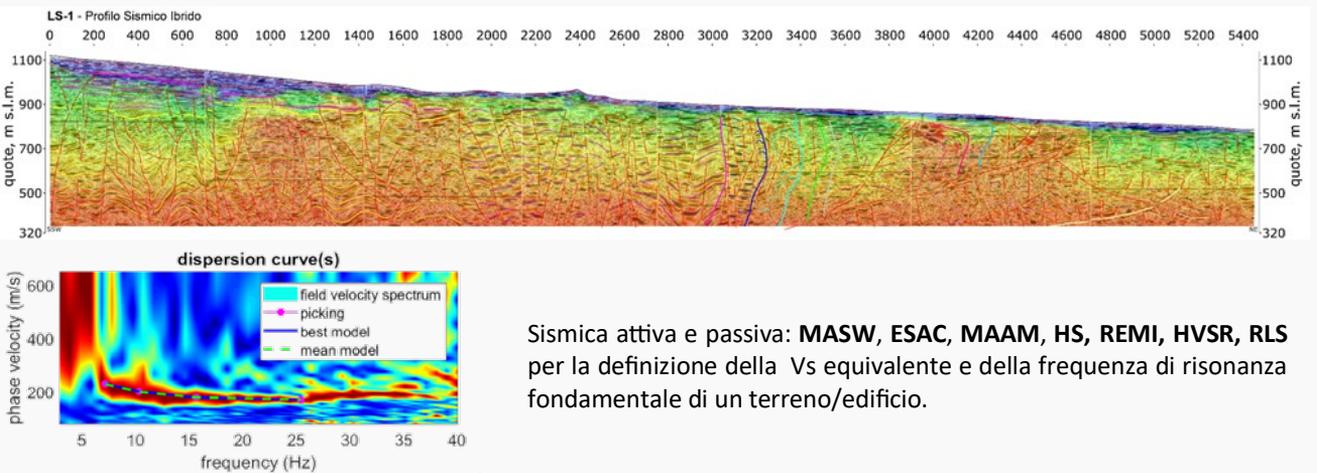
**ELETTROMAGNETISMO e TOMOGRAFIA ELETTRICA** in terreni sedimentari e strutture carbonatiche per la caratterizzazione di plumes di inquinanti (petrolio) e per la definizione della falda.



Indagini sismiche in foro:

- CAROTAGGI SISMICI DH
- CH TEST
- CH TOMOGRAFICI 2D/3D/4D
- CH SONICI

**SISMICA IBRIDA - RIFLESSIONE e RIFRAZIONE** combinate per la definizione delle strutture geologiche con alto dettaglio fino a profondità elevate.



Sismica attiva e passiva: **MASW, ESAC, MAAM, HS, REMI, HVSR, RLS** per la definizione della Vs equivalente e della frequenza di risonanza fondamentale di un terreno/edificio.

**GECO-DMC Srl—Società tra Professionisti**

Ordine Geologi Toscana STP-001 – [geco@geco-dmc.com](mailto:geco@geco-dmc.com)

Member of CISQ Federation



CAMPIONAMENTO  
LOW-FLOW

# SOLUZIONI PER IL CAMPIONAMENTO DI ACQUA E GAS



## CAMPIONI DI ELEVATA QUALITÀ GRAZIE AI SISTEMI DI PRELIEVO LOW-FLOW E INDISTURBATI SOLINST®

Da oltre 30 anni Solinst® realizza soluzioni evolute per il campionamento di acque sotterranee e vapori interstiziali. La gamma di strumenti comprende: pompe peristaltiche, bladder pump, pompe a doppia valvola, pompe inerziali, campionatori ad intervalli discreti, bailer biodegradabili monouso e campionatori in acciaio inox decontaminabili. Mediante i packer a bassa pressione è inoltre possibile isolare le zone di campionamento all'interno del piezometro.

Da sempre impegnati nell'offrire le soluzioni tecnologiche più avanzate e affidabili per misure e monitoraggio di livello, campionamenti low-flow e indisturbati, analisi qualitative delle acque sotterranee o di superficie. Abbiamo selezionato i migliori prodotti disponibili sul mercato internazionale per soddisfare le esigenze dei professionisti del settore.



MISURE DI LIVELLO



DATALOGGER  
E TELEMETRIE



PROFILAZIONE  
MULTILIVELLO



BONIFICA  
IDROCARBURI

# Solinst®

DISTRIBUTORI UFFICIALI PER L'ITALIA E RIVENDITORI PER CROAZIA,  
SLOVENIA E SVIZZERA DEI PRODOTTI SOLINST®

Una partnership di successo che dura da oltre trent'anni.

 **EGEO** +lab

WWW.EGEO.LAB.IT

Quadrimestrale dell'Ordine Nazionale dei Geologi  
N. 2/2020

#### DIRETTORE RESPONSABILE

Alessandro Reina

#### COMITATO DI REDAZIONE

Francesco Peduto, Vincenzo Giovine,  
Arcangelo Francesco Violo, Raffaele Nardone,  
Antonio Alba, Domenico Angelone, Lorenzo Benedetto,  
Alessandra Biserna, Adriana Cavaglià, Luigi Matteoli,  
Gabriele Ponzoni, Alessandro Reina, Paolo Spagna,  
Fabio Tortorici, Tommaso Mascetti

#### COMITATO SCIENTIFICO

Eros Aiello, Vincenzo Simeone, Guido Giordano, Antonio Martini,  
Giulio Iovine, Claudio Mariotti, Sergio Castenetto, Sergio Rusi,  
Ezio Crestaz, Alfredo Degiovanni, Francesco Maria Guadagno,  
Paolo Fabbri, Rocco Dominici, Domenico Guida, Tiziana Apuani,  
Elisabetta Erba, Alessandro Conticelli, Nicola Casagli, Rinaldo  
Genevois, Gilberto Panebianchi, Silvia Castellaro, Floriana Pergalani,  
Vincenzo Morra, Silvia Fabbrocino, Gabriele Scarascia Mugnozza,  
Massimiliano Imperato

#### SEGRETERIA DI REDAZIONE

Maristella Becattini  
maristella.becattini@cngeologi.it

#### DIREZIONE, REDAZIONE, AMMINISTRAZIONE

Consiglio Nazionale dei Geologi  
Via Vittoria Colonna, 40 - 00193 Roma  
Tel. 06.68807736 / 06.68807737 - Fax 06.68807742

#### SITO INTERNET

www.cngeologi.it

#### UFFICIO STAMPA

Ilenia Ingui  
addettostampa@cngeologi.it

#### PUBBLICITÀ

Agicom srl  
Viale Caduti in Guerra, 28 - 00060 Castelnuovo di Porto (Roma)  
Tel 06.9078285 Fax 06.9079256  
agicom@agicom.it  
www.agicom.it

#### GRAFICA E IMPAGINAZIONE

Agicom srl  
Immagini: ©shutterstock.com

#### STAMPA

Spadamedia S.r.l.

Iscritto al Registro degli Operatori di Comunicazione (ROC)  
al n. 4768. Autorizzazione del Tribunale di Roma n. 55 del  
5 febbraio 1986.

Questa rivista viene spedita a tutti i geologi iscritti agli Ordini  
regionali, Enti, Uffici Tecnici interessati e università.

Può essere scaricata online in PDF dal sito [www.cngeologi.it](http://www.cngeologi.it)

Spedizione in abbonamento postale 45%, art. 2, comma 20/b,  
legge 662/96 - Filiale di Roma.

Un fascicolo € 16,00 - Numeri arretrati € 18,00.

Versamenti sul c/c n. 347005 intestato a:

Consiglio Nazionale dei Geologi

Via Vittoria Colonna, 40 - 00193 Roma, specificando la causale.

*I manoscritti, anche se non pubblicati, non si restituiscono.*

*L'Autore dell'articolo è responsabile di quanto in esso contenuto,  
delle autorizzazioni alla pubblicazione di figure, tabelle, ecc.,  
dei riferimenti e strumentazioni.*

Associato all'USPI, Unione Stampa Periodica Italiana.

#### GARANZIA DI RISERVATEZZA

L'editore garantisce la massima riservatezza dei dati forniti dagli abbonati e la  
possibilità di richiedere gratuitamente la rettifica o la cancellazione, scrivendo a:  
Consiglio Nazionale dei Geologi - Via Vittoria Colonna 40, 00193 Roma.

Le informazioni custodite nell'archivio elettronico dell'Editore saranno utilizzate al  
solo scopo di inviare la rivista o altre comunicazioni concernenti l'abbonamento  
(D.L. 30/6/2003, n. 196, sulla tutela dei dati personali).

#### PER GLI AUTORI:

le Norme di Stampa sono consultabili sul sito [cngceologi.it](http://cngceologi.it), nell'area Rivista.

#### IN COPERTINA:

Grotte di Castellana.

Foto di: Mariagrazia Proietto (Grotte di Castellana srl)

#### ERRATA CORRIGE N.1/2020:

Relativamente alla dicitura sulla Testastina 'Convegni' si rettifica  
'Atti Convegni Enna' e non Bari, come erroneamente indicato.

## Sommario

<b>L'Editoriale</b>	<b>9</b>
A. Reina	
<b>Il Punto del Presidente</b>	<b>11</b>
F. Peduto	
<b>Università e ricerca</b>	<b>15</b>
S. Ciarcia, S. Vitale Carta geologica della Campania: nota illustrativa sintetica	
<b>Risorsa acqua</b>	<b>21</b>
S. Di Nocera, F. Matano, S. Critelli, S. Criniti, A. Riviello Lo scavo della galleria idraulica Pavoncelli bis (Caposele- Conza): aggiornamento delle conoscenze geologiche nel settore del valico appenninico campano-lucano	
<b>Risorsa acqua</b>	<b>39</b>
O. Barbagallo, F. Calvi Studio geomeccanico e di caduta massi nell'area di Forza d'Agro finalizzato alla richiesta di variante al pai dei bacini 097-098	
<b>Rischio sismico</b>	<b>57</b>
E. Aiello, F. Catanzariti, S. Giuliani, A. Lippelli Analisi di risposta sismica locale bidimensionale. Un caso di studio: vulnerabilità sismica di un edificio rilevante posto a Sant'Elpidio a Mare (FM)	
<b>Protezione civile</b>	<b>71</b>
G. Bruno Preliminary evaluation of the reliability, through simulation with numeric code (UDEC), of the stabilization measures suggested by SMR for a slope affected by rockfalls	
<b>Atti Convegno Enna</b>   2 <sup>a</sup> parte	<b>81</b>
R. Maniscalco, D. Tanasi Geo-archeositi ipogei dei territori ibleo e maltese	
<b>Risorsa acqua</b>	<b>89</b>
I. Meringolo, C. Migliorino Prima ricostruzione dei valori di fondo di arsenico, ferro e manganese nell'acquifero sotterraneo della zona industriale (ex SIR) della piana di Lamezia Terme (CZ)	
<b>Recensione</b>	<b>97</b>
Idrogeofisica. Geofisica applicata all'idrogeologia.	

REGISTRAZIONE E TRASMISSIONE REMOTA  
DEI DATI



**DL.OCS**



**WMS.GPRS**

LIVELLO E TEMPERATURA

SCOPRI

# LE SOLUZIONI STS PER LA GEOLOGIA



**SAC254**

CONDUCIBILITÀ/SALINITÀ, PH, REDOX, TORBIDITÀ,  
OSSIGENO DISCIOLTO, SOLIDI SOSPESI



**FREATIMETRI**



**Alessandro Reina**

Direttore Responsabile

**Che** cosa è una ricetta? È un concetto così comune che a volte non ci si fa caso! La semplice spiegazione di un piatto, un piccolo testo che non potrà mai diventare letteratura, una formula matematica fatta di grammi e decilitri o qualcosa di più? Lo storico Massimo Montanari ha paragonato la cucina al linguaggio, in quanto, come questo, possiede vocaboli (gli ingredienti) usati secondo le regole di una grammatica (ricette) e di una sintassi che è il menù. Tuttavia si sa che grammatica e sintassi servono per scrivere in maniera corretta ma non fanno di chi scrive un letterato, così come la conoscenza delle tecniche di cucina non produce uno chef di successo.

È altrettanto vero però, che se l'interprete che le realizza usa esperienza, cura e capacità, oltre a passione e intuito potrà vedere realizzato un piatto che farà godere il palato di chi lo assaggia.

In questi anni il GTA si è posto come obiettivo una condizione basilare frutto di una precisa intenzione dell'attuale Consiglio Nazionale: la trasmissione della conoscenza geologica, delle tecniche e dei risultati, attraverso le specifiche esperienze che la variabilità del nostro territorio impone con estrema forza e diversificazione.

Si è voluto, volta per volta, numero dopo numero, comporre "ricette" che fossero fruibili a tutti e che permettessero di ritrovarsi nell'unico intento di fare sempre più competente la nostra categoria. Un giornale tecnico come il nostro sicuramente è anche un contenitore democratico perché accessibile a tutti coloro i quali hanno un'esperienza, una ricerca, un approfondimento da offrire e condividere e che racconta o esprime qualcosa di noi e della nostra professione.

Questo numero propone, ancora una volta, una serie di articoli che dimostrano quanto possa essere ampia e ricca l'applicazione della geologia nel campo professionale. **Dalla valutazione della vulnerabilità sismica (Aiello), allo studio delle frane (Barbagallo; Bruno), alle grandi opere strutturali (Di Nocera). Dal rilevamento geologico e la stratigrafia (Ciarcia & Vitale) alla geoarcheologia (Rosanna Maniscalco & Davide Tana) e all'ambiente (Meringolo & Migliorino).**

Un intreccio di "ingredienti" che certamente potranno, attraverso testi agili, comprensibili e incommensurabilmente accattivanti, condurre ad approfondimenti, confronti e disquisizioni fra chi ha ritrovato analogie e spunti per risolvere situazioni e/o problematiche simili.

*Buona lettura.*





**Francesco Peduto**

**N**on siamo assolutamente fuori dall'emergenza che ha colpito il nostro Paese e il resto del mondo in seguito all'epidemia da Covid-19 e il Consiglio Nazionale dei Geologi continua la sua azione costante di monitoraggio dei provvedimenti governativi e di interlocuzione con le forze parlamentari e di governo, sia autonomamente che di concerto con la Rete delle Professioni Tecniche e con il Comitato Unitario delle Professioni.

Proseguono incessanti, pertanto, le attività per mettere in campo iniziative ed azioni a tutela della categoria professionale, per avere garantiti gli strumenti di tutela del lavoro e della salute, gli ammortizzatori sociali e l'accesso privilegiato alla liquidità finanziaria. I provvedimenti sin qui emessi ci lasciano largamente insoddisfatti, perché pervasi da eccessi di burocrazia e privi di ogni indirizzo di semplificazione, che tra l'altro solo in parte ed in modo insufficiente hanno accolto le istanze dei professionisti. Ora siamo alle prese con il cosiddetto "Decreto Agosto" e con la conversione in legge del D.L. 16 luglio 2020, n. 76 recante misure urgenti per la semplificazione e l'innovazione digitale: ci accingiamo, pertanto, a riformulare ulteriori proposte secondo le linee già tracciate in precedenza.

In particolare, per quanto riguarda la conversione in legge del D.L. 16 luglio 2020, n. 76 voglio parteciparvi dell'audizione parlamentare al Senato presso le Commissioni riunite 1<sup>a</sup> (Affari Costituzionali) e 8<sup>a</sup> (Lavori

Pubblici, comunicazioni), dove come RPT abbiamo presentato una serie di proposte ed emendamenti, quali quelli relativi a:

1. (Modifiche all'art. 1 del DL 16 luglio 2020, n. 76)  
Ampliamento a favore dei professionisti delle misure di incentivazione degli investimenti pubblici durante il periodo emergenziale in relazione all'affidamento di lavori, servizi, forniture sotto soglia.
2. (Modifiche all'art. 2 del DL 16 luglio 2020, n. 76)  
Ampliamento a favore dei professionisti delle misure di incentivazione degli investimenti pubblici durante il periodo emergenziale in relazione all'affidamento di lavori, servizi, forniture sotto soglia.
3. (Modifiche all'art. 6 del DL 16 luglio 2020, n. 76)  
Modifiche alla disciplina del Collegio consultivo tecnico.
4. (Modifiche all'art. 7 del DL 16 luglio 2020, n. 76)  
Istituzione del Fondo di rotazione per l'affidamento di servizi di architettura e ingegneria.
5. (Modifiche all'art. 8 del DL 16 luglio 2020, n. 76)  
Modifica delle disposizioni urgenti in materia di contratti pubblici.
6. (Modifiche all'art. 10 del DL 16 luglio 2020, n. 76)  
Modifica di disposizioni varie in materia edilizia e di progettazione allo scopo di rilanciare e semplificare il settore.
7. (Modifiche all'art. 11 del DL 16 luglio 2020, n. 76)  
Introduzione di chiarimenti sui lavori riguardanti edifici di culto rientranti nell'area del sisma del 2016 e sull'applicabilità del DM 140/2012 alle prestazioni professionali svolte sugli stessi.
8. (Modifiche all'art. 36 del DL 16 luglio 2020, n. 76)  
Misure di semplificazione amministrativa, per l'innovazione e la definizione della responsabilità dei professionisti.
9. (Modifiche all'art. 37 del DL 16 luglio 2020, n. 76)  
Disposizioni per favorire l'uso degli strumenti elettronici e la semplificazione dei rapporti tra Amministrazione, imprese e

professionisti, la riorganizzazione degli ordini professionali disciplinati dal DPR 8 luglio 2005, n. 169, l'equo compenso e altre disposizioni di rilievo ordinistico.

Questa consiliatura si avvia alla scadenza del mandato ricevuto, sembra ieri quando ci siamo insediati quel 2 dicembre 2015, eppure sono trascorsi cinque anni. A metà settembre si voterà per il rinnovo del consiglio, ma per correttezza istituzionale eviterò di ripercorrere qui, ormai con la campagna elettorale alle porte, il cammino fatto e i risultati raggiunti. Chiunque si proporrà alla guida della categoria per il prossimo quinquennio avrà modo, attraverso proprie pagine dedicate e scrivendo direttamente agli iscritti, di evidenziare il proprio punto di vista su ciò che è stato e sui propositi futuri.

Voglio informarvi, tuttavia, che in considerazione dell'emergenza epidemiologica in corso abbiamo reiterato la richiesta al Ministro della Giustizia Bonafede, già formulata con nota prot. n. 4630 del 27.12.2017, di poter votare mediante mezzo di natura elettronica o informatica, chiedendo di valutare la possibilità di proporre tale evenienza anche in sede di legislazione emergenziale.

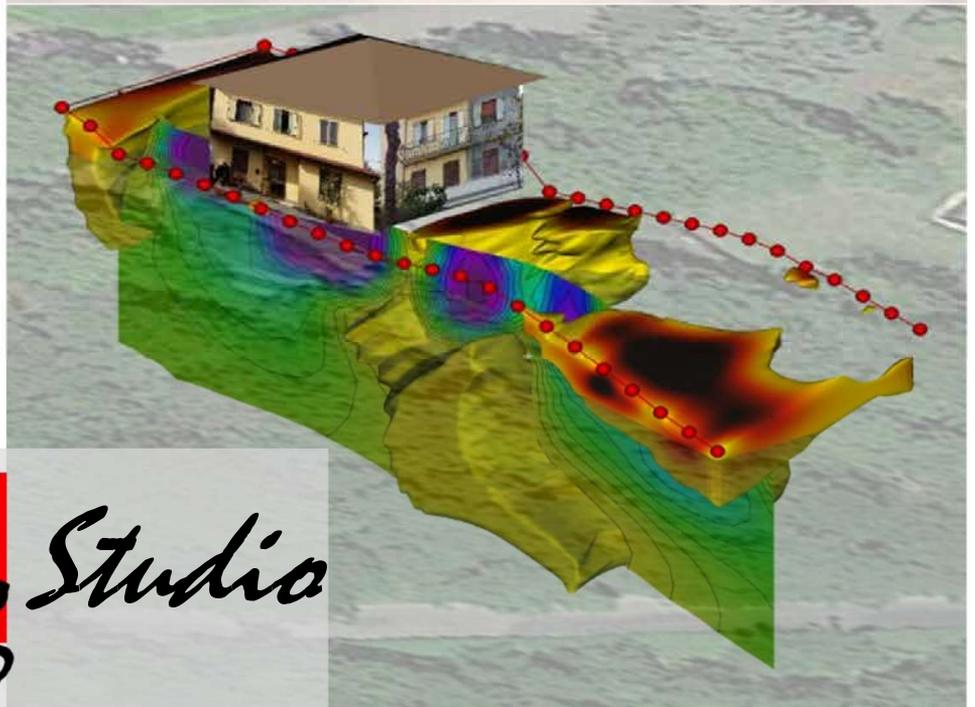
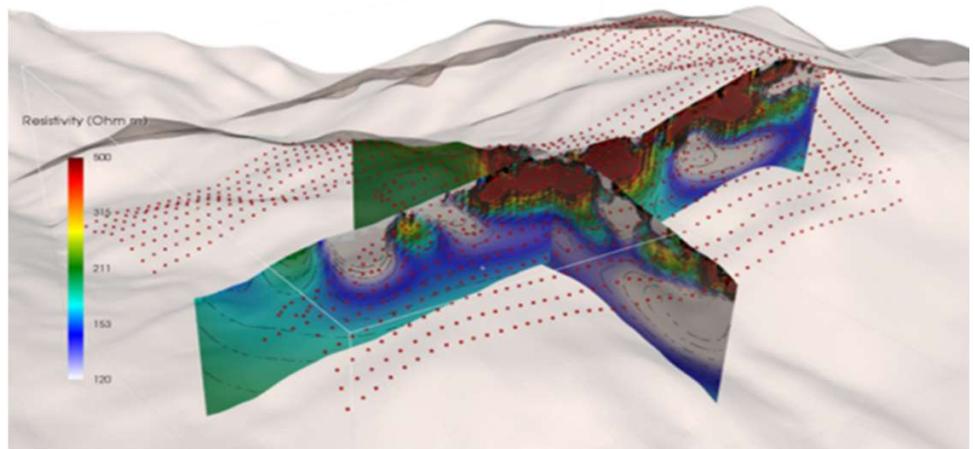
La richiesta, ovviamente, è stata accompagnata da una serie di considerazioni, che andavano dalle difficoltà organizzative per l'emergenza in corso alla necessità di evitare spostamenti massivi degli iscritti ed assembramenti, anche per autenticare le firme e la spedizione della scheda mediante raccomandata. Tale evenienza avrebbe anche consentito una maggiore partecipazione al voto ed un risparmio notevole in termini economici (per queste votazioni, come anche per quelle precedenti, è stato necessario stanziare una cifra superiore ai 100.000 euro).

La risposta pervenuta dal ministero purtroppo è stata negativa, per cui ancora una volta ci toccherà votare con il solito sistema arcaico. E meno male che le forze parlamentari stanno lavorando ad un provvedimento legislativo per la sburocratizzazione e la semplificazione amministrativa!

**ERTLAB STUDIO È IL NUOVO SOFTWARE 3D PER  
L'INVERSIONE DI DATI DI RESISTIVITÀ E  
CARICABILITÀ CHE HA RADICALMENTE CAMBIATO  
IL MODO DI FARE TOMOGRAFIA ELETTRICA**

**CARATTERISTICHE PRINCIPALI:**

- NUOVA UNICA INTERFACCIA GRAFICA 3D
- MODELLAZIONE 3D CON TOPOGRAFIA COMPLESSA
- CREAZIONE SEQUENZE 2D E 3D (SUPERFICIE E FORO)
- DISTRIBUZIONE LIBERA DEGLI ELETTRODI NELLO SPAZIO
- FUNZIONI AUTOMATIZZATE DI INVERSIONE ED OTTIMIZZAZIONE MESH
- INVERSIONE AGLI ELEMENTI FINITI DELLA RESISTIVITÀ E CARICABILITÀ
- INVERSIONE CONGIUNTA DI ARRAY ELETTRODICI DIVERSI
- MODULI AGGIUNTIVI PER MULTSOURCE E 4D
- IMPORTAZIONE OGGETTI GRAFICI



**ERT**  
Lab Studio

# Per il **risanamento** **ambientale...** scegli **l'eccellenza!**

## TECHNOLOGIES THAT EXCITE

Progetto di divulgazione tecnologica - Ideazione e coordinamento scientifico BAW s.r.l.

*"Il progetto nasce dalla convinzione che la divulgazione scientifica e tecnologica sia l'unico modo che abbiamo per migliorare l'ambiente in cui viviamo, per noi, ma soprattutto per i nostri figli."*

Technologies That Excite è un progetto di divulgazione tecnologica internazionale, ideato e coordinato da BAW s.r.l., finalizzato a promuovere le migliori tecnologie di bonifica ad oggi disponibili sul mercato. Il progetto coinvolge e raggruppa società fornitrici di tecnologie di assoluta avanguardia in una rete internazionale, unica nel suo genere, che si propone agli operatori di settore come un contenitore da cui attingere le migliori soluzioni tecniche per le loro problematiche ambientali.

Le società ad oggi incluse nel progetto TTE, e rappresentate in Italia da BAW s.r.l., sono:

**provectus**  
ENVIRONMENTAL PRODUCTS

Prodotti innovativi per il risanamento di terreni e acquiferi contaminati

**IVEY-SOL**  
Surfactant Technology

Surfactant Remediation Technologies

**SENSATEC**

Tecnologie innovative di bioremediation

**mi**  
microbialinsights

Analisi microbiologiche e biological tools

**GEO-LOG**  
Geosolutions

Sistemi tecnologicamente avanzati per la caratterizzazione ambientale

**QED**  
TRUSTED PROVEN QUALITY

Campionatori passivi di acque di falda contaminate

# Carta geologica della Campania: nota illustrativa sintetica

**Sabatino Ciarcia**, Dipartimento di Scienze e Tecnologie, Università degli Studi del Sannio, Via De Sanctis, 82100, Benevento  
Ordine dei Geologi della Campania, Via Stendhal, 23, 80133, Napoli

**Stefano Vitale**, Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse (DiSTAR), Università di Napoli Federico II,  
Via Cupa Nuova Cintia, 21, 80126 Napoli

Questa breve nota rappresenta una sintesi dell'assetto tettono-stratigrafico della Campania, attraverso una descrizione delle principali successioni affioranti e della struttura profonda della catena sudappenninica con la redazione di tre sezioni geologiche a scala regionale (Fig. 1).

La carta geologica illustrata (Vitale & Ciarcia, 2018, una versione digitale è scaricabile dal sito <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1424655>) è il risultato di una reinterpretazione della cartografia disponibile del Servizio Geologico d'Italia, alla scala 1:100.000 e 1:50.000, oltre a nuovi dati geologici acquisiti mediante rilevamenti originali in alcuni settori chiave. I modelli stratigrafici e tettonici proposti sintetizzano gli studi eseguiti da diversi autori in differenti settori della regione. Le tre sezioni geologiche, ortogonali ai fronti orogenici principali, rappresentative dell'architettura tettonica per le zone interne ed esterne della catena, sono state realizzate integrando le conoscenze geologiche di superficie con quelle del sottosuolo. Per ricostruire l'assetto tettono-stratigrafico del cuneo orogenico in profondità, i dati di terreno sono stati calibrati con i pozzi e i profili sismici disponibili. La versione integrale della nota illustrativa è disponibile, in formato cartaceo o digitale, presso l'Ordine dei Geologi della Campania.

La Campania comprende un vasto settore della catena montuosa dell'Appennino Meridionale, dove l'impalcatura orogenica è caratterizzata dalla sovrapposizione di diverse falde tettoniche, raggruppate in tre complessi principali: (i) unità del Bacino Liguride (Complesso d'Accrezione

Liguride, CAL); (ii) unità della Piattaforma Appenninica (PA) e (iii) unità del Bacino Lagonegrese-Molisano (BLM). La pila tettonica è ricoperta in discordanza da diversi depositi di bacino di *wedge-top* del Neogene e da terreni post-orogenici quaternari, continentali, marini e vulcanici (Figg. 2 e 3).

In generale, le unità del CAL occupano le posizioni tettoniche più alte, sovrascorse sulle unità della PA, che a loro volta ricoprono le unità del BLM. Come si evince dalle informazioni di numerosi pozzi e profili sismici, le unità lagonegresi-molisane formano *duplex* tettonici e falde imbricate che ricoprono i carbonati della Piattaforma Apula sepolta. Tuttavia questa geometria è ulteriormente resa più complessa dalla successiva reimbricazione della pila tettonica che localmente inverte la sequenza di sovrapposizione strutturale descritta (Fig. 4).

La catena a pieghe e sovrascorrimenti dell'Appennino Meridionale è il risultato della subduzione della litosfera oceanica liguride sotto la placca Europa, con la migrazione del fronte orogenico verso i quadranti orientali, come conseguenza dell'arretramento flessurale della placca subducente. La subduzione della litosfera oceanica ha avuto inizio nel Paleocene/Eocene, con differenti stadi tettonici parossistici, quali le migrazioni rapide dei fronti di sovrascorrimento durante l'Oligocene-Langhiano e il Tortoniano-Pliocene, con relativa apertura, rispettivamente, dei bacini di retroarco Liguro-Provenzale e Tirrenico. L'evoluzione orogenica mio-pliocenica è stata segnata dalla

sedimentazione di depositi torbiditici calci- e silico-clastici, sia nei bacini di avanfossa che nei bacini di *wedge-top*, le cui età vincolano e definiscono la sequenza temporale degli impulsi tettonici, tra cui alcuni sovrascorrimenti fuori-sequenza, che spesso rappresentano le strutture da raccorciamento meglio conservate dell'orogene. Il raccorciamento crostale è terminato all'inizio del Pleistocene Medio seguito da una generale risalita isostatica della catena, compresa l'Avanfossa Bradanica. Successivamente, la catena è stata soggetta ad un nuovo regime tettonico caratterizzato da un'estensione NE-SO con la formazione di

faglie prevalentemente estensionali che dissecano l'intera struttura orogenica. Durante le fasi tettoniche estensionali del Pleistocene si sono generate diverse depressioni strutturali tra le quali la Piana Campana, la Piana del Sele, il Golfo di Salerno, il Golfo di Napoli, il Vallo di Diano e il Bacino di Auletta, controllate principalmente da faglie normali a sviluppo NO-SE e NE-SO. Queste aree sono state sede della sedimentazione di depositi più o meno potenti di ambiente lacustre e marino costiero, spesso alternati e ricoperti da rocce vulcaniche, soprattutto durante il tardo Pleistocene-Olocene.

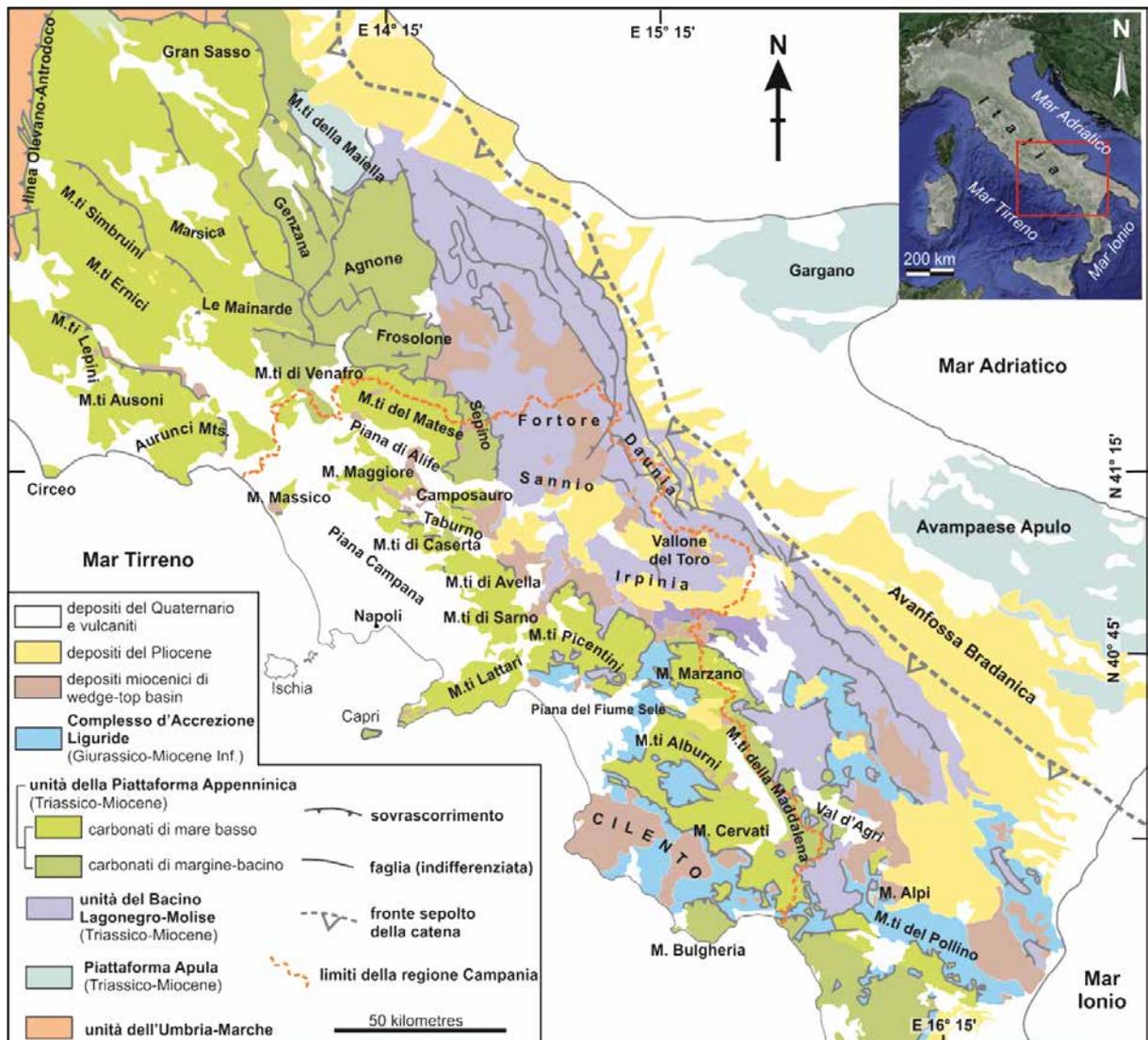


Fig. 1 - Schema geologico dell'Appennino Meridionale.

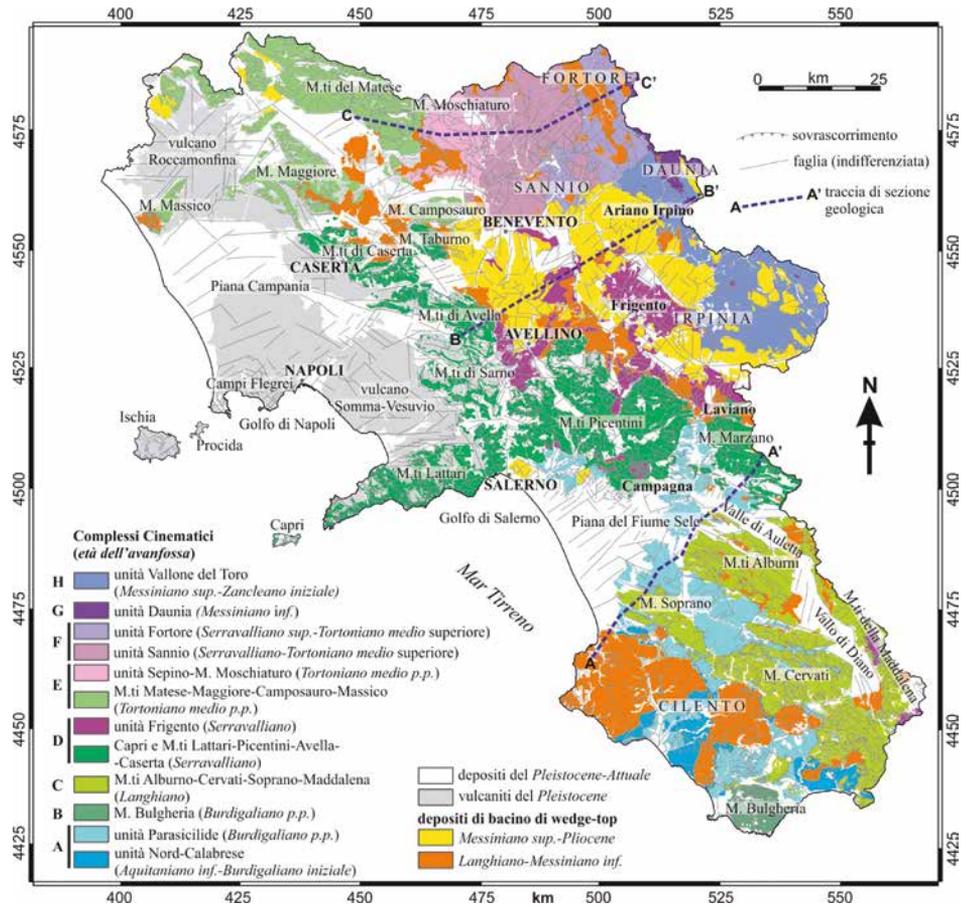


Fig. 2 - Carta dei Compleksi Cinematici della Campania.

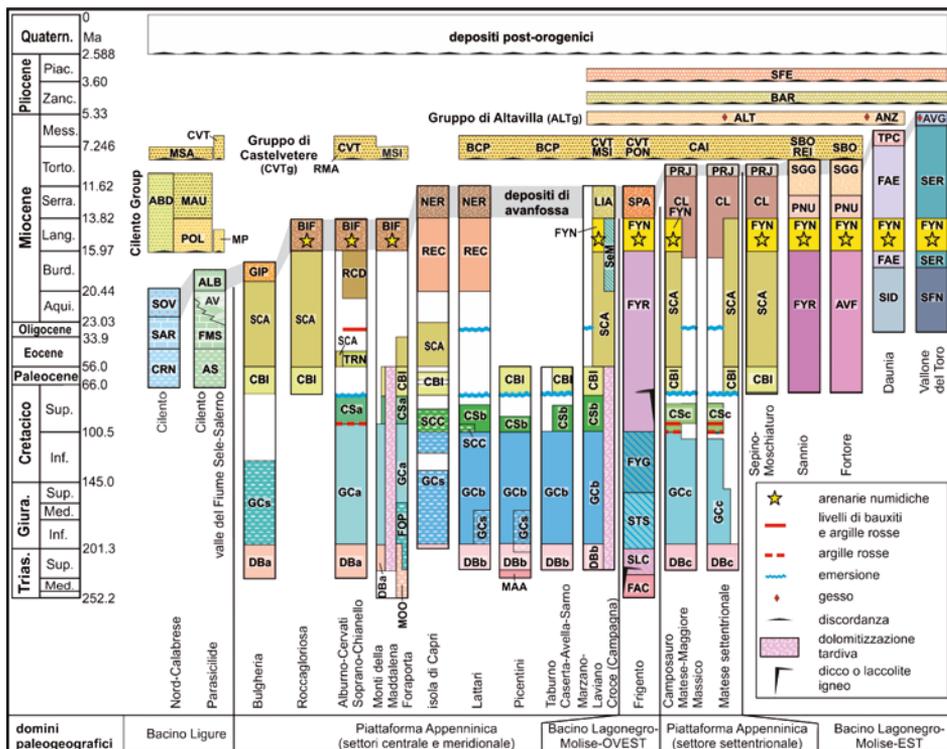


Fig. 3 - Schema stratigrafico che mostra le successioni sedimentarie esposte in Campania. N.B. per le abbreviazioni vedi la legenda della Carta Geologica della Campania.

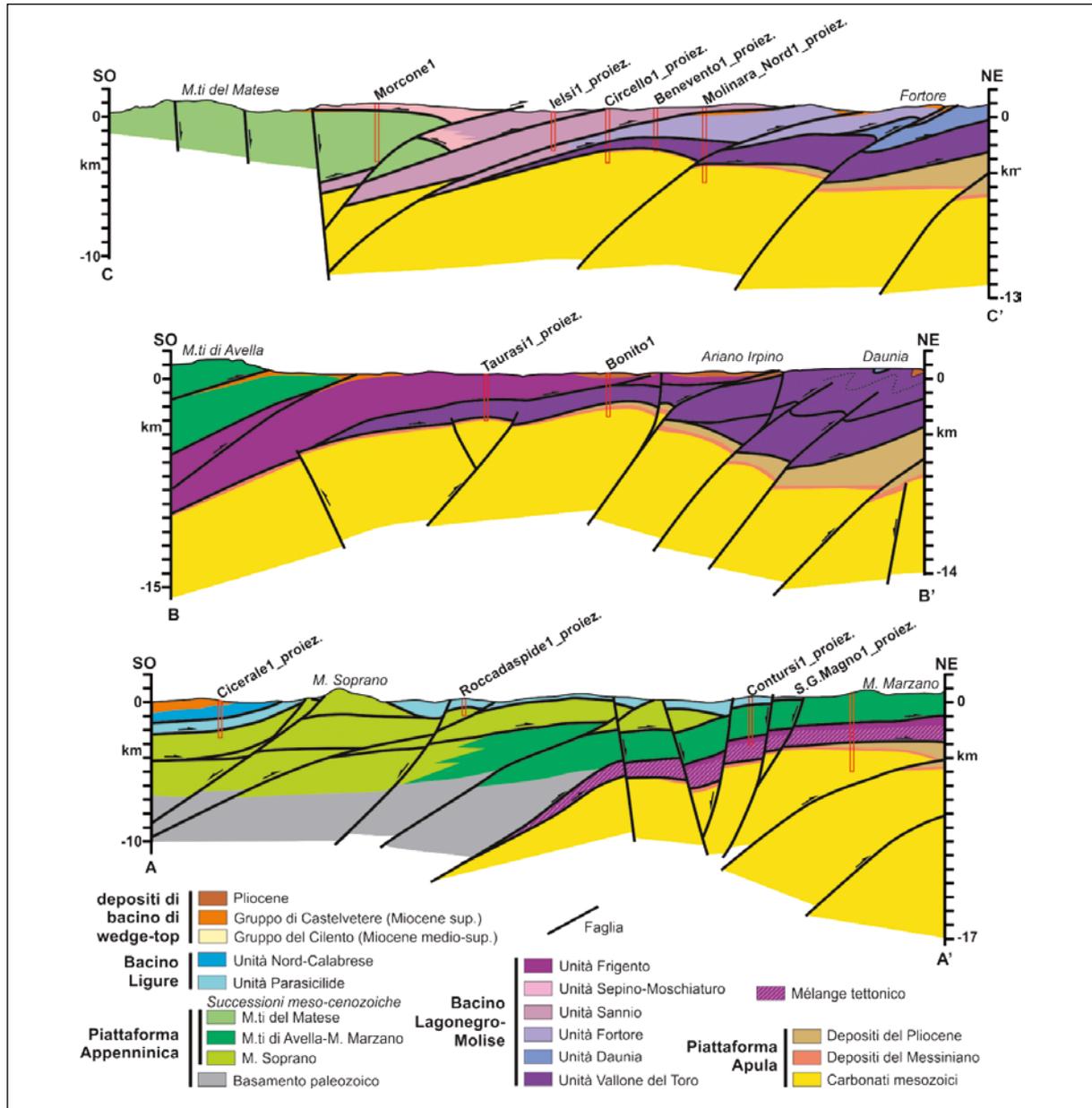


Fig. 4 - Sezioni geologiche (le tracce sono indicate in figura 2).

**PER SCARICARE I DOCUMENTI COMPLETI:**

**Carta della Regione Campania, nota illustrativa**

[https://www.researchgate.net/publication/326675611\\_Carta\\_geologica\\_della\\_Campania\\_nota\\_illustrativa](https://www.researchgate.net/publication/326675611_Carta_geologica_della_Campania_nota_illustrativa)

**Carta della Regione Campania**

[https://www.researchgate.net/publication/342121685\\_Carta\\_della\\_Regione\\_Campania\\_2018](https://www.researchgate.net/publication/342121685_Carta_della_Regione_Campania_2018)

**Carta Geologica della Campania versione per Google Earth\_new**

[https://www.researchgate.net/publication/341508522\\_Carta\\_Geologica\\_della\\_Campania\\_versione\\_per\\_Google\\_Earth\\_new?\\_iepl%5BviewId%5D=qfYPzbux0CKbDt1trY4nARgJ&\\_iepl%5Bcontexts%5D%5B0%5D=projectUpdatesLog&\\_iepl%5BtargetEntityId%5D=PB%3A341508522&\\_iepl%5BinteractionType%5D=publicationTitle](https://www.researchgate.net/publication/341508522_Carta_Geologica_della_Campania_versione_per_Google_Earth_new?_iepl%5BviewId%5D=qfYPzbux0CKbDt1trY4nARgJ&_iepl%5Bcontexts%5D%5B0%5D=projectUpdatesLog&_iepl%5BtargetEntityId%5D=PB%3A341508522&_iepl%5BinteractionType%5D=publicationTitle)



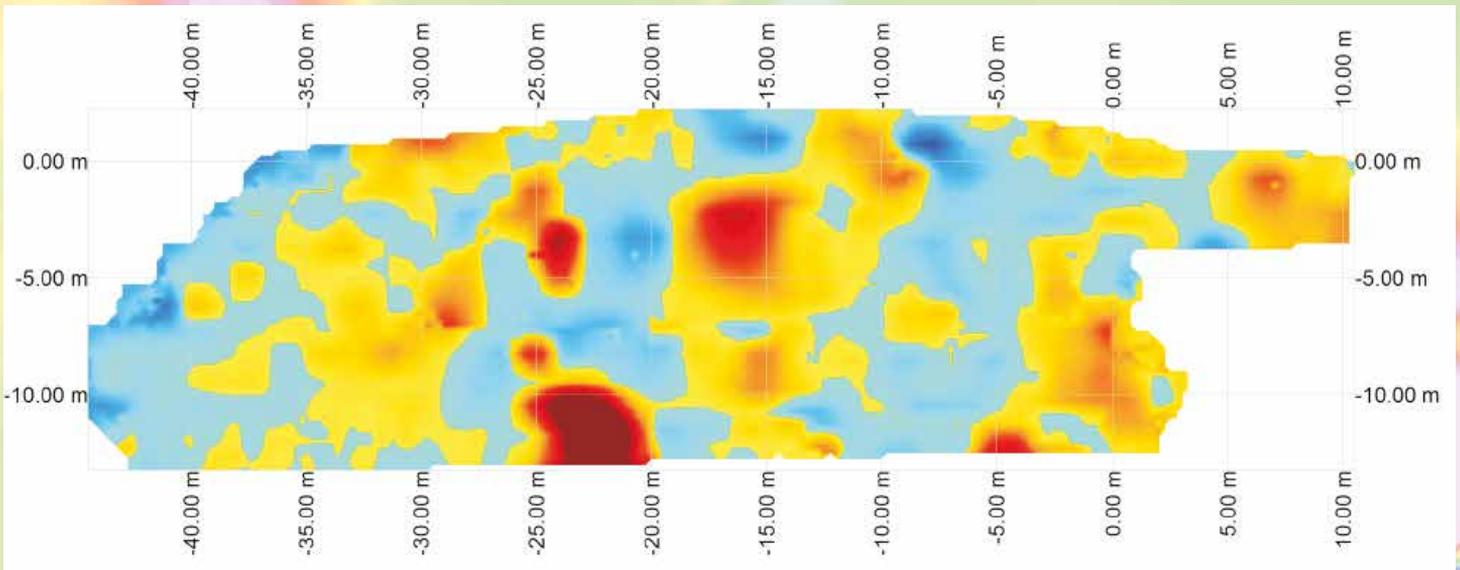
[www.indago-rovigo.it](http://www.indago-rovigo.it)  
Società accreditata per corsi APC

**Magnetometro Portatile**    **Sensys MagWalk**    App per smartphone Android

Doppio sensore triassiale Fluxgate  
GPS incorporato



**Sensys SBL10**  
Dispositivo compatto per rilevamento  
di oggetti ferromagnetici nel suolo



DISTRIBUTORE PER L'ITALIA

**GUIDELINEGEO**  
ABEM MALÅ

geotomographie

**GEOGIGA**  
TECHNOLOGY CORP

**SENSYS**<sup>®</sup>  
Magnetometers & Survey Solutions

Geophex Ltd.

EMFAD<sup>®</sup>

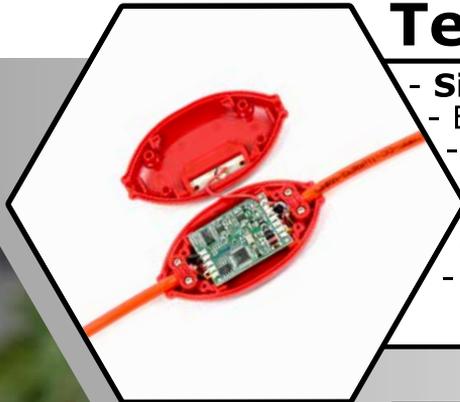
ZC

W&R  
instruments

# SISMOGRAFO DOREMI<sup>®</sup> 16/24 BIT



## Telemetria digitale



- **Sismografo nel canale**
- Eccezionale Rapporto Segnale/Rumore
- **Immune al Crosstalk ed ai disturbi elettromagnetici**
- Lunga autonomia
- **Batteria inclusa nell'interfaccia**
- Non teme l'umidità

## Modulare



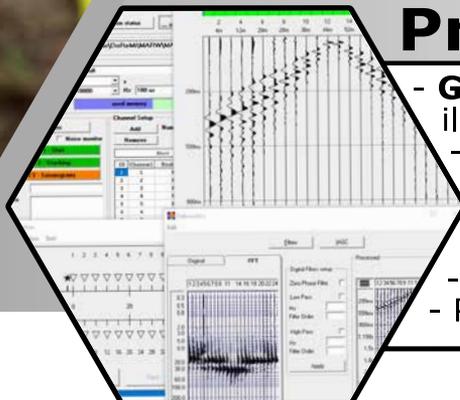
- **Configurabile da 1 a 255 canali**
- Diverse tipologie di geofoni e sensori
- **Componenti intercambiabili**
- Prolunghe e Power Booster al bisogno

## Multiruolo



- Rifrazione/Tomografia
- **MARW** Riflessione 1D
- **Riflessione 2D/3D**
- ESAC/SPAC/ReMi
- **SSV**
- HVSR
- Downhole
- **MASW 1D/2D/3D**

## Pratico



- **Gestione totale dell'acquisizione** con il software **DoReMi GeoExplorer**
- Roll Along, Interlace, Walk Away, Down Hole, etc.
- **Controllo rumore in situ**
- Controllo qualità dei dati
- **Analisi spettrale**
- Picking per rifrazione e molto altro

Via Angelo Morettini, 11, 06128 Perugia

E-mail: [info@sara.pg.it](mailto:info@sara.pg.it) | Web: [sara.pg.it](http://sara.pg.it) | Telefono: +39 075 505 1014, +39 075 937 0309

# Lo scavo della galleria idraulica Pavoncelli bis (Caposele-Conza): aggiornamento delle conoscenze geologiche nel settore del valico appenninico campano-lucano

**Silvio Di Nocera**, già Università degli Studi di Napoli "Federico II", Napoli.

**Fabio Matano**, Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Scienze Marine, Napoli.

**Salvatore Critelli**, Università degli Studi della Calabria - Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra, Rende (CS).

**Sara Criniti**, Università degli Studi della Calabria - Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra, Rende (CS).

**Antonio Riviello**, Libero professionista, Potenza.

## Termini chiave:

geologia regionale, galleria, Appennino meridionale, Italia

## Keywords:

regional geology, tunnel, southern Apennines, Italy

## Riassunto

La galleria idraulica Pavoncelli attraversa un settore dell'Appennino campano-lucano, il cui studio risulta di notevole importanza scientifica per le sue implicazioni geologico-regionali, sismotettoniche, idrogeologiche e geomorfologiche. Nell'area sono state individuate varie unità tettoniche d'importanza regionale di età compresa tra il Mesozoico ed il Miocene inferiore, quali l'Unità Sicilide e l'Unità tettonica di Frigento, caratterizzate da successioni bacinali, prevalentemente pelitico-calcaree, e le unità di piattaforma carbonatica dei M.ti Picentini e di M.te Marzano, separati dall'ampia valle del fiume Sele. Sono state individuate, per la prima volta nell'area, sia in affioramento che in galleria, successioni arenacee quarzolitiche con composizione vulcanoclastica correlabili alle successioni arenacee inframioceniche tipiche della parte alta dell'Unità Sicilide. Altre successioni arenacee supramioceniche di tipo sinorogenico, correlabili alla Formazione di Castelvetere, sono caratterizzate dalla tipica composizione quarzoso-feldspatica. La preziosa occasione di raccogliere nuovi dati geologici di sottosuolo ha consentito la verifica e l'integrazione dei modelli geologico-regionali elaborati dagli scriventi nel corso di oltre 30 anni di ricerche geologico-regionali, in particolare effettuate durante la partecipazione al progetto CARG per il rilevamento della nuova Carta Geologica d'Italia nelle aree campano-lucane della catena sud-appenninica.

## 1. Introduzione

La storica galleria Pavoncelli attraversa il sottosuolo di un settore chiave dell'Appennino campano-lucano, il cui studio risulta di notevole importanza scientifica per le sue implicazioni geologico-regionali, sismotettoniche, idrogeologiche e geomorfologiche. Questa opera idraulica di attraversamento del valico appenninico ha rappresentato, per oltre un secolo, l'unica via di approvvigionamento di acqua per le necessità idropotabili delle cittadinanze lucane e pugliesi, ma, a seguito delle conseguenze degli eventi sismici del terremoto del 1980, ha subito danni gravissimi, richiedendo interventi molto costosi con conseguente interruzione del flusso idrico e gravi disagi per le popolazioni. Accertata l'impossibilità di adottare interventi risolutivi, nel 1988 fu deciso di realizzare la nuova galleria Pavoncelli bis, con andamento parallelo al tragitto della vecchia galleria. A causa di numerosi rinvii e interruzioni, nelle varie fasi di progettazione ed esecuzione, l'opera è stata ultimata e collaudata solo nel 2019. Nel 2017, per le particolari condizioni geologico-strutturali incontrate nello scavo, è stato affidato agli scriventi l'incarico di studiare con maggiore dettaglio la struttura geologica del sottosuolo nei settori interessati dal completamento dello scavo. A tal fine è stato condotto un dettagliato rilievo geologico di superficie (scala 1:5000), che è stato integrato con le risultanze di numerose campagne di indagini geognostiche, comprendenti sondaggi profondi nuovi e di archivio. Sono stati inoltre analizzati i dati raccolti in galleria, sia mediante

il rilievo diretto sui fronti di scavo, durante alcuni fermi tecnici dei lavori, che grazie all'analisi di campioni rocciosi prelevati sui fronti di scavo, nonché dei detriti (terre sciolte e frammenti rocciosi) provenienti dai lavori di scavo della galleria (c.d. smarino).

La ricostruzione del contesto geologico del settore di territorio interessato dal tracciato della galleria ha permesso di validare, in un più ampio quadro geologico-strutturale regionale riconosciuto in letteratura (Pescatore et al., 1996, 2000; Di Nocera et al., 2006; Matano et al., 2016), la ricostruzione delle litologie, delle associazioni di litofacies e delle geostrutture che sono state attraversate nel corso dello scavo, e la correlazione con le unità tettoniche e litostratigrafiche e con l'assetto tettonico riconosciuto in affioramento. Le risultanze delle analisi petrografiche delle arenarie hanno consentito una correlazione diretta tra le varie unità arenacee campionate nel sottosuolo ed in superficie e quelle note in letteratura (Critelli, 1999; 2018).

Questo incarico ha rappresentato per gli scriventi un'occasione unica di raccolta di nuovi dati geologici di sottosuolo, che hanno consentito la verifica e l'integrazione dei modelli geologico-regionali elaborati dagli scriventi nel corso di oltre 30 anni di ricerche geologico-regionali, ed in particolare, con riferimento all'area in esame, durante la partecipazione al progetto CARG (Fogli n. 419 – San Giorgio la Molara, 433 - Ariano Irpino, 449 – Avellino, 468 – Eboli, 470 – Potenza) per il rilevamento della nuova Carta Geologica d'Italia nelle aree della catena campano-lucana.

## **2. Caratteristiche tecniche della Galleria Pavoncelli bis**

Una delle principali fonti di approvvigionamento idrico dell'Acquedotto Pugliese è costituita dalle sorgenti di Caposele e di Cassano Irpino, ubicate in Provincia di Avellino. Le acque di tali sorgenti sono trasportate in Puglia attraverso il Canale Principale dell'Acquedotto Pugliese, che nel tratto di valico appenninico, tra Caposele e Conza della Campania, era costituito dalla "Galleria Pavoncelli".

I lavori di realizzazione di questa galleria iniziarono nel 1906 e furono completati nel 1911. La realizzazione delle opere in muratura, benché fossero di ottima fattura, fu caratterizzata da notevolissime difficoltà per la natura dei terreni attraversati, costituiti prevalentemente da "argille scagliose rigonfianti" (A.A.VV., 1928). A seguito dei dissesti verificatisi a causa del terremoto dell'Irpinia e del Vulture del 23 luglio 1930 (magnitudo momento 6,7; X grado della scala Mercalli con epicentro tra Lacedonia e Bisaccia), furono da subito necessari numerosi interventi di riparazione e parziale ricostruzione tra gli anni '30 e '50, ed il sempre crescente fabbisogno idrico spinse già nel 1956 l'Ente Autonomo Acquedotto Pugliese a presentare un primo progetto che prevedeva la realizzazione di una nuova opera che costituisse

un by-pass alla galleria Pavoncelli. Infine, l'evento sismico del 23 novembre 1980 (magnitudo momento 6,9; X grado della scala Mercalli con epicentro tra Teora, Castelnuovo di Conza e Conza della Campania), provocò danni gravissimi all'opera, con effetti cosismici diffusi lungo tutto il suo tracciato, tali da rendere necessario interrompere il flusso d'acqua per un lungo periodo (Cotecchia, 1981). Infatti, nell'area compresa tra le località Acqua delle Breccie e Caposele, fu evidenziata una dislocazione superficiale del terreno con un rigetto variabile tra 20 cm ed 1 m (Valensise & Pantosti, 2001). Infine, in località Acqua delle Breccie, il terremoto del 1980 ha causato dislocazioni dei suoli e dei depositi detritici, innescando fenomeni indotti di tipo scoscendimento (Funicello et alii, 1988).

A seguito di questi notevoli danni, furono effettuati onerosi interventi di ripristino, che determinarono anche un restringimento della sezione con conseguente riduzione della portata utile da 6,5 mc/s a 4,5 mc/s. Nel 1988 fu, di conseguenza, avviata la progettazione del by-pass della Galleria Pavoncelli, ormai ridotta al limite della funzionalità, che comprendeva la realizzazione della nuova galleria "Pavoncelli Bis", anche al fine di convogliare le portate di supero, ancor oggi in sfioro, delle sorgenti di Caposele e Cassano Irpino, che sono in grado di erogare da 6,5 mc/s, con una frequenza superiore al 60%, fino a 9,0 mc/s.

La galleria "Pavoncelli Bis" è un sistema di adduzione a pelo libero, capace di una portata a regime di 6,5 mc/s, se pur in grado di trasferire una portata massima fino a 9 mc/s. La nuova galleria di valico si sviluppa parallelamente alla vecchia galleria per 10.225 m, con sezione interna circolare di diametro pari a 3.400 mm. La quota del fondo della galleria varia da circa 415 m s.l.m., lato Caposele, a 411 m s.l.m., lato Conza.

La profondità dello scavo si mantiene mediamente intorno a 100-120 m dalla superficie topografica nel tratto iniziale, aumentando nel tratto centrale fino a coperture di 330 m, con topografia di 750 m s.l.m., in corrispondenza dell'attraversamento del rilievo di Cresta del Gallo, per poi ridursi a coperture di 150 m, con topografia di 550 m s.l.m., nel tratto finale. Per lo scavo è stato impiegato il sistema meccanizzato TBM-EPB (Tunnel Boring Machine) con posa dell'anello in conci prefabbricati e sezione di scavo pari a 4.500 mm. La fresa meccanica a piena sezione impiegata aveva una penetrazione pari a 12,5-15,0 mm/giro, garantendo una penetrazione media teorica pari a 3,1 m/h.

Dopo le varie fasi di progettazione (ultima revisione del progetto esecutivo nel 2012) ed esecuzione dei lavori (completati nel dicembre 2018), il collaudo finale è avvenuto nel luglio 2019 ad opera del Commissario Delegato ex OPCM n°3858 del 12.03.2010 (<https://sites.google.com/site/pavoncellibis/home>), in qualità di Commissario Straordinario per le opere d'integrazione dell'acquedotto del Sele - Calore Galleria di Valico Caposele - Conza detta Pavoncelli Bis.

### 3. Inquadramento geologico

La Galleria Pavoncelli bis attraversa il sottosuolo di un settore chiave dell'Appennino meridionale, delimitato ad ovest dal bordo settentrionale dei Monti Picentini e ad est da Monte Marzano, a nord dall'ampia valle del fiume Ofanto e a sud dall'alta valle del fiume Sele (Fig. 1).

I numerosi Autori (Selli, 1957, 1962; Ogniben, 1969; Ippolito et al., 1973; D'argenio et al., 1973, 1975; Mostardini & Merlini, 1986; Sgrosso, 1988, 1998; Pescatore et al., 1988; Patacca & Scandone, 1989, 2001; Di Nocera et al., 2006; Bonardi et al., 2009; Mazzoli et al., 2006, 2008, 2014; Matano et al., 2014; Critelli, 2018) che hanno studiato il settore meridionale della catena appenninica hanno elaborato differenti interpretazioni del suo assetto tettonico e della geometria dei suoi elementi strutturali, mentre è sempre stato condiviso il generale senso di trasporto tettonico verso i quadranti orientali. In generale, l'assetto strutturale dell'Appennino meridionale può essere inquadrato come il risultato di una tettonica caratterizzata da sovrascorrimenti di importanza regionale, il cui orizzonte di scollamento basale diventa progressivamente più superficiale procedendo dalle aree interne della catena verso l'avampaese apulo, e da ulteriori sovrascorrimenti più recenti e profondi che, propagandosi verso l'alto, troncano i preesistenti sovrascorrimenti più superficiali secondo un meccanismo di *breaching* (sensu Butler, 1987), che coinvolgono l'avampaese apulo strutturato alla base della catena (Di Nocera et al., 2006).

Nelle aree dell'Appennino campano-lucano la ricostruzione dell'assetto stratigrafico-strutturale si presenta molto problematica e sono disponibili in letteratura differenti modelli paleogeografici e palinspastici di epoca pre-tettonica (D'Argenio, 1988), basati prevalentemente sulle differenze nella ricostruzione stratigrafica di alcune successioni di bacino pelagico e nell'attribuzione cronologica di alcune successioni mioceniche di *foredeep* e *thrust-top basins*.

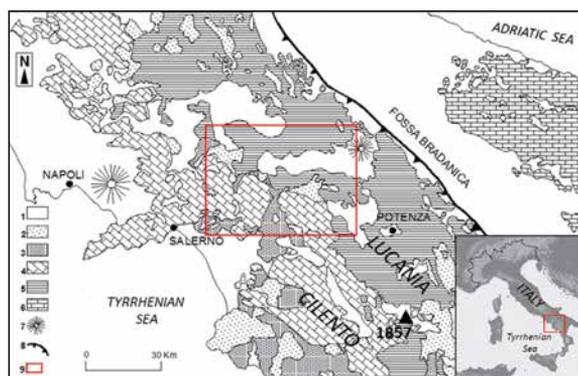
Nel presente studio si fa riferimento al modello paleogeografico pre-orogénico proposto in Pescatore et al. (1996, 2000), Di Nocera et al. (2006) e Critelli (2018). Tale modello generale, riferito al settore campano-lucano della catena, prevede schematicamente quattro unità paleogeografiche principali (Fig. 1):

**Bacino Oceanico Lucano**, in cui si sono deposte le successioni riferite al Complesso Liguride, alle Unità con "terreni ad affinità sicilide" (Bonardi et alii, 1988a) e al Complesso Sicilide (Ogniben, 1969).

**Piattaforma carbonatica sud-appenninica**, che separava parzialmente il Bacino Liguride da quello Lagonegrese-Molisano; la successione mesozoica è costituita da depositi carbonatici in facies di retroscogliera, cui si associano depositi di scogliera e di transizione (D'Argenio, 1966, 1974; Carannante et alii, 1994) con chiare evidenze di emersione ed annegamento della piattaforma.

**Bacino Lagonegrese-Molisano**, cui sono ascrivibili tre principali unità tettono-stratigrafiche, che si riferiscono al margine occidentale (settori interni), alle zone assiali ed alle aree più esterne del bacino (Pescatore et alii, 1988; Dazzaro et alii, 1988). Ai **settori interni** del Bacino Lagonegrese-Molisano sono riferite l'Unità Lagonegro II (Scandone, 1967; 1972), l'Unità lagonegrese di Monte Arioso (Pescatore et alii, 1988), l'Unità di Frigento (Di Nocera et alii, 2002) e l'Unità del Sannio (Dazzaro et alii, 1988; Pescatore et alii, 1996). Le successioni sedimentarie comprendono i prodotti della sedimentazione avvenuta lungo il margine occidentale del bacino, caratterizzate da depositi calcareo-clastici, provenienti dal disfacimento del margine della Piattaforma sud-appenninica, intercalati a sedimenti emipelagici silico-marnosi. Ai **settori assiali** sono riferite l'Unità Lagonegro I (Scandone, 1967; 1972), l'Unità di Groppa d'Anzi (Pescatore et alii, 1988) e l'Unità del Fortore (Dazzaro et alii, 1988; Pescatore et alii, 1996; 2000). Le successioni riferite ai **settori esterni** comprendono l'Unità di Campomaggiore, l'Unità della Daunia, l'Unità del Vallone del Toro (Pescatore et alii, 1988; Pescatore & Senatore, 1986; Basso et alii, 2001, 2002), caratterizzate da depositi argilloso-marnosi con intercalazioni calcareo clastiche provenienti dal margine interno della Piattaforma Apula.

**Piattaforma Apula**, che si compone di depositi evaporitici del Trias superiore (Anidridi di Burano), cui seguono depositi carbonatici mesozoici e cenozoici di ambiente neritico (Pavan & Pirini, 1966; Ricchetti et alii, 1988).



**Fig. 1** - Carta geologica schematica dell'Appennino meridionale con ubicazione dell'area studiata (riquadro rosso). LEGENDA: 1) Depositi pliocenici e quaternari; 2) Depositi sinorogénici miocenici; 3) Unità Sicilide e Liguride; 4) Unità della piattaforma carbonatica sud-appenninica; 5) Unità del Bacino Lagonegrese-Molisano; 6) Unità Apula; 7) Edifici vulcanici; 8) Limite dei sovrascorrimenti sepolti della catena.

L'attribuzione paleogeografica di alcune successioni bacinali, quali le successioni delle unità "lagonegresi", "sicilidi" e "sannitiche" e le successioni ad esse assimilate, è sempre risultata controversa in letteratura. Le successioni riferite all'Unità Sicilide (D'Argenio et alii, 1973; Ogniben, 1969),

costituite da Gruppo delle Argille Variegata (Argille Varicolori inferiori, Membro Sant'Arcangelo, Argille Varicolori superiori), Tufiti di Tusa e Arenarie di Corleto, si sarebbero deposte, secondo alcuni Autori, in posizione *interna* e sarebbero legate allo stesso dominio paleogeografico delle Unità Liguridi di pertinenza oceanica. Nell'Appennino meridionale, tali successioni non evolvono in continuità di sedimentazione al Flysch Numidico, in quanto si sono deformate prima dell'inizio della sedimentazione numidica. Unità simili e coeve alla successione sicilide, riferite al settore assiale del Bacino di Lagonegro (Mostardini & Merlini, 1986; Pescatore et alii, 1988), sono costituite dalla Formazioni delle Argille Varicolori e dalla Formazione di Corleto Peticara, entrambe passanti verso l'alto alla Formazione delle Tufiti di Tusa e/o alla Formazione Paola Doce, e al Flysch Numidico. Per le unità sannitiche, infine, si veda l'ampia discussione sulla loro posizione strutturale e paleogeografica in Di Nocera et alii (2002).

#### 4. Risultati dei rilievi geologici, delle analisi e delle indagini eseguite

##### 4.1. Rilevamento geologico di superficie

Nell'area compresa tra Caposele e Conza della Campania, un nuovo rilevamento geologico di dettaglio alla scala 1:5000 (Fig.2) è stato eseguito in una fascia di territorio, ampia oltre 2 km in larghezza, in corrispondenza del tracciato della galleria Pavoncelli bis, finalizzato all'individuazione delle unità litostratigrafiche affioranti ed alla definizione del loro assetto geometrico e strutturale. Come riferimento cartografico si è utilizzato il Foglio CARG 450 "S. Angelo dei Lombardi" (Servizio Geologico d'Italia, 2016; Pescatore & Pinto, 2016).

Le unità litostratigrafiche individuate sono state riferite al Gruppo delle Argille Variegata, all'Unità dei Monti Picentini ed all'Unità di Frigento, oltre che a successioni sinorogeniche del Miocene, al *Supersintema di Ariano Irpino* e a depositi quaternari. Al fine di riconoscere in maniera univoca l'appartenenza formazionale delle unità arenacee incontrate durante le operazioni di scavo in galleria e riconosciute in superficie, sono stati utilizzati anche i risultati di analisi composizionali mineralogico-petrografiche. Sono stati inoltre cartografati numerosi elementi tettonici, quali faglie e sovrascorrimenti.

Il Gruppo delle Argille Variegata, riferibile all'unità tettonica strutturalmente più elevata (Unità Sicilide), è formata nel settore in esame dalla *Formazione di Monte Sant'Arcangelo* (FMS) e dalla formazione delle Argille Varicolori Superiori (ALV), passanti nella parte alta ad un'unità arenacea del Miocene inferiore, riferibile alle *Arenarie di Corleto-Albanella* (Ar-COR).

La *Formazione di Monte Sant'Arcangelo* (FMS) risulta costituita in affioramento da un'associazione litologica

prevalentemente calcareo-marnosa-argillosa. Si ritrovano, infatti, alternanze di calcari marnosi in strati spessi, di colore giallo chiaro o crema, e massivi o caratterizzati da laminazione da piano-parallela a ondulata e convoluta, calcilutiti e calcareniti fini di colore bianco o giallastro in strati sottili e medi, marne in strati spessi di colore bianco o rosa con fratturazione discontinua, argille marnose di colore grigio-verde in strati sottili e medi, e argille grigie. La porzione più calcarea (Fig.3) è spesso affiorante lungo piccoli crinali e risulta costituita da calcilutiti giallo scuro, del tipo "*pietra paesina*", con intercalazioni di marne argillose giallastre, verdastre ed azzurre in strati medi e spessi, a frattura prismatica. La porzione prevalentemente pelitica spesso è sub-affiorante e dà luogo a fenomeni franosi lungo i versanti. Lo spessore complessivo della formazione è di circa 450 m. Il limite stratigrafico inferiore della formazione non è osservabile, mentre passa superiormente, con rapporto latero-verticale, alle Argille Varicolori Superiori (ALV). L'ambiente deposizionale è marino pelagico con apporti torbiditici. L'età della successione è riferibile all'Eocene medio - Oligocene superiore (Pescatore & Pinto, 2016).

L'unità delle *Argille Varicolori Superiori* (ALV) è formata da una successione prevalentemente pelitica, che generalmente si presenta sub-affiorante o disorganizzata e in assetto caotico, con intercalazioni calcaree e marnose, spesse 3-4-m, di natura torbiditica e di areniti a grana fine e siltiti massive di colore marrone e grigio scuro (Fig. 4). I litotipi risultano intensamente tettonizzati, come dimostra la notevole fissilità delle marne e la scagliosità delle argille. In corrispondenza di Sella di Conza, nell'area al Valico Appenninico, i terreni ALV sono costituiti da argille ed argilliti policrome rosse, verdi e violacee, argilliti e marne argillose grigio-azzurrognole, in strati medi e sottili, comunemente con intercalazioni di vari pacchi di strati litoidi eterogenei e discontinui da poco a mediamente spessi, costituiti da calciruditi grigio scuro ad alveoline e nummuliti, fratturate, ricche di vene calcitiche e, in alcuni casi, ricristallizzati; localmente si alternano pacchi decametrici di strati di marne calcaree compatte di colore grigio-avana o giallognolo con laminazione piano-parallela sfaldabile tipo "*marna fogliarina*" (Fig. 5). Nell'ambito dell'unità è stata distinta una *litofacies calcarea* (ALVc) formata prevalentemente da strati e banchi litoidi (Fig. 6), costituiti da calciruditi grigie ad alveoline e nummuliti ricche di vene calcitiche, calcari ricristallizzati biancastri, calcareniti e calcilutiti di colore grigio chiaro, e marne calcaree compatte di colore grigio-avana o giallognolo con laminazione piano-parallela sfaldabile tipo "*marna fogliarina*". L'assetto caotico e le cattive condizioni di esposizione di ALV rendono poco chiari i rapporti stratigrafici con FMS, che si suppongono di tipo latero-verticale. L'ambiente deposizionale è di bacino marino da profondo a marginale. Lo spessore stimato è di circa 150 m. Si presume un'età dell'Oligocene-Miocene inferiore (Pescatore & Pinto, 2016).

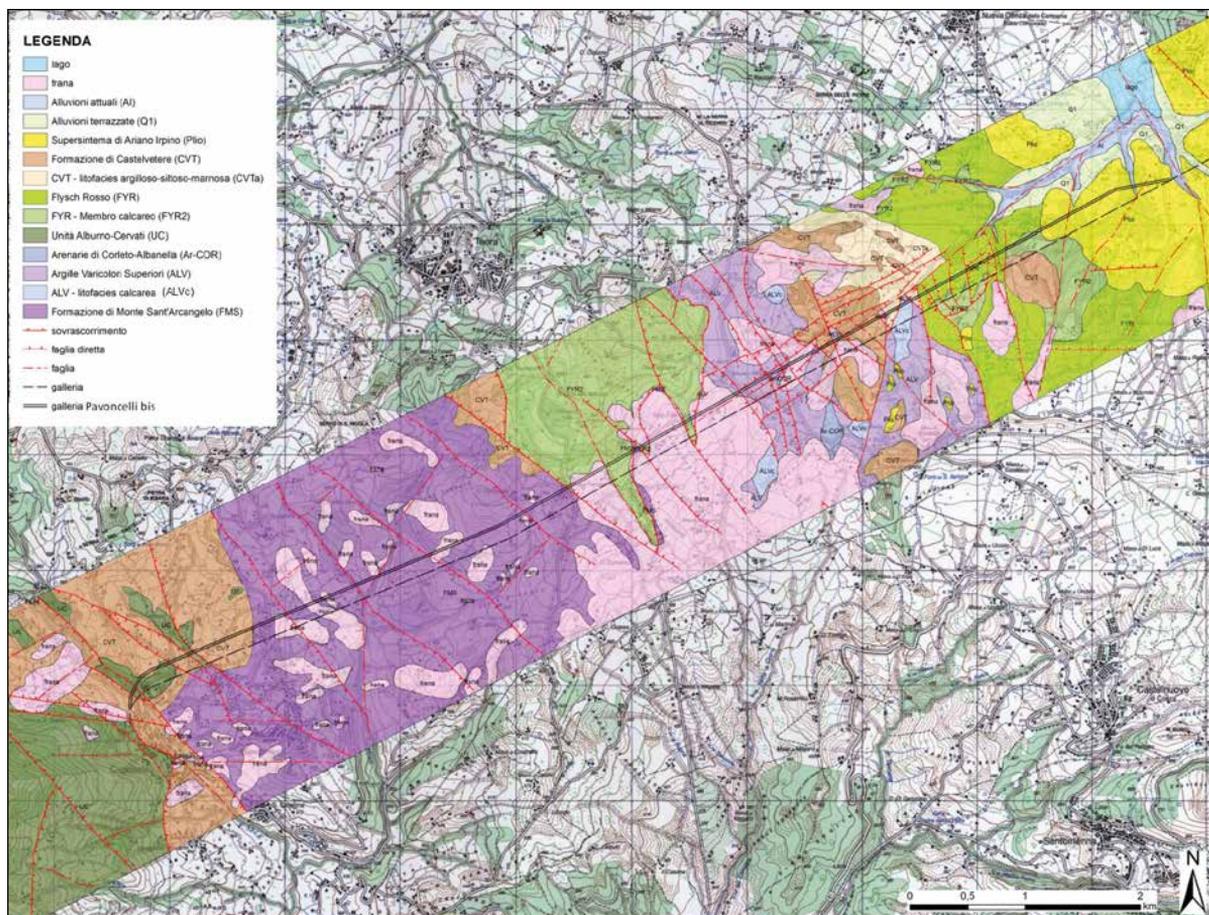


Fig. 2 – Carta geologica di dettaglio dell'area di studio.



Fig. 3 - Piccolo affioramento di calciliti e marne calcaree passanti verso il basso a marne argillose, Formazione di Monte Sant'Arcangelo (FMS).

Verso l'alto l'unità ALV passa progressivamente ad alternanze di arenarie quarzolitiche di natura torbiditica di colore grigio e marrone, in strati da sottili a spessi, siltiti ed argille grigie e verdi in strati medi e spessi, che sono state

attribuite alle unità delle **Arenarie di Corleto-Albanella** (Ar-Cor). Lo spessore dell'unità in affioramento è stimabile in poche decine di metri, ma in letteratura sono riportati spessori superiori ai 100 m. L'età della formazione è riferibile al Miocene inferiore. Le analisi petrografiche eseguite su alcuni campioni di arenarie hanno definito una composizione quarzolitica, tipica delle successioni arenacee ubicate nella parte sommitale dell'Unità Sicilide sulle Argille Varicolori Superiori (Fig. 7 e 8).

L'**Unità dei Monti Picentini** (UC), costituita da una successione carbonatica di ambiente peritidale sia di bassa sia di alta energia, è riferibile all'unità tettonica strutturalmente intermedia (Unità carbonatica Appenninica) costituita dai depositi carbonatici mesozoico-terziari della piattaforma carbonatica appenninica.

Nei dintorni dell'abitato di Caposele affiorano successioni mesozoico-terziarie calcaree e calcareo-dolomitiche, costituite da calcareniti detritiche di colore grigio chiaro (grainstone e packstone) in livelli stratiformi molto spessi e rare calcareniti con livelli di stromatoliti e calciliti grigie



**Fig. 4** - Alternanza di areniti e marne calcaree nelle Argille Varicolori Superiori (ALV).



**Fig. 5** - Affioramento di marne tipo "fogliarina" nelle Argille Varicolori Superiori (ALV).



**Fig. 6** - Calcareniti e calcilutiti in banchi e strati fratturati nelle Argille Varicolori Superiori a litofacies calcarea (ALVc).



**Fig. 7** - Affioramento di Areniti delle Formazioni di Corleto/Albanella (ACL/ABA).



**Fig. 8** - Campione delle arenarie di Corleto-Albanella utilizzato per le analisi petrografiche.

spatizzate, che si intercalano a calcari oncolitici, calcareniti e calcilutiti scure. Da un punto di vista litostratigrafico esse sono riferite alle unità dei *Calcari e calcari dolomitici* (CLU), *Calcari con Cladocoropsis e Clypeina* (CCM), *Calcari con Requienie e Gasteropodi* (CRQ) e *Calcari bio-litoclastici con Rudiste* (CBI) (Servizio Geologico d'Italia, 2016; Pescatore & Pinto, 2016). L'ambiente di sedimentazione è riferibile ad una piattaforma tidale prossima a barre marginali. Nella gran parte degli affioramenti è prevalente uno stato di forte tettonizzazione e la dolomitizzazione della roccia. Lo spessore in affioramento è stimato di circa 700 m; il limite inferiore stratigrafico non è affiorante. L'età è compresa tra il Giurassico inferiore e il Cretacico inferiore.

L'**Unità di Frigento**, (UF) rappresentata da successioni calcareo-clastiche mesozoico-cenozoiche del Bacino Lagonegrese di ambiente pelagico o di scarpata (Matano & Di Nocera, 2001), è riferibile all'unità tettonica strutturalmente inferiore. Essa è rappresentata dalla formazione del **Flysch Rosso** (FYR), formata da alternanze di calcareniti, talora ricche di macroforaminiferi (principalmente alveoline e nummuliti), calcilutiti, marne calcaree e calcari marnosi con intercalazioni di marne argillose ed argilliti rossastre. I terreni dell'unità FYR sono ampiamente distribuiti nei settori dello spartiacque tra l'alta valle del fiume Ofanto e il fiume Sele. Localmente (ad es. al km 68 della SS n.7), negli strati calcarei a grana fine, si rinvengono liste e noduli di selce di colore rosso scuro e nerastro. In loc. Laghi la successione calcarenitica presenta al suo interno clasti di quarzo arrotondati e sottili straterelli di quarzareniti, indicativi di una sequenza "pre-numidica". Nell'ambito della formazione è stato distinto un **membro calcareo** (FYR<sub>2</sub>) affiorante prevalentemente in loc. Cresta del Gallo, dove costituisce un lembo relitto del retroscorrimento tettonico regionale delle Unità Lagonegresi sulle Unità Sicilidi. Il membro è costituito da calcari clastici grigiastri e biancastri, in strati e banchi massivi, con geometria irregolare e diffuse fratture verticali (Fig. 9).

In particolare la successione è formata da banchi e strati spessi di *rudstone* in matrice di *packstone* e *grainstone* bio-litoclastici con stiloliti e tipica stratificazione ondulata lenticolare intersecata da sistemi di diaclasi subverticali, calcari cristallini saccaroidi biancastri e grigio-avana con vene spatiche; subordinatamente si intercalano strati calciruditici a frammenti di rudiste con stratificazione irregolare, *grainstone* grigio-avana ad intraclasti e peloidi a luoghi con macroforaminiferi e frammenti di calcari di scogliera (Pescatore & Pinto, 2016). I banchi di spessore metrico di calcari massicci e breccie calcaree mostrano amalgamazione erosiva interna e poggiano a luoghi con basi erosive su orizzonti argilloso-marnosi grigiastri. L'ambiente di deposizione è riferibile ad una scarpata continentale carbonatica al passaggio a bacino pelagico. Lo spessore in affioramento non supera i 200 m; il limite inferiore non è affiorante. L'età nel complesso è compresa nell'intervallo Cretaceo inferiore-Miocene inferiore.

Con limiti non conformi e con caratteri sinorogenici seguono i depositi di *wedge-top basin* sviluppati nell'intervallo temporale Miocene medio-superiore. Si tratta di successioni silicoclastiche, e più raramente calcareo-silicoclastiche, prevalentemente torbiditiche, che poggiano in discordanza sui terreni dell'Unità Sicilide, dell'Unità della Piattaforma appenninica, dell'Unità di Frigento.



**Fig. 9** - Cava di calciruditici e calcareniti del membro calcareo della formazione del Flysch Rosso (FYR2).

La **Formazione di Castelvetere** (CVT) affiora estesamente a nord di Caposele e più ad est tra le loc. Varco di Conza e Bosco di Conza. Essa è formata da banchi e strati di arenarie arcosiche grigio-avana e marroni a grana medio-grossolana, intercalate a orizzonti argillosi con olistoliti calcarei, e da conglomerati, arenarie e talora conglomerati matrice-sostenuti con grossi ciottoli e clasti pelitici a struttura massiva (Fig. 10 e 11). I ciottoli sono sub-arrotondati e poligenici, costituiti da marne calcaree biancastre, rocce plutoniche, metasedimentarie ed arenite. Le arenarie si presentano massive o laminare nella parte alta, con laminazioni piane parallele ed oblique, e mostrano all'osservazione clasti quarzosi, feldspatici ed abbondante detrito

con frammenti litici a grana media e fine; risultano di colore grigio scuro o grigio-avana, al taglio fresco, e grigio-azzurrognolo o giallastro-arancio quando alterate (Fig. 12 e 13). Nell'ambito della formazione è stata riconosciuta una **litofacies argilloso-siltoso-marnosa** (CVTa), affiorante in loc. Tre Valloni. Essa è costituita in prevalenza da argille e marne argillose con intercalate marne ed arenarie quarzoso-feldspatiche, quarzoso-litiche e micacee e talora livelli calcarenitici. Lo spessore stimato di CVT è di circa 200 m. La Formazione di Castelvetere fa parte di un sistema torbiditico, a cui si intercalano cospicui depositi di varie dimensioni di olistoliti carbonatici e olistostromi, composti in prevalenza da blocchi afferenti ai terreni dell'Unità Sicilide e della Piattaforma carbonatica appenninica. Le analisi di carattere petrografico sui campioni prelevati indicano per le arenarie di CVT una composizione quarzoso-feldspatica derivante dall'erosione di rocce cristalline plutoniche e metamorfiche. Il limite inferiore è erosivo con discordanza angolare con FMS, ALV, FYE e UC. L'età è Tortoniano superiore-Messiniano inferiore.



**Fig. 10** - Campione delle arenarie della Formazione di Castelvetere (CVT) utilizzato per le analisi petrografiche.



**Fig. 11** - Arenarie grossolane della Formazione di Castelvetere (CVT).



Fig. 12 - Arenarie grossolane della Formazione di Castelvetere (CVT).



Fig. 13 - Arenarie a grana medio-fine della Formazione di Castelvetere (CVT).

Le unità plioceniche affioranti sono riferibili al **Supersintema di Ariano Irpino** (Plio), che si è sviluppato in un intervallo temporale compreso tra il Pliocene inferiore p.p. e il Pliocene superiore p.p. In particolare, nell'area di studio, le successioni plioceniche sono state attribuite alla *litofacies arenaceo-sabbiosa* del **Sintema di Ruvo del Monte** (RVM) (Servizio Geologico d'Italia, 2016). Questa litofacies è costituita da arenarie fini, sabbie, sabbie argillose, silt gialli stratificati e, subordinatamente, da arenarie avana medio-grossolane, generalmente in strati medi, irregolari e lenticolari; talora è visibile una gradazione diretta. Nella parte bassa sono frequenti le intercalazioni di argille, marne siltose, marne sabbiose grigie o verdastre in lenti, e di calcareniti grigie organogene in strati da sottili a spessi; le lenti conglomeratiche divengono più frequenti verso l'alto. Nei livelli sabbiosi si rinvencono frammenti di molluschi e concrezioni calcaree puntuali. Tra i macrofossili spiccano abbondanti resti di grossi lamellibranchi (*Pecten*, *Ostrea*), sia in gusci interi che in frammenti (Pescatore & Pinto, 2016). Nel dettaglio, lungo il settore settentrionale

della Sella di Conza, sono presenti sabbie arrossate e livelli calcarenitici bioclastici poco cementati, mentre più ad est, nell'area dell'abitato di Conza, affiorano diffusamente successioni sabbioso-pelittiche di colore grigio-giallastro. Le **unità quaternarie** (Q1) sono molto diffuse ai margini del lago artificiale di Conza, dove è presente il **Sintema di Conza della Campania** (CZC), ed in particolare il **Subsintema del Torrente Sarda** (CZC<sub>3</sub>) di età Pleistocene superiore-Olocene p.p. (Servizio Geologico d'Italia, 2016). La successione è formata da un'alternanza di ghiaie, limi e sabbie di colore giallo pallido, limi argillosi grigio chiaro e limi brunastri, con rare intercalazioni di sabbie calcaree chiare e lenti di ghiaie eterogenee ed incoerenti, con debole cementazione e ricche in matrice fino a paraconglomerati. Inoltre, sono presenti argille siltose in strati da sottili a medi. I depositi di questa unità si presentano sospesi e terrazzati di qualche metro rispetto all'attuale area golennale del Torrente Sarda, un tributario di sinistra del Fiume Ofanto. Lo spessore è di circa 10 m. Il limite inferiore è modellato sui depositi pre-quaternari, mentre quello superiore coincide con la superficie topografica o localmente vede il passaggio erosivo a depositi attuali ubiquitari, alluvionali o eluvio-colluviali.

I **depositi alluvionali attuali** (A1) sono formati da ghiaie poligeniche ed eterometriche a matrice sabbioso-limosa con lenti e strati decimetrici di sabbie limose e limi argillificati e da sabbie e ghiaie di golena; essi affiorano lungo gli alvei attuali dei torrenti il deposito, dei corsi d'acqua principali e della loro piana di esondazione. Lo spessore varia da 2 a 5 m.

I **depositi di frana** (a<sub>1</sub>) sono costituiti da masse argillose o argilloso-marnose destrutturate con frammenti litoidi o blocchi di calcilutiti, calcareniti ed arenarie, appartenenti a terreni originariamente stratificati. Lo spessore è variabile da pochi metri fino a circa 5 m. Nelle aree studiate sono stati riconosciuti estesi e profondi fenomeni franosi, che si sviluppano nelle unità prevalentemente argillose con superfici di scorrimento che raggiungono profondità di varie decine di metri. La più vasta area in frana è rappresentata da un ampio e complesso sistema franoso con cinematismo di scorrimento rotazionale-colata, ubicata ad est di Caposele, nella località Buoninventre, che si è in parte riattivato a seguito del terremoto dell'Irpinia del 1980. Il sistema franoso si sviluppa su di un'area di circa 8 km<sup>2</sup> e coinvolge buona parte del versante dalla località Cresta del Gallo (750 m s.l.m.) fino al corso del T. Casolare (300 m s.l.m.), e coinvolge i terreni del Gruppo delle Argille Varicolori. Altri fenomeni franosi, con cinematismi simili ma di minore estensione, sono presenti lungo i principali valloni dell'area di studio (Budetta, 1983).

Le associazioni di strutture tettoniche individuate nell'area di studio individuano varie generazioni di strutture prevalentemente compressive (sovrascorrimenti con piani a

basso e ad alto angolo), che sono a loro volta deformate da strutture plicative di età pliocenica e dislocate da strutture tensili del Pliocene-Pleistocene (faglie dirette e trascorrenti ad alto angolo). I principali sovrascorrimenti delimitano i contatti tra FYR/FYR2 e FMS/ALV.

La morfostruttura carbonatica dei Monti Picentini è bordata, nel settore di Caposele, da imponenti scarpate di faglia diretta che ribassa verso NE e la mettono in contatto laterale con le successioni bacinali meso-cenozoiche (Unità Sicilide e Unità di Frigento). Le faglie bordiere fanno parte dei sistemi di faglie normali orientati NO-SE, NNE-SSO e N-S che costituiscono i principali trend tettonici quaternari distensivi dell'area.

Gli elementi tettonici distensivi ad alto angolo, quali faglie dirette e trascorrenti, sono maggiormente evidenti grazie ai piani di dislocazione, osservabili lungo i crinali calcarei, come ad esempio in località Cresta del Gallo a ridosso del contatto di sovrascorrimento tettonico tra l'unità calcarea FYR e l'unità pelitico-calcarea FMS. Le evidenze morfotettoniche lungo le superfici morfologiche di spianamento sommitale sono conservate in prevalenza laddove tali superfici sono modellate in rocce più conservative, come ad esempio i livelli calcareo-clastici del Flysch Rosso, nei pressi di località Cresta del Gallo, oppure quelli calcareo-marnosi della Formazione di Monte Sant'Arcangelo, in prossimità dell'abitato di Materdomini.

Gli andamenti regolari lineari del reticolo idrografico consentono di riconoscere la presenza di faglie recenti nelle aree di affioramento delle unità calcareo-pelitiche, pelitiche ed arenacee.

#### 4.2. Stratigrafie dei sondaggi geognostici

Tra i numerosi sondaggi di archivio disponibili eseguiti a partire dagli anni '70, si è fatto riferimento ai tre sondaggi SV1, SV2 e SV3 effettuati per il progetto esecutivo nel 2012 ed al sondaggio SB effettuato nel 2018 nel corso del nostro incarico (Tab. 1). In Fig. 14 sono illustrate le stratigrafie schematiche del sondaggio SB e dei tre sondaggi di archivio eseguiti per il progetto esecutivo (SV1, SV2 e SV3). Le stratigrafie dei sondaggi di archivio e l'analisi diretta del carotaggio SB hanno consentito di ricostruire, lungo le verticali indagate, le caratteristiche delle unità litostratigrafiche e la posizione in profondità dei contatti stratigrafici e tettonici tra di esse. In alcuni sondaggi, grazie alla correlazione con le descrizioni di scavo, della galleria, è stato possibile distinguere nell'unità FMS quattro diverse litofacies largamente eteropiche, caratterizzate da associazioni litologiche diverse, quali la litofacies argillosa (FMS-arg), la litofacies argilloso-marnosa (FMS-arg-ma), la litofacies marnoso-argillosa (FMS-ma-arg), e la litofacies calcareo-marnosa (FMS-cal-ma).

SONDAGGIO	DESCRIZIONE LITOLOGICA	UNITÀ
SV1	0-11m, argilla limosa; 11-197m argilla marnosa, marna, m. calcarea, calcare marnoso, rara siltite; 197-199 m argille varicolori; 199-350 m, id.	ALV (0-11 m); FMS cal-ma (11-197 m); ALV (197-350 m)
SV2	0-39 m, argille e marne; 39-100 m, marne argillose, marne calcaree e calcari marnosi	FMS ma-arg; FMS cal-ma (0-100 m)
SV3	0-100 m, argille rossastre e calcari	FYR (0-100 m)
SB	0-50 m a distruzione di nucleo; 50- 107 m argille, arenarie; da 107-130 m, arenarie, calcareniti, argille rossastre	CVT (0-130 m)

Tab. 1 – Sintesi delle stratigrafie dei sondaggi principali e loro interpretazione in unità geologiche.

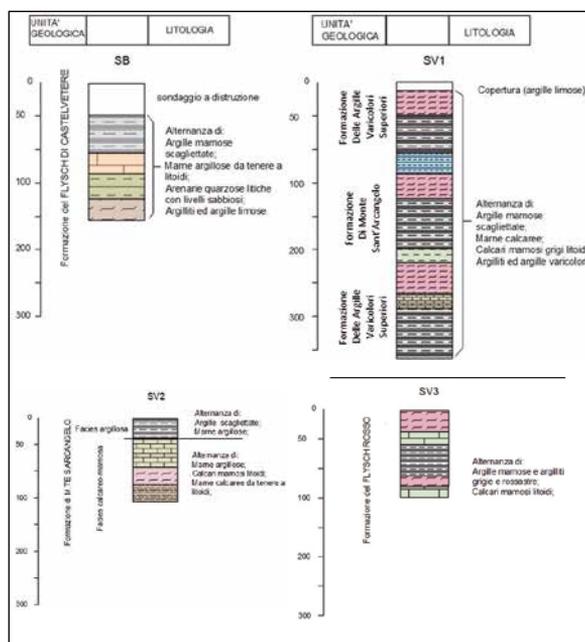


Fig. 14 - Sintesi delle stratigrafie dei sondaggi e correlazione alle unità geologiche.

#### 4.3. Risultati delle Analisi composizionali delle arenarie

Sono stati analizzati dal punto di vista composizionale mineralogico-petrografico n. 23 campioni, di cui n. 11 campioni arenacei prelevati in superficie (Fig. 15), n. 10 campioni arenacei e n. 2 campioni di argilliti e siltiti provenienti dai fronti di scavo in galleria in corrispondenza della pk 6100 m (Fig. 16).

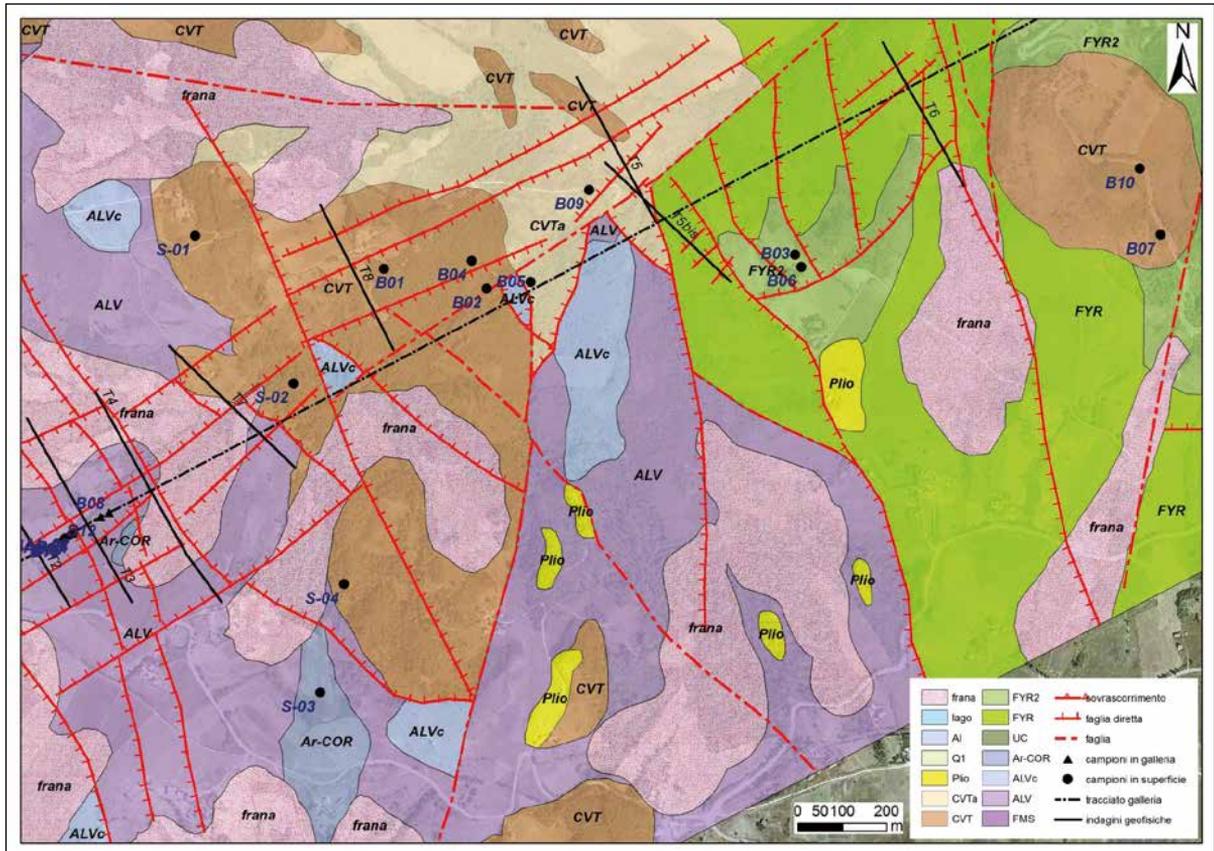


Fig. 15 – Ubicazione dei siti di prelievo dei campioni per le analisi petrografiche; riquadro nero: area dei campioni raccolti in galleria (vedi Fig. 16).

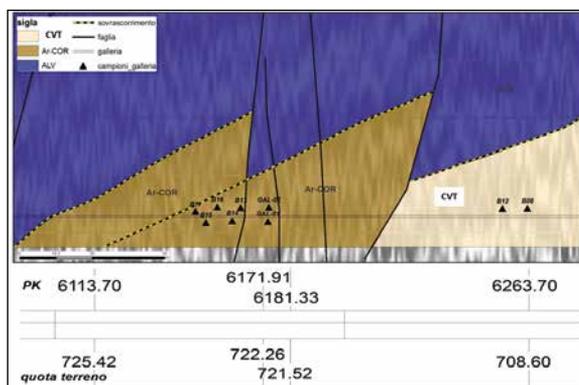


Fig. 16 – Ubicazioni lungo il profilo geologico dei campioni prelevati in galleria.

I risultati delle analisi sono illustrati in Tab. 2, e consentono di fare correlazioni tra le unità arenacee incontrate in galleria e quelle affioranti. Alcune arenarie presentano caratteri composizionali quarzolitici, tipici delle unità arenacee generalmente presenti nella parte alta della

successione stratigrafica delle Unità Sicilidi, al di sopra della formazione delle Argille Varicolori Superiori (ALV), mentre altre arenarie hanno composizione quarzoso-feldspatica tipica delle unità arenacee sinorogeniche del Miocene medio-superiore.

I risultati delle arenarie analizzate sono stati confrontati con i dati composizionali di letteratura delle formazioni dell'Appennino meridionale (e.g. Critelli et al., 2017; Critelli, 2018) per accertare la loro attribuzione. I dati composizionali permettono di inquadrare i campioni analizzati in tre distinte popolazioni composizionali. I 21 campioni di arenarie si distribuiscono in una popolazione composizionale di arenarie quarzolitiche e una popolazione di arenarie quarzoso-feldspatiche (Fig. 17).

I tre campioni di calcareniti e areniti ibride (B-03, B-06 e B-09), denominate in Fig. 17 come pre-Numidico, sono costituiti da calcareniti ad altissimo contenuto di carbonati intrabacinali di origine bioclastica (Fig. 18) e hanno caratteri composizionali comparabili con le successioni calcarenitiche (Calcareniti pre-Numidiche) del Miocene inferiore, sovrastanti il Flysch Rosso e che precedono le Quarzareniti Numidiche nel Bacino Lagonegrese (Pescatore et al., 1988;

CAMPIONE	DESCRIZIONE LITOLOGIA	PETROGRAFIA	UNITA' DI ATTRIBUZIONE
G-01	arenite a grana medio-fine molto compatta e litoide di colore grigio scuro	Arenaria quarzolitica	Arenarie di Corleto-Albanella
G-02	siltite litoide e argillite	Arenaria quarzolitica	Arenarie di Corleto-Albanella
S-01	arenite a grana grossolana poco litificata	Arenaria quarzoso-feldspatica	Formazione di Castelvetero
S-02	arenite a grana grossolana poco litificata	Arenaria quarzoso-feldspatica	Flysch di Castelvetero
S-03	arenite compatta bruno-giallastra a grana media	Arenaria quarzolitica	Arenarie di Corleto-Albanella
S-04	arenite a grana grossolana poco litificata	Arenaria quarzoso-feldspatica	Formazione di Castelvetero
B-01	arenite a grana media molto compatta e litoide di colore grigio scuro	Arenaria quarzoso-feldspatica	Formazione di Castelvetero
B-02	arenite a grana media molto compatta e litoide di colore grigio scuro	Arenaria quarzoso-feldspatica	Formazione di Castelvetero
B-03	calcarenite a grana medio-fina con clasti silicatici	Biocalcarenite	Flysch Rosso, successione pre-numidica
B-04	arenite a grana media molto compatta e litoide di colore grigio scuro	Arenaria quarzoso-feldspatica	Formazione di Castelvetero
B-05	arenite compatta bruno-giallastra a grana media	Arenaria quarzoso-feldspatica	Formazione di Castelvetero
B-06	calcarenite a grana medio-fina con clasti silicatici	Biocalcarenite	Flysch Rosso, successione pre-numidica
B-07	arenite compatta bruno-giallastra a grana media	Arenaria quarzoso-feldspatica	Formazione di Castelvetero
B-08	arenite compatta bruno-giallastra a grana media	Arenaria quarzoso-feldspatica	Formazione di Castelvetero
B-09	calcarenite a grana medio-fina con clasti silicatici	Biocalcarenite	Flysch Rosso, successione pre-numidica
B-10	arenite compatta bruno-giallastra a grana media	Arenaria quarzoso-feldspatica	Formazione di Castelvetero
B-11	arenaria micacea a grana media di colore grigiastro	Arenaria quarzolitica	Arenarie di Corleto-Albanella
B-12	arenite compatta bruno-giallastra a grana media	Arenaria quarzoso-feldspatica	Formazione di Castelvetero
B-13	arenaria micacea a grana media di colore grigiastro	Arenaria quarzolitica	Arenarie di Corleto-Albanella
B-14	arenaria micacea a grana media di colore grigiastro	Arenaria quarzolitica	Arenarie di Corleto-Albanella
B-15	arenaria micacea a grana media di colore grigiastro	Arenaria quarzolitica	Arenarie di Corleto-Albanella
B-15 bis	argillite leggermente siltosa di colore grigiastro associata alle arenarie B-15	Pelite	Arenarie di Corleto-Albanella
B-16	argillite leggermente siltosa di colore grigiastro	Pelite	Arenarie di Corleto-Albanella

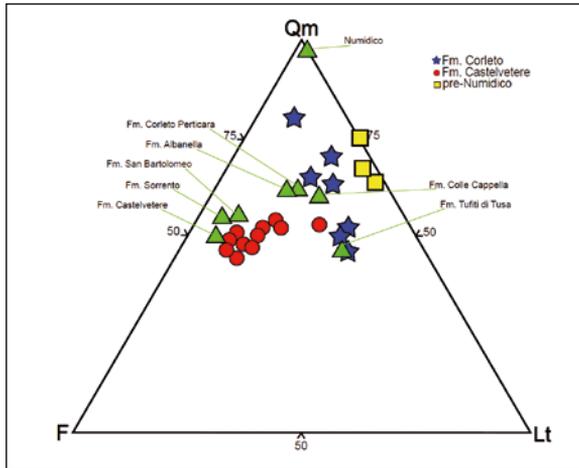
**Tab. 2** – Sintesi delle caratteristiche dei campioni prelevati per le analisi petrografiche.

Patacca et al., 1992).

Le arenarie quarzolitiche (campioni G-01, G-02, S-03, B-11, B-13, B-14 e B-15), caratterizzate da abbondante quarzo e frammenti litici prevalentemente di filladi e scisti a grana fine, frammenti vulcanici, ofiolitiferi e sedimentari per lo più carbonatici (Fig.19), sono abbastanza peculiari, su scala geologico-regionale, in successioni arenacee torbiditiche del Miocene inferiore (Burdigaliano), che costituiscono il tetto stratigrafico delle Unità Sicilidi o delle Unità ad affinità Sicilide. Queste successioni torbiditiche costituiscono alcune formazioni-tipo dell'Appennino meridionale, dalla Formazione di Albanella (Critelli et al., 1994; Critelli & Le Pera, 1995; Critelli, 1999), affiorante nella Valle del Fiume Calore, alla Formazione delle Arenarie di Corleto affiorante

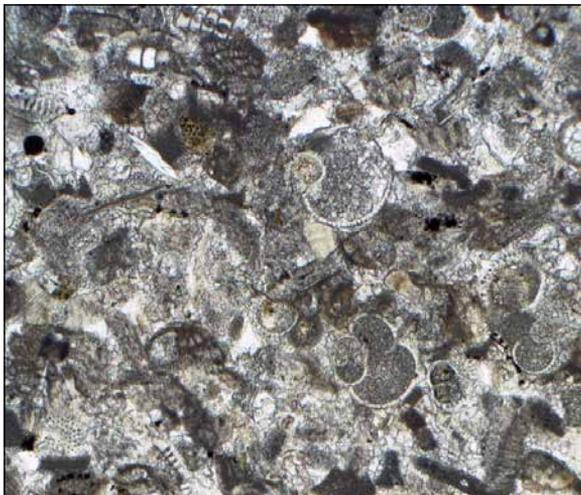
in Basilicata (Critelli, 1991; Fornelli et al., 1992; Critelli et al., 1995; Fornelli & Piccarreta, 1997), ed infine alla parte basale della Formazione delle Tufiti di Tusa (Critelli et al., 1990). Sulla base della comparazione composizionale con le successioni appenniniche, i campioni di arenarie quarzolitiche, attraversati dallo scavo, sono riconducibili alla Formazione delle Arenarie di Corleto o Formazione delle Arenarie di Albanella (Fig. 17).

Le arenarie quarzoso-feldspatiche, caratterizzate da abbondante quarzo e feldspati e da frammenti a grana grossa di rocce plutoniche e metamorfiche di medio-alto grado (Fig. 20), sono decisamente abbondanti, su scala geologico-regionale, in vaste aree dove affiorano le successioni torbiditiche mioceniche (Critelli & Le Pera, 1994, 1995, Critelli,

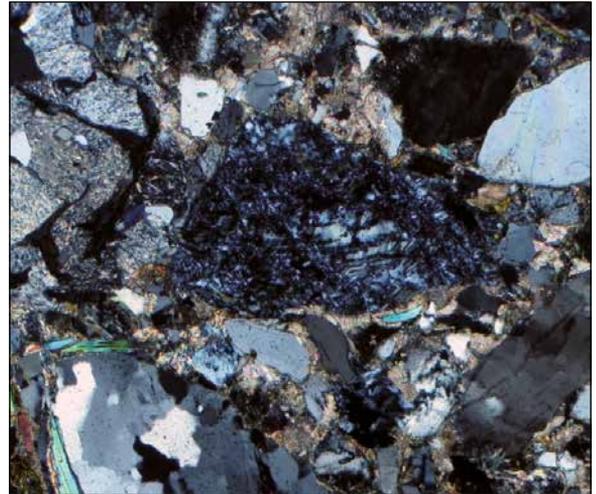


**Fig. 17** - Diagramma QmFLt con ubicazione dei campioni studiati e confronto con le unità arenacee dell'Appennino meridionale equivalenti. Le arenarie quarzolitiche sono confrontate con le successioni arenacee delle porzioni sommitali del Complesso Sicilide (i.e., Arenarie di Corleto, Arenarie di Albanella e Tuffi di Tusa). Le arenarie quarzosofeldspatiche sono confrontate con le successioni arenacee del Miocene medio e medio-superiore (i.e., Formazioni di Castelvetere e successioni equivalenti (Formazioni delle Arenarie di Sorrento e Flysch di San Bartolomeo).

1999; Critelli et al., 1995, 2011, 2013, 2017; Barone et al., 2006; Matano et al., 2014). Tuttavia, l'estrema peculiarità composizionale dei campioni analizzati (B-01, B-02, B-04, B-05, B-07, B-08, B-10, B-12, S-01, S-02 e S-03), restringe il quadro di correlazione stratigrafica regionale alle successioni torbiditiche del Miocene medio-superiore, con una forte analogia composizionale con le arenarie della Formazione di Castelvetere (Critelli & Le Pera, 1995, 1998).



**Fig. 18** - Fotografia di una sezione sottile della facies calcarenitica pre-Numidico del Flysch Rosso. I granuli sabbiosi sono costituiti da abbondanti carbonati (bioclasti) e non-carbonati (glauconie) intrabacinali, quarzo e carbonati extrabacinali.



**Fig. 19** - Fotografia di una sezione sottile della Formazione delle Arenarie di Corleto / Albanella. Le arenarie contengono abbondante detrito metamorfico di basso-medio grado, vulcanico e ofiolitico.



**Fig. 20** - Fotografia di una sezione sottile della Formazione di Castelvetere. Le arenarie contengono abbondante detrito metamorfico da basso ad alto grado, plutonico e sedimentario.

#### 4.4. Dati geologici acquisiti durante lo scavo della galleria

Partendo dalla dettagliata conoscenza delle unità geologiche affioranti in superficie, grazie ai rilievi diretti ed alla raccolta di campioni rocciosi sui fronti di scavo durante alcune fasi di fermo tecnico ed all'analisi dei materiali scavati (smarino), dei rapporti di cantiere, delle fotografie e dei filmati eseguiti nel corso delle operazioni di scavo della galleria è stato possibile ricostruire le litologie e le varie unità litostratigrafiche attraversate dalla TBM.

Altre informazioni indirette, specificatamente in riferimento al rinvenimento in fase di scavo di discontinuità tettoniche (faglie, fratture, ecc.) presenti nell'ammasso roccioso, sono state ottenute dall'analisi della variazione dei parametri riferiti alla *Forza di Spinta* e dalla presenza di gas e di acqua in galleria. Infine, l'analisi petrografica dei campioni arenacei prelevati in galleria ha consentito una corretta attribuzione formazionale delle masse rocciose arenacee attraversate. Su queste basi i differenti intervalli litologici individuati lungo la galleria Pavoncelli-bis sono stati attribuiti alle unità geologiche e sono stati individuati i principali elementi strutturali.

Dalla progressiva di scavo (pk) 0 m a 655 m sono stati attraversati "calcari" attribuiti all'Unità carbonatica (UC), affiorante in superficie nella zona di Caposele. Alla pk 665 m si è osservata una radicale variazione delle litologie in corrispondenza di un elemento strutturale di primo ordine (faglia diretta). Infatti, dalla pk 655 m alla pk 2000 m, sono stati attraversati "argilliti scistose e scagliose alternate con marne" ascrivibili alla litofacies argilloso-marnosa della Formazione di Monte Sant'Arcangelo (FMS-arg-ma), affiorante ad est di Materdomini e Fornaci. Tra le pk 1000 m e 1600 m si sono osservati incrementi nelle spinte di avanzamento, forti emanazioni di gas e venute d'acqua associabili alla presenza di uno o più elementi strutturali.

Dalla pk 2000 m alla pk 4300 m sono state attraversate "marne alternate ad argilliti" riferite alla litofacies marnoso-argilloso della Formazione di Monte Sant'Arcangelo (FMS-ma-arg), affiorante lungo il Vallone del Demanio. Le importanti venute d'acqua in corrispondenza della pk 2100 m e della pk 2600 m sono da associare alla presenza di vari elementi tettonici presenti in corrispondenza del Vallone Minuto e dei suoi affluenti. Si riconosce la presenza di un intervallo "argilloso" in corrispondenza dell'intervallo pk 2900-3000 m e di un intervallo "marnoso" in corrispondenza delle pk da 3700 m a 3800 m.

Dalla pk 4200 m alla pk 5000 m è stato attraversato un "flysch calcareo-marnoso" corrispondente alla litofacies calcareo-marnosa della Formazione di Monte Sant'Arcangelo (FMS-cal-ma), affiorante lungo i crinali a sud della loc. Cresta del Gallo. Tra le pk 4200 m e 5500 m si sono riscontrati vari picchi nella forza di avanzamento associati a venute d'acqua e di gas, che unitamente alle variazioni litologiche riscontrate, testimoniano la presenza di vari elementi tettonici, che sono da correlare in superficie con le faglie che dislocano gli strati calcarei del FYR ad ovest e ad est di loc. Cresta del Gallo (Fig. 2).

Dalla pk 5000 m alla pk 5300 m sono state attraversate differenti litologie, a partire da un "flysch argilloso", passante a "argilla scura rigonfiante" ed infine a "limo chiaro argilloso". Queste litologie si riferiscono alla litofacies argilloso della Formazione di Monte Sant'Arcangelo (FMS-arg). Dalla pk 5300 m alla pk 5600 m è stato attraversato un "flysch

con minore frazione argillosa", che è stato in parte riferito alla litofacies calcareo-marnosa della Formazione di Monte Sant'Arcangelo (FMS-cal-ma). Dalla pk 5600 m alla pk 5900 m è stato attraversato un "flysch più argilloso" seguito da "brecce di faglia" attribuiti alla Formazione delle Argille Varicolori Superiori (ALV).

In corrispondenza della pk 5900 m e per un tratto di alcune decine di metri la formazione argillitica si è presentata fortemente fratturata secondo vari piani di discontinuità. Inoltre, tra le pk 5800 m e 5900 m, in corrispondenza dell'intervallo denominato "brecce di faglia", dove si sono osservate venute di gas e di acqua, è presente il prolungamento in profondità della faglia diretta di primo ordine, riconosciuta in superficie e tra i sondaggi SV1 e PR4 con orientamento NNW-SSE, che mette a contatto un blocco costituito dall'unità FMS, con a tetto l'unità FYR, posto a sud-ovest della faglia, con un blocco costituito dalle unità ALV e Ar-COR, posto a nord-est della faglia.

Dalla pk 5900 m alla pk 6100 m sono state attraversate differenti litologie, a partire da un "flysch più argilloso", passante a "marne argillose scure e argilliti scure". L'associazione litologica descritta ha permesso di riferire le litologie attraversate alla Formazione delle Argille Varicolori Superiori (ALV).

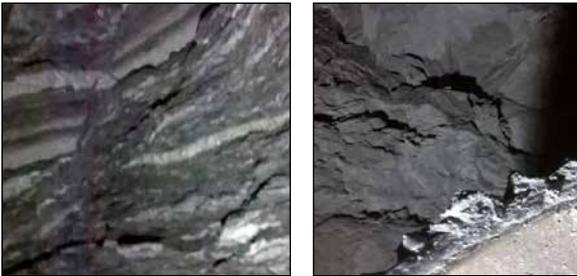
Tutto il tratto attraversato dalla pk 5800 m alla pk 6170 m è interessato da uno stato di tettonizzazione molto spinto, in quanto correlato all'incrocio di più sistemi di faglie ad andamento appenninico ed antiappenninico (NW-SE e NE-SW). In corrispondenza della pk 6100 m, dove sono riportati incrementi crescenti della forza di avanzamento della TBM e forti emanazioni di gas, è presente una faglia, orientata in pianta SW-NE, che frattura ulteriormente e disloca il pacco di strati arenaceo-siltosi. Pertanto, è ragionevole inquadrare tali osservazioni come conseguenza della presenza di una importante discontinuità litologica, determinata da un sistema di faglie che ha messo a diretto contatto i terreni appartenenti alla Formazione delle Argille Varicolori Superiori (ALV) e quelli della formazione delle Arenarie di Corleto-Albanella (Ar-COR).

Dalla pk 6100 m alla pk 6233 m lo scavo ha attraversato una nuova successione litologica costituita da banchi e strati di arenarie e marne argillose, intercalate da sottili livelli di siltiti arenacee e argilliti di colore grigio scuro, da alternanze di arenaria quarzolitica a grana grossa e media, siltiti e subordinatamente argilliti di colore grigio scuro (Fig. 21, 22 e 23). Tale associazione è stata attribuita alle Arenarie di Corleto/Arenarie di Albanella (Ar-COR), riconosciute anche sulla base delle analisi petrografiche.

Tutto il tratto di roccia attraversato dalla pk 5800 m alla pk 6200 m è interessato da uno stato di tettonizzazione molto spinto, in quanto correlato all'incrocio di più sistemi di faglie ad andamento appenninico ed antiappenninico (NW-SE e NE-SW), riconosciuti anche in superficie, che



**Fig. 21** - Galleria Pavoncelli bis pk 6170 m fronte scavo: alternanza di arenarie e siltiti arenacee con sottili intercalazioni marnose afferenti alla Formazione delle Arenarie di Corleto-Albanella.



**Fig. 22** - Galleria Pavoncelli bis pk 6170 m fronte scavo: Piegatura a stretto raggio nell'ambito della Formazione delle Arenarie di Corleto-Albanella. Si osserva l'alternanza di sottili strati di arenarie, siltiti ed argilliti, scompaginati dall'effetto della tettonica.



**Fig. 23** - Galleria Pavoncelli bis: Campioni di arenarie e di argilliti grigio scuro appartenenti alla Formazione delle arenarie Corleto prelevati dallo smarino tra pk 6210 m e pk 6220 m.

hanno messo a contatto diretto i terreni appartenenti alla Formazione delle Argille Varicolori Superiori (ALV) ed alla formazione delle Arenarie di Corleto/Albanella.

Dalla pk 6223 m alla pk 6357 m, si assiste ad un cambiamento formazionale con la presenza di arenarie quarzoso-feldspatiche a grana grossa e fine (Fig. 24), analizzate petrograficamente (campioni B-12 e B-08) e afferenti alla Formazione di Castelvetere (CVT), argilliti grigio scuro e marne.

Dalla pk 6357 m alla pk 7760 m, sono state attraversate argilliti e marne scure con locali lenti di argille rossastre e subordinate intercalazioni di calcari marnosi biancastri ed avana, calcilutiti e calcareniti (Fig. 25), attribuite alla Formazione delle Argille Varicolori Superiori (ALV).

Si segnala che in corrispondenza delle progressive tra pk 6448 m, pk 6463 m e pk 6709 -6725 m, nell'ambito della formazione delle Argille Varicolori, sono state rinvenuti piccoli



**Fig. 24** - Galleria Pavoncelli bis campioni di arenarie a grana fine e grossa riferite alla Formazione di Castelvetere (CVT) prelevati dallo smarino tra pk 6210 m e pk 6220 m.



**Fig. 25** - Galleria Pavoncelli bis: campioni di argilliti grigio-verdastro e calcari marnosi avana riferiti alla Formazione delle Argille Varicolori (ALV) prelevati dallo smarino intorno a pk 7590 m circa.



**Fig. 26** - Galleria Pavoncelli bis: campioni di marne calcaree rosso vinaccia e argille con calcari biancastri riferiti alla formazione del Flysch Rosso prelevati intorno alla pk 7850 m circa.

pacchi di strati di arenarie che, per le loro caratteristiche, sono da riferire al Flysch di Castelvetere, probabilmente dislocati lungo i piani di faglia in corrispondenza di un settore intensamente tettonizzato.

Dalla pk 7760 m alla pk 8500 m (imbocco lato Conza), sono state attraversate argilliti e marne grigio scuro con marne argillose rosse (Fig. 26), calcari marnosi e breccie calcaree organogene attribuibili alla Formazione del Flysch Rosso.

## 5. Assetto Geologico-Strutturale e Modello geologico dell'area

Nell'area studiata affiorano successioni sedimentarie sia di natura carbonatica che terrigena e clastica. Le unità riconosciute appartengono al Gruppo delle Argille Variegate (AV), all'Unità dei Monti Picentini (UC) ed all'Unità di Frigento (FR), oltre che alle successioni sinorogeniche del Miocene (Flysch di Castelvetere) e del Pliocene (Sintema di Ruvo del

Monte) ed ai depositi quaternari ubiquitari e sintemici di ambiente continentale.

Le successioni mesozoiche carbonatiche sono riconducibili al dominio paleogeografico della piattaforma appenninica ed ai suoi margini, con associazioni di litofacies riferibili ad ambienti deposizionali peritidali (piane tidali associate a lagune e baie), subtidali di alta energia, e di scarpata superiore, fortemente condizionati da regimi tettonici distensivi.

Le successioni pelitico-calcaree meso-cenozoiche di ambiente di mare profondo sono caratterizzate da differenti evoluzioni stratigrafiche mioceniche in quanto appartengono a due diversi domini paleogeografici, quali il Bacino Lagonegrese-Molisano (dominio esterno) e il Bacino delle Unità Sicilidi (dominio interno). Le successioni silicoclastiche mioceniche e plioceniche si sono deposte in bacini sedimentari deformati dalla tettonica compressiva durante l'orogenesi appenninica.

In particolare, nel settore in esame della catena, si riscontra un significativo raccorciamento crostale dovuto alla compresenza di sovrascorrimenti di importanza regionale con piani ad immersione sia tirrenica sia adriatica.

L'Unità Sicilide è sovrapposta all'Unità dei Monti Picentini e all'Unità di Frigento con direzione adriatica del trasporto tettonico attraverso piani tettonici associati a pieghe con vergenza nord-orientale. Questo sovrascorrimento costituisce la struttura compressiva a scala regionale più antica nell'area di studio (Serravalliano) ed è conservata in sottosuolo nell'alta valle del Fiume Sele, al di sotto della frazione di Materdomini di Caposele (Di Nocera et al., 2006). Nelle porzioni strutturali superiori è sviluppata la sovrapposizione dell'Unità di Frigento (Flysch Rosso) sui termini dell'Unità Sicilide con un trasporto tettonico tirrenico mediante piani meccanici associati a pieghe con vergenza occidentale. Tali rapporti sono intervenuti a partire dal Tortoniano medio-superiore. I depositi sinorogeni della Formazione di Castelvete (CVT) sono gli indicatori stratigrafici più antichi (Tortoniano) posti a sutura di questi contatti tettonici legati ad un "retroscorrimento".

I dati geologici utilizzati per la definizione del profilo geologico della galleria (Fig. 27), rappresentativo di un più generale modello geologico dell'area, derivano da numerosi datasets:

- rilevamento geologico di superficie;
- litologia dei materiali di scavo della galleria desunte dai rapporti di cantiere, dalle fotografie e dai filmati eseguiti durante lo scavo della Galleria Pavoncelli bis, e
- dall'analisi dello smarino e dei campioni rocciosi;
- rilievi geologico-strutturali diretti sui fronti di scavo in galleria durante i fermi tecnici della TBM;
- stratigrafie dei sondaggi eseguiti nelle varie campagne di indagini;

- analisi petrografiche dei campioni rocciosi prelevati nel corso degli scavi.

Il profilo geologico illustra un articolato assetto geologico-strutturale, in cui si possono schematizzare differenti settori strutturali.

Nella parte iniziale della sezione tra la sorgente Sanità di Caposele, la galleria Rosalba bis e il tratto fino alla pk 665 m della galleria Pavoncelli bis, si riconosce la presenza delle unità di piattaforma carbonatica (UC), su cui poggiano in discordanza i depositi miocenici della Formazione di Castelvete (CVT). Tale successione è fortemente dislocata in strutture tipo "horst e graben" da una serie di faglie dirette ad andamento appenninico.

Tra la pk 665 m e la pk 4200 m si riconosce la presenza dell'Unità Sicilide con le varie litofacies della formazione FMS su cui poggiano in discordanza i depositi miocenici della Formazione della Formazione di Castelvete (CVT). Tale successione risulta fortemente deformata sia per lo stile plicativo che per la dislocazione in blocchi minori da parte di una serie di faglie dirette ad andamento appenninico, anti-appenninico e N-S.

Tra la pk 4200 m e la pk 5400 m si riconosce l'accavallamento tettonico dell'unità lagonegrese di Frigento, costituita dalla formazione FYR, sull'Unità Sicilide con le varie litofacies della formazione FMS, ancora fortemente deformata con stile plicativo. La superficie di sovrascorrimento è dislocata in più punti da faglie dirette per varie centinaia di metri di rigetto; in questo settore, lungo il versante meridionale si è sviluppato il fenomeno franoso profondo di Buoninventre, riattivato dal terremoto dell'Irpinia del 1980. Tra la pk 5400 m e la pk 6200 m è presente una diversa struttura tettonica che mostra il raddoppio tettonico dell'Unità Sicilide, sempre fortemente deformata con stile plicativo, formata dalle unità FMS e ALV che si accavallano sulle ALV, che a loro volta, intorno alla pk 6100 m, si accavallano su piccole scaglie tettoniche delle Arenarie di Corleto-Albanella, afferenti alla parte sommitale dell'Unità Sicilide. Due importanti elementi tettonici ad alto angolo (faglie dirette e sistemi coniugati) si sviluppano intorno alle pk 5900 m e 6100 m.

Intorno alla pk 6200 m è presente un altro elemento tettonico ad alto angolo (faglia diretta e sistemi coniugati) di importanza regionale che separa un settore strutturale differente che si estende fino alla pk 6850 m. In questo settore, che si presenta tettonicamente ribassato rispetto al precedente, una falda dell'Unità Sicilide, composta sempre da FMS e ALV, raddoppia l'unità accavallandosi sulla successione arenacea miocenica (CVT) poggiante in contatto stratigrafico sulle AVL. Anche questo settore si presenta ulteriormente dislocato da numerose strutture tensili ad alto angolo.

A partire dalla pk 6850 m si passa, sempre con una faglia diretta di importanza regionale, ad un settore ulteriormente

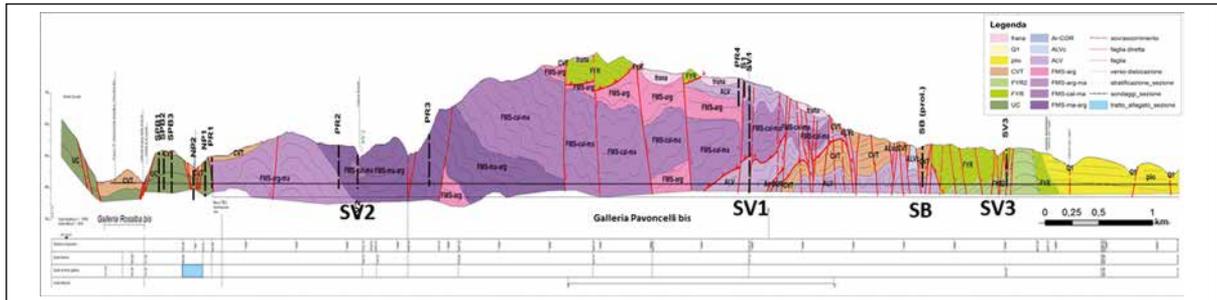


Fig. 27 – Sezione geologica longitudinale all'asse della galleria (rapporto H/L pari a 3:1).

ribassato in cui è presente la falda sommitale dell'Unità Sicilide, costituita dalle AVL su cui poggiano, in contatto stratigrafico, le arenarie mioceniche CVT.

Intorno alla pk 7760 m circa, questo settore strutturale passa ad un altro settore caratterizzato da una differente evoluzione tettonica, mediante un sovrascorrimento a vergenza occidentale (retroscorrimento) dell'Unità di Frigento, costituita dal Flysch Rosso (FYR), sull'Unità Sicilide e i sovrastanti depositi sinorogenetici della CVT. Questo settore è molto articolato per la presenza di numerosi sistemi di faglie ad alto angolo con strutture tipo "horst e graben" trasversali, e si sviluppa fino alla fine della galleria (pk 8500 m).

## 6. Conclusioni

Lo studio geologico condotto nell'area di valico appenninico, dove è stata realizzata la nuova galleria idraulica Caposele-Conza denominata Pavoncelli bis, ha permesso agli scriventi di ottenere rilevanti elementi sull'evoluzione tettono-stratigrafica della catena appenninica.

Lo scavo della galleria Pavoncelli bis ha costituito un'occasione di conoscenza dettagliata delle strutture geologiche presenti nel sottosuolo di un settore della catena appenninica dove le vicissitudini tettoniche hanno completamente alterato gli originali rapporti geometrici esistenti tra le varie unità geologiche.

La complessità delle strutture geologiche e la natura delle litologie presenti hanno reso obiettivamente molto difficoltosa la ricostruzione degli assetti geologici attraversati dallo scavo, soprattutto in corrispondenza dei tratti con elevata copertura.

Nel caso della Galleria Pavoncelli bis, la complessità delle strutture geologiche e la natura delle litologie presenti hanno reso obiettivamente molto difficoltosa la ricostruzione degli assetti geologici attraversati dallo scavo, soprattutto in corrispondenza dei tratti con elevata copertura. Tuttavia, la raccolta di dati originali di sottosuolo ed i risultati di dettagliati rilievi geologici di superficie, supportate da approfondite analisi delle caratteristiche petrografiche delle

successioni arenitiche, hanno permesso di approfondire ulteriormente le conoscenze geologiche di letteratura derivanti dalla realizzazione del Progetto CARG, e sono risultate fondamentali per la ricostruzione del modello geologico di dettaglio del sottosuolo dell'area attraversata dagli scavi della galleria.

In particolare, è stata documentata in maniera esaustiva, per la prima volta nell'area, la presenza, sia in affioramento che in galleria, di successioni arenacee quarzolitiche con composizione vulcanoclastica correlabili alle successioni arenacee inframioceniche tipiche della parte alta dell'Unità Sicilide. Sono presenti anche successioni arenacee supramioceniche di tipo sinorogenico, correlabili alla Formazione di Castelvetere, caratterizzate dalla tipica composizione quarzoso-feldspatica.

## Ringraziamenti

Si ringrazia l'ing. Roberto De Angelis, responsabile del Cantiere di Caposele, lo staff tecnico e le Maestranze della Soc. CAPOSELE S.C.A.R.L. che durante la fase degli scavi della galleria hanno posto in atto strategie di alto livello professionale per consentire agli scriventi la realizzazione dello studio.

## Bibliografia

- AAVV. (1928) - *The Apulian Aqueduct, Southern Italy*. Engineering, n. 35-36 (July 27, August 3, 24, November 2, December 7 and 14, 1928). W.C.2, Bedford street, London, 1929.
- BARONE M., CRITELLI S., LE PERA E., DI NOCERA S., MATANO F., TORRE M. (2006) - *Stratigraphy and detrital modes of Upper Messinian Post-Evaporitic sandstones of the Southern Apennines, Italy: Evidence of foreland-basin evolution during the Messinian Mediterranean salinity crisis*. International Geology Review. **48**, 702-724.
- BASSO C., DI NOCERA S., ESPOSITO P., MATANO F., RUSSO B. & TORRE M. (2001) - *Stratigrafia delle successioni sedimentarie evaporitiche e post-evaporitiche del Messiniano superiore in Irpinia settentrionale (Appennino meridionale)*. Bollettino della Società Geologica Italiana, **120** (2-3), 211-231.
- BASSO C., CIAMPO G., CIARCIA S., DI NOCERA S., MATANO F., STAITI D. & TORRE M. (2002) - *Geologia del settore irpino-dauno*

- dell'Appennino meridionale: implicazioni sui domini paleogeografici delle unità bacinali meso-cenozoiche e nuovi vincoli stratigrafici nell'evoluzione tettonica mio-pliocenica del settore esterno della catena. Studi Geologici Camerti, nuova serie, **1** (2), 7-26.
- BONARDI G., AMORE FO., CIAMPO G., DE CAPOA P., MICONNET P. & PERRONE V. (1988A) - Il complesso Liguride auct.: stato delle conoscenze e problemi aperti sulla sua evoluzione pre-appenninica ed i suoi rapporti con l'Arco Calabro. Mem. Soc. Geol. It., **41**, 17-35.
  - BONARDI G., CIARCIA S., DI NOCERA S., MATANO F., SGROSSO I. & TORRE M. (2009) - Carta delle principali Unità Cinematiche dell'Appennino Meridionale. Nota illustrativa. Italian Journal of Geosciences, **128**, 47-60 (scala 1:250.000, 1 carta allegata).
  - BUDETTA P. (1983) - Geologia e frane dell'alta valle del F. Sele (Appennino meridionale). Mem. e Note Ist. Geol. Appl. **16**, 1981-83, pp. 53.
  - BUTLER RW. (1987) - Thrust sequences. Journal of Geological Society, London, **144**, 619-634.
  - CARANNANTE G., SEVERI C. & SIMONE L. (1994) - Off-shelf carbonate transport along foramol (temperate-type) open shelf margins: an example from the Miocene of the central-southern Apennines (Italy). Mem. Soc. Geol. France, **169**, 277-288.
  - COTECCHIA V. (1981) - Considerazioni sui problemi geomorfologici, idrogeologici e geotecnici evidenziatisi nel territorio colpito dal sisma campano-lucano del 23 novembre 1980 e possibilità d'intervento del Progetto Finalizzato "Conservazione del Suolo" del CNR. Rend. Soc. Geol. It., vol. **4**.
  - CRITELLI S. (1991) - Evoluzione delle mode detritiche delle successioni arenitiche terziarie dell'Appennino meridionale. Memorie della Società Geologica Italiana, v. 47, p. 55-93.
  - CRITELLI S. (1999) - The interplay of lithospheric flexure and thrust accommodation in forming stratigraphic sequences in the southern Apennines foreland basin system, Italy. Memorie dell'Accademia Nazionale dei Lincei, **10**, 257-326.
  - CRITELLI S. (2018) - Provenance of Mesozoic to Cenozoic Circum-Mediterranean sandstones in relation to tectonic setting. Earth-Science Reviews, **185**, 624-648.
  - CRITELLI S., LE PERA E. (1994) - Detrital modes and Provenance of Miocene sandstones and Modern sands of the Southern Apennines thrust-top basins (Italy). Journal of Sedimentary Research, **A64**, 824-835.
  - CRITELLI S. & LE PERA E. (1995) - La Formazione di Castelvetere nell'evoluzione petrostratigrafica dell'avanfossa del Tortoniano-Messiniano dell'Appennino meridionale. Boll. Soc. Geol. It., **114**, 615-634.
  - CRITELLI S., LE PERA E. (1998) - Post-Oligocene sediment dispersal systems and unroofing history of the Calabrian Microplate, Italy. International Geology Review, **48**, 609-637.
  - CRITELLI S., DE ROSA R., SONNINO M., ZUFFA G.G. (1990) - Significato dei depositi vulcanoclastici della Formazione delle Tufiti di Tusa (Miocene inferiore, Lucania meridionale). Bollettino della Società Geologica Italiana, **109**, 743-762.
  - CRITELLI S., DE CAPOA P., LE PERA E. & PERRONE V. (1994) - Stratigrafia e petrografia delle Arenarie di Albanella (valle del Calore, Appennino campano). Boll. Soc. Geol. It., **113**, 451-463.
  - CRITELLI S., LE PERA E., PERRONE V., SONNINO M. (1995) - Le successioni silicoclastiche nell'evoluzione tettonica cenozoica dell'Appennino meridionale. Studi Geologici Camerti, vol. spec. **1995/2**, 155-165.
  - CRITELLI S., MUTO F., TRIPODI V., PERRI F. (2011) - Relationships between lithospheric flexure, thrust tectonics and stratigraphic sequences in foreland setting: the Southern Apennines foreland basin system, Italy, in Schattner, U., editor, New Frontiers in Tectonic Research at the Midst of Plate Convergence. Intech Open Access Publisher, Janeza Trdine 9, Rijeka, Croatia, 121-170.
  - CRITELLI S., MUTO F., TRIPODI V., PERRI F. (2013) - Link between thrust tectonics and sedimentation processes of stratigraphic sequences from the southern Apennines foreland basin system, Italy. Rendiconti Online Soc. Geol. It., v. **25**, p. 21-42.
  - CRITELLI S., MUTO F., PERRI F., TRIPODI V. (2017) - Interpreting Provenance Relations from Sandstone Detrital Modes, Southern Italy Foreland Region: stratigraphic record of Miocene tectonic evolution. Marine and Petroleum Geology, v. **87**, p. 47-59.
  - D'ARGENIO B. (1966) - Zone isopiche e faglie trascorrenti nell'Appennino meridionale. Mem. Soc. Geol. It., **4**, 279-299.
  - D'ARGENIO B. (1974) - Le piattaforme carbonatiche periadriatiche. Una rassegna di problemi nel quadro geodinamico mesozoico dell'area mediterranea. Mem. Soc. Geol. It., **13**, 137-160.
  - D'ARGENIO B. (1988) - L'Appennino campano-lucano. Vecchi e nuovi modelli geologici tra gli anni Sessanta e gli inizi degli anni Ottanta. Mem. Soc. Geol. It., **41**, 3-15.
  - D'ARGENIO B., PESCATORE T. & SCANDONE P. (1973) - Schema geologico dell'Appennino meridionale (Campania, Lucania) - Atti del Cov. Moderne vedute sulla Geologia dell'Appennino. Acc. Naz. Lincei, **182**, 49-72.
  - D'ARGENIO B., PESCATORE T. & SCANDONE P. (1975) - Structural pattern of the Campania-Lucania Apennines. In: Ogniben L., Parotto, M. & Praturlon, A. (Ed.), Structural model of Italy, Quaderni de «La ricerca scientifica», **90**, 313-327, C.N.R. Roma.
  - DAZZARO L., DI NOCERA S., PESCATORE T., RAPISARDI L., ROMEO M., RUSSO B., SENATORE M. & TORRE M. (1988) - Geologia del margine della catena appenninica tra il F. Fortore ed il T. Calaggio (Monti della Daunia - App. Merid.). Mem. Soc. Geol. It., **41**, 411-422.
  - DI NOCERA S., MATANO F. & TORRE M. (2002) - Le unità "sannitiche" Auct. (Appennino centro-meridionale) rassegna delle correnti interpretazioni stratigrafiche e paleogeografiche e nuove ipotesi con l'introduzione dell'Unità di Frigento. St. Geol. Camerti, n. s., **1** (1), 87-102, Camerino.
  - DI NOCERA S., MATANO F., PESCATORE T., PINTO F., QUARANTIELLO R., SENATORE M. & TORRE M. (2006) - Schema geologico del transetto Monti Picentini orientali - Monti della Daunia meridionali: unità stratigrafiche ed evoluzione tettonica del settore esterno dell'Appennino meridionale. Boll. Soc. Geol. It., **125**, 1-20.
  - FORNELLI A., GALLICCHIO S., MONGELLI G., SALVEMINI A., SUMMA V., VENTRELLA N., ZAZA S. (1992) - Areniti a glaucofane nell'Appennino meridionale. Mineralogica et Petrographica Acta, **35**, 199-214.
  - FORNELLI A. & PICCARRETA G. (1997) - Mineral and chemical provenance indicators in some early Miocene sandstones of the Southern Apennines (Italy). European Journal of Mineralogy, **9**, 433-447.
  - FUNICIELLO R., MONTONE P., SALVINI F. & TOZZI M. (1988) - Caratteri strutturali del Promontorio del Gargano. Mem. Soc. Geol. It., **41**, 1235-1243.
  - IPPOLITO F., D'ARGENIO B., PESCATORE T. & SCANDONE P. (1973) - Unità stratigrafico-strutturali e schema tettonico dell'Appennino Meridionale. Trad. from «The guide-book of Italy», 134-155. Petroleum Exploration Society of Libya. Ist. Geol. Geof. Univ., pubbl. n.s., 15, Napoli.
  - ISPRA (2000-2007) - Catalogo delle formazioni - Unità Validare, Unità non validate (Unità da riclassificare e/o da abbandonare), Unità Tradizionali - Quaderno n. 7 - Carta Geologica d'Italia - 1:50.000 - Fascicoli I, II, III, IV, V, VI, VII.
  - LENTINI F., CARBONE S., CATALANO S. & MONACO C. (1990) - Tettonica a thrust neogenica nella catena appenninico-maghebide: esempi dalla Lucania e dalla Sicilia. Studi Geol. Camerti, vol. spec. **1990**, 19-26.
  - MATANO F. (2007) - Evaporite deposits of the Messinian southern Apennines foreland basin (Irpinia-Daunia Mts., southern Italy). In: SCHREIBER, B. C., LUGLI, S. & BABEL, M. (eds) Evaporites Through Space and Time. Geological Society, London, Special

- Publications, **285**, 165-192.
- MATANO F. & DI NOCERA S. (2001) - *Geologia del settore centrale dell'Irpinia (Appennino meridionale): nuovi dati e interpretazioni*. Boll. Soc. Geol. It., **120**, 3-14.
  - MATANO F., CRITELLI S., BARONE M., MUTO F., DI NOCERA S. (2014) - *Stratigraphic and provenance evolution of the Southern Apennines foreland basin system during the Middle Miocene to Pliocene (Irpinia-Sannio successions, Italy)*. Marine and Petroleum Geology, **57**, 652-670.
  - MAZZOLI S., ALDEGA L., CORRADO S., INVERNIZZI C. & ZATTIN M. (2006) - *Pliocene-quaternary thrusting, syn-orogenic extension and tectonic exhumation in the Southern Apennines (Italy): Insights from the Monte Alpi area*. Geological Society America, Sp. Pap., **414**, 55-77.
  - MAZZOLI S., ASCIONE A., BUSCHER, J. T., PIGNALOSA, A., VALENTE, E. & ZATTIN, M. (2014) - *Low-angle normal faulting and focused exhumation associated with late Pliocene change in tectonic style in the southern Apennines (Italy)*. Tectonics, **33**, 1802-1818.
  - MAZZOLI S., D'ERRICO M., ALDEGA L., CORRADO S., INVERNIZZI C., SHINER P. & ZATTIN M. (2008) - *Tectonic burial and "young" (<10 Ma) exhumation in the southern Apennines fold and thrust belt (Italy)*. Geology, **36**, 243-246.
  - MOSTARDINI, F. & MERLINI, S. (1986) - *Appennino Centro-meridionale: sezioni geologiche e proposta di modello strutturale*. Memorie della Società Geologica Italiana, **35**, 177-202.
  - OGNIBEN L. (1969) - *Schema introduttivo alla geologia del confine calabro-lucano*. Mem. Soc. Geol. It., **8**, 453-763.
  - PATACCA E. & SCANDONE P. (1989) - *Post-Tortonian mountain building in the Apennines. The role of the passive sinking of a relict lithospheric slab*. In: A. Boriani, M. Bonafede, G.B. Piccardo and G.B. Vai (Eds.), *The lithosphere in Italy. Advances in Earth Science Research*. It. Nat. Comm. Int. Lith. Prog., Mid-term Conf. (Rome, 5-6 May 1987), Atti Conv. Lincei, **80**, 157-176.
  - PATACCA E. & SCANDONE P. (2001) - *Late thrust propagation and sedimentary response in the thrust-belt-foredeep system of the Southern Apennines (Pliocene-Pleistocene)*. In: VAI G.B. & MARTINI I.P. (eds), *Anatomy of an Orogen: the Apennines and adjacent Mediterranean Basins*, 401-440, Kluwer Academic Publ., Great Britain.
  - PAVAN G. & PIRINI C. (1966) - *Stratigrafia del Foglio 157 «Monte S. Angelo»*. Boll. Serv. Geol. d'It., **86**, 123-189.
  - PESCATORE T., DI NOCERA S., MATANO F. & PINTO F. (2000) - *L'Unità del Fortore nel quadro della geologia del settore orientale dei Monti del Sannio (Appennino meridionale)*. Boll. Soc. Geol. It., **119**, 587-601.
  - PESCATORE T., PINTO F., RENDA P., SENATORE M.R., TRAMUTOLI M. & VALENTE A. (1996) - *Avanfosse mioceniche dell'Appennino meridionale (Italia)*. Rend. Acc. Sc. Fis. Mat. Napoli, **63**, 85-121.
  - PESCATORE T., RENDA P. & TRAMUTOLI M. (1988) - *Rapporti tra le Unità lagonegresi e l'Unità Sicilide nella media valle del Basento*. Mem. Soc. Geol. It., **41**, 353-361.
  - PESCATORE T.S. & PINTO F. (2016) - *Note Illustrative. Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 F° 450 «S. Angelo dei Lombardi»*.
  - PESCATORE T. & SENATORE M.R. (1986) - *A comparison between a present-day (Taranto Gulf) and Miocene (Irpinian basin) foredeep of the Southern Apennines (Italy)*. Spec. Publs Int. Ass. Sediment., **8**, 169-182.
  - RICCHETTI G., CIARANFI N., LUPERTO SINNI E., MONGELLI F. & PIERI P. (1988) - *Geodinamica ed evoluzione sedimentaria e tettonica dell'avampaese apulo*. Mem. Soc. Geol. It., **41**, 57-82.
  - SCANDONE P. (1967) - *Studi di geologia lucana: la serie calcareo-silico-marnosa e i suoi rapporti con l'Appennino calcareo*. Boll. Soc. Natur. Napoli, **76**, 1-175, 1969.
  - SCANDONE P. (1971) - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000 Fogli 199 e 210 Potenza e Lauria*. Servizio Geologico d'Italia, pp. 71.
  - SELLI R. (1962) - *Il Paleogene nel quadro della geologia dell'Italia centro meridionale*. Mem. Soc. Geol. It., **3**, 737-789.
  - SELLI R. (1957) - *Sulla trasgressione del Miocene nell'Italia Meridionale*. Giornale Geologia, **26**, 1-54.
  - SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (2016) - *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 F° 450 «S. Angelo dei Lombardi»*.
  - SGROSSO I. (1988) - *Nuovi elementi per un più articolato modello paleogeografico nell'Appennino centro-meridionale*. Mem. Soc. Geol. It., **41**, 225-252.
  - SGROSSO I. (1998) - *Possibile evoluzione cinematica miocenica nell'orogene centro-sud appenninico*. Boll. Soc. Geol. It., **117**, 679-724.
  - VALENSISE, G. AND PANTOSTI, D. (2001) - *Seismogenic faulting, moment release patterns and seismic hazard along the central and southern Apennines and the Calabrian arc*. In: Vai G.B. and Martini I.P. (eds), *Anatomy of an Orogen: The Apennines and Adjacent Mediterranean Basins*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001.

# Studio geomeccanico e di caduta massi nell'area di Forza d'Agro finalizzato alla richiesta di variante al PAI dei bacini 097-098

**Orazio Barbagallo**, geologo libero professionista

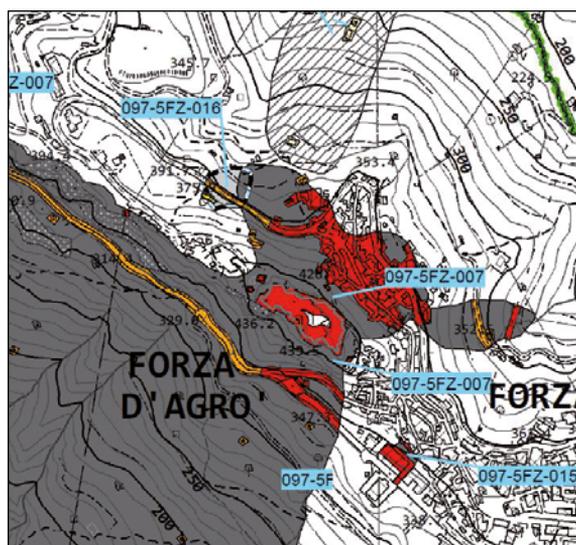
**Federico Calvi**, funzionario direttivo dell'Autorità del Distretto Idrografico della Sicilia

## Riassunto

Il presente elaborato illustra le metodologie adottate per un aggiornamento del Piano per l'Assetto Idrogeologico di un'area a valle del Castello Normanno che sovrasta Forza d'Agro. Lo studio, realizzato in accordo a quanto prescritto nel D.D.G. 1067 dell'Assessorato Regionale Territorio e Ambiente - Dipartimento Regionale dell'Ambiente, è stato finalizzato alla valutazione della capacità di penetrazione di un masso in caduta nel centro abitato, per valutare il numero di case coinvolte nel transito dei blocchi. Sulla scorta dei dati ottenuti è stata sviluppata un'analisi della pericolosità che tenesse conto non solo della tipologia e magnitudo del fenomeno franoso, ma anche della probabilità di accadimento dell'evento o del suo tempo di ritorno.

## Abstract

*The present study shows the methodologies adopted for an update of the Plan for the Hydrogeological Structure of an area downstream of the Norman Castle that overlooks Forza d'Agro. The study, carried out in accordance with the provisions of the D.D.G. 1067 of the Regional Department of Territory and Environment - Regional Department of the Environment, was aimed at evaluating the penetration capacity of a falling rock in the inhabited center; to evaluate the number of houses involved in the transit of the blocks. On the basis of the data obtained, a hazard assessment was developed that took into account not only the type and magnitude of the landslide phenomenon, but also the probability of occurrence of the event or its return time.*



**Figura 1** - Stralcio PAI Bacini 97 e 98 - Carta della pericolosità e del rischio

## Premessa

La memoria presenta i risultati di uno studio geologico propedeutico alla richiesta di aggiornamento del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) nel comune di Forza d'Agro, in relazione al dissesto da crollo contraddistinto dalla sigla "097-5FZ-007" ubicato a valle del Castello Normanno sui versanti NE e SW dell'altura ove sorge l'abitato. Questo dissesto ha determinato l'insorgenza di un'ampia

area di pericolosità a grado P4 (*molto elevata*) e conseguente rischio di livello R4 (*molto elevato*), che interessa una gran parte della porzione settentrionale del centro abitato. Nella Figura 1 viene rappresentata la situazione vigente del PAI in relazione alla Pericolosità Geomorfológica, in grigio scuro l'area a pericolosità (P4), mentre il livello di rischio è indicato dalla colorazione rossa (R4) degli elementi a rischio (*Centro Abitato, Bene Storico - monumentale e Viabilità principale*) e in arancio (R3) per la viabilità secondaria. Considerato il fatto che la zona di transito dei massi mette a rischio una buona parte del centro abitato di Forza d'Agrò, l'Amministrazione Comunale ha dato incarico allo scrivente di verificare la possibilità di riclassificare l'area, approfondendo gli studi condotti dall'Autorità di Bacino per dettagliare l'identificazione del rischio finalizzata alla sua gestione.

Il riferimento per gli studi sui fenomeni di crollo è rappresentato dal D.D.G. n. 1067 dell'Assessorato Regionale Territorio e Ambiente - Dipartimento Regionale dell'Ambiente (pubblicato sulla G.U.R.S. n. 53 del 2014), in cui sono definiti i contenuti minimi per gli studi geologici e geotecnici finalizzati alla determinazione delle pericolosità e rischio dei fenomeni di crollo, in modo da affrontare analiticamente il

problema della delimitazione del massimo areale di avanzamento dei blocchi, considerando la fisica del moto e le relative traiettorie ed energie sviluppate durante i percorsi e tenuto anche conto delle opere di mitigazione del rischio esistenti, in base a quanto prescritto dalle norme UNI 1211-1, UNI 1211-2, UNI 1211-3, UNI 1211-4.

### Inquadramento geologico

La zona in studio è ubicata su di uno stretto crinale che si sviluppa in direzione NW-SE, culminante nel Castello Normanno, che dall'abitato scende verso il mare in direzione sud-est fino a Capo Sant'Alessio, promontorio ove sorgono i ruderi di un altro Castello presente lungo la linea costiera ionica tra Messina e Taormina.

Dal punto di vista geostrutturale i terreni sotto osservazione sono ubicati in una zona interessata dalle fasce frontali del complesso sistema di unità geologiche, corrugate e sovrapposte, che affiorano lungo tutto il settore nord-orientale della Sicilia.

Il quadro geologico-strutturale evidenzia, nella fascia di terreni sotto osservazione, la sovrapposizione tra strutture relative a diverse fasi deformative.

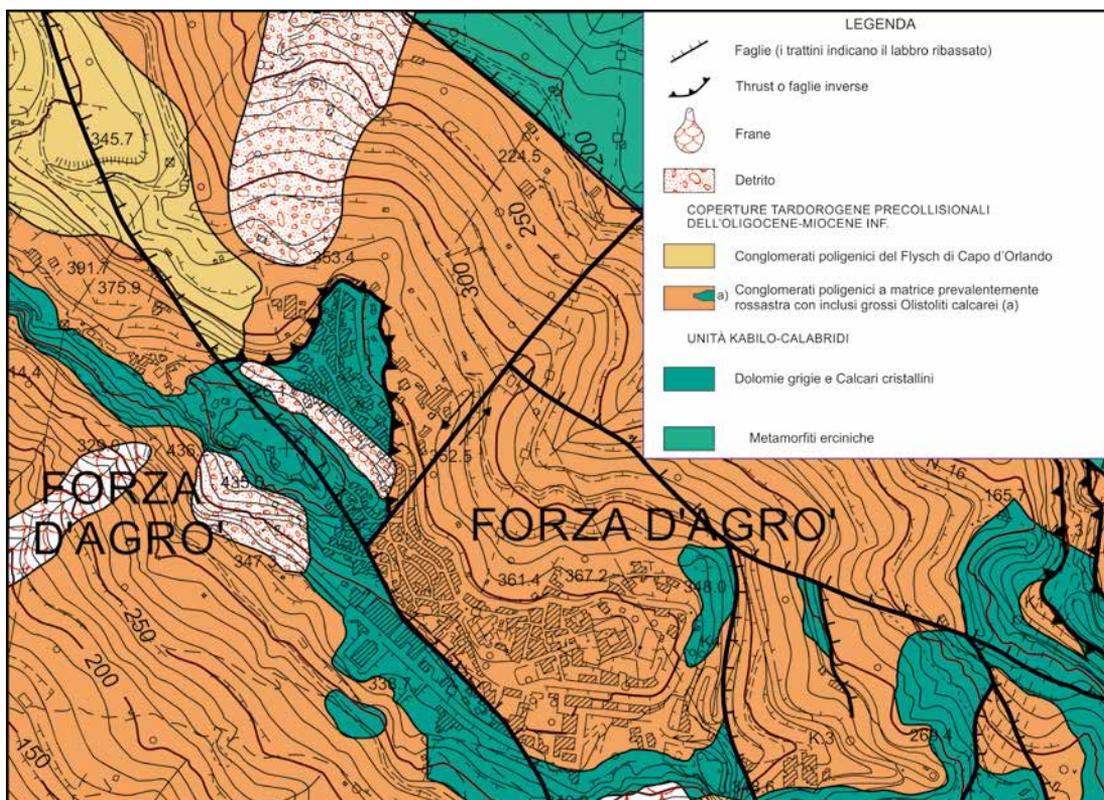


Figura 2 – Carta Geologica area in studio (da Lentini et alii mod.).

In particolare, si può osservare che la zona occidentale e sommitale del crinale dove sorge il Castello Normanno, è caratterizzata dall'affioramento di dolomie e calcari cristallini dell'Unità di Mandanici. L'affioramento è condizionato dalla presenza di una faglia, diretta NW-SE, che abbassa verso valle i calcari e le dolomie cristalline e che a sua volta taglia un'altra faglia trascorrente sinistra, sviluppata in direzione NE-SW. Il contatto tra i calcari e le dolomie rispetto alla formazione del conglomerato rosso è spesso influenzato da strutture tettoniche quali faglie o thrust. Lungo tutto il versante si notano grossi olistoliti calcareo-dolomitici intercalati alla formazione del conglomerato rosso.

### Suddivisione dell'area in studio in zone di omogeneità

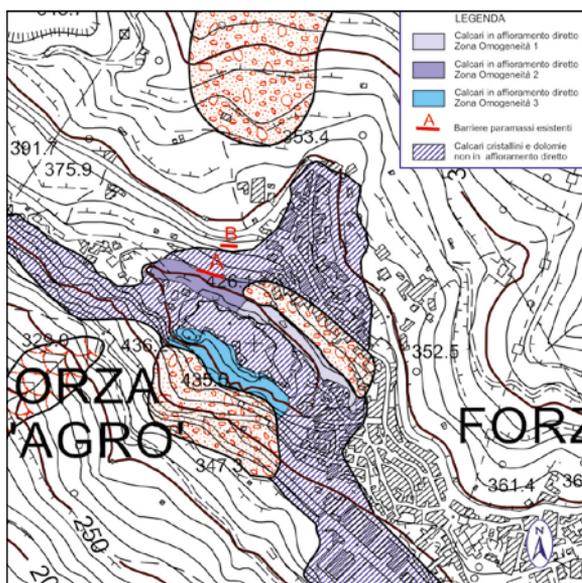


Figura 3 - Suddivisione area in Z. O.

In relazione alla complessità strutturale dell'area, la formazione carbonatica affiorante nell'area d'intervento è stata suddivisa in differenti Zone di Omogeneità, ovvero settori dell'ammasso che presentano caratteristiche di fratturazione e di assetto strutturale omogenee.

La differenziazione delle ZO è stata effettuata sia in base a sopralluoghi in sito sia sulla scorta di una serie di sezioni topografiche sviluppate sul versante nord-orientale e su quello sud-occidentale, in modo da evidenziare le caratteristiche di acclività delle pendici che, unitamente all'intenso grado di disgregazione della massa rocciosa, influenzano la possibilità di caduta e propagazione degli elementi lapidei.

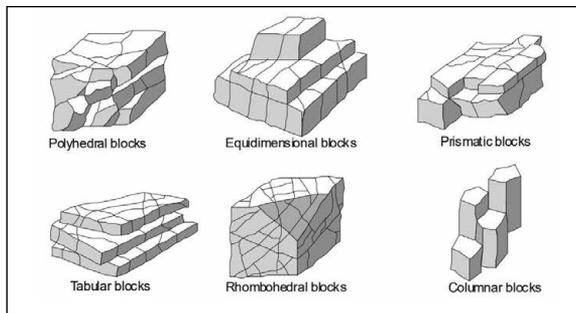


Figura 4 - Forma dei blocchi rocciosi Dearman.

Abbiamo potuto così distinguere, sul versante a NE del Castello, le 2 Zone di Omogeneità riportate nella figura 3. Da notare a valle della zona di omogeneità 2 la presenza di due barriere paramassi, messe in opera a protezione della via Vignale.

### Caratteristiche geomeccaniche

Le caratteristiche geomeccaniche dei fronti rocciosi delle zone 1 e 2 (*poste immediatamente a monte del centro abitato*) sono state ricavate dai dati ottenuti da rilievi geomeccanici e da due classificazioni dell'ammasso eseguite nel corso dei sopralluoghi in sito.

### Classificazione dell'ammasso Zona Omogeneità 1



Figura 5 - Zona di Omogeneità 1, versante nord-orientale

La zona di Omogeneità 1 è rappresentata dal versante a valle della Torre medievale e di parte del versante nord-orientale del Castello Normanno.

Si tratta di una fascia di terreni contrassegnata dall'affioramento di dolomie grigie e calcari cristallini dell'Unità di Mandanici (*ex unità di Novara*) caratterizzati da un

discreto grado di fratturazione che suddivide l'ammasso in blocchi allungati di forma parallelepipedo-prismatica, assimilabili a blocchi poliedrici o prismatici di Dearman (1991) o massi di forma variabile da compact Blocks a long

Block di Palmström (1996a).

La classificazione è stata realizzata attraverso le metodologie proposte da Barton, Bieniawsky e Romana, i dati ottenuti sono i seguenti:

**Tabella 1** - Risultati classificazione ammasso (Zona ZO1)

<b>Classificazione di Barton (indice Q) dell'ammasso roccioso</b>			
<i>Indice Q</i>	<i>Classe</i>	<i>Descrizione</i>	
1.469	VI	Scadente	
<b>Indice Q normalizzato nei confronti della resistenza alla compressione monoassiale della roccia</b>			
<i>Resistenza alla compressione uniassiale (MPa)</i>		<i>Indice Qc</i>	
43		0.6317	
<b>Classificazione di Bieniawsky (indice RMR) dell'ammasso roccioso</b>			
<i>RMRbase</i>	<i>RMR corretto</i>	<i>Classe</i>	<i>Descrizione</i>
62.5400	55.5400	Terza	Mediocre
<b>Classificazione di Romana (indice SMR) dell'ammasso roccioso</b>			
<i>SMR</i>	<i>Classe</i>	<i>Descrizione</i>	
60.04	Terza	Mediocre	
<b>Grado di stabilità, tipo di cinematismo di rottura, eventuali interventi di stabilizzazione</b>			
<i>Stabilità</i>	<i>Modo di rottura</i>	<i>Stabilizzazione</i>	
Parzialmente stabile	Lungo piani o per cunei	Sistematica	



**Figura 6** – Particolare ammasso ZO2. Si noti l'elevato grado di fratturazione.

### **Classificazione Zona Omogeneità 2 (ZO2)**

La zona di Omogeneità 2 si pone sempre sul versante nord-orientale del Castello Normanno a nord della zona 1 con la quale è in contatto sul lato sud-orientale. Si tratta anche in questo caso di una fascia di terreni caratterizzata da un versante acclive sul quale affiorano le dolomie grigie e i calcari cristallini dell'Unità di Mandanici, sollevati per faglia, al cui piede si osserva il contatto con la formazione del conglomerato del Flysch di Capo d'Orlando.

L'ammasso dolomitico-calcareo si contraddistingue per uno stato di fratturazione superiore a quello della ZO1, con quattro famiglie di giunti che suddividono la roccia in blocchi di forma da poliedrica a prismatica allungata, con volume roccioso unitario di dimensioni minori rispetto alla ZO1 (Cfr Figura 6). Alla base dell'ammasso roccioso è presente una barriera paramassi.

**Tabella 2** - Risultati classificazione ammasso (Zona ZO2)

Classificazione di Barton (indice Q) dell'ammasso roccioso			
Indice Q	Classe	Descrizione	
0.7358	VII	Molto scendente	
Indice Q normalizzato nei confronti della resistenza alla compressione monoassiale della roccia			
Resistenza alla compressione unia- siale (MPa)	Indice Qc		
43	0.3164		
Classificazione di Bieniawsky (indice RMR) dell'ammasso roccioso			
RMRbase	RMRcorretto	Classe	Descrizione
53.1400	38.1400	Quarta	Scadente
Classificazione di Romana (indice SMR) dell'ammasso roccioso			
SMR	Classe	Descrizione	
33.14	Quarta	Scadente	
Grado di stabilità, tipo di cinematismo di rottura, eventuali interventi di stabilizzazione			
Stabilità	Modo di rottura	Stabilizzazione	
Instabile	Lungo piani o su grandi cunei	Estesa	

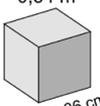
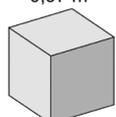
**Dimensione dei Blocchi**

La dimensione dei blocchi è un indicatore estremamente importante del comportamento della massa rocciosa. Essa è determinata dalla spaziatura delle discontinuità, dal numero dei sistemi presenti e dalla persistenza delle fratture che delimitano i potenziali blocchi.

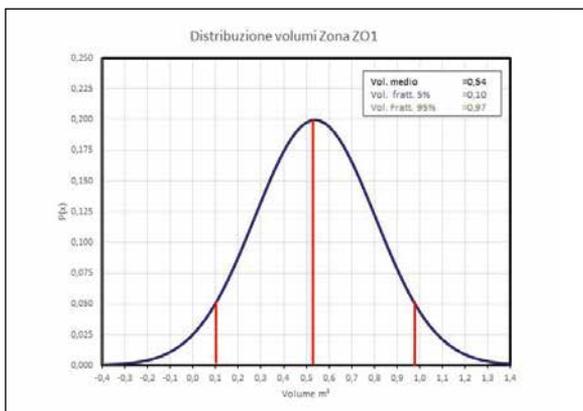
Il calcolo del volume roccioso unitario nelle due zone di omogeneità è stato sviluppato sulla scorta dei valori del Jv (numero volumetrico delle discontinuità) che dipende dalla spaziatura media dei giunti.

**Ammasso roccioso ZO1**

**Tabella 3** – Volume dei blocchi zona ZO 1

Volumi rocciosi - Cubo equivalente		
Vol. Minimo 0,10 m <sup>3</sup>	Vol. Medio 0,54 m <sup>3</sup>	Vol. Massimo 0,97 m <sup>3</sup>
 46,9 cm	 81,36 cm	 99,1 cm

Volumi rocciosi - Sfera equivalente		
Vol. Minimo 0,10 m <sup>3</sup>	Vol. Medio 0,54 m <sup>3</sup>	Vol. Massimo 0,97 m <sup>3</sup>
 d = 58,2 cm	 d = 101 cm	 d = 123 cm



**Figura 7** – ZO 1 densità di probabilità dim. volumetriche.

Per la ZO1, il valore del Jv (*numero volumetrico delle discontinuità*) è pari a 8,18 (RQD = 88,0%), che corrisponde a blocchi di media dimensione (Cfr Fig. 7).

**Ammasso roccioso ZO2**

Per la ZO2, il valore del Jv (*numero volumetrico delle discontinuità*) è pari a 12,42 (RQD = 74,0%), che corrisponde a blocchi di piccola dimensione (Cfr Tab. 4).

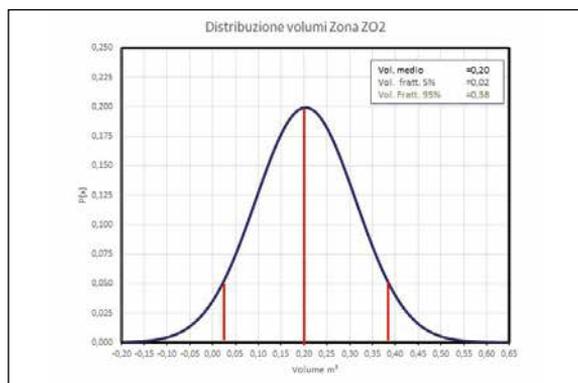


Figura 8 – ZO 2 densità di probabilità dim. volumetriche.

Tabella 4 – Volume dei blocchi zona ZO 2

Volumi rocciosi - Cubo equivalente		
Vol. Minimo 0,02 m³  28,5 cm	Vol. Medio 0,20 m³  58,8 cm	Vol. Massimo 0,38 m³  72,7 cm
Volumi rocciosi - Sfera equivalente		
Vol. Minimo 0,02 m³  d = 35,4 cm	Vol. Medio 0,20 m³  d = 73,0 cm	Vol. Massimo 0,38 m³  d = 90,2 cm

Tabella 5 – Dimensione Blocchi

Lato del cubo equivalente				
Zona di Omogeneità	Minimo (cm)	Max (cm)	Medio (cm)	dev. St.
ZO1	46,90	99,13	81,36	26,56
ZO2	28,54	72,65	58,81	22,56
Diametro della sfera equivalente				
Zona di Omogeneità	Minimo (cm)	Max (cm)	Medio (cm)	dev. St.
ZO1	58,2	123,0	101,0	32,95
ZO2	35,4	90,2	73,0	27,99

**Metodologie applicate per la simulazione dei crolli**

Nell'analisi di caduta massi abbiamo utilizzato il software "Is GeoMassi" della Dolmen, nel quale la geometria del versante è rappresentata da una maglia di triangoli, detta "mesh", generata a partire da un Digital Terrain Model (DTM). Il problema che abbiamo incontrato in questo lavoro è nato dal fatto che in quest'area il DTM Sicilia posto a base del calcolo risultava impreciso e non utilizzabile ai nostri scopi; abbiamo dovuto così ricostruire su base cartografica un Digital Elevation Model (DEM) che meglio si adattava alla conformazione del territorio.

Ai fini del calcolo delle traiettorie dei massi è stato applicato il metodo "Lumped Mass ibrido", in cui il moto del corpo avviene, oltre che per caduta libera, con una serie di impatti e di rimbalzi o per rotolamento.

Il calcolo delle velocità post-impatto è stato definito attraverso il modello CRSP (Colorado Rockfall Simulation Program) basato sulla conservazione dell'energia. L'effetto della parte aerea della vegetazione, se presente, è rappresentato da una resistenza viscosa lineare equivalente. La forza resistente risultante è applicata al centro di massa di ciascun blocco.

La geometria del versante è modellata da una maglia di triangoli. L'analisi del rimbalzo e del roto-scivolamento su ciascun triangolo è stata eseguita con riferimento al piano che lo contiene; si è anche definito un valore di rugosità del terreno (altezza media delle asperità), che influisce sull'angolo di rimbalzo, secondo le dimensioni del blocco. L'arresto dei blocchi è stato imposto quando l'energia traslazionale diventava inferiore a 1E-06 [kJ] o la velocità traslazionale inferiore a 0.005 [m/s].

Per schematizzare il percorso dei massi si è utilizzato un modello stocastico, associando ad alcuni parametri, (dimensioni del blocco, velocità iniziale, coefficienti di restituzione, angolo d'attrito, scabrezza etc) una distribuzione normale, definita da un valore medio m e dallo scarto quadratico medio (o deviazione standard) s.

Per definire i coefficienti di restituzione ci siamo basati sui dati forniti su litotipi simili da Piteau e Clayton, da Hoek e da Pfeifer e Bowen (valori spesso scaturiti da test in sito eseguiti in appositi campi di prove) e dai risultati di una Back Analysis da noi effettuata su di una frana per crollo a Castelmolta che interessava terreni simili, scegliendo tra questi il range dei valori da applicare. In tutto abbiamo considerato due diversi orizzonti: quello composto da roccia affiorante, visibile nella parte sommitale del pendio ed il detrito presente nella porzione medio-bassa. I valori adottati sono i seguenti:

**Tabella 6** - Valori dei coefficienti di restituzione

<i>Roccia affiorante (Distribuzione normale)</i>			
	<i>Coeff. di Restituzione Kn</i>	<i>Coeff. di Restituzione Kt</i>	<i>Dev. Standard</i>
Valore minimo	0,35	0,37	0,07
Valore massimo	0,92	0,85	0,40
media	0,69	0,62	0,31
<i>Terreni di copertura detritici (TR) (Distribuzione normale)</i>			
	<i>Coeff. di Restituzione Kn</i>	<i>Coeff. di Restituzione Kt</i>	<i>Dev. Standard</i>
Valore minimo	0,32	0,62	0,60
Valore massimo	0,66	0,82	0,80
media	0,50	0,74	0,70

Il valore dell'angolo d'attrito volvente è stato ottenuto applicando la formula di Kirkby e Statham (1975), ovvero suddividendo le sezioni di verifica in celle elementari ognuna di lunghezza pari a 5 m, scegliendo per esse un angolo di rugosità medio che è stato poi diviso per il diametro medio dei blocchi nella fattispecie assimilati ad una sfera.

#### Verifica dissipazione dell'energia in seguito all'urto

Preliminarmente all'analisi delle traiettorie, in considerazione dell'obiettivo di verificare i fenomeni di impatto sugli edifici presenti a valle delle zone sorgenti dei fenomeni di crollo, si è cercato di individuare un metodo per potere valutare la capacità di penetrazione di un masso nel centro abitato ed il conseguente numero di case coinvolte, partendo dal calcolo della resistenza all'urto delle pareti delle abitazioni, parametro fondamentale che influenza fortemente la lunghezza delle traiettorie dei massi. È evidente che questo valore, condizionando la dissipazione di energia dei blocchi, influenza anche il numero di abitazioni che possono essere distrutte, parzialmente o completamente, dall'arrivo dei massi in caduta, in dipendenza sia dell'energia cinetica posseduta dal masso al momento dell'urto con un'abitazione a valle, ovvero dalla velocità e dalla massa dei blocchi, sia dalle caratteristiche della muratura di resistere ad un urto dinamico quasi istantaneo.

Mentre per il calcolo dell'energia cinetica sviluppata dal blocco possiamo fare riferimento ai valori forniti dallo studio geomeccanico e dall'analisi traiettografica, la valutazione della dissipazione dell'energia posseduta dal masso di progetto in seguito all'urto contro le abitazioni presenti nella porzione sommitale del pendio appare più complessa.

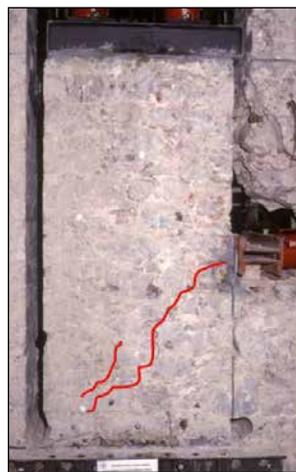
Nella fattispecie, tenuto conto che le case esistenti immediatamente a valle del Castello sono vetuste e rappresentate per lo più da edifici in muratura semplice ad un solo piano, abbiamo considerato la dissipazione di energia in seguito all'urto del blocco con le due pareti esterne degli edifici, nell'ipotesi di murature di spessore pari a 40 cm, costituite

da blocchi composti da roccia calcarea legati insieme con malta cementizia.

Nella caduta di massi di grandi dimensioni il danno dovuto all'impatto sugli edifici è senz'altro molto elevato, tuttavia per eventi di caduta di blocchi di piccole e medie dimensioni esso è molto variabile e dipende anche dalla resistenza e/o vulnerabilità degli edifici, dato che se espresso in termini numerici può fornire un parametro oggettivo per l'analisi del rischio.

Per stabilire, in modo quantitativo, il danneggiamento arrecato dai massi in caduta su fabbricati in muratura posti lungo i pendii, oltre all'energia cinetica del masso che dipende dal suo volume e dalla velocità di caduta, bisognerebbe accertare:

- l'impronta del masso sulla parete dell'edificio, funzione della forma e delle dimensioni geometriche dell'elemento litoide;
- la misura temporale dell'urto che dipende dalla velocità del masso;

**Figura 9** – Pannello di prova

- c) la resistenza della parete in muratura che dipende dalla resistenza della matrice rocciosa che compone i blocchi, dalla resistenza della malta cementizia e dalla disposizione dei singoli blocchi.

Nel presente lavoro abbiamo utilizzato due diverse metodologie: la prima che sfrutta il principio dell'energia cinetica, basandoci sui risultati di alcune prove di sforzo-deformazione da spinte orizzontali su strutture murarie; la seconda applicando il metodo di Mavrouli et alii (2016) che utilizzano per la valutazione delle proprietà meccaniche e la modellazione della struttura muraria il metodo degli elementi finiti FEM con cui si calcolano gli sforzi all'interno della struttura muraria e le conseguenti curve di fragilità.

Verifica 1

Nel primo caso si è fatto riferimento ai risultati della resistenza laterale di strutture murarie, ottenuta su un pannello di prova in muratura (Cfr Fig. 9):

Il primo approccio teorico si basa sul teorema dell'energia cinetica.

Abbiamo detto che il moto di un masso roccioso in caduta lungo una scarpata, in base alle leggi della cinematica e della dinamica, può essere descritto in funzione delle variabili cinematiche e delle forze applicate al masso in relazione al tempo. **In particolare, si fa riferimento all'energia cinetica posseduta dal masso in caduta (EK)** che viene così definita:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

dove:

m = massa del blocco;

v = velocità del blocco.

L'unità di misura dell'energia cinetica è il Joule (J), così definito:

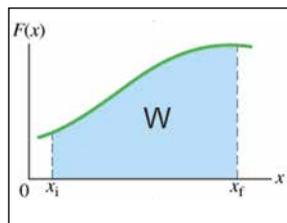
$$J = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$$

L'energia cinetica è una quantità scalare che assume sempre valore positivo o al più nullo, in quanto dipende da v<sup>2</sup>. L'interazione del blocco in caduta con l'ambiente esterno provoca una variazione del suo moto; in base all'equazione (1) si osserva che se cambia la velocità cambia pure l'energia cinetica che viene in parte dissipata negli urti (*in assenza di fratturazione del blocco*) attraverso la deformazione della superficie d'impatto (*coefficiente di restituzione*) e la produzione di calore.

Il trasferimento dell'energia cinetica da un corpo ad un altro viene chiamato lavoro (W). La formulazione matematica del lavoro è data da:

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

Figura 10



Ovvero il lavoro è una quantità scalare ricavata integrando il prodotto scalare tra la forza F agente sul corpo e il suo spostamento ds (Fig. 10). Ciò significa che per conoscere il lavoro fatto da una forza (F), dobbiamo sapere come

la forza varia lungo il percorso seguito dall'oggetto F(x). Se disegniamo il grafico di F(x) lungo il percorso, vediamo che il lavoro (W) corrisponde all'area sottesa dalla curva F(x) tra i punti di coordinate xi e xf.

Dalla fisica sappiamo che con il teorema dell'Energia cinetica possiamo mettere in relazione il Lavoro con l'Energia Cinetica. Infatti:

$$\vec{F} \cdot d\vec{s} = m a_T \cdot ds = m \frac{dv}{dt} ds = m \frac{ds}{dt} dv = m v dv \Rightarrow W = \int_{v_1}^{v_2} \vec{F} d\vec{s} = \int_{v_1}^{v_2} m v dv = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

Da cui otteniamo:

$$W = E_{K_f} - E_{K_i} = \Delta E_k \quad (2)$$

La relazione (2) ci permette di collegare il lavoro e l'energia cinetica e ci dice che un lavoro si manifesta sempre come variazione di energia cinetica di un corpo. Essa è sempre valida, qualunque sia la forza che compie il lavoro.

Possiamo calcolare in questo modo l'energia cinetica massima che viene dissipata dal blocco per abbattere la parete come il lavoro necessario, in un diagramma sforzo-spostamenti, per portare a rottura la stessa parete.

Nella fattispecie abbiamo fatto riferimento alla curva riportata nella figura 11 che rappresenta il risultato della prova di rottura eseguita sul pannello di muratura della figura 9. I dati calcolati sono riportati nella tabella 7:

Tabella 7 – Calcolo Energia Cinetica

kN	d (m)	KJ
193,35	0,0078	0,76
352,14	0,0247	4,02
517,01	0,0500	6,26
621,12	0,0719	3,42
676,72	0,0998	18,08
687,48	0,1283	19,42
193,35	0,0078	0,76
Somma		51,96
Arrotondato a		50,0
resistenza complessiva edificio		100,0

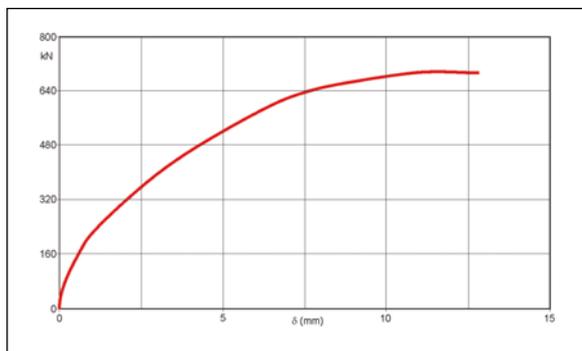


Figura 11 – Curva di resistenza sforzo-spostamento.

In base ai calcoli eseguiti otteniamo una resistenza delle due pareti che compongono gli edifici in muratura (*il contributo delle pareti interne viene tralasciato*) pari a 100 KJ.

**Verifica 2**

Per un ulteriore controllo sul valore della soglia di danneggiamento (100 kJ) scelto in base ai calcoli prima realizzati, abbiamo applicato il metodo delle curve di fragilità (Mavrouli et alii - 2014), che permette di effettuare una valutazione probabilistica delle prestazioni di una parete in muratura.

Le curve di fragilità esprimono la probabilità che all'aumentare dei livelli di energia cinetica di un blocco di roccia che impatta su una muratura, possa superarsi una data soglia di danno (*basso, moderato e alto*).

Allo scopo è stato sviluppato un software che fornisce una misura quantitativa della vulnerabilità degli edifici sottoposti ad impatto, che funge da input per la valutazione numerica del rischio in aree edificate. Il software calcola il danno atteso nelle murature soggette a impatti da caduta massi utilizzando il metodo degli elementi finiti (FEM).

Le variabili di input da applicare riguardano:

- a) la struttura della muratura: larghezza della parete e resistenza alla trazione della muratura;
- b) le proprietà del blocco di roccia impattante: velocità e volume.

Nel programma sono inoltre forniti dei data-base a cascata che facilitano l'inserimento dei valori di riferimento. Per lo sviluppo delle curve abbiamo definito le soglie di danneggiamento secondo i seguenti criteri:

1. **Danneggiamento basso:**  
- % dell'area del muro danneggiata compresa tra 10-20%;
2. **Danneggiamento moderato:**  
- % dell'area del muro danneggiata compresa tra 20-60%;
3. **Danneggiamento alto:**  
- % dell'area del muro danneggiata compresa tra 60-100%.

Nella fattispecie è stato eseguito uno studio probabilistico con i dati di input riportati nella tabella 8:

Tabella 8 – Dati di input per il calcolo delle curve di fragilità

Spessore parete (m)	
Minimo	0,3
Massimo	0,5
Medio	0,4
Resistenza a trazione (MPa)	
Minima	0,2
Massima	0,3
Media	0,25
Velocità del blocco (m/s)	
Minima	5
Massima	15
Media	10
Volume Blocco roccioso (m³)	
Minimo	1
Massimo	2
Soglie di danno %	
Basso	10-25
Moderato	25-55
Alto	55-100

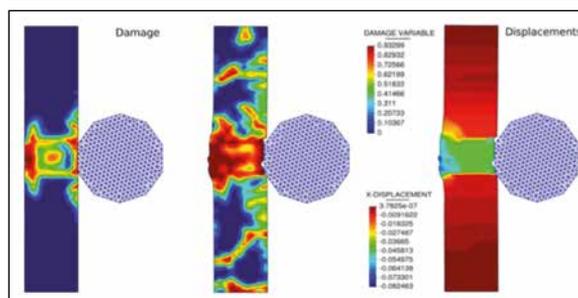


Figura 12 – Differenti percentuali di danneggiamento in caso di impatto di un blocco di roccia sferico a partire da una velocità di 5 m/s (da Mavrouli et alii 2014).

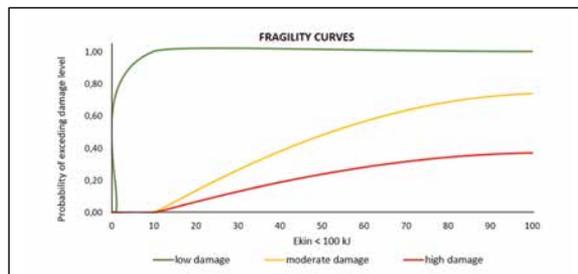


Figura 13

In base ai risultati delle curve di fragilità sviluppate (Fig. 13), il superamento dei livelli di soglia di danno è così distribuito:

**Tabella 9** - % di superamento delle soglie di danno

Energia (kJ)	% di superamento	Soglia di danno
100	100	Bassa
100	74	Moderata
100	37	Elevata

Come si può osservare, con un'energia di 100 kJ si ha un superamento del 74% della soglia di danno di tipo moderato (*percentuale dell'area del muro danneggiata compresa tra 20-60 %*), mentre la possibilità di superamento della soglia di danno di tipo elevato (*percentuale dell'area del muro danneggiata compresa tra 60 - 100 %*) risulta pari al 37%. Se consideriamo che, in base ai dati ricavati applicando il teorema dell'energia cinetica sul pannello di muratura prima riportata, un livello di energia cinetica di 100 kJ provocherebbe il crollo delle pareti, mentre con questo stesso valore energetico secondo la teoria delle curve di fragilità otteniamo un superamento della soglia di danno elevata solamente nel 37% dei casi, possiamo ritenere che il livello assunto di collasso teorico delle pareti è sufficientemente cautelativo.

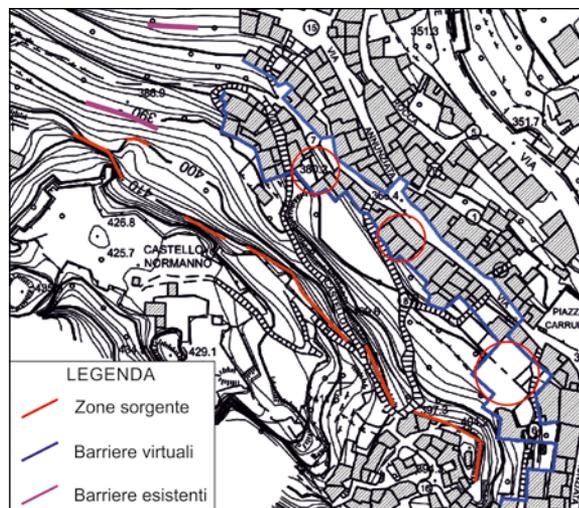
### Analisi traiettografica

Per riuscire a determinare la capacità distruttiva dei blocchi rocciosi in caduta dobbiamo calcolare la loro energia cinetica e la dissipazione di energia causata dall'urto con le pareti degli edifici.

Allo scopo abbiamo sviluppato un'analisi traiettografica in caduta in cui la simulazione della perdita di energia in seguito all'urto è stata valutata attraverso l'inserimento nel pendio a valle della scarpata rocciosa, in corrispondenza della prima e della seconda fila di abitazioni, di due barriere paramassi "virtuali" ognuna della capacità di 100 kJ (Cfr calcolo precedente) con altezza di 3 m (le abitazioni in genere sono ad un solo piano) che simulano l'impatto del blocco con la prima e la seconda fila di case.

Per implementare un procedimento atto alla definizione delle energie cinetiche dei blocchi al momento dell'urto con i target a valle, dobbiamo passare, così come prescritto nella FASE 3 del DDG 1067 (Decreto Crolli), ad uno stadio di modellazione atto alla definizione del cosiddetto "crollo di progetto".

Tale modellazione secondo quanto stabilito all'interno delle linee guida predisposte dall'European Organisation for Technical Assessment (EOTA) nella Guida per il benessere tecnico Europeo di Sistemi di Protezione Paramassi denominato ETAG 027, deve fare riferimento alle possibili tipologie di crollo indicate dalla normativa tecnica:



**Figura 14** – Ubicazione barriere esistenti e virtuali.

1. crollo di un masso isolato;
2. crollo di uno sciame di blocchi;
3. crollo che si esplica in condizioni temporali tali da poter essere considerato come un unico evento;
4. crolli ripetuti, concentrati in tempi ristretti, lungo la stessa direttrice.

In base alle osservazioni di campagna ed agli studi ed analisi precedentemente esposti, come blocco di progetto per le verifiche abbiamo scelto la tipologia di caduta di un blocco singolo escludendo la possibilità di caduta di sciame di blocchi. Ai blocchi sottoposti a verifica abbiamo dato un volume variabile tra 0,16 e 1,26 m<sup>3</sup>, con un incremento rispetto al volume massimo calcolato pari a 1,3.

### Barriere

Nel modello sono state definite 4 barriere, di cui 2 esistenti (in viola nella figura 14) e 2 virtuali (in blu nella figura 14) la cui resistenza è stata posta pari a quella delle due pareti esterne di un singolo edificio in muratura. Nella fattispecie affinché il blocco possa oltrepassare la barriera virtuale dovrà superare anche le due pareti esterne dell'edificio (tale calcolo è comunque cautelativo perché quando il blocco impatta con la prima parete, prima di colpire la seconda ha già subito una perdita di energia, anche in funzione della disposizione delle pareti interne degli edifici e di eventuali altri ostacoli, considerato però il fine del lavoro possiamo accettare questa ipotesi).

La barriera virtuale di monte è stata segnata come continua, pur essendoci tre aree (evidenziate con i cerchi rossi nella figura 14) che apparentemente sembrano prive di edifici, in quanto in corrispondenza di tali zone esistono dei ruderi privi di tetto, però con le pareti in muratura ancora efficienti (Cfr fig. 14). Alle barriere esistenti è stata assegnata una resistenza di 500 kJ, alle barriere virtuali una resistenza di 100 kJ.

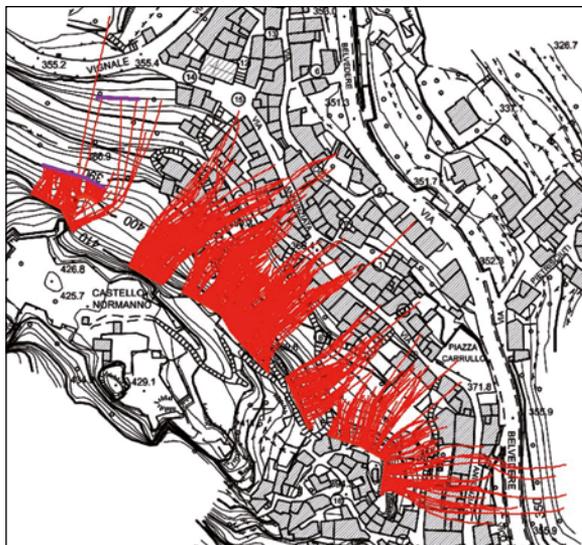


Figura 15 – Traiettorie in assenza di azione frenante degli edifici.

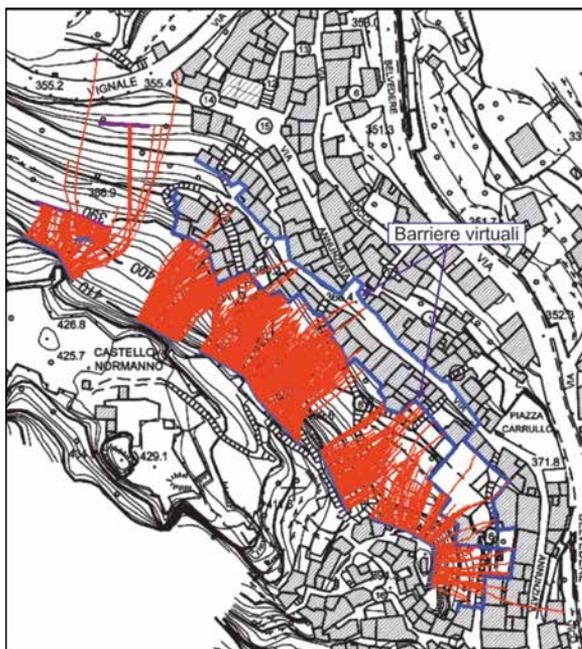


Figura 16 – Traiettorie ottenute considerando l'azione frenante degli edifici.

### Verifica eseguita senza considerare l'azione frenante degli edifici

Nella figura 15 abbiamo riportato una verifica effettuata senza considerare l'azione frenante dovuta agli edifici ed inserendo le sole due barriere paramassi esistenti; in essa come si può osservare i percorsi dei blocchi interessano oltre quattro file di abitazioni.

### Verifica eseguita considerando l'azione frenante degli edifici

Nella figura 16 e nella tabella 10 vengono riportate le traiettorie e gli impatti sulle pareti di monte degli edifici (*barriere virtuali*). Come si può osservare l'azione frenante dei fabbricati riduce sensibilmente le lunghezze dei tracciati rispetto alla simulazione precedente.

Da notare che nonostante la Barriera esistente n° 1 intercetti 181 traiettorie, essa risulta ancora insufficiente in quanto viene scavalcata da alcuni massi che proseguono la loro traiettoria verso valle fino alla via Vignale e oltre.

Sulla Barriera virtuale n° 1 (*quella posta più a monte*) si riscontrano 120 impatti, a dimostrazione dell'estrema pericolosità della porzione di monte dell'abitato di Forza d'Agro, con energia cinetica massima fino a 421,8 kJ (*modulo 9*). Sulla Barriera virtuale 2, posta immediatamente più a valle della 1, si riscontrano solamente 10 impatti con energia cinetica massima pari a 336,1 kJ, a dimostrazione che quasi tutti i blocchi si fermano prima nell'impatto con la barriera virtuale 2, ovvero l'energia dei blocchi in caduta viene quasi completamente assorbita dagli urti con la prima fila di abitazioni di monte.

Nella figura 17 e nella tabella 10 sono riportati gli impatti sui moduli delle 4 barriere (2 esistenti e 2 virtuali). Le traiettorie che non producono impatti sulle barriere sono state omesse.

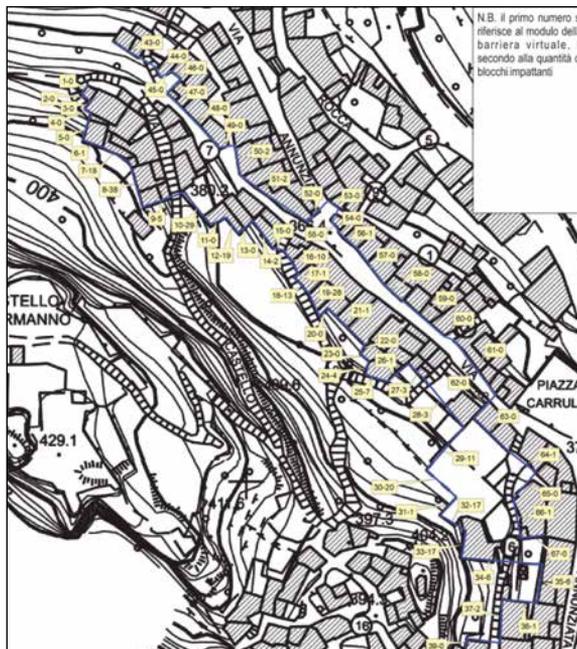


Figura 17 – N° di impatti sui moduli delle barriere virtuali (il primo numero si riferisce al modulo il secondo ai blocchi impattanti).

Tabella 10 – Impatti sulle barriere

Nome	n°	H <sub>MAX</sub> [m]	H <sub>0,95</sub> [m]	V <sub>tr,MAX</sub> [m/s]	V <sub>tr,0,95</sub> [m/s]	E <sub>tr,MAX</sub> [kJ]	E <sub>tr,0,95</sub> [kJ]
Barriera esistente 1 - Modulo 1	124	2.3597	1.376	14.01	10.17	157.014	58.947
Barriera esistente 1 - Modulo 2	57	1.4752	0.916	8.46	6.85	39.101	23.614
Barriera esistente 2 – Modulo 1	3	1.6984	2.167	10.09	12.93	109.691	133.701
Barriera 3 - Modulo 6	1	0	0	4.36	4.36	12.764	12.764
Barriera 3 - Modulo 7	18	2.0416	1.471	14.87	13.88	123.199	103.505
Barriera 3 - Modulo 8	38	0.555	0.4474	12.62	11.3	118.496	78.981
Barriera 3 - Modulo 9	5	0.2688	0.3274	10.57	10.5	95.532	86.194
Barriera 3 - Modulo 10	29	1.6368	1.6773	18.42	15.4	234.176	147.295
Barriera 3 - Modulo 12	19	1.1476	0.7463	10.28	9.91	104.344	65.049
Barriera 3 - Modulo 14	2	1.2427	1.5767	6.72	6.9	71.993	84.304
Barriera 3 - Modulo 16	10	2.9337	1.9024	9.41	9.1	54.111	40.42
Barriera 3 - Modulo 17	1	0	0	5.48	5.48	26.197	26.197
Barriera 3 - Modulo 18	13	1.7153	1.3342	12.35	14.58	113.19	74.787
Barriera 3 - Modulo 19	26	1.5171	1.3239	11.89	10.74	122.443	88.975
Barriera 3 - Modulo 21	1	0.9882	0.9882	6.66	6.66	4.541	4.541
Barriera 3 - Modulo 24	4	0.2598	0.2655	8.83	10.06	74.949	80.02
Barriera 3 - Modulo 25	7	0.6296	0.7756	11.49	12.91	78.305	88.015
Barriera 3 - Modulo 27	3	0.1832	0.2125	7.06	8.1	40.414	54.352
Barriera 3 - Modulo 28	3	0.842	1.0208	15.08	16.12	239.356	264.549
Barriera 3 - Modulo 30	20	2.868	2.3871	14.9	16.08	249.29	178.427
Barriera 3 - Modulo 31	1	0	0	9.28	9.28	148.342	148.342
Barriera 3 - Modulo 32	17	2.5031	2.6096	17.31	16.73	314.006	272.038
Barriera 3 - Modulo 33	17	1.8246	1.9999	14.11	14.46	275.753	260.08
Barriera 3 - Modulo 34	6	0.7029	0.7196	6.44	7.58	50.927	47.851
Barriera 3 - Modulo 35	6	1.6209	1.8299	18.03	16.52	117.369	133.371
Barriera 3 - Modulo 36	1	0	0	7.84	7.84	25.273	25.273
Barriera 3 - Modulo 37	11	2.6476	2.0132	10.79	10.63	155.212	148.806
Barriera 3 - Modulo 38	1	0.782	0.782	6.98	6.98	82.006	82.006
Barriera 3 - Modulo 39	0	0	0	0	0	0	0
Barriera 3 - Modulo 40	79	3.6691	2.4775	16.48	14.61	254.022	116.538
Barriera 3 - Modulo 41	86	2.955	2.2546	17.42	11.43	86.734	53.592
Barriera 3 - Modulo 42	5	0.3632	0.4326	9.15	9.64	39.924	41.697
Barriera 4 - Modulo 50	2	0	0	13.82	16.52	299.684	389.176
Barriera 4 - Modulo 51	2	0.1109	0.1137	5.61	6.63	17.598	20.303
Barriera 4 - Modulo 56	1	0	0	7.16	7.16	18.712	18.712
Barriera 4 - Modulo 64	1	0.001	0.001	2.45	2.45	2.586	2.586
Barriera 4 - Modulo 66	1	0.9989	0.9989	11.73	11.73	63.861	63.861
Barriera 4 - Modulo 67	0	0	0	0	0	0	0

## Analisi della pericolosità

Tralasciando il metodo di valutazione della Pericolosità da frana in roccia adottato in Norvegia, valido per grandi pendii, tra i metodi più avanzati ed ampiamente utilizzati sulla gestione del rischio di crollo possiamo annoverare quello adottato in Svizzera (ERHA).

### ERHA (Evolving Rockfall Hazard Assessment procedure)

I quattro elementi principali della strategia di gestione del rischio naturale in Svizzera sono dati dalla:

- valutazione dei pericoli;
- definizione dei requisiti di protezione;
- pianificazione delle misure;
- pianificazione delle emergenze.

Le tecniche per lo sviluppo di mappe di pericolosità da frana sono delineate nella raccomandazione federale “Codice di comportamento per il rischio di frana e pianificazione territoriale”, pubblicata nel 1997. Esse si basano su:

1. Registro degli eventi  
Si tratta di database, chiamati “StorMe”, che rappresentano un prerequisito indispensabile per l’identificazione delle pericolosità basata sull’informazione degli eventi passati.
2. Classificazione delle frane  
Per ciò che concerne le frane di crollo la suddivisione è basata sulla velocità di caduta, la dimensione degli elementi (*diametro dei blocchi*) e i volumi coinvolti.
3. Mappe dei fenomeni franosi  
Per ogni determinata zona si redige una mappa dei fenomeni di frana con associati rapporti tecnici ove si riportano le manifestazioni, le prove e le indicazioni dell’instabilità del pendio osservate sul campo.
4. Mappe della pericolosità da frana  
La pericolosità è definita come la probabilità che un fenomeno naturale potenzialmente dannoso avvenga in un determinato periodo di tempo e in una determinata area (IDNDR 1993). La valutazione della pericolosità implica la stima dell’intensità di un evento nel tempo.

In tutto sono considerati tre livelli energetici, che corrispondono alle seguenti classi di intensità:

- a) Bassa (<30 kJ);
- b) media (30 – 300 kJ);
- c) Alta > 300 kJ;

Per quanto riguarda la probabilità di accadimento, i livelli vengono associati ai corrispondenti periodi di ritorno:

- a) alta T. R. 1-30 anni;
- b) media T. R. 30-100;
- c) bassa 100-300 anni.

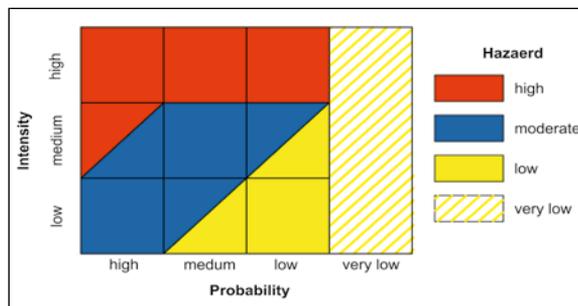


Figura 18 – Diagramma dei livelli di pericolosità in funzione della Probabilità e dei livelli di intensità.

Il lavoro da svolgere per un potenziale pericolo è quindi quello di determinare la sua intensità per i livelli di probabilità scelti in punti selezionati in un’area specifica.

La probabilità di accadimento di caduta delle rocce dovrebbe essere stimata tenendo conto delle tracce di eventi precedenti verificatisi negli ultimi 300 anni. Ciò consente di stabilire zone di bassa, media o alta probabilità di avvenimento.

Le Pericolosità associate ad una probabilità di accadimento molto bassa sono solitamente schedate, nella classificazione standard, come “Pericolosità residue” (Zona tratteggiata in giallo nel diagramma di figura 18). Nel campo dei pericoli legati ai movimenti di massa, il limite inferiore per un “pericolo residuo” è fissato ad un evento con un periodo di ritorno di 300 anni.

### Valutazione della Pericolosità e Rischio nel PAI

In Italia la metodologia di valutazione del rischio viene realizzata facendo riferimento alla definizione data nel D.P.C.M. 29/9/98 (*Atto di indirizzo e coordinamento*). In esso il rischio totale, così come specificato nel rapporto UNESCO di Varnes & Jaeg (1984), è il risultato del prodotto di tre fattori:

$$R = H * V * E$$

dove:

- *Rischio totale (R)*: è il numero atteso di perdite umane, feriti, danni alle proprietà, interruzione di attività economiche, in conseguenza di un particolare fenomeno naturale.
- *Pericolosità (H)*: è la probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di determinata intensità si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area. **Essa è espressa in termini di probabilità annuale o di tempo di ritorno e perciò viene riferita ad una determinata intensità del fenomeno ed alla sua frequenza nel tempo;**
- *Vulnerabilità (V)*: è il grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi esposti a rischio, risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data intensità;

- *Elementi a rischio (E)*: comprendono la popolazione, le proprietà, le attività economiche, inclusi i servizi pubblici etc.

Nel calcolo del Rischio Totale per ciò che concerne l'assetto geomorfologico del territorio, a parte la Vulnerabilità e gli Elementi a rischio che vengono ricondotti ad alcune situazioni tipo, assume una grande rilevanza la valutazione della Pericolosità da frana (*H*).

Nel PAI tale valutazione viene riferita alla definizione dell'intensità o magnitudo (*M*) dell'evento, intesa come "severità" meccanica e geometrica del fenomeno potenzialmente distruttivo, e dello stato di attività che fornisce solamente una prima valutazione di tipo temporale e quindi, in un certo senso, della propensione al dissesto di quel territorio.

Un altro elemento che concorre a determinare la pericolosità è dato dalla tipologia delle frane, la cui valutazione viene fatta in considerazione della velocità del fenomeno, ovvero della rapidità di evoluzione del meccanismo di rottura, secondo la seguente classificazione:

- T1: deformazioni gravitative profonde in roccia, creep, espansione laterale, colate lente;
- T2: frane complesse, scorrimenti e colamenti in roccia, detrito e terra;
- T3: scivolamenti rapidi in roccia, detrito e terra, crolli, colate rapide di fango.

Nella fattispecie le **frane di crollo**, per ciò che attiene lo stato di attività, vengono valutate in modo differente rispetto alle altre tipologie di dissesto. Esse infatti sono classificate tra i fenomeni più imprevedibili e pericolosi e sono perciò considerate sempre come "Attive". L'unica indicazione data nel PAI per tale tipologia di dissesti, riguarda la delimitazione dell'effettiva area sorgente dei distacchi rocciosi. Con l'emanazione in Sicilia del D.D.G. 1067 del 25/11/2014, sono state altresì stabilite una serie di regole atte a delimitare in modo più oggettivo anche le zone di possibile transito dei blocchi a valle delle scarpate rocciose. Nel decreto l'area di run-out del crollo viene però determinata solo da fattori connessi con il fenomeno come se questo fosse sempre presente a prescindere dalla sua probabilità di accadimento.

**È evidente che il tipo di analisi appena descritto, anche in presenza del D.D.G. 1067, pur essendo riferita ad una determinata intensità del fenomeno, non consente di quantificare l'effettivo grado di Pericolosità di una potenziale frana da crollo ed il livello di Rischio ad essa associato, in quanto non tiene conto della probabilità di accadimento dell'evento o del suo tempo di ritorno.**

In realtà alla definizione di pericolosità e del conseguente rischio dovrebbe essere sempre accoppiata una valutazione probabilistica della possibilità di accadimento di un determinato evento, anche semplicemente basata su indizi e

segnali raccolti sul campo. Ciò avrebbe il grande vantaggio di stabilire, in frane della stessa tipologia, una gerarchia delle pericolosità basata, oltre che sull'estensione dell'evento o sul numero di persone coinvolte, sulla frequenza attesa di accadimento di certi fenomeni e sui loro possibili tempi di ritorno. Ciò porterebbe anche un notevole beneficio economico in sede di programmazione degli interventi di mitigazione del rischio.

Per essere più chiari, un fenomeno che coinvolge 1000 persone con un tempo di ritorno di 300 anni è molto meno pericoloso di un evento che coinvolge 100 persone con un tempo di ritorno di 30 anni.

Anche in base alle definizioni sviluppate dall'Ufficio del coordinatore delle Nazioni Unite delle operazioni di soccorso in caso di disastro (UNDRO, 1979) e l'Australian Geomechanics Society, l'analisi della pericolosità e del conseguente rischio dovrebbe sempre essere basata sullo studio della frequenza degli eventi nel passato e sulle probabili conseguenze. Essa si dovrebbe sviluppare attraverso i seguenti parametri:

1. Probabilità spaziale e temporale di avvenimento di un evento pericoloso;
2. Probabilità di impatto spaziale e temporale dell'evento;
3. Valore degli elementi a rischio;
4. Vulnerabilità degli elementi a rischio.

Nelle analisi di rischio del PAI il parametro 3 viene valutato con il valore strategico dell'elemento strutturale secondo la scala da 1 a 4 stabilita dal D.P.C.M. 29 settembre 1998, il parametro 4 viene posto sempre uguale a 1 cioè massima vulnerabilità a prescindere dal fenomeno, in funzione del principio di massima cautela in sede di pianificazione.

Certamente è spesso difficile fare una valutazione del tempo di ritorno del distacco di un blocco roccioso, o prevedere quando una frana inattiva può riattivarsi; bisogna peraltro dire che l'applicazione integrale dei metodi proposti in altre nazioni non copre le varie possibilità di pericolosità e rischio in aree territoriali essenzialmente diverse. Per esempio, in Svizzera sono considerati tre livelli di intensità, espressi in kJ, di un evento: 1-30; 30-300 e > 300.

Una tale classificazione nel nostro caso sarebbe poco adatta, infatti se la classe 1-30 kJ in Svizzera risulta molto importante perché rappresenta il livello di rottura delle staccionate in legno che proteggono i binari ferroviari, nel nostro caso specifico diventano più importanti le soglie di energia cinetica di 100 kJ (*resistenza delle murature di una fila di edifici*) e di 200 kJ (*resistenza delle murature di due file di edifici*).

Nel presente lavoro, considerata la delicatezza del problema, non abbiamo voluto trascurare gli aspetti probabilistici dei fenomeni franosi, ovvero nel caso di caduta di blocchi rocciosi, dei tempi di ritorno attesi per eventi similari a quello in esame. In definitiva i due parametri significativi

applicati sono i **tempi di ritorno e l'energia d'impatto**, quest'ultima però, in relazione al caso in studio, viene suddivisa in livelli che tengono conto delle vulnerabilità degli elementi a rischio riscontrati in loco.

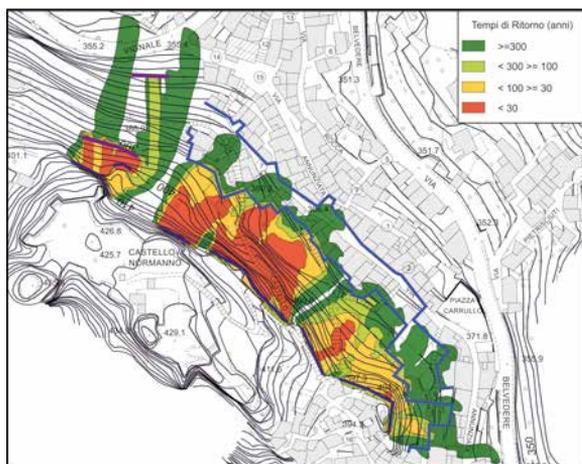
**Tempi di ritorno**

Per ciò che concerne i tempi di ritorno, in base ai sopralluoghi effettuati e in relazione al numero di blocchi di volume significativo caduti negli ultimi anni e visibili al piede della scarpata e lungo essa, abbiamo valutato una frequenza di caduta massi non superiore ai 3 blocchi/anno; per realizzare una simulazione che ricopre un arco di tempo di 300 anni è stata perciò eseguita un'analisi traiettografica comprendente un totale di 900 lanci, Come periodi significativi dei tempi di ritorno sono stati scelti i seguenti intervalli:

**Tabella 11** – Classificazione in base ai tempi di ritorno

Tempi ritorno (anni)	Impedenza
1 <= 30	probabilità dell'evento elevata
>30 <=100	probabilità media
>100 <300	probabilità bassa
>= 300	probabilità molto bassa

La simulazione sviluppata evidenzia che il maggior numero di blocchi con T.R. compreso tra 1 e 30 anni sono visibili nella fascia di terreni a monte dell'area ove insistono le abitazioni, a ridosso delle quali (barriera virtuale 1) si riscontrano zone con T.R. compresi tra 30 e 100 anni e in minor misura tra 100 e 300 anni. Al di là della barriera virtuale n° 1 i tempi di ritorno sono >= a 300 anni (Cfr fig. 19).



**Figura 19** – Tempi di ritorno degli eventi.

**Energia d'impatto**

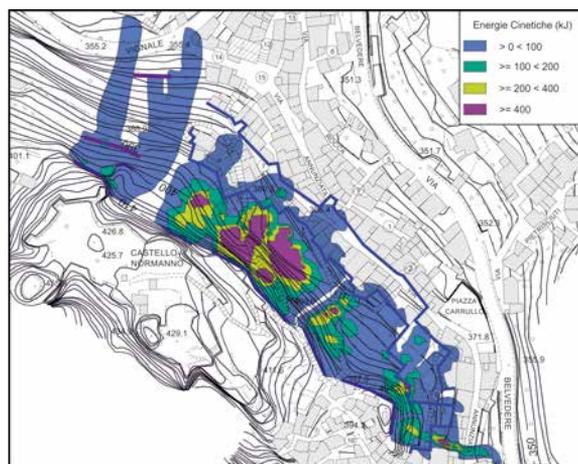
Per quantificare l'energia d'impatto nelle zone esposte (che rappresenta la somma dell'energia traslazionale e dell'energia di rotazione) abbiamo suddiviso, in relazione alle problematiche specifiche dell'area ed alle resistenze delle pareti degli edifici, i valori in kJ risultanti in 4 classi d'intensità che variano da:

**Tabella 11** – Classificazione in base all'Energia cinetica dei blocchi

Classe Energia Cinetica (kJ)	Impedenza
> 0 >100	livello di sollecitazione moderato (danni più o meno rilevanti alla prima fila di edifici)
>=100 <200	livello di sollecitazione medio-alto (supera la soglia di resistenza della prima fila di edifici ma non quella della seconda fila)
>= 200 <400	livello di sollecitazione alto (energia sufficiente a superare le prime due file di edifici);
>= 400	livello di sollecitazione molto alto (energia cinetica sufficiente a danneggiare più file di edifici)

Energie cinetiche

L'analisi 2D delle energie cinetiche evidenzia che le zone ove si sviluppano le maggiori energie sono rappresentate dall'area centrale del fronte esaminato e da quella sud-orientale, a monte dell'area edificata. In corrispondenza del centro abitato si ha una rapida diminuzione delle energie che si esauriscono completamente nella prima fila di abitazioni a valle delle vie Rocca e Santissima Annunziata.



**Figura 20** – Energie cinetiche.

### Carta della Pericolosità versante settentrionale

Il lavoro svolto per definire le differenti aree di pericolosità è stato quindi quello di determinare le energie cinetiche sviluppate dai blocchi in caduta (*intensità dell'evento*) e di valutarne i corrispondenti tempi di ritorno (*probabilità di accadimento*). I valori così ottenuti sono stati incrociati attraverso una matrice per ottenere una carta di Pericolosità che meglio si approssima alla definizione di *Hazard* descritta nel rapporto UNESCO di Varnes & Jaeg (1984). Per la determinazione dei predetti valori di Pericolosità abbiamo fatto riferimento alla matrice delle Pericolosità di figura 21 tratta da quella Svizzera, modificata per tenere conto delle condizioni locali:

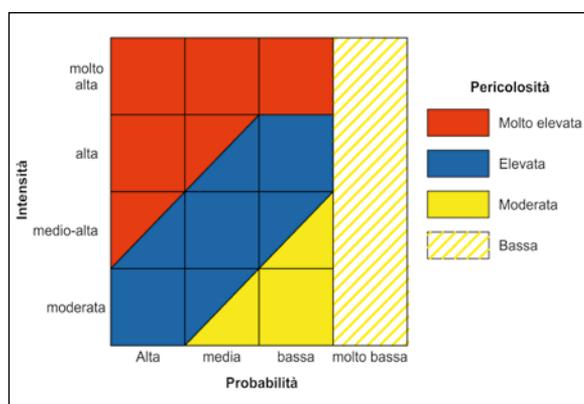


Figura 21 – Matrice delle Pericolosità (modificata).

Come si può osservare per valori di intensità molto elevati la conseguente Pericolosità è anch'essa molto elevata, per probabilità da Alta fino a Bassa; i valori di Pericolosità diventano bassi per T.R. >= a 300 anni (*probabilità molto bassa*). Per intensità moderate si ha una Pericolosità moderata a partire da probabilità da media fino a bassa. La Pericolosità Elevata si pone come una fascia interposta tra la Pericolosità molto elevata e quella Moderata.

L'interpolazione delle carte delle intensità e delle probabilità con la matrice di figura 21 è riportata nella figura 22.

A titolo di esempio, abbiamo provato ad utilizzare la suddivisione delle pericolosità dell'areale di propagazione del fenomeno di crollo operata con la metodologia Svizzera modificata, per una simulazione dei livelli di rischio in base alle matrici del PAI (figura 23).

In essa possiamo osservare che i blocchi che proseguono il loro percorso a valle della prima barriera "virtuale", sono rappresentati da traiettorie con tempi di ritorno uguali o maggiori ai 300 anni, ciò indica per queste zone un livello di pericolosità moderato (P1). I livelli di Rischio sono stati ottenuti interpolando i livelli di Pericolosità con gli elementi a Rischio.

La via Vignale, pur essendo soggetta a pericolosità P1, è

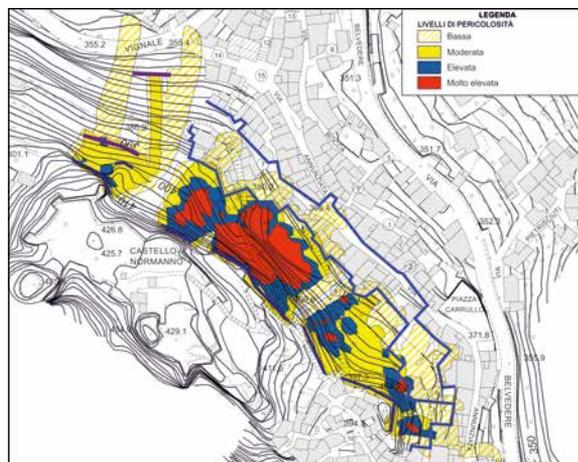


Figura 22 – Carta della matrice delle Pericolosità.

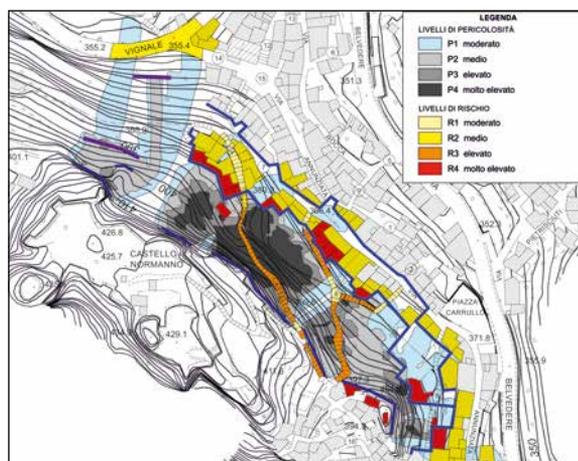


Figura 23 – Carta delle Pericolosità versante settentrionale.

stata considerata come un elemento a rischio R2 perché di fatto rappresenta una via di fuga per alcuni nuclei abitati presenti ad ovest e a sud-ovest del centro abitato.

Emerge subito il fatto che molte situazioni di rischio medio sembrerebbero, ad una prima analisi, poco cautelative per l'edificato urbano e la viabilità interna. Ciò è spiegabile con la necessità, una volta adottata una metodologia che tiene conto della probabilità temporale di accadimento, di approfondire le valutazioni sul parametro E (*valore dell'elemento a rischio*) e V (*vulnerabilità*), inserendo stime basate sia sulla vulnerabilità strutturale sia di quella relativa alla reale fruizione delle strutture.

Evidentemente un ulteriore passo avanti andrebbe fatto in prima analisi a livello culturale, sul concetto di accettabilità del rischio (*dove per rischio accettabile si intende un valore limite di soglia al di sotto del quale la popolazione*

e la società nel suo insieme sono disposte a tollerare l'esposizione al rischio, tenuto conto del tipo del fenomeno potenzialmente pericoloso, del livello di consapevolezza dell'esposizione al rischio ovvero del rischio percepito, della volontarietà o involontarietà dell'esposizione al rischio, del tipo di elemento a rischio, ovvero vite umane e beni economici e dei conseguenti aspetti giuridici penali e civili), in maniera da concordare socialmente la scala opportuna per l'identificazione dei livelli di rischio derivanti da carte che differenziano la pericolosità in base alla probabilità di accadimento temporale.

Pertanto la simulazione del rischio riportata nella figura 23, apparentemente, non è direttamente collimabile a quella che si ricava dall'applicazione del PAI che è più cautelativa in relazione sia al mancato approfondimento delle probabilità di accadimento del fenomeno, sia della valutazione del rischio accettabile che della vulnerabilità e del reale utilizzo delle strutture; essa però permette, già in questa fase, di ottenere valutazioni di dettaglio sulle priorità di intervento per azioni mirate di prevenzione e protezione.

### Considerazioni conclusive

Per determinare il reale stato di pericolosità di una frana da crollo, ubicata immediatamente a monte dell'abitato di Forza d'Agrò, abbiamo sviluppato uno studio applicando i modelli cinematici analitici previsti nel D.D.G. n. 1067 dell'Assessorato Regionale Territorio e Ambiente - Dipartimento Regionale dell'Ambiente.

Nella realizzazione dello studio per valutare il reale transito ed arresto dei blocchi si rendeva necessario misurare la capacità di penetrazione di un masso in caduta nel centro abitato ed il conseguente numero di case coinvolte, ovvero la capacità di dissipazione dell'energia cinetica in seguito all'urto con le pareti delle abitazioni, parametro fondamentale che influenza fortemente la lunghezza del percorso dei massi.

Per stimare ciò bisognava accertare la resistenza all'urto delle pareti murarie delle abitazioni e la soglia di danno minima capace di provocare il collasso delle murature. Lo scopo è stato raggiunto attraverso l'applicazione di due diverse metodologie date rispettivamente dal Teorema dell'Energia Cinetica e da un'analisi ai FEM attraverso curve di fragilità delle strutture murarie. In base a questi due metodi abbiamo stabilito una soglia di danno di 100 kJ.

Una volta determinata l'estensione dell'areale di transito dei blocchi bisognava tradurre i risultati dell'analisi traiettografica in aree di pericolosità e di rischio. Allo scopo abbiamo applicato un software capace di lavorare su DTM. Il problema che abbiamo avuto però è stato rappresentato dal fatto che in quest'area il DTM Sicilia è risultato impreciso a causa di una morfologia troppo articolata e quindi non utilizzabile ai nostri scopi; abbiamo dovuto così ricostruire

su base cartografica un DEM che meglio si adattava alla conformazione del territorio.

Per definire l'effettivo grado di Pericolosità di una potenziale frana da crollo ed il livello di Rischio ad essa associato, abbiamo considerato che quest'ultimo non può essere riferito semplicisticamente ad una determinata intensità del fenomeno di crollo, specialmente in una condizione delicata come quella di un centro abitato; in tali condizioni si rende necessaria anche la quantificazione della probabilità di accadimento dell'evento o del suo tempo di ritorno.

Nel calcolo del Rischio Totale, infatti, per ciò che concerne l'assetto geomorfologico del territorio, a parte la Vulnerabilità e gli Elementi a rischio che vengono ricondotti ad alcune situazioni tipo, assume una grande rilevanza la valutazione della Pericolosità da frana (*Hazard*).

Quest'ultima analisi deve tenere conto, per una sua compiuta definizione, della probabilità di accadimento di un particolare evento. Certamente fare una valutazione del tempo di ritorno del distacco di un blocco roccioso, o prevedere quando una frana inattiva può riattivarsi non è né facile né agevole. Per risolvere questo problema in altre Nazioni sono stati sviluppati diversi metodi di valutazione del rischio, su base statistica, come quello valido per grandi pendii rocciosi instabili proposto in Norvegia o quello messo a punto in Svizzera.

Nel presente lavoro il calcolo dei tempi di ritorno è stato realizzato in base alla valutazione delle osservazioni dirette dei tecnici comunali nel corso degli ultimi anni, determinando una stima della frequenza di caduta massi non superiore ai 3 blocchi/anno; tenuto conto che l'analisi traiettografica è stata eseguita su un totale di 900 lanci abbiamo ottenuto una simulazione che ricopre un arco di tempo di 300 anni.

Come periodi significativi dei tempi di ritorno sono stati scelti, in accordo alle norme Svizzere, i seguenti intervalli: 1-30 anni (*probabilità dell'evento elevata*), 30 -100 anni (*probabilità moderata*) e 100 - 300 anni (*probabilità bassa*) > 300 anni (*probabilità molto bassa*).

I dati delle modellazioni sui crolli così realizzate permettono di sviluppare delle analisi statistiche che possono consentire un calcolo realistico della pericolosità effettiva del fenomeno in ogni punto dell'areale di propagazione dei massi. Facendo riferimento alle tabelle utilizzate da molte nazioni all'avanguardia nella prevenzione degli usi territoriali rispetto alle condizioni di pericolosità geomorfologica, si è potuta definire una carta delle pericolosità di un versante soggetto a crolli che comprenda il fattore temporale di accadimento e le energie in gioco nella condizione morfologica complessa di un centro urbano storico di pregio. Le esemplificazioni introdotte per illustrare il fenomeno e determinare i 4 gradi di pericolosità su base semiquantitativa sono congruenti con la scala di pianificazione necessaria a differenziare spazialmente e quantitativamente le attività

necessarie per la gestione del rischio.

In particolare, la possibilità di differenziare gli effetti del fenomeno sull'edificato e di individuare i singoli immobili maggiormente colpiti per impatto energetico e frequenza temporale, permette di agire direttamente sui comportamenti dei residenti, operando sgomberi o limitazioni d'uso e iniziando a intervenire con gradualità, riducendo passo-passo la vulnerabilità (con costi moderati) o utilizzando efficacemente i finanziamenti esterni per progetti mirati di mitigazione della pericolosità e del rischio.

Rimane a questo punto la necessità di introdurre una scala del rischio basata sull'esposizione sia della struttura che delle persone, e determinare a livello nazionale il rischio idrogeologico "accettabile" (in genere nel mondo risulta superiore ad un caso su 100.000 o su 1.000.000 di persone esposte) per indirizzare la programmazione degli interventi e individuare le delocalizzazioni inevitabili.

## Bibliografia

- Regione Sicilia – 2004 – Relazione generale del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico della Sicilia.
- W.R. DEARMAN – 1991- *Engineering Geological Mapping* – 1st Edition - Elsevier Butterworth-Heinemann.
- A. PALMSTRÖM – 1996 a - *Characterizing rock masses by the RMI for Use in Practical Rock Engineering* – Part 2 - Tunnelling and Underground Space Technology 11(3):287-303.
- BARTON, N.R. (1988). "Rock Mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection using the Q-system". In Kirkaldie, L. (ed.). Rock Classification Systems for Engineering Purposes: ASTM Special Technical Publication 984. 1. ASTM International. pp. 59-88. doi:10.1520/STP48464S. ISBN 978-0-8031-0988-9.
- BIENIAWSKI Z.T. (1989): *Engineering Rock Mass Classification*, John Wiley & Son.
- ROMANA, M., TOMÁS, R., SERÓN, J.B. (2015). *Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review*. ISRM Congress 2015 Proceedings - International Symposium on Rock Mechanics, Quebec, Canada, May 10 to 13 2015. ISBN 978-1-926872-25-4, 10 pp.
- PALMSTROM A. (2005) - *Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD)* - Tunnels and Underground Space Technology 20 (2005) 362-377.
- PITEAU D.R. & CLAYTON R. (1976): *Computer Rockfall Model. Proceedings Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness*. Bergamo, Italy. ISMES Publication n. 90, Bergamo, Italy, 123-125.
- G.P. GIANI - *Analisi del moto di caduta di massi - opere di protezione contro la caduta massi, aspetti progettuali* - Associazione Georisorse e Ambiente (GEAM) Torino, (dicembre 2011).
- E. HOEK (1987): *A basic microcomputer program for analysis of rockfalls*. University of Toronto, Dept. Civil Eng. CIV 1460S, Rock Eng.
- T. PFEIFFER & T. BOWEN (1989a): *Colorado Rockfall Simulation Program*. Colorado School of Mines - U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Final Report.
- T. PFEIFFER & T. BOWEN (1989b): *Computer simulation of rockfalls*. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, XXVI, 1, 135-146.
- M.J. KIRKBY & I. STATHAM (1975): *Surface stone movement ad scree formation*. Journal of Geology, 83:349-362.
- O. MAVROULI • S. FOTOPOULOU • K. PITILAKIS • G. ZUCCARO • J. COROMINAS • A. SANTO • F. CACACE • D. DE GREGORIO • G. DI CRESCENZO • E. FOERSTER • T. ULRICH (2014) - *Vulnerability assessment for reinforced concrete buildings exposed to landslides* - Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014.
- O. MAVROULI, P. G. GIANNPOULOS, J. M. CARBONELL AND C. SYRMAKEZIS - *Damage analysis of masonry structures subjected to rockfalls*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016
- Regione Sicilia (2013) – Assessorato Regionale Territorio e Ambiente Dipartimento - Regionale dell'Ambiente D.D.G. n. 1067 "Direzioni per la redazione degli studi di valutazione della pericolosità derivante da fenomeni di crollo" G.U.R.S. n. 53 del 2014.
- ETAG 27 (2008) - European Organisation for Technical Approvals - *Guida per il Benessere Tecnico Europeo di Sistemi di Protezione Paramassi*.
- VARNES D.J., IAEG (1984): "The principles and practise of landslide hazard zonation" UNESCO Press, Parigi.
- UNDRO (1979) *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*. Report of Expert Group Meeting, Office of United Nations Disaster Relief Co-Ordinator (UNDRO), Palais des Nations, CH-1211 Geneva 10, Switzerland.
- United Nations (1992) - Department of Humanitarian Affairs - Internationally agreed glossary of basic terms related to Disaster Management - DHA-Geneva.
- Australian Geomechanics Society Sub-Committee on Landslide Risk Management (2000) - *Landslide Risk Management Concepts and Guidelines* - Australian Geomechanics.

# Analisi di risposta sismica locale bidimensionale. Un caso di studio: vulnerabilità sismica di un edificio rilevante posto a Sant'Elpidio a Mare (FM)

**Eros Aiello**, CGT- Centro di GeoTecnologie dell'Università di Siena

**Filippo Catanzariti**, Geostru

**Stefano Giuliani**, libero professionista

**Anna Lippelli**, Geostru

## Termini chiave:

Spettri di Risposta, Sorgenti sismogenetiche, Risposta Sismica Locale 2D

## Keywords:

Response Spectra, Seismogenic sources, Local seismic-response 2D

## Abstract

*In the context of studies for the reduction of seismic risk, the numerical approach provides a valuable investigation tool. The analysis of the Local Seismic Response is the most used one, requiring, however, a multidisciplinary application that foresees the joint effort of different scientific skills, since the problem is somewhat complex.*

*A first fundamental phase is the characterization of the site, regarding the geometries of the subsoil and the physical-mechanical properties of lithotypes present. A seismic input is then defined, representative of the expected earthquake. The site examined is in the historic center of Sant'Elpidio a Mare (Fermo). This work presents the first results of a study, which has the main purpose of comparing the applicability and the limits of the calculation codes based on 2D analysis with the results obtained by applying the simplified RSL approach of the NTC18.*

*It was conducted a campaign of geological, geomorphological, geotechnical, and local seismostratigraphic investigations to evaluate what are the characteristics of site amplification phenomena.*

*The technical data found in the area have been used for characterize the geomechanical behavior of the materials and geometric relationships to be used as a base of analysis for the numerical calculations.*

## Riassunto

Nell'ambito degli studi per la riduzione del rischio sismico, l'approccio numerico fornisce un prezioso strumento di indagine. L'analisi della risposta sismica locale è la più utilizzata, ma richiede un'applicazione multidisciplinare che preveda lo sforzo congiunto di diverse competenze scientifiche poiché il problema è alquanto complesso.

Una prima fase fondamentale è la caratterizzazione del sito, riguardante le geometrie del sottosuolo e le proprietà fisico-meccaniche dei litotipi presenti. Viene poi definito un input sismico rappresentativo del terremoto atteso. Il sito esaminato si trova nel centro storico di Sant'Elpidio a Mare (Fermo).

In questo lavoro sono presentati i primi risultati di uno studio, che ha lo scopo principale di confrontare l'applicabilità e i limiti dei codici di calcolo basati sull'analisi del 2D con i risultati ottenuti applicando l'approccio di RSL semplificato delle NTC18.

È stata condotta una campagna di indagini geologiche, geomorfologiche, geotecniche e sismostratigrafiche al fine di valutare quali sono le caratteristiche dei fenomeni di amplificazione del sito.

I dati tecnici raccolti nel sito di interesse sono stati utilizzati per caratterizzare il comportamento geomeccanico dei materiali e le relazioni geometriche da utilizzare come base di analisi per i calcoli numerici.

## 1. Introduzione

L'analisi di risposta sismica locale (RSL) contiene una serie di procedure di calcolo basate sulle informazioni relative ai più grandi eventi sismici che hanno interessato il sito di studio. Dette informazioni vengono correlate con i dati stratigrafici, geotecnici e sismici desunti da una specifica campagna di indagini.

L'obiettivo dichiarato è quello di ottenere uno spettro dell'accelerazione sismica al suolo in funzione del periodo, che sia "sito dipendente", ossia prodotto specificatamente per l'area di studio e che non sia derivato da procedure e calcoli statistici contenuti nella attuale normativa.

In estrema sintesi, si tratta di stimare l'amplificazione sismica che si può manifestare in un determinato sito in conseguenza di un input sismico, di magnitudo indicata nella vigente normativa, valutando come detto evento venga trasformato al passaggio dal bedrock sismico al piano campagna o al piano di riferimento utilizzato per le Vseq in funzione del tipo di opera, ossia all'attraversamento del cosiddetto Volume Significativo Sismico.

La scelta dell'approccio semplificato, rigoroso 1D o 2D dell'analisi, dipende dall'Ambito Territoriale Significativo (ATS)<sup>1</sup> di appartenenza del sito di interesse. All'interno di detto ATS vengono definiti il Modello Geologico di Riferimento (MGR), l'Ambito Geomorfologico Significativo (AGS), il Modello Geotecnico e la Modellazione sismica, che indirizzano la scelta tra i vari approcci.

Dove gli elementi contenuti nell'ATS (stratigrafia, geomorfologia, geotecnica, topografia, sismica, etc.) lo richiedono, l'approccio 2D è da preferire all'approccio 1D, semplificato o rigoroso, poiché può rilevare e contemplare fenomeni come, ad esempio, la diffrazione ai bordi con generazione di onde di superficie, la focalizzazione delle onde sismiche, l'interferenza tra onde di volume e onde di superficie che porta ad un campo d'onda complesso, tutte problematiche di carattere bidimensionale.

Specifiche analisi numeriche di risposta sismica locale (RSL) sono fortemente raccomandate nelle NTC18 e nella Circolare esplicativa (CSLLP, n.7/2019) per determinati sistemi geotecnici o se si intende aumentare il grado di accuratezza nella

previsione del moto sismico in un dato sito.

Nelle analisi condotte in condizioni bidimensionali è possibile tenere conto sia dell'amplificazione stratigrafica, che dell'amplificazione morfologica (superficiale e/o profonda) del sito.

Le situazioni geologiche, geomorfologiche e geotecniche in cui le condizioni sito-specifiche possono portare ad una modificazione del segnale sismico in arrivo al sito su "terreno rigido" (geomateriale con  $V_s > 800$  m/sec) sono tre:

- depositi costituiti da terreni stratificati di caratteristiche meccaniche diverse da quelle della roccia sottostante (effetti stratigrafici 1D);
- depositi di valle con bordi e morfologie del substrato irregolari dove le onde sismiche possono subire fenomeni di rifrazione e riflessione con generazione di onde di superficie e concentrazioni di energia (effetti di bordo 2D-3D);
- sommità di rilievi collinari, creste, promontori costituiti da formazioni rocciose, profili di versanti, pendii, bordi di terrazzi (effetti topografici 2D-3D).

Per quanto riguarda il fattore stratigrafico, i depositi di terreno amplificano l'accelerazione massima in superficie rispetto a quella che ricevono dal bedrock sismico su cui giacciono, agendo da filtro del moto sismico, riducendone l'energia complessiva e modificando la composizione in frequenza, con l'accentuazione di alcune frequenze e lo smorzamento di altre.

Quando è presente una topografia piuttosto articolata tra il substrato sismico e le coperture si hanno amplificazioni maggiori dovute alla sovrapposizione degli effetti di riflessione multipla del segnale sismico dalla superficie topografica libera e dalla linea di demarcazione dei due mezzi che, combinandosi, rimangono intrappolate nello strato a bassa impedenza, poggiante sul substrato, nella forma di onde di superficie.

Pertanto, l'assetto superficiale dei terreni posti sul substrato sismico controlla il fenomeno della cosiddetta "risonanza" per frequenze critiche, con ampliamento delle frequenze dello spettro all'interno del campo di frequenze di interesse ingegneristico (0.5 ÷ 10 Hz).

Questa nota descrive il percorso sviluppato per la verifica della vulnerabilità sismica di un edificio pubblico di classe III (*rilevante*) secondo le NTC18, posto nel centro storico di Sant'Elpidio a Mare (FM).

Per la definizione dei modelli geologico, geotecnico e sismico è stata realizzata una specifica campagna di sondaggi geognostici a carotaggio continuo e di indagini sismiche con prove Down Hole, MASW ed HVSR.

Nel caso in esame, valutati gli elementi costituenti l'Ambito Territoriale Significativo (ATS), all'interno del quale si colloca il sito analizzato, si è deciso di utilizzare per la definizione della Risposta Sismica Locale l'approccio rigoroso bidimensionale, confrontandolo, infine, con l'approccio semplificato.

<sup>1</sup> L'Ambito Territoriale Significativo (2D-3D) comprende il sito e il relativo sottosuolo in cui è possibile rilevare sorgenti di carattere dinamico di origine geologica s.l., geomorfologica, idrogeologica, geotecnica, geomeccanica, sismica, vulcanica e antropica influenzanti le costruzioni. Trattasi di una porzione più o meno estesa di territorio con il suo sottosuolo per profondità generalmente inferiori a 100 m, ma talora anche maggiori. Si dovrà, pertanto, valutare l'estensione di territorio entro il quale possano essere identificate una o più sorgenti di rischio (fenomeni geologici s.l., geodinamici, idrogeologici, geotecnici, vulcanici e antropici) in grado di provocare azioni dirette o indirette sul sito di costruzione, con le relative opere o parti di esse, o che questo subisca azioni dirette o indirette da parte di dette opere o di parte di esse.

## 2. Aspetti geologici

Il sito di studio fa parte di una zona marginale del centro storico di Sant’Elpidio a Mare (FM), quella sud-occidentale, posta su un’anticlinale Plio-Pleistocenica caratterizzata da un’elevata pendenza in direzione SW, verso un compluvio naturale.

Il margine ove è posizionata la costruzione (v. Fig.1) evolve in direzione sud/sud-ovest con pendenze di circa 16°, mostrando evidenti manomissioni in più parti legate ad interventi e riporti antropici, specie nella porzione del centro storico. La quota media del sito è stimabile intorno ai 250 m. s.l.m..

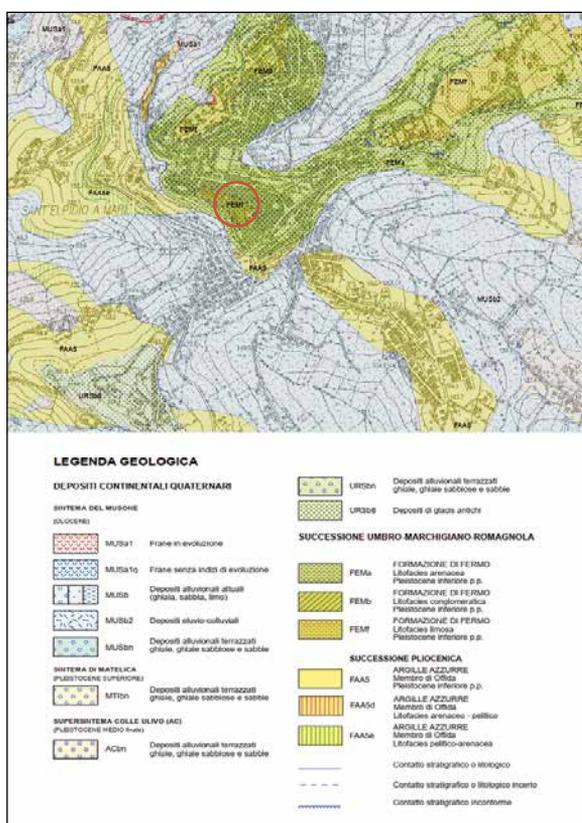


Fig. 1 – Carta Geologica Regionale - Regione Marche con ubicazione della costruzione.

La Successione Plio-Pleistocenica che caratterizza l’area si è deposta in un bacino subsidente, formatosi nella parte esterna dell’edificio a thrust dell’Appennino Centrale, mentre la parte interna andava incontro a fenomeni di progressivo sollevamento ed emersione (Bigi et al., 1995). La base della successione Plio-Pleistocenica è caratterizzata da depositi sabbioso-conglomeratici di ambiente neritico litorale, affioranti al margine occidentale del bacino periadriatico (Centamore et al., 2009). Su tali depositi

sabbioso-conglomeratici poggia una potente successione pelitica all’interno della quale si intercalano, a varie altezze stratigrafiche, orizzonti sabbioso-conglomeratici o sabbioso-argillosi a geometria tabulare o lenticolare (Argille Azzurre - FAA; v. Fig. 1). Superiormente la successione è chiusa in discordanza da depositi neritico-litorali, sabbioso-conglomeratici, del Siciliano (Formazione di Fermo - FEM). I depositi conglomeratici, intercalati a più livelli nelle sabbie litorali, all’interno della successione siciliana, evidenziano la progradazione delle facies deltizie.

Dalla campagna di indagini appositamente realizzata nel sito si è rilevata la seguente successione stratigrafica attribuibile alla Formazione di Fermo (Pleistocene inf. p.p.), facente parte della Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola:

-Riporti antropici limoso-sabbiosi completamente alterati e destrutturati, includenti elementi di laterizi. Lo spessore massimo rilevato è di circa 4,30 m, partendo da piano campagna.

-Substrato plio-pleistocenico. Livello superiore in facies limosa con presenza di torba puntiforme. Seguono limi sabbiosi con trovanti arenacei e sabbie localmente limose nocciola-giallastre sciolte con patine carbonatiche, a medio addensamento.

Sono presenti a varie profondità intercalazioni di limo argilloso-sabbioso di color marrone più scuro. La potenza del livello è di circa 25,0 m.

Trattasi di depositi sovraconsolidati di origine marina, epibatiali.

Le rilevazioni effettuate durante e dopo la campagna di indagini non hanno evidenziato la presenza della falda.

Sotto il profilo geomorfologico, la presenza di litotipi prevalentemente incoerenti sabbiosi ed arenaceo-sabbiosi del substrato, addensati e dotati di elevata resistenza al taglio, determina condizioni favorevoli di stabilità del sito.

## 3. Caratterizzazione sismica

La sismicità storica dell’area in esame è stata analizzata consultando i seguenti cataloghi:

- il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani CPTI15;
- il Database Macrosismico Italiano DBMI15.
- la banca dati DISS, (“Database of Individual Seismogenic Sources” versione 3.2.0),INGV.

Dalla consultazione del database DBMI15 risultano per la zona di studio gli eventi riportati nella tabella seguente.

Comune	Massima intensità risentita	Numero di terremoti risentiti
Sant’Elpidio a Mare	6	39

Eventi sismici registrati nella a Sant’Elpidio a Mare (DBMI 2015, INGV).

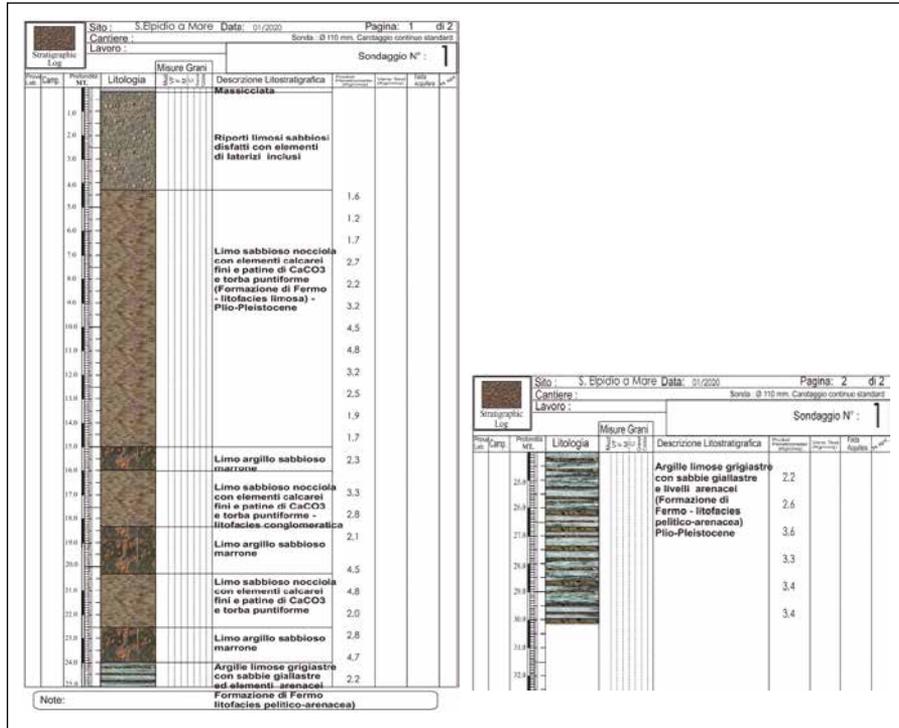


Fig.2- Colonna stratigrafica

### 3.1 Zona sismogenetica di riferimento per il sito

Per ogni zona sismogenetica è stato definito uno strato sismogenetico e ad esso è stata associata una "profondità efficace", ossia la profondità alla quale avviene il maggior numero di terremoti che determina la pericolosità sismica della zona (Meletti C. e Valensise G., 2004). Questi strati sono stati definiti da un'analisi del catalogo della sismicità strumentale (1983-2002) dell'INGV e indicano l'intervallo di profondità che ha generato il 90% degli eventi storici che

ricadono all'interno di ogni zona.

È stata, infine, proposta una suddivisione dell'intero strato sismogenetico in quattro classi di profondità comprese tra: 1-5 km, 5-8 km, 8- 12 km, e 12-20 km, per tenere conto delle incertezze e del fatto che un unico valore di profondità può non essere rappresentativo dell'intero strato. Nella Figura seguente sono indicate le classi di profondità efficace per ciascuna zona. La zona 917, quella di interesse, ha 5-8 km di profondità efficace.

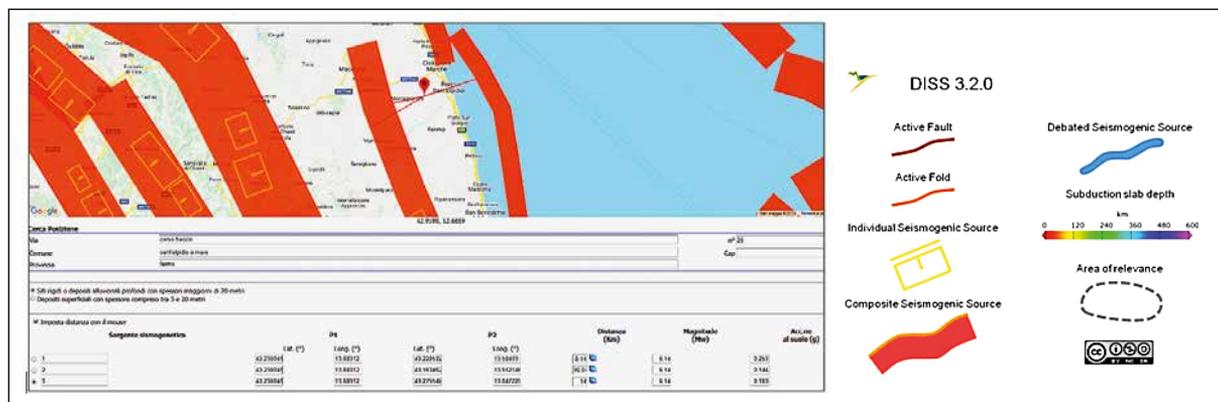


Fig.3 - Sorgenti sismogenetiche composte in campo arancione, e sorgenti sismogenetiche individuali perimetrate in giallo (DISS 3.2.0).

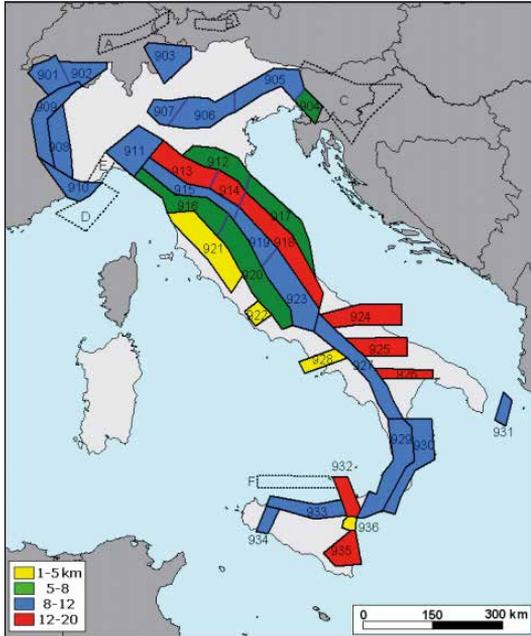
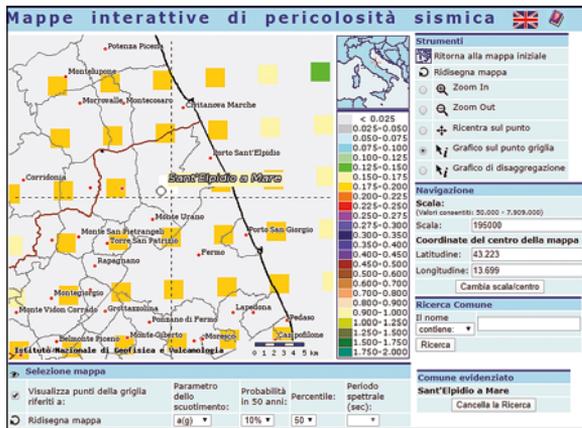
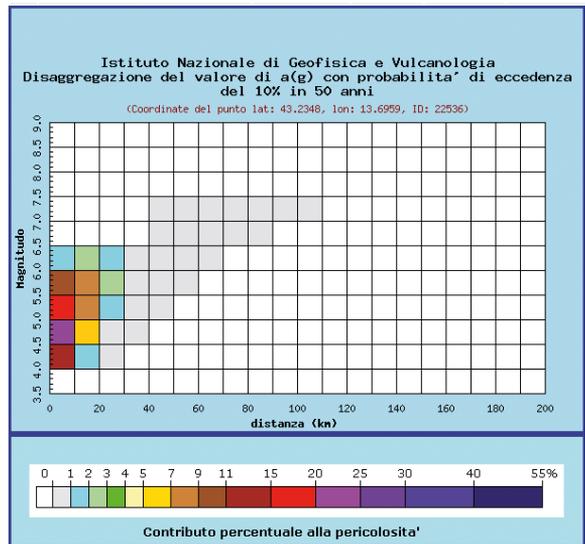


Fig. 4 - Classi di profondità efficace assegnate alle diverse zone sismogenetiche di ZS9 (Meletti C. e Valensise G., 2004).

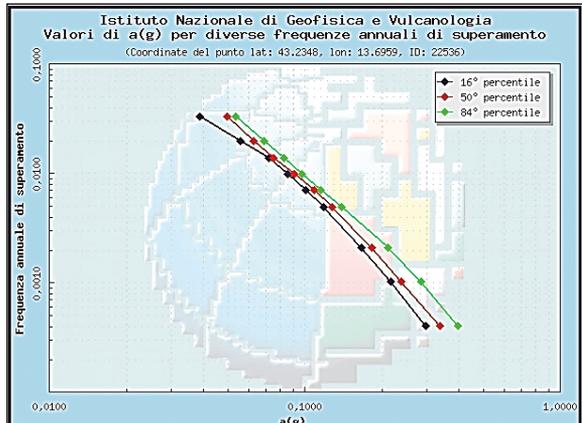
Frequenza annuale di superamento	a(g) (Coordinate del punto lat: 43.2348, lon: 13.6959, ID: 22536)		
	16° percentile	50° percentile	84° percentile
0.0004	0.2957	0.3383	0.3974
0.0010	0.2162	0.2380	0.2839
0.0021	0.1661	0.1832	0.2101
0.0050	0.1176	0.1274	0.1385
0.0071	0.1005	0.1088	0.1153
0.0099	0.0856	0.0906	0.0973
0.0139	0.0719	0.0750	0.0823
0.0200	0.0558	0.0629	0.0690
0.0333	0.0386	0.0494	0.0536



Distanza in km	Disaggregazione del valore di a(g) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 43.2348, lon: 13.6959, ID: 22536)										
	Magnitudo										
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
0-10	0.000	11.000	24.100	17.300	10.700	1.640	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10-20	0.000	0.000	1.760	5.560	8.460	8.440	2.630	0.000	0.000	0.000	0.000
20-30	0.000	0.000	0.423	1.510	2.460	1.190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30-40	0.000	0.000	0.000	0.128	0.592	0.487	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
40-50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.105	0.172	0.003	0.003	0.000	0.000
50-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.051	0.068	0.079	0.000	0.000
60-70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.040	0.066	0.000	0.000	0.000
70-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.041	0.000	0.000	0.000
80-90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.023	0.000	0.000	0.000
90-100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000
100-110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
110-120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
120-130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
130-140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
140-150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
150-160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
160-170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
170-180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
180-190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
190-200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Valori medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.150	9.440	0.786



Dalle mappe interattive di pericolosità sismica, attraverso il parametro dell'accelerazione massima attesa con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni su suolo rigido, pianeggiante e free field, si è ricavato per il sito di interesse

un valore compreso tra 0,175 – 0,200 g.

**Magnitudo media  $M_I=5,15$**

**Magnitudo Momento  $M_w=6,14$**  (zona sismogenetica ZS9 = 917)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nome ZS	N ZS	DISS2 MwMax	CPTI2 MwMax	CPTI2 MwMax (classe)	CPTI2 completo 04.2	Az1	Mw Max1	Az2	Mw Max2
Rimini-Ancona	917	6.1	5.94	5.91	5.91	G	6.14	G	6.14

Zona sismogenetica ZS9 = 917. Valori della Magnitudo Momento  $M_w$

### 3.2 Risposta sismica locale

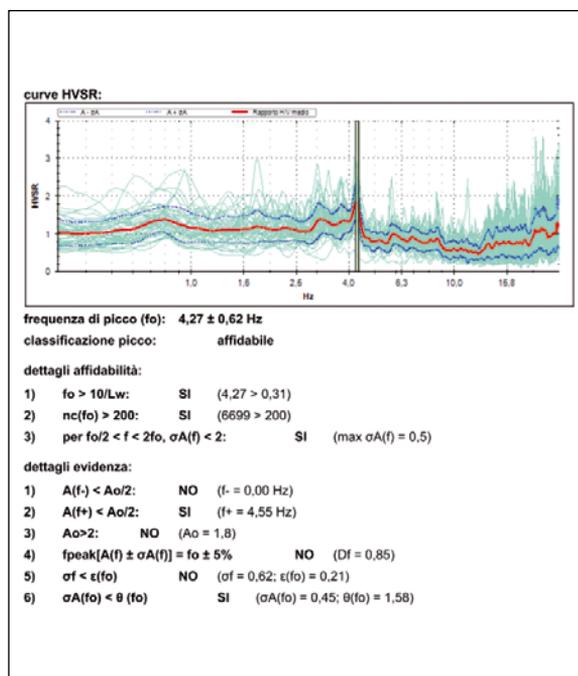
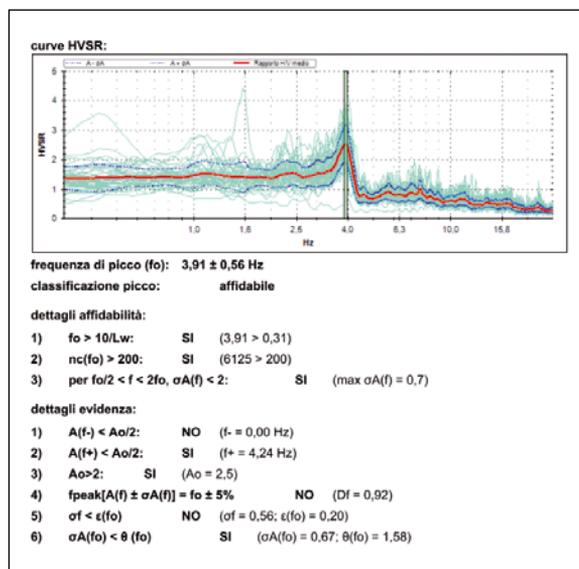
Sulla scorta di quanto detto in precedenza, rilevati i valori delle accelerazioni massime attese  $ag$  su suolo rigido (bedrock sismico), è necessario valutare la loro amplificazione/variazione negli strati più superficiali (RSL).

Le NTC 18 definiscono la risposta sismica locale semplificata di un sito tramite la stima di questi elementi:

1. Categoria di sottosuolo;
2. Categoria topografica.

#### Categoria di sottosuolo

Per la definizione della Categoria di sottosuolo si sono utilizzate le acquisizioni geofisiche e la definizione dei sismostri, ottenute con la tecnica HVSR, MASW e Down Hole.

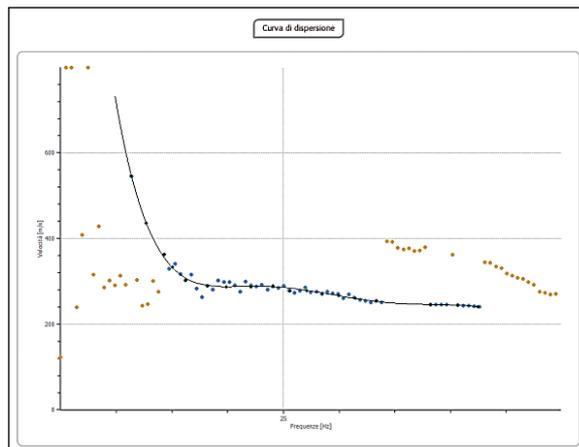
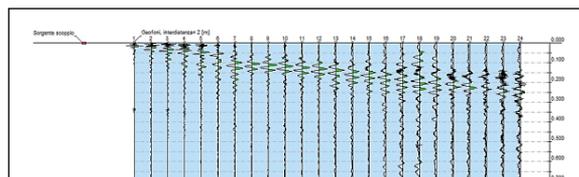


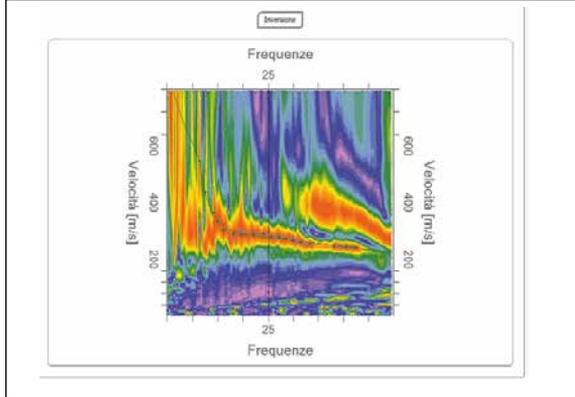
Frequenza edificio = 2,0 – 2,5 Hz

Frequenza del terreno di picco ( $f_0$ ):  $3,91 \pm 0,56$  Hz -  $4,27 \pm 0,62$  Hz (da prove HVSR)

Esclusa la doppia risonanza.

#### Prova Sismica Multicanale MASW





**Altri parametri geotecnici**

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Densità [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]	NSPT	Qc [kPa]
1	2.00	2.00	209.52	436.16	1800.00	0.35	79.02	342.43	237.06	213.36	N/A	960.77
2	6.85	4.86	315.86	627.07	1900.00	0.33	189.56	747.10	494.35	504.24	N/A	N/A
3	10.59	3.74	316.42	591.96	2000.00	0.30	200.24	700.84	433.86	520.63	N/A	N/A
4	15.43	4.84	685.96	1240.96	2100.00	0.28	988.15	3233.95	1916.41	2529.66	N/A	N/A
5	18.53	3.10	695.00	1257.30	2100.00	0.28	1014.34	3319.66	1967.21	2596.71	N/A	N/A
6	26.36	7.83	926.84	1676.72	2200.00	0.28	1889.88	6185.06	3665.22	4838.09	N/A	N/A
7	∞	∞	1062.64	1922.38	2200.00	0.28	2484.24	8130.24	4817.92	6359.65	0	N/A

G0: Modulo di deformazione al taglio;  
 Ed: Modulo edometrico;  
 M0: Modulo di compressibilità volumetrica;  
 Ey: Modulo di Young;

**Risultati**

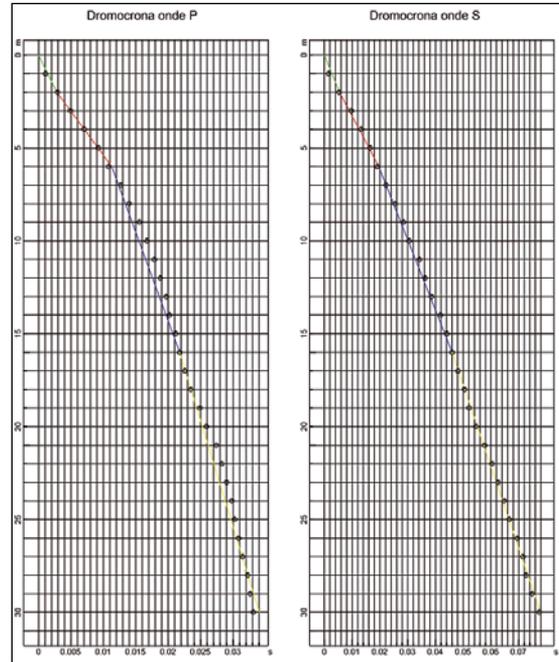
<b>Profondità piano di posa [m]</b>	<b>0.00</b>
<b>Vs,eq [m/sec] (H=18.53 m)</b>	<b>384.12</b>
<b>Categoria del suolo</b>	<b>B</b>

**Sismostrati rilevati dalla prova geofisica MASW**

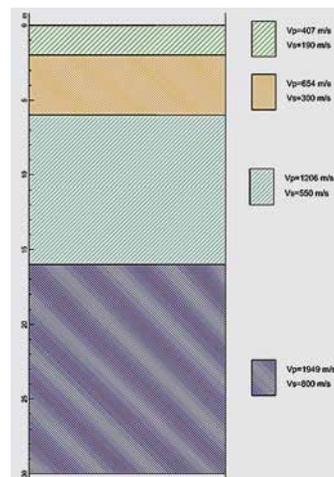
- 0 – 2 mt. Vs=210 m/sec
- 2 – 11 mt. Vs=315 m/sec
- 11 – 18,5 m Vs=690 m/sec
- 18,5 → m Vs=900 m/sec

Dalla prova geofisica MASW si evince che la Categoria di sottosuolo da assegnare al sito è la B. Si analizzano i risultati della prova Down Hole, sempre ai fini dell'individuazione della Categoria di sottosuolo.

**Prova Down Hole**



N. Strato	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Spessore medio fino a 30 m. [m]
1	190,00	407,00	2,00
2	300,00	654,00	4,00
3	550,00	1206,00	10,00
4	800,00	1949,00	14,00



$$V_{seq} = \frac{16}{\sum_{i=1, N} \frac{h_i}{V_i}} = 435.04 \cdot m/s$$

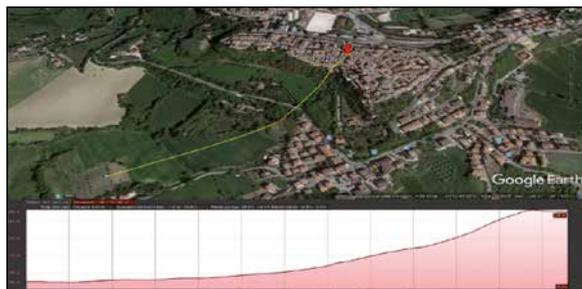
Sismostrati rilevati dalla prova geofisica DOWN-HOLE

Anche la prova Down Hole conferma quanto desunto dalla prova MASW. Pertanto, sulla base delle indagini sismiche realizzate, la **Categoria di sottosuolo** individuata è la **B** (NTC18).

**B – Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente V<sub>seq</sub> compresi tra 360 m/s e 800 m/s**

### Categoria Topografica

Si definisce la Categoria topografica secondo quanto indicato nelle NTC18.



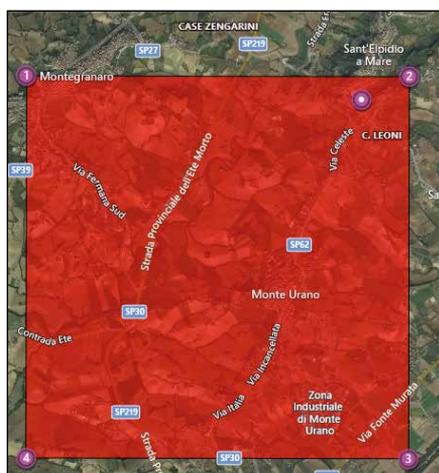
Quote della sezione: 242 m slm -152 m slm = dislivello 90 m su una distanza di 300 m, pari a 16,69° (pendenza media pendio a valle).

Categoria Topografica: **T2**

Distanza dal ciglio (rottura di pendenza) = 20 mt.

Substrato sismico (>800 m/sec) a 16 mt. dal p.c. (da prova Down Hole).

### Pericolosità sismica



### PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

Vita nominale (V<sub>n</sub>): 50 [anni]  
Classe d'uso: III  
Coefficiente d'uso (C<sub>u</sub>): 1,5  
Periodo di riferimento (V<sub>r</sub>): 75 [anni]  
Periodo di ritorno (Tr) SLO: 45 [anni]

Periodo di ritorno (Tr) SLD: 75 [anni]  
Periodo di ritorno (Tr) SLV: 712 [anni]  
Periodo di ritorno (Tr) SLC: 1462 [anni]

Tipo di interpolazione: Media ponderata

Coordinate geografiche del punto

Latitudine (WGS84): 43,2309151 [°]  
Longitudine (WGS84): 13,6864319 [°]  
Latitudine (ED50): 43,2318649 [°]  
Longitudine (ED50): 13,6873503 [°]

Coordinate dei punti della maglia elementare del reticolo di riferimento che contiene il sito e valori della distanza rispetto al punto in esame

Latitudine (ED50) [°]	Longitudine (ED50) [°]
43,234890	13,627310
43,234790	13,695890
43,184790	13,695750
43,184890	13,627180

Parametri di pericolosità sismica per TR diversi da quelli previsti nelle NTC, per i nodi della maglia elementare del reticolo di riferimento

### Punto d'indagine

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	45	0,060	2,462	0,286
SLD	75	0,077	2,511	0,290
SLV	712	0,213	2,493	0,318
SLC	1462	0,278	2,491	0,326

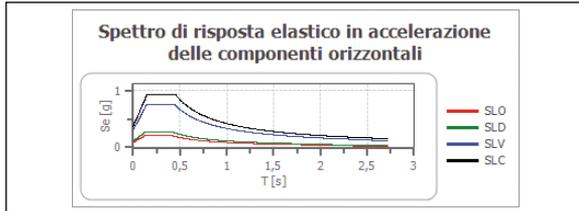
### PERICOLOSITÀ SISMICA DI SITO

Coefficiente di smorzamento viscoso  $\xi$ : 5%  
Fattore di alterazione dello spettro elastico  $\xi = [10/(5 + \xi)]^{(1/2)}$ : 1,000  
Categoria sottosuolo: B  
Categoria topografica: T2 - Pendii con inclinazione media maggiore di 15°

### Stabilità di pendii e fondazioni

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0,017	0,022	0,085	0,105
kv	0,009	0,011	0,042	0,052
amax [m/s <sup>2</sup> ]	0,853	1,089	2,976	3,662
Beta	0,200	0,200	0,280	0,280

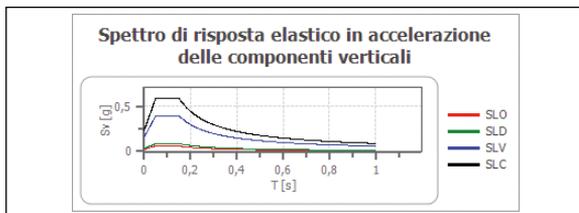
### Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali



	cu	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	S [-]	[-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
SLO	1,5	0,060	2,462	0,286	1,200	1,410	1,200	1,440	1,000	0,135	0,404	1,841	0,087	0,214
SLD	1,5	0,077	2,511	0,290	1,200	1,410	1,200	1,440	1,000	0,136	0,409	1,909	0,111	0,279
SLV	1,5	0,213	2,493	0,318	1,190	1,380	1,200	1,428	1,000	0,146	0,439	2,450	0,303	0,757
SLC	1,5	0,278	2,491	0,326	1,120	1,380	1,200	1,344	1,000	0,150	0,450	2,711	0,373	0,930

### Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti verticali

Coefficiente di smorzamento viscoso  $\xi$ : 5%  
 Fattore di alterazione dello spettro elastico  $= [10 / (5 + \xi)]^{(1/2)}$ : 1,000



	cu	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	S [-]	[-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
SLO	1,5	0,060	2,462	0,286	1	1,410	1,200	1,200	1,000	0,050	0,150	1,000	0,024	0,059
SLD	1,5	0,077	2,511	0,290	1	1,410	1,200	1,200	1,000	0,050	0,150	1,000	0,035	0,087
SLV	1,5	0,213	2,493	0,318	1	1,380	1,200	1,200	1,000	0,050	0,150	1,000	0,159	0,396
SLC	1,5	0,278	2,491	0,326	1	1,380	1,200	1,200	1,000	0,050	0,150	1,000	0,237	0,591

### 3.3 Analisi di Risposta Sismica Bidimensionale

Nelle applicazioni sismiche l'input sismico costituisce un aspetto determinante, considerando che i sistemi geotecnici sono in larga misura influenzati da caratteristiche peculiari quali durata, contenuto in frequenza, valori massimi di accelerazione e spostamento. Gli accelerogrammi naturali sono dotati di un più realistico contenuto in frequenze e numero di cicli. Inoltre, l'aggiornamento continuo dei diversi database presenti in rete rende di facile reperibilità le registrazioni di eventi reali.

L'input sismico rappresentativo del moto atteso sul sito, utilizzato nelle analisi, è derivato da sette times history dell'accelerazione per lo stato limite qui considerato, ossia SLV e SLO.

Si utilizza per l'estrazione degli accelerogrammi di input la banca dati ITACA INGV Rexelite, che permette di adoperare varie banche dati, tra le quali l'European Strong-motion database e l'Italian Building Code. L'estrazione degli accelerogrammi naturali, sismo-compatibili con le caratteristiche

del sito in esame, conduce come risultato alla media dei sette accelerogrammi amplificati dal sito, che sono fondamentali, poichè costituiscono l'input sismico nelle analisi di risposta sismica locale.

Inoltre, i possibili fenomeni di amplificazione sismica locale sono stati valutati tramite approccio numerico relativo allo stato limite considerato, di riferimento per la progettazione (SLV e SLO), utilizzando il codice di calcolo del Programma RSLIII 2D della *Geostru*, che impiega un modello in analisi bidimensionale di risposta sismica 2D. L'analisi bidimensionale è giustificata dal fatto che il sito costituisce un'area contigua ad un pendio acclive, con pendenza superiore ai 15°. Pertanto, il sito rappresenta una possibile area di amplificazione topografica e stratigrafica.

L'analisi è stata effettuata utilizzando la stratigrafia dei sondaggi eseguiti ed i profili delle onde sismiche Vs (mediate rispetto a tutte le verticali indagate), ricavate dalle

indagini Down-Hole e MASW effettuate sul sito.

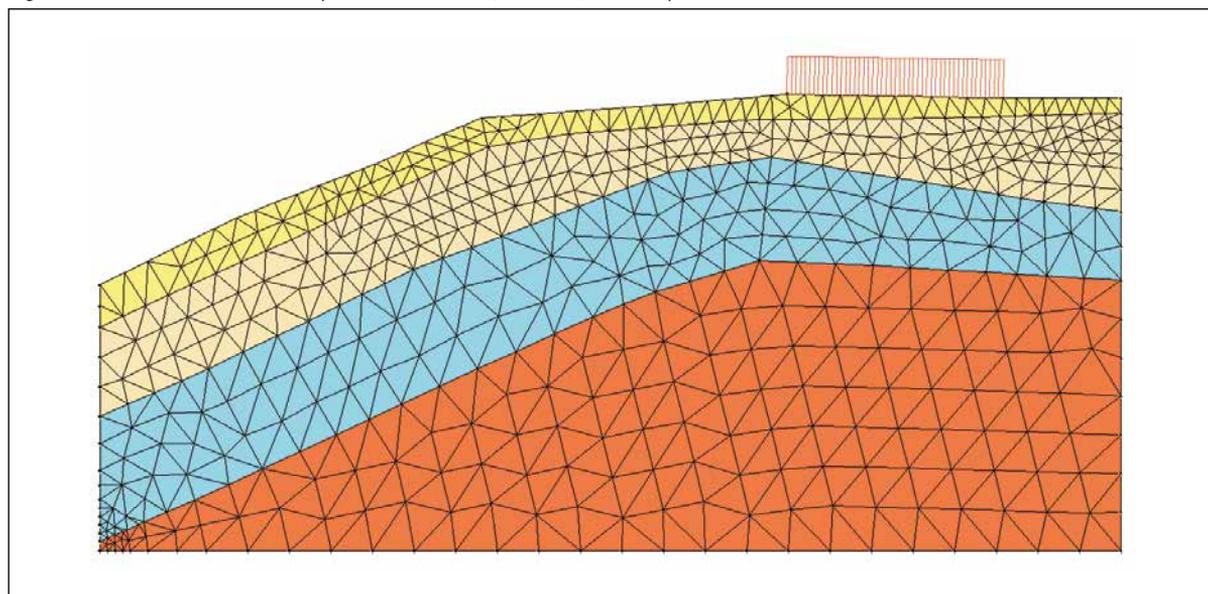
L'input sismico è rappresentato da una serie di accelerogrammi reali scelti in funzione del regime tettonico e sismogenetico dell'area indagata, che sono ritenuti sufficientemente rappresentativi delle caratteristiche di sismicità dell'area stessa.

Gli accelerogrammi sono stati utilizzati con il valore atteso nel sito per geomateriale rigido affiorante (Categoria di sottosuolo A).

Per la identificazione della profondità del bedrock sismico ( $V_s > 800$  m/s), ove si collocano gli accelerogrammi naturali di input, si è ricorso alle elaborazioni delle prove Down-Hole e MASW (bedrock sismico prossimo ai 16-18 mt. di profondità dal p.c.).

L'analisi bidimensionale inizia con la creazione della mesh ad elementi finiti della sezione considerata tramite il software specifico RSL 2D della *Geostru*.

Fig.8 - Mesh ad elementi finiti creata per il sito in esame e, in tabella, dati di input.

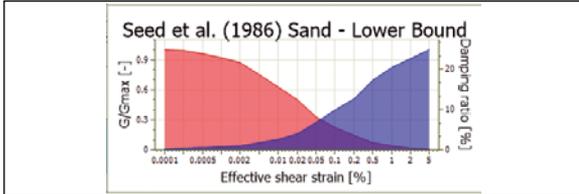


#	Nome	Colore	Modulo elastico [kPa]	Coefficiente di Poisson	Spessore [m]	Peso specifico [kN/m <sup>3</sup> ]	Coefficiente di spinta a riposo	Massa Rayleigh	Rigidizza Rayleigh	GMax [kPa]	G0 [kPa]
1	Materiale 1	Yellow	1630	0.36	2	18	0.53	0	0	66238.53	66238.53
2	Materiale 2	Blue	4468	0.36	9	19	0.5	0	0	174311.9	174311.9
3	Materiale 3	Light Blue	16894	0.36	7.5	20	0.47	0	0	616717.6	616717.6
4	Materiale 4	Orange	40015	0.39	2	21	0.44	0	0	1370031	1370031

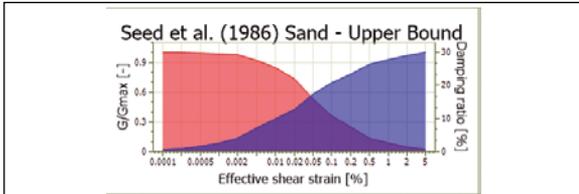
Rapporto smorzamento	Onde di taglio VS [m/s]	Onde di Compressione VP	Proprietà dinamiche
0.02	190	407	Seed et al. (1986)
0.02	300	654	Seed et al. (1986)
0.02	550	1206	Seed et al. (1986)
0.5	800	1949	Seed et al. (1986)

**Curve di decadimento Seed et al. (1986) utilizzate (consigliate dalla Protezione Civile)**

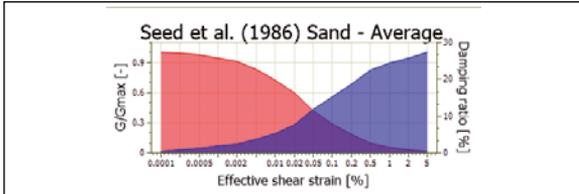
Strato 1



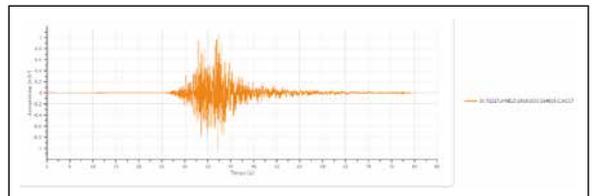
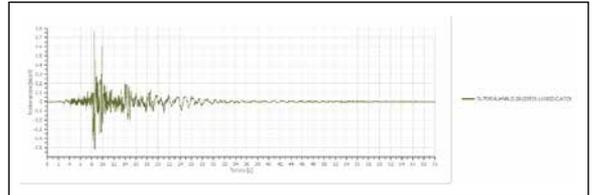
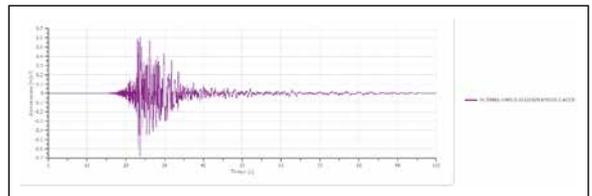
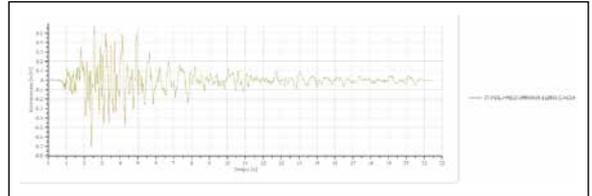
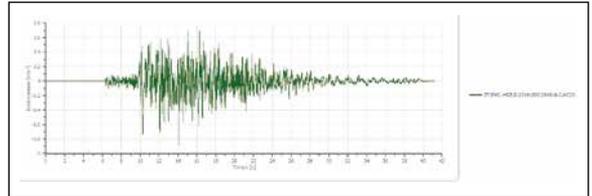
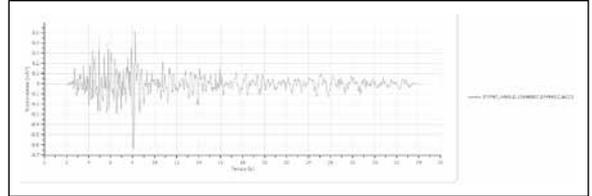
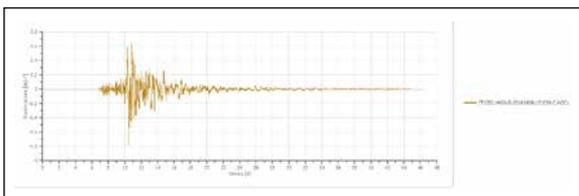
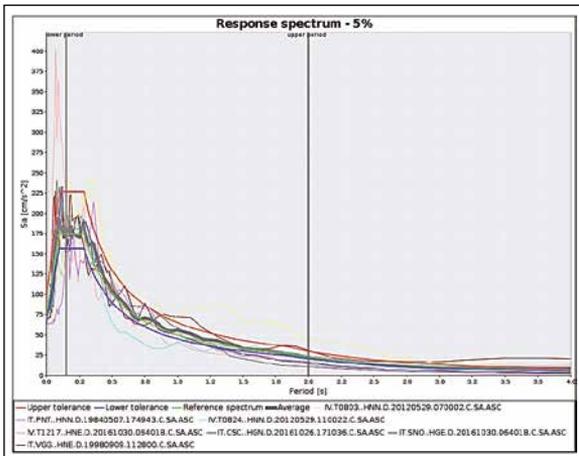
Strato 2-3



Strato 4 (bedrock sismico)



**Accelerogrammi di input sismico SLO**



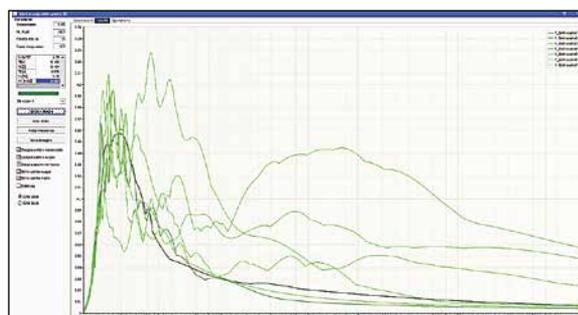
**Relazione**

Parametri	Valori
Numero di nodi	576
numero di elementi	1031
Ampiezza di banda	62

Liners	0
Bolts	0
Geogrids	0
Fixed nodes	90
Prescribed displ.	30
Springs	0
Tipo elemento	1
Tipo analisi	8
Tipo di deformata	2
N. Regioni	4
N. Modi	6
No. Earthquakes	7
Monitorised Nodes	504-561

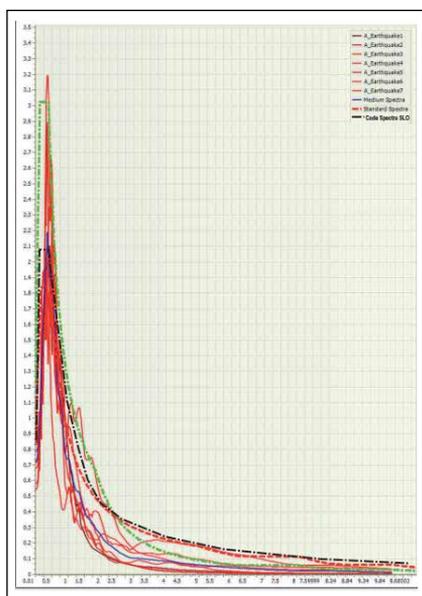
Svmo	0.143
FA	1.062
FV	1.652
TB	0.163
TC	0.490
TD	5.012
SA_O	0.845

### Grafico delle velocità

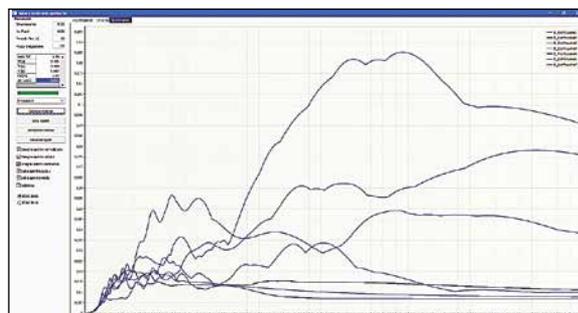


### GRAFICO ACCELERAZIONE - PERIODO (tempo) (SLO)

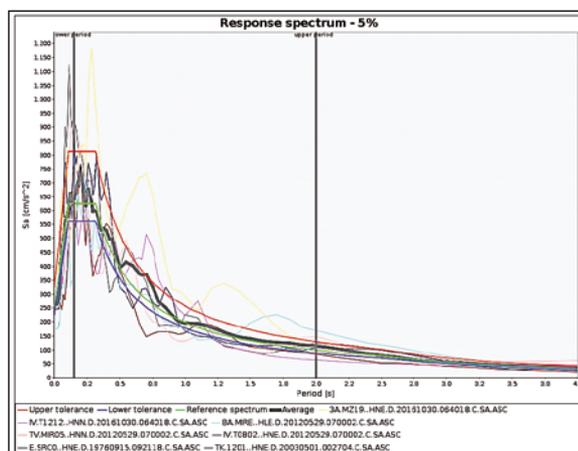
Linea tratteggio blu = spettro medio  
 Linea tratteggio verde = spettro di normativa  
 Linea tratteggio rosso = spettro medio normalizzato



### Grafico dello Spostamento

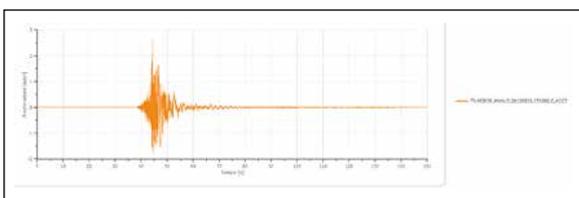
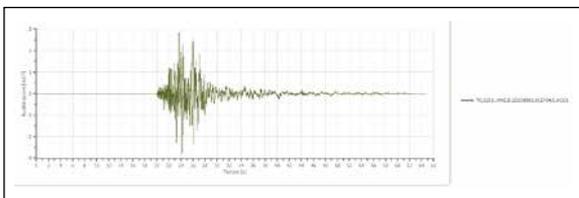
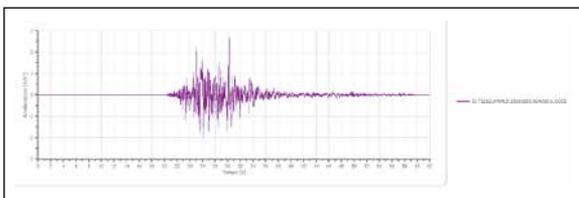
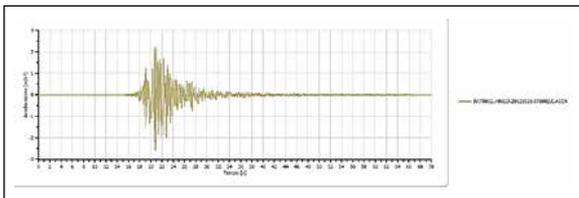
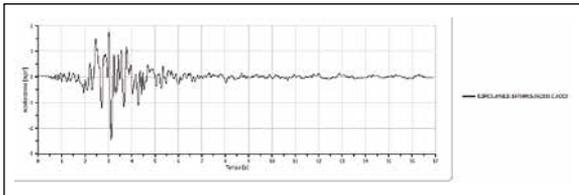
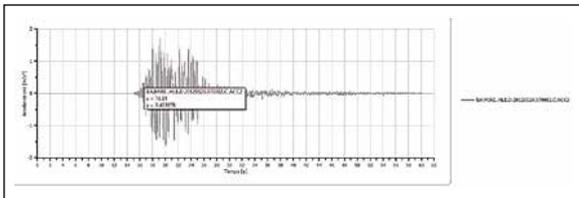
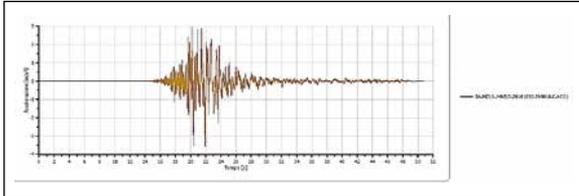


### Accelerogrammi di input sismico SLV



### Parametri standard dello spettro

Parametri	Valori
Sami	1.729
Svmi	0.087
Samo	1.837



### Parametri standard dello spettro

Parametri	Valori
Sami	6.544
Svmi	0.378
Samo	7.111
Svmo	0.671
FA	1.087
FV	1.774
TB	0.197
TC	0.592
TD	13.508
SA_O	2.890

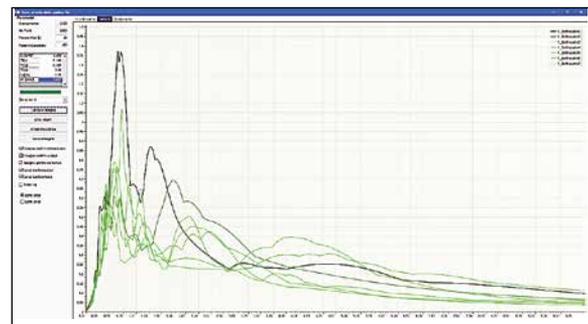
### GRAFICO ACCELERAZIONE – PERIODO (tempo) (SLV)

Linea tratteggio blu = spettro medio

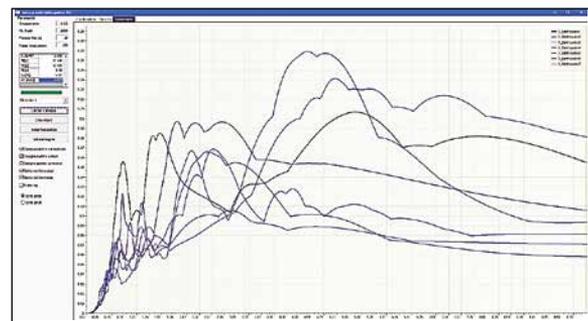
Linea tratteggio verde = spettro di normativa

Linea tratteggio rosso = spettro medio normalizzato

### Gráfico Velocità



### Gráfico Spostamento



### 4. Conclusioni sulla analisi di RSL 2D

Dalle analisi di risposta sismica locale eseguite in schema bidimensionale, riferite ai nodi monitorati alla base delle fondazioni dell'edificio "rilevante" di interesse, emerge un

valore di spettro di risposta, allo Stato Limite di riferimento considerato (SLO e SLV), inferiore rispetto a quello della RSL con approccio semplificato (sensu NTC 2018) relativa alla Categoria di sottosuolo B e alla Categoria topografica T2.

#### RISULTATI RSL CON APPROCCIO SEMPLIFICATO

	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [m/sec <sup>2</sup> ]	Se(TB) [m/sec <sup>2</sup> ]
SLO	0,135	0,404	1,841	0,853	2,099
SLV	0,146	0,439	2,450	2,973	7,428

#### RISULTATI RSL RIGOROSA 2D

	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [m/sec <sup>2</sup> ]	Se(TB) [m/sec <sup>2</sup> ]
SLO	0,163	0,490	5.012	0,854	1.837
SLV	0,197	0,592	13.50	2.890	7.111

Gli spettri di RSL con approccio semplificato, essendo più sfavorevoli, andranno utilizzati a favore di sicurezza per la valutazione della vulnerabilità sismica dell'opera esaminata.

#### Bibliografia essenziale

- AAVV. (1986) La geologia delle Marche Studi Geologici Camerti - Numero Speciale Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Camerino
- AAVV. (1991) L'ambiente fisico delle Marche (Geologia-Geomorfologia-Idrogeologia) Regione Marche - Giunta Regionale - Assessorato Urbanistica e Ambiente
- Basili, Roberto, et al. "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." (2018).
- Bigi, S., E. Centamore, and S. Nisio. "Elementi di tettonica quaternaria nell'area pedeappenninica marchigiano-abruzzese." *Il Quaternario* 10.2 (1997): 359-362.
- Calamita F. (1990) Thrusts and fold-related structures in the Umbria-Marche Apennines (Central Italy) *Annales Tectonicae* - Vol. IV
- Cantalamessa, Gino, and Claudio Di Celma. "Sequence response to syndepositional regional uplift: insights from high-resolution sequence stratigraphy of late Early Pleistocene strata, Periadriatic Basin, central Italy." *Sedimentary Geology* 164.3-4 (2004): 283-309.
- Centamore, Ernesto, and David Rossi. "Neogene-Quaternary tectonics and sedimentation in the Central Apennines." *Italian Journal of Geosciences* 128.1 (2009): 73-88.
- Locati, M., Camassi, R. D., Rovida, A. N., Ercolani, E., Bernardini, F. M. A., Castelli, V. & D'Amico, S. (2016). DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database.
- Meletti, C. "Valensise G." Zonazione sismogenetica dell'Italia e aree adiacenti ZS9, INGV internal document, available on World Wide Web at <http://zonesismiche.mi.ingv.it> (2004).
- Macerola, L., Durante, F., Milana, G., Nocentini, M., Santangelo, S., & Tallini, M. Risposta sismica locale 1D e 2D per la microzonazione

di 3 livello di alcune aree pilota dell'Aquilano.

- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018)." Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: Rome, Italy (2018).
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP
- Rovida, Andrea Nicola, et al. "CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes." (2016).

# Preliminary evaluation of the reliability, through simulation with numeric code (UDEC), of the stabilization measures suggested by SMR for a slope affected by rockfalls

Giovanni Bruno, DICATECh - Politecnico di Bari, Via E. Orabona, 4 - 70125 Bari, Italy

Phone: +393336656731; Fax: +390805963414, e-mail: giovanni.bruno@poliba.it

## Keywords:

Landslide hazard, SMR, Kinematic analysis, slope stabilization, UDEC slopes stability analysis.

## Abstract

This paper shows the preliminary results of a slope adjacent to a road, affected by instability due to local rockfalls, where the stabilization suggested by SMR classification has been verified through simulation with numeric code (UDEC). In the case-study, preliminarily a geomechanical survey has been done, followed by a rock masses classification and graphical stability analysis of the slopes. The rock masses classifications, and particularly the Romana SMR (Slope Mass Rating) index, are commonly used to assess the rock slopes stability and to choose the support measures. Hence, the SMR index has been calculated for each analysed road sections, including considerations and suggestions proposed for the slopes stabilization. What the aim to fix up one of the rock mass slopes, an intervention with a 0.15m thickness of shotcrete has been simulated as stability support, based on the indications proposed by Romana SMR index value, for the vertical slope of road section No. 10, close to the geomechanical station No. 3, where rockfalls already occurred. However, the stability analysis conducted with a distinct element code (UDEC) has shown that this proposed intervention is insufficient to stabilize the slope, especially if it is applied after a long time since its cutting. These preliminary results will be subject to reevaluation after performing a sufficient number of UDEC analysis of slopes, stabilized according to SMR suggestions, that have similar phenomena of instability and geomechanical characteristics.

## 1. Introduction

Landslides are an important natural calamity which frequently occurs on natural slopes as well as cut road

slopes, causing hazard to human life and properties. The assessment of landslide hazard along the road communication routes is not always simple to define [1-3], moreover the zoning of risk degree targeted to the planning of the support measures is often more complex [4]. Especially in the case of rock masses, difficulties arise from the high number of factors that controls slopes stability and from the complexity of the instability mechanisms. In this case, the use of rock mass slope classifications such as SMR [5-8] and CSRM [9] for hard rocks, or SRMR [10] for weak rocks, can be of help for preliminary and sometimes final design as well as for planning of the support measures.

The case-study presented concerns 12 slopes adjacent to the road sections, along a stretch of provincial road No. 76 Presicce-Specchia of about 1.3 km; this road is located in the Apulia peninsula (Southern Italy) and in some places is facing calcareous rock mass slopes recently affected by rockfalls instability. The morphology of the slopes are the same for all the road sections considered; their heights, instead, range from a minimum of  $H = 0.83$  m (section n. 1) to a maximum of  $H = 54.00$  m (section n. 12); those are, within the range of heights  $H = 15 \div 63$  m considered by the SMR classification (Figure 1).

A stabilization simulation, according to the support measures suggested by the SMR [11-12], has been applied to the slope of the road section No. 10 (close to the geomechanical station No. 3) interested by local rockfalls. Finally, the reliability of the support measures suggested from SMR has been checked by a simulation with numerical distinct element code (UDEC).

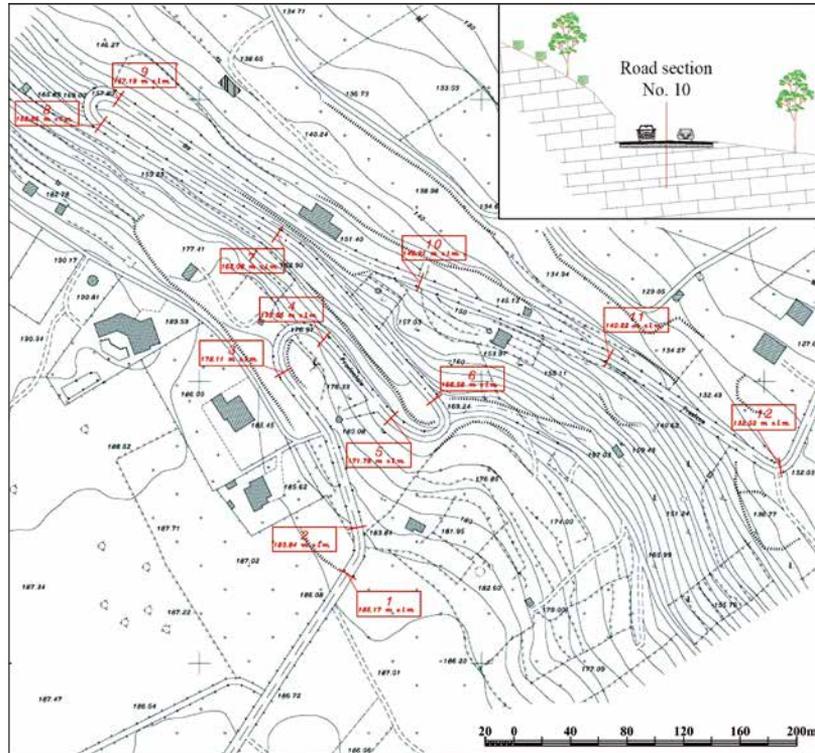


Figure 1. Localization of the twelve studied road sections with the sketch of a typical slope section (road section No. 10)

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Geological and geostuctural outlines

The considered road is located in the West side of the so-called “Serra di Cianci” (Apulia - Southern Italy), that is a plateau delimited by a transtensional fault plane about 750 meters long and with an overall drop of about 30 meters (Figure 2). The outcropping rocks are made up by whitish and fine-grained microcrystalline limestones that are usually very compact and sturdy, with interspersed grey and light

brown dolomite horizons, belonging to the “Altamura Limestone” Formation (Upper Cretaceous). The limestones are well layered [13], with layers thickness from 0.20 to 0.50 m, and affected by sub-vertical joints which divide the rock mass into blocks of different shapes and sizes. There are also fractures, often filled with residual material, and small karst cavities.

The geostuctural data of the limestone rock mass (Tables 1 and 2) have been inferred from a survey executed in three geomechanical stations (Figure 2).

Table 1. Geomechanical stations 1 and 2: structural data

	K <sub>1</sub> (Joint)	K <sub>2</sub> (Joint)	K <sub>3</sub> (Joint)	K <sub>4</sub> (Joint)	K <sub>5</sub> (Joint)	K <sub>s</sub> (Layer)
Strike (°)	113	173	214	292	19	276
Dip (°)	48	76	73	84	75	7
Dip direction (°)	203	263	304	22	109	6
Length (m)	0.8	0.7	0.7	2.0	1.4	40
Aperture (cm)	0.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
Spacing (cm)	46	52	100	30	99	39
JRC	5	6	11	8	9	3
JCS (MPa)	46	52	100	30	99	39
Elementary block dimension (m <sup>3</sup> )	$0.06 (K_2-K_4-K_s) \div 0.51 (K_2-K_3-K_5)$					

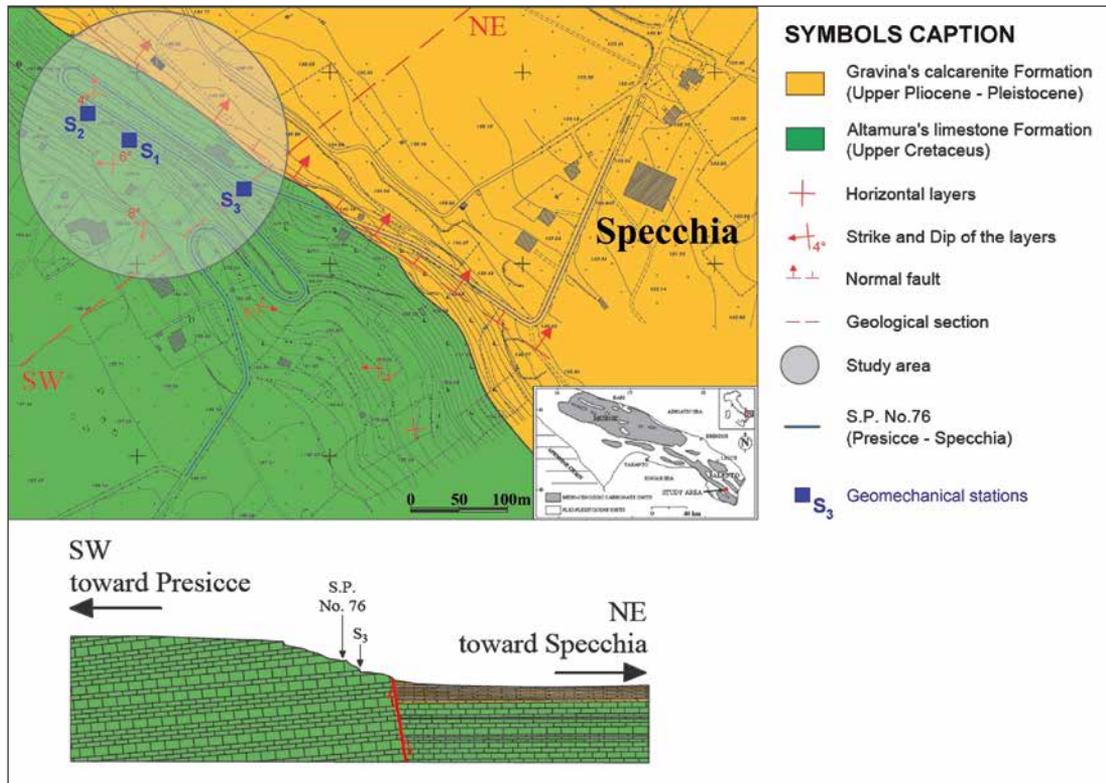


Figure 2. Map and geological section of studied area

Table 2. Geomechanical station 3: structural data

	K <sub>1</sub> (Joint)	K <sub>2</sub> (Joint)	K <sub>3</sub> (Joint)	Ks (Layer)
Strike (°)	217	314	19	274
Dip (°)	68	83	78	5
Dip direction (°)	307	44	109	4
Length (m)	1.3	0.8	2.3	6.4
Aperture (cm)	0.0	0.0	0.1	0.1
Spacing (cm)	58	15	18	25
JRC	6	6	5	3
JCS (MPa)	70	64	61	31
Elementary block dimension (m <sup>3</sup> )	2.42 (K <sub>1</sub> -K <sub>2</sub> -K <sub>3</sub> )			

### 3. Results

#### 3.1 Rock mass classification, slope stabilization suggested by SMR method and kinematic analysis of stability

In order to obtain the Q and RMR geomechanical classification indexes of the rock mass [14-15] aimed at evaluating the fronts stability in the studied road stretch, 3 stations for

geomechanical measures (Figure 2) have been performed by the “generalised scanline method” [16]. The results obtained for the Q index (Table 3) provide, by means of a correlation equation [17], the values of RMR index:

$$RMR=13.5 \cdot \log Q+43 \quad (1)$$

which correspond to a fair rocky mass quality (Class III) for all the three geomechanical stations.

**Table 3.** Geomechanical stations 1-2 and 3: survey data and Q, RMR rock mass classification indexes

Station No.	Jv joints/m	RQD %	Jn (0.5 ÷ 20)	Jr (0.5 ÷ 4)	Ja (0.75 ÷ 20)	Jw (0.1 ÷ 1)	SRF (0.5 ÷ 20)	Q (Barton)	RMR (Bieniawski)
1-2	3.15	100.00	7.00	1.67	0.75	1.00	5.00	<b>6.36 Fair</b>	<b>53.85 Fair</b>
3	12.07	75.17	7.00	1.50	0.87	1.00	5.00	<b>3.70 Poor</b>	<b>50.67 Fair</b>

**Table 4.** Road section 10 (close to geomechanical station n. 3): example of SMR calculation

SMR calculation in to road section n° 10	Wedges sliding on $k_{K1-K2}$ joints sets intersection		Planar sliding on $K_1$ joints set	
lj (dip direction of joint)	323°		307°	
ls (dip direction of slope)	0°		0°	
ij (dip of joint)	60°		68°	
is (dip of slope)	90°		90°	
(lj - ls)	323	<b>F<sub>1</sub> = 0.15</b>	307	<b>F<sub>1</sub> = 0.15</b>
ij	60	<b>F<sub>2</sub> = 1</b>	68	<b>F<sub>2</sub> = 1</b>
ij - is	-30	<b>F<sub>3</sub> = - 45</b>	-22	<b>F<sub>3</sub> = - 45</b>
Digging method	blasting or mechanical	<b>F<sub>4</sub> = 0</b>	blasting or mechanical	<b>F<sub>4</sub> = 0</b>
RMR	50.67		50.67	
$SMR = RMR + (F_1 * F_2 * F_3) + F_4$	<b>43.92 -&gt; Classe III</b>			

Then, for each of the twelve road sections (Figure 1), the slope stability assessment through SMR method [6] has been calculated (Table 4).

The minimum SMR values obtained (Table 5), albeit with small variations, are all included in the III quality class to which correspond partially stable slopes [6-7]. On the other hand, a feedback in the field among the stability expected by the SMR classification index and the real conditions of stability of the slopes, in the different road sections, showed a substantial disagreement for the slopes at sections No. 8 and No. 10 which manifestly show instability. Furthermore, according to the obtained SMR values (Table 5), the suggested measures for the rock mass front stabilisation are basically of two types: spot or systematic bolting and/or spot shotcrete [11].

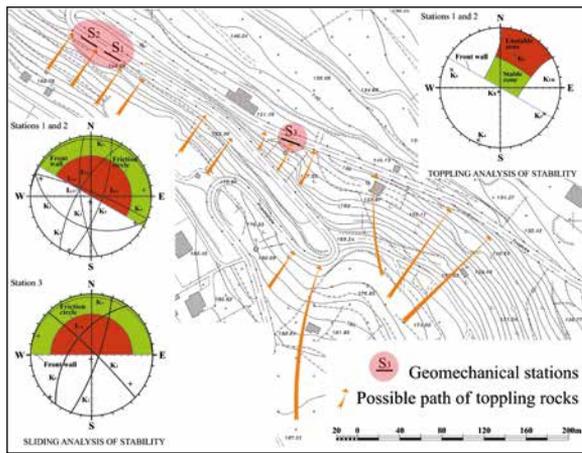
**Table 5.** Road section 1÷12: minimum SMR values and classes with related stability rank and suggested support

Road Section	Observed stability conditions	SMR <sub>min</sub>	Stability rank	Support measures
1	stable	46.20 (III Class)	partially stable	spot or systematic bolting, spot shotcrete
2	stable	46.20 (III Class)	partially stable	spot or systematic bolting, spot shotcrete

3	stable	46.20 (III Class)	partially stable	spot or systematic bolting, spot shotcrete
4	stable	46.20 (III Class)	partially stable	spot or systematic bolting, spot shotcrete
5	stable	46.20 (III Class)	partially stable	spot or systematic bolting, spot shotcrete
6	stable	43.92 (III Class)	partially stable	spot or systematic bolting, spot shotcrete
7	stable	46.20 (III Class)	partially stable	spot or systematic bolting, spot shotcrete
8	unstable	43.02 (III Class)	partially stable	spot or systematic bolting, spot shotcrete
9	stable	43.02 (III Class)	partially stable	spot or systematic bolting, spot shotcrete
10	unstable	43.92 (III Class)	partially stable	spot or systematic bolting, spot shotcrete
11	stable	43.92 (III Class)	partially stable	spot or systematic bolting, spot shotcrete
12	stable	43.92 (III Class)	partially stable	spot or systematic bolting, spot shotcrete

The kinematic analyses of stability (Figure 3), performed by stereographic procedures [18], confirmed that the rockfalls phenomena, occurred in the slopes adjacent to the road sections No. 8 and No. 10, relate to mechanisms of sliding along discontinuities plans or their intersection lines and/or rockfalls and topplings of blocks (Table 6).

**Figure 3.** Kinematic analyses of stability and possible paths of falling rocks



**Table 6.** Stations 1-2 and 3: kinematic analyses of stability

Station No.	Sliding on plane	Sliding along intersection line	Toppling
1 - 2	K <sub>3</sub> , K <sub>4</sub> , K <sub>5</sub> , K <sub>S</sub>	l <sub>K2-K3</sub> , l <sub>K2-K4</sub> , l <sub>K3-K4</sub> , l <sub>K4-K5</sub>	K <sub>1</sub>
3	K <sub>1</sub> , K <sub>2</sub>	l <sub>K1-K2</sub>	-

**3.2 Reliability evaluation of the suggested SMR stabilization measures through stability analysis by distinct element numeric code (UDEC)**

The SMR classification is a widespread tool for assessment and stabilisation of the slopes; then a stability analysis and

a finalised design of correction and support measures to risk reduction are necessary. Often in panoramic roads or near bonded and/or protected areas, as in this case-study, because of high costs that would come from a change of the road path, the only appropriate measure remains the slope stabilisation.

With the aim to evaluate the reliability of the stability measures suggested by SMR classification, a stability analysis of the slope overlooking the instable road section No. 10 has been performed with a numeric code of calculation (UDEC). This typical road section and the related slope, according to the SMR classification, should be partially stable and in need only of spot shotcrete support, as well as the other eleven road sections (Table 5). The rock mass of the considered slope is highly fractured and divided into blocks of various shapes and sizes. Therefore, the use a distinct elements calculation code (UDEC) rather than a finite element code was considered appropriate for the stability analysis [19-21]. The constitutive model used for rock blocks and discontinuities was the Mohr-Coulomb elasto-plastic one. This model was chosen both because it is one of the most efficient computationally plasticity models and because the analysis concerns general rock mechanics issues (e.g. slope stability and underground excavation).

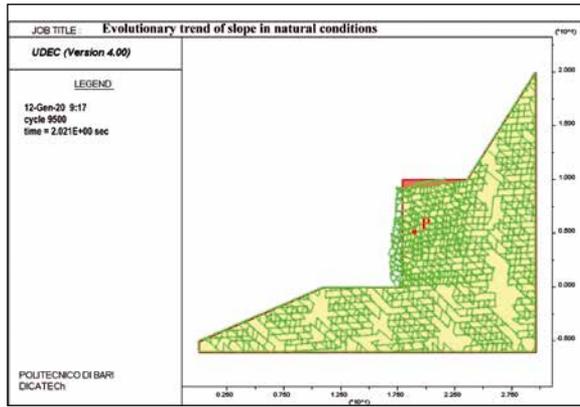
Initially, the stability analysis, where parameters used in the numerical model (Table 7) are typical for the Altamura Limestone litotype [16, 22, 23], was carried out considering the natural evolutionary trend of the slope (without shotcrete support) which resulted unstable, in perfect agreement with the recent collapses (Figure 4).

Thus, an intervention with a 0.15m thickness of shotcrete has been simulated as stability support suggested by SMR. In practice, the slope stability analysis has been carried out according to two distinct ways. The first analysis has been made simulating the shotcrete application soon after the road cut. The second analysis, more close to the actual situation, has been made applying the shotcrete after the slope relaxation and the occurrence of rockfalls.

**Table 7.** Rock and joint properties of Altamura's Limestone for UDEC model

Rock properties						Joint properties		
Unit weight $\gamma_n$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Unconfined compressive strength $\sigma_c$ (MPa)	Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	Modulus of elasticity $E_{50\%}$ (MPa)	Poisson modulus $\nu$	Friction angle $\psi$ (°)	Joint Roughness Coefficient JRC	Joint Compressive Strength JCS (MPa)	Friction angle $\phi$ (°)
2350	140	5.0	37000	0.3	45	3÷11	30÷100	35

**Figure 4.** Slope of road section No. 10: unstable evolutionary trend of the slope (green profile) many years after the road cut (red profile)

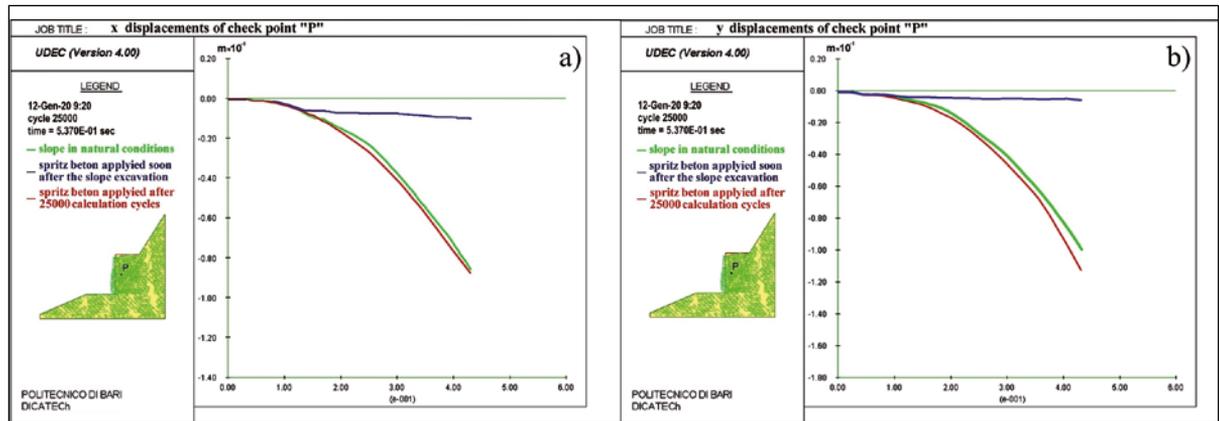


The slope analyses, in the actual conditions and applying the shotcrete after the slope relaxation, provided deformations of the order of  $10^{-3}$ m in the checking point "P" located

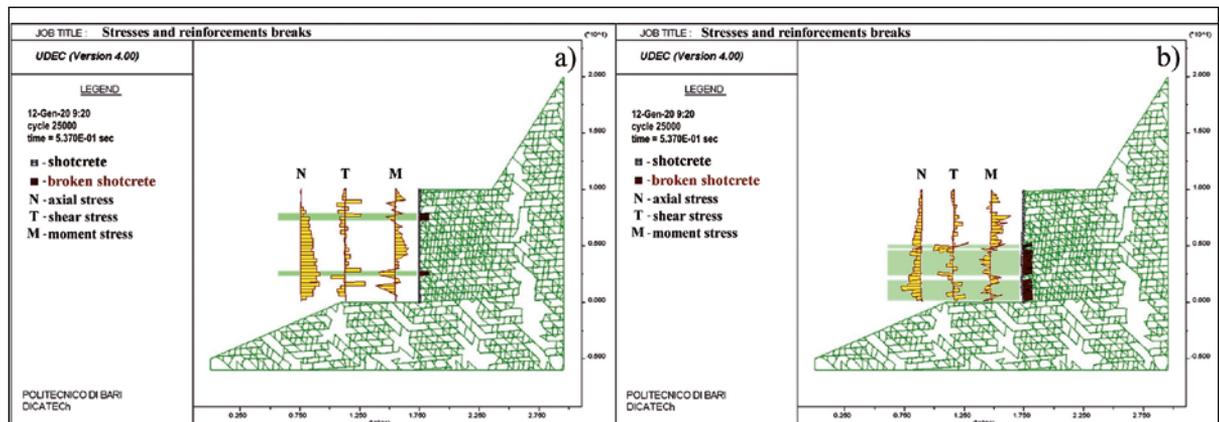
at half slope height and at 1m inside its front (Figure 4), both in the X (Figure 5a green and red lines) and Y (Figure 5b green and red lines) directions. The case in which the shotcrete is projected soon after the front's excavation (Fig. 5a and 5b, blue lines) is slightly different: in this case, in fact, the provided deformations in the checking point "P" are of the order of  $10^{-3}$ m, much lower than previous ones. It is clear, therefore, that in the actual conditions and applying the shotcrete after the slope relaxation the trend and the deformations extent lead to the instability of the slope, even if with different times.

Observing the shotcrete state of stresses, in both the analyses, it is interesting to observe how the shotcrete reinforcement highlights several breaking points as clearly shown by diagrams of the axial and shear stress and moments (Figure 6a and 6b).

In the case of shotcrete application, soon after the front excavation (Figure 6a), there are just two break points located in the upper and lower middle third of the reinforcement. If, however, the shotcrete is applied at incipient deformation,



**Figure 5.** Slope of road section No. 10: a) X displacements of check point "P"; b) Y displacements of check point "P"



**Figure 6.** Slope of road section No. 10: Stresses state and reinforcement breaks in the case of a) shotcrete application soon after the front excavation b) shotcrete application at incipient deformation

the reinforcement rupture, occurring in the lower half of the front, is more widespread (Figure 6b).

The trend of the total displacement vectors in the slope shows a landslide mechanism, both in the case of immediate stabilization of the front and after its relaxation (Figure 7a and 7b), compatible with a “soil type” behavior of the rock mass.

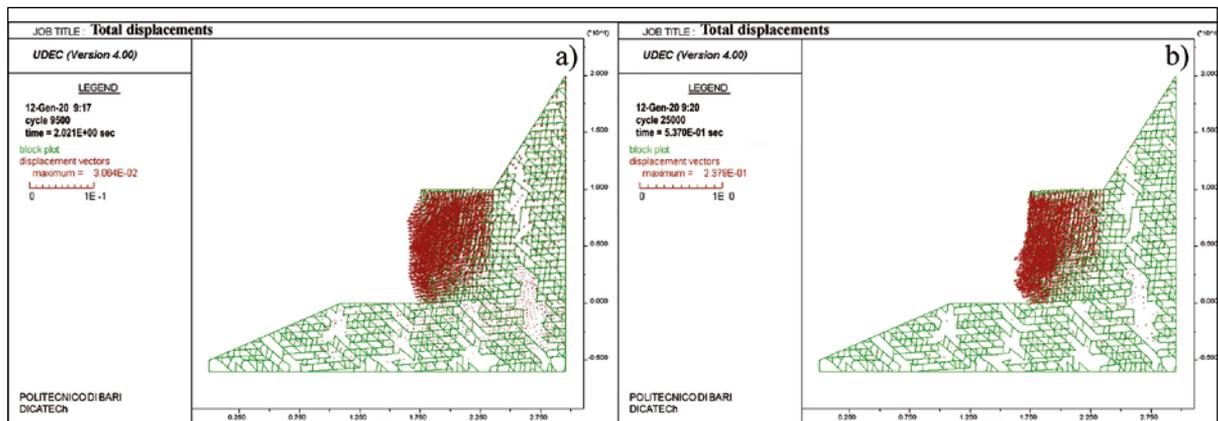
According to the results of this study and to achieve a major degree of safeness, the local Administration has chosen to stabilize the slopes, not by means of the shotcrete suggested by the SMR classification, but by means of a gravity wall, frontal re-profiling and the installation of a wire mesh (Figure 8).

#### 4. Discussion and Conclusions

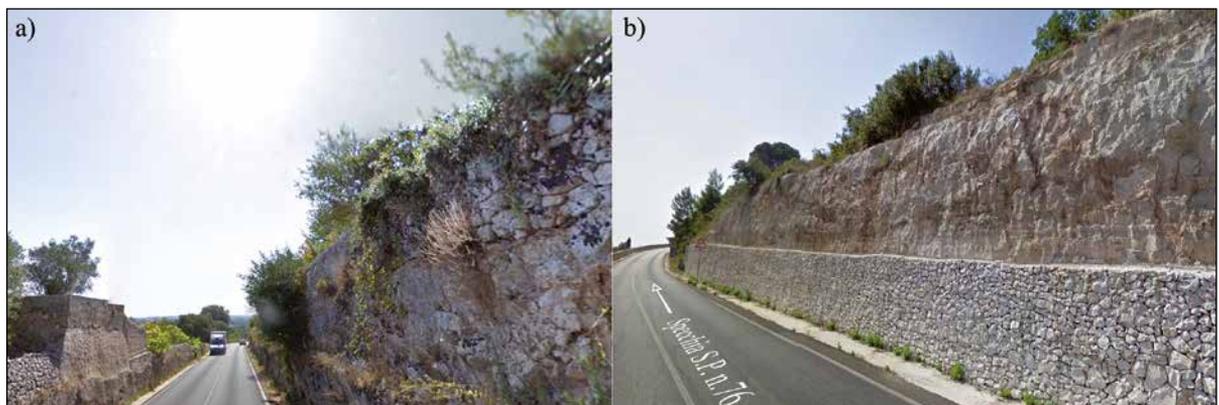
The Romana SMR geomechanical classification, like other classifications, is a widely used tool both for an initial assessment of the stability of slopes and excavation fronts and for establishing which types of supports to adopt for

their stabilisation. Taking this into account, a case study was chosen concerning twelve road sections, along a 1.3 km stretch of the provincial road No. 76 Presicce-Specchia, located in the Apulia peninsula (Southern Italy), which has been affected by instability due to local rockfalls.

For each of the road sections considered, the SMR index, the quality class of the rock mass and the relative corrections suggested by the Romana classification were calculated. A preliminary feedback in the field, between the stability rank by SMR classification indexes and the real conditions of stability of the slopes in the different road sections, suggests a fairly good agreement with the exception of the road sections No. 8 and No. 10 affected by landslide rockfalls. The graphic stability analyses also confirmed the possibility of kinematics in these two slopes adjacent to the road sections. Hence, with the aim to evaluate the reliability of the stabilisation measures suggested by SMR classification, a stability analysis of the slope overlooking the unstable road section No. 10, stabilised with 0.15m thickness of shotcrete, has been performed with the distinct element code (UDEC).



**Figure 7.** Slope of road section No. 10: Total displacement vectors in the case of a) shotcrete application soon after the front excavation b) shotcrete application at incipient deformation



**Figure 8.** View of the slope close the No. 10 road section: a) before the front stabilization; b) after the front stabilization

The above results and considerations show that, in the studied case, the support measures suggested by SMR classification are insufficient to ensure the fronts stabilisation, particularly if they are carried out at incipient failure. In fact, the X and Y displacements of a check point "P" are very large and the slope stability is not achieved even after the shotcrete application. The numerical simulation shows clearly the stress state and reinforcement breaks of the shotcrete, especially if its application takes place in a relaxed or incipient instability state. The analysed case study confirm that the SMR is essentially a preliminary tool for assessing the stability of the slopes and designing their stabilisation. A lot of stability analysis are planned with the UDEC code on slopes subject to landslides and with similar geomechanical characteristics to assess the degree of reliability of the stabilizations proposed by the SMR.

## References

- 1. Bunce, C.M.; Cruden, D.M.; Morgenstern, N.R. Assessment of the hazard from rockfall on a highway. *Can. Geotech. J.* 1997, 34, pp. 344-356.
- 2. Bruno, G. Proposta di revisione del metodo RHRS per la valutazione e zonazione della pericolosità di percorrenza veicolare delle strade in caso di frane: il caso di studio della SP n. 76 presiccespucchia (Puglia). *Geologi e Territorio* 2017, 1, pp. 3-15.
- 3. Ramesh, V.; Mani, S.; Baskar, M.; Kavitha, G.; Anbazhagan, S. Landslide hazard zonation mapping and cut slope stability analyses along Yercaud ghat road (Kuppanur-Yercaud) section, Tamil Nadu, India. *Geo-Engineering* 2017, 8:2, DOI 10.1186/s40703-017-0039-x.
- 4. Whiteside, P.G.D. Discussion on rock fall protection measures. In Proceedings of *Conf. on. Rock Eng. and Excavation in an Urban Env.*, Institution of Mining and Metallurgy, Hong Kong, China, 1986; pp. 490-498.
- 5. Romana, M. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In Proceedings of *Int. Symp. on the Role of rock mechanics*, ISRM, Zacatecas, Mexico, 1985; pp. 49-53.
- 6. Romana, M. SMR classification. In Proceedings of *7<sup>th</sup> Int. Cong. Rock Mech.*, Balkema Ed.; Rotterdam, Netherlands, 1991; pp. 955-960.
- 7. Romana, M. A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating. In *Comprehensive Rock Engineering*, Hudson J. Ed.; Publisher: Pergamon, 1993; 3, pp. 575-600.
- 8. Romana, M.; Serón Gáñez, J.B.; Montalar, E. (2001) La clasificación geomecánica SMR: aplicación, experiencias y validación. In Proceedings of *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Madrid, Spain, 27 a 30 de noviembre de 2001.
- 9. Zuy, C.H. Recent developments in slope stability analysis Key-note lecture. In Proceedings of *8<sup>th</sup> Int. ISRM Congress*, Fujii Ed.; 1995.
- 10. Robertson, A.M. Estimating weak rock strength. *AIME-SME Annual Meeting*, Phoenix, Arizona, U.S.A., preprint N° 88-145, 1988.
- 11. Romana, M. The geomechanical classification SMR for slope correction. In Proceedings of *8<sup>th</sup> Int. ISRM Congress*, Fujii Ed.; 1995.
- 12. Singh, B.; Goel, S.K. Engineering Rock Mass Classification. Elsevier Ed.; 2011, ISBN 978-0-12-385878-8.
- 13. Pieri, P.; Sabato, L.; Spalluto, L.; Tropeano, M. Note illustrative della Carta geologica d'Italia in scala 1:50.000 Foglio 438-Bari. ISPRA, Servizio Geologico d'Italia, Publisher: Litografia Artistica Cartografica, Firenze, 2011.
- 14. Barton, N. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2002, 39, pp. 185-216.
- 15. Bieniawski, Z.T. The Geomechanics Classification in rock engineering applications. In Proceedings of *4<sup>th</sup> Int. Congr. on Rock Mech.*, Balkema Ed., Rotterdam, Netherlands, 1979; 2, pp. 51-58.
- 16. Bruno, G. Caratterizzazione geomeccanica per la progettazione ingegneristica. Dario Flaccovio Ed., Palermo, Italy, 2012, ISBN 978-88-579-0150-3.
- 17. Rutledge, T.C.; Preston, R. Experience with engineering classification of rock for prediction of tunnel support. In Proceedings of *Int. Tunnel Symp.*, A3, Tokio, Japan, 1981.
- 18. Goodman, R.E. Introduction to rock mechanics. John Wiley & Sons Eds., New York, U.S.A., 1980.
- 19. Cundall, P.A.; Hart R.D. Development of generalized 2-D and 3-D distinct element programs for modeling jointed rock. Itasca Consulting Group, U.S. Army Corps of Engineers, Misc. *Paper SL-85-1*, 1985.
- 20. Marcato, G.; Silvano, S.; Zabuski, L. Modellazione di ammassi rocciosi instabili con il metodo degli elementi distinti. *Giornale di Geologia Applicata* 2005, 2, pp. 87-92, DOI: 10.1474/GGA.2005-02.0-12.0038.
- 21. Saeed, M.S.; Maarefvand, P.; Yaaghubi, E. (2015). "Two and three-dimensional slope stability analyses of final wall for Miduk mine". *International Journal of Geo-Engineering* 2015, 6:9, DOI 10.1186/s40703-015-0009-0.
- 22. Lollino, P.; Parise, M.; Reina, A. Numerical analysis of the behavior of karst cavern at Castellana-Grotte, Italy. In *Numerical Modelling of Discrete Materials*, Konietzky Ed., Publisher: Taylor & Francis Group, 2004, London, UK, ISBN 90 5809 6351.
- 23. Bruno, G.; Carucci, F. 2D numerical analysis of the seismic response of a karst rock mass: importance of underground caves and geostructural details. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2019; pp. 1-13.

# AMBRGEO

Strumenti per Geofisica

- SISMOGRAFI
- HVSR
- TOMOGRAFIA ELETTRICA
- GEORESISTIVIMETRI
- ENERGIZZATORI SISMICI
- IDROFONI



Seismograph  
ECHO 48/2014 Seismic Unit - 24bit



Seismograph  
ECHO 24/2010 Seismic Unit - 24bit



ECHO Tromo HVSR3 - 24bit



Mangusta MC 24-120E  
Geoelectrical Tomography Equipment



Resistivity Meter Datares-10



3D/5D - 3D Twin Borehole Geophone



P/S Wave Borehole Energy Source



Borehole Deviation Probe

## Approccio direct-sensing per la caratterizzazione di siti contaminati: Indagine MIP su sito con acquifero contaminato da composti clorurati

Ing. Claudio Sandrone, Ing. Andrea Campi (BAW s.r.l.)

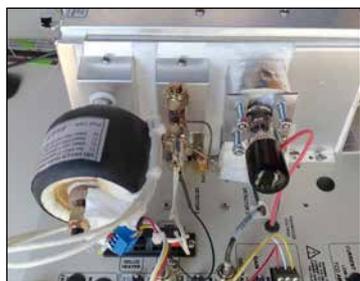
La definizione dell'entità e dell'estensione della contaminazione da idrocarburi nel suolo e nelle acque sotterranee con metodi tradizionali prevede il campionamento delle matrici ambientali coinvolte e la successiva esecuzione di analisi di laboratorio. Tale approccio richiede la raccolta di numerosi campioni in matrici diverse per definire l'intero profilo verticale insaturo e saturo e la ricostruzione tridimensionale della contaminazione, ancor più quando è richiesta un'elevata risoluzione dei dati per la progettazione di interventi di bonifica in scenari complessi.

Un diverso approccio, che utilizza la tecnica di indagine MIP (**Membra-  
ne Interface Probe**), è stato utilizzato per la caratterizzazione di un sito nel Nord Italia. Nel sito, oggetto di monitoraggio tradizionale per diversi anni, non erano state individuate e delimitate in modo chiaro le due probabili sorgenti di contaminazione e il plume inquinante. Inoltre, non era stata caratterizzata la contaminazione in direzione verticale (l'acquifero si estende da 2 a 10 m di profondità).

È stata pertanto progettata un'indagine MIP con lo scopo di definire tridimensionalmente le sorgenti di contaminazione e delimitare il plume, per poter procedere con una progettazione dettagliata dei successivi interventi di bonifica (nello specifico con In Situ Chemical Reduction, ISCR).

La tecnologia MIP è un sistema in grado di riscontrare in corso di perforazione la presenza di Sostanze Organiche Volatili (VOC) in modo continuo; essa si realizza secondo le seguenti fasi:

- i. infissione mediante macchina perforatrice, con tecnica direct-push, della punta di campionamento lungo tutta la verticale oggetto di indagine (nel caso specifico 10 m);
- ii. riscaldamento della punta a temperature comprese tra 80 e 130 °C e conseguente mobilizzazione dei contaminanti presenti nelle diverse matrici ambientali;
- iii. diffusione molecolare del contaminante attraverso la membrana porosa della punta e trasferimento del contaminante dal sottosuolo alle unità di analisi in superficie;
- iv. analisi del gas in superficie mediante FID (Flame Ionization Detector), sensibile alla presenza di idrocarburi; PID (Photo Ionization Detector), sensibile nei confronti degli idrocarburi aromatici; DELCD (Dry Electrolytic Conductivity Detector), sensibile ai composti clorurati;
- v. registrazione della risposta del sistema in termini di segnale elettrico misurato.



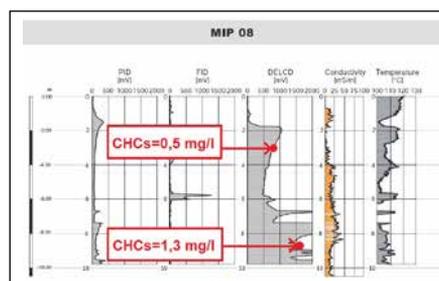
**Figura 1.** Vista dei tre rilevatori di cui è dotato il sistema MIP. Da sinistra: rilevatore DELCD, rilevatore FID e rilevatore PID.

In questo modo è pertanto possibile ricostruire una distribuzione pseudo-quantitativa del contaminante nel sottosuolo; inoltre il sistema è associato ad un monitoraggio continuo delle conduttività elettrica finalizzato alla contemporanea verifica delle caratteristiche litologiche del terreno indagato (permettendo di evidenziare il raggiungimento della base dell'acquifero superficiale).

Per il sito in esame l'indagine MIP è stata realizzata da BAW s.r.l. in collaborazione con la società tedesca GEO-LOG. In meno di due settimane sono state realizzate 40 postazioni di indagine MIP, con caratterizzazione in continuo da 0 a 10 m di profondità. Sono inoltre stati prelevati, con la medesima attrezzatura di perforazione, 30 campioni puntuali di acqua di falda (3 campioni per n. 10 verticali) per la successiva taratura dei rilevatori, al fine di correlare il segnale elettrico registrato al valore di concentrazione contaminante presente.

I vantaggi rispetto ai metodi tradizionali sono significativi. Il profilo

MIP continuo riduce il numero di campioni di suolo e di falda necessari per delineare completamente l'estensione delle aree sorgenti e del plume, fornendo informazioni dettagliate sulla distribuzione verticale dei contaminanti sia in zona vadosa che in zona saturo. Inoltre, in base alla conduttività del suolo, fornisce informazioni sulle condizioni geologiche del sito contribuendo allo sviluppo del modello concettuale. In Figura 2 si riporta a titolo esemplificativo l'output derivato da una delle verticali eseguite, in corrispondenza della quale sono stati anche prelevati campioni puntuali per la taratura del segnale. I valori di concentrazione determinati (espressi come composti clorurati totali, CHCs) sono riportati nell'immagine sottostante.



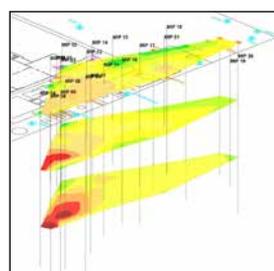
**Figura 2.** Output fornito dall'indagine MIP in corrispondenza della postazione MIP08, con indicazione delle concentrazioni di composti clorurati per la taratura del rilevatore DELCD.

Ai fini dell'indagine svolta, il segnale più significativo è stato quello rilevato dal sensore DELCD, sensibile alla presenza di composti clorurati. È stato osservato un generale aumento dell'intensità del segnale con l'aumentare della profondità, comportamento concorde con la natura dei contaminanti in oggetto, che tendono ad accumularsi negli strati più profondi dell'acquifero.

Gli altri sensori non hanno rilevato segnali significativi, a conferma del fatto che la contaminazione nel sito è dovuta unicamente ai composti alifatici clorurati.

L'interpretazione dei segnali dei vari sensori e dei relativi profili viene eseguita anche tenendo conto dei risultati emersi dai campioni di taratura, prelevati a più profondità dell'acquifero.

Tali dati sono utilizzati per effettuare una ricostruzione tridimensionale particolarmente dettagliata dello stato di contaminazione del sottosuolo. La figura seguente mostra alcune sezioni del sito ricostruite utilizzando i dati emersi da 20 postazioni di indagine MIP.



**Figura 3.** Ricostruzione delle sezioni effettuate sulla base dei dati emersi dall'indagine MIP e dai campionamenti di taratura (il colore rosso scuro rappresenta concentrazioni di CHCs dell'ordine di 1 mg/l).

La Figura 3 rappresenta una delle due potenziali sorgenti di contaminazione individuate nel sito grazie alla tecnologia MIP; tale area è risultata essere una zona utilizzata in passato per lo stoccaggio in serbatoi fuori terra di composti clorurati (principalmente tricloroetilene).

L'attività condotta ha evidenziato come l'approccio "direct sensing" sia in grado di fornire elementi utili e dettagliati in merito allo stato di contaminazione del sito, con un costo per unità di volume caratterizzato decisamente inferiore rispetto ad un'indagine tradizionale in grado di fornire lo stesso dettaglio.

I dati raccolti con il MIP saranno molto utili per definire la miglior strategia di bonifica, consentendo una progettazione più accurata degli interventi nelle diverse matrici e nelle diverse aree di contaminazione (aree sorgenti e plume), differenziandoli anche in profondità. Gli interventi alla fine risulteranno più efficaci, perché meglio indirizzati rispetto alla contaminazione presente, ed i costi ottimizzati.

# Geo-archeositi ipogei dei territori ibleo e maltese

## *Underground geo-archaeosites of Hyblaeen and Maltese areas*

**Rosanna Maniscalco**, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali - Università di Catania, Italy

**Davide Tanasi**, Department of History - University of South Florida, Tampa, USA

### Termini chiave:

Geoarcheositi, Malta, Iblei, ipogei

### Keywords:

Geoarcheosites, Malta, Iblea, underground caves

### Abstract

*Prehistoric caves, as Għar ar Mirdum in Malta and Grotta Monello and Grotta Palombara in Siracusa territory represent an important evidence of human occupation of Sicily and Malta in the Neolithic and their use is, at the same time, the most relevant indicator of an 'underground' shared religion well attested in the two islands between the 3rd and the 2nd millennium BC. Peculiar geological and environmental features, and the surrounding landscape were decisive in the choice of the type of ritual practices to be performed inside of those caves, as if their natural frame was able to condition the cultural outcome. Too often archaeological studies aimed to interpret that outcome have ignored the geological and environmental context, which was in first place responsible for the ritual activity. This paper contributes to highlight those geo-archaeological elements of such peculiar geo-archaeosites connecting cultures of Sicily and Malta.*

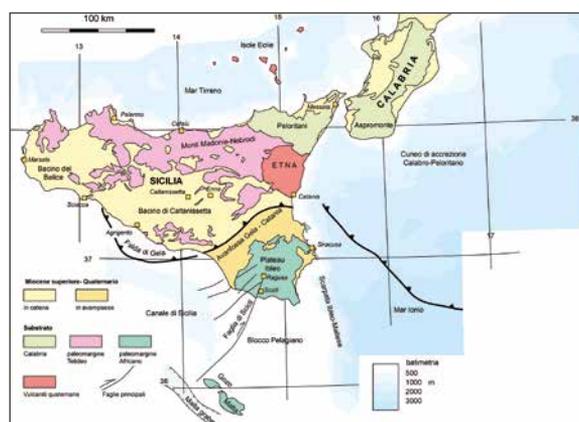
### Riassunto

Le grotte preistoriche (Għar Mirdum a Malta e le Grotte Monello e Palombara a Siracusa) rappresentano un'importante evidenza della produzione culturale delle genti di Malta e Sicilia, di epoca Neolitica, e sono la testimonianza più significativa dello sviluppo di una religione sotterranea condivisa, che matura tra il III ed il II millennio a.C. Le peculiarità geologiche, le caratteristiche ambientali ed il paesaggio circostante erano decisivi nella scelta del tipo di pratiche rituali svolte all'interno delle grotte: una sorta di paesaggio naturale capace di condizionare il paesaggio culturale. Troppo di frequente, gli studi archeologici volti ad interpretare gli esiti di tali processi culturali hanno ignorato gli aspetti geologici e naturali che di quei processi sono

stati l'elemento scatenante. Il lavoro fornisce informazioni proprio su questi elementi, che accomunano e collegano intimamente il patrimonio archeologico maltese a quello siciliano.

### 1. Inquadramento geologico-strutturale del blocco pelagiano

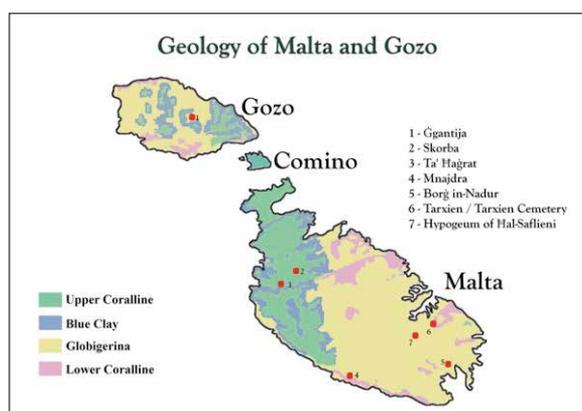
I territori di Malta e della Sicilia sud-orientale presentano notevoli analogie morfologiche, geologiche e strutturali. Il Plateau Ibleo, in Sicilia sud-orientale, rappresenta il margine più settentrionale, poco deformato, della placca Africana (Blocco Pelagiano di Burolet P. F. et al., 1978, fig.1), che si estende, nell'offshore, nel Canale di Sicilia emergendo in corrispondenza dell'isola di Lampedusa e dell'arcipelago Maltese.



**Fig. 1** - Carta geologica schematica della Sicilia e Malta. Sono riportati i principali lineamenti strutturali del Canale di Sicilia (modificata da Butler R. W. H. et al., 2015).

L'appartenenza del settore dei Monti Iblei alla placca Africana giustifica la notevole analogia dei paesaggi siciliano e maltese e la loro comune evoluzione a paesaggi carsici.

Nel Neogene, la convergenza e la successiva collisione del margine settentrionale della Placca Africana (fig.1) e di quello meridionale della Placca Europea determinarono la formazione della Catena Appenninico-Maghrebide, la flessurazione dell'avampase africano sotto la placca Europea e l'inarcamento e la conseguente emersione della regione Iblea (Dewey J. F. et al., 1989). La crosta del Bacino Ionico è separata da quella del Plateau Ibleo dalla Scarpata Ibleo-Maltese, un'importante struttura tettonica orientata NNO-SSE, il cui rigetto aumenta verso nord, ove la placca ionica va in subduzione sotto l'Arco Calabro-Peloritano. Essa separa la crosta continentale del Canale di Sicilia (Plateau Ibleo-Maltese) da quella del Mare Ionio. Il grande contrasto batimetrico, oltre che di spessore, tra i mari poco profondi della piattaforma Ibleo-Maltese, a luoghi interrotta da importanti fosse tettoniche con andamento NO-SE e le profondità notevoli nel Bacino Ionico dipendono dalla diversa natura della crosta nei due differenti settori: continentale nel Blocco Pelagiano e oceanica nel Mar Ionio. In particolare, il sistema di rift del Canale di Sicilia divide il Blocco Pelagiano in aree di mare poco profondo separate da fosse. La deformazione nel Plateau Ibleo e nelle Isole Maltesi è collegata proprio all'apertura del rift nel Canale di Sicilia ed il comune comportamento tettonico delle due regioni sarebbe controllato da un sistema di faglie trascorrenti destre, orientate NNE-SSO che dal margine occidentale del Plateau Ibleo arrivano a lambire l'offshore NO dell'isola di Gozo (Faglia di Scigli, Fig.1). Un sistema di faglie con la stessa orientazione del sistema di rift è visibile lungo la costa meridionale dell'Isola di Malta (Maghlaq Fault). L'apertura del rift ha determinato un basculamento verso NE dell'isola, ubicata sulla spalla settentrionale della fossa, e lungo la cui costa meridionale sono esposte spettacolari falesie verticali (Dingli Cliffs, figg. 2 e 3).

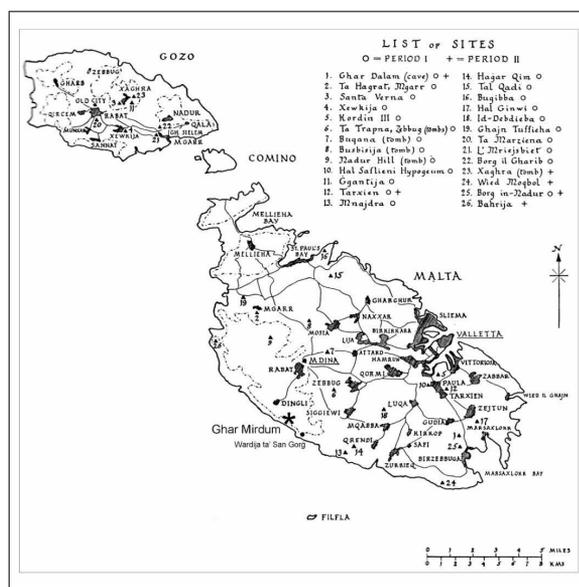


**Fig. 2** - Carta geologica dell'Arcipelago Maltese, (adattata da Geological Map of the Maltese Islands 1:25,000 published by the Oil Exploration Directorate, Office of the Prime Minister, Valletta, Malta, 1993).

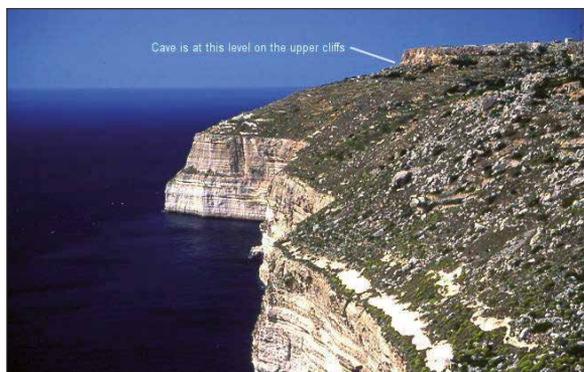
## 2. La nascita del carsismo nei territori ibleo e maltesi

Proprio alle fasi collisionali continente-continente, avvenute nel Miocene superiore, è dovuto l'esteso fenomeno di inarcamento crostale che ha determinato l'emersione del dominio ibleo (Bonforte A. et al., 2015) e dell'isola di Malta. Dal Messiniano e per tutto il Pliocene, l'area Iblea è largamente emersa e caratterizzata dallo sviluppo di un paesaggio fluviale che ha raggiunto uno stadio di avanzata maturità, quindi il processo carsico si è evoluto adattandosi al livello di base, più basso rispetto a quello instauratosi nel Pleistocene inferiore ed evidenziato dalla linea di massima ingressione marina pleistocenica (Bianca M., 1998; Grasso M. et al., 2000; Maniscalco R., 1998; Maniscalco R. & Stamilla R., 2000; Bonforte A. et al., 2015). Dal Pleistocene inferiore fino al Pleistocene superiore le linee di costa sono progressivamente migrate dall'entroterra verso il mare sia per variazioni eustatiche, che per il sollevamento dell'area. Ciò ha determinato, quindi, l'abbassamento del livello di base carsico.

Anche l'emersione delle Isole Maltesi, e quindi l'inizio del processo carsico recente, è datata al Miocene superiore-Pliocene inferiore (Pedley H. M., 2011), così come nel Plateau Ibleo. I cambiamenti climatici pleistocenici hanno determinato ripetuti abbassamenti ed innalzamenti del livello globale del mare legato a glaciazioni e periodi interglaciali e le cave e grotte del territorio maltese ne sono testimonianza. Il territorio siracusano siciliano e delle Isole Maltesi è marcato da morfologie carsiche spettacolari, quali doline e strutture da dissoluzione carsica di notevoli dimensioni



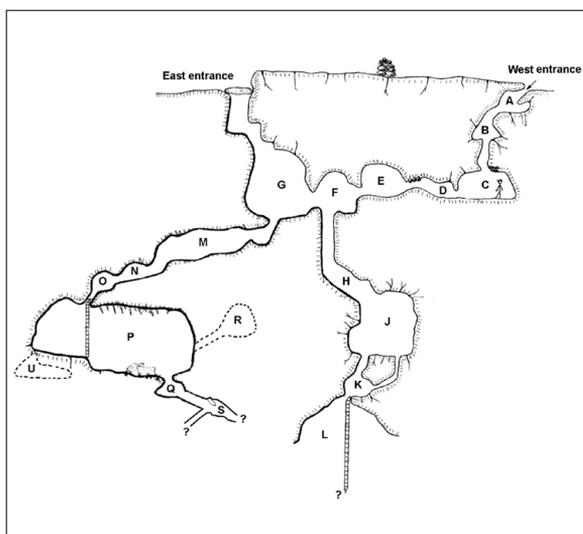
**Fig. 3** - Pianta dell'arcipelago maltese con indicazione dei principali siti preistorici maltesi e della grotta di Ghar Mirdum (Tanasi D., 2014).



**Fig. 4** - Falesie di Dingli con indicazione dell'ingresso superiore di Għar Mirdum (Tanasi D., 2014).



**Fig. 5** - Archeologo Francis Mallia a Għar Mirdum durante l'esplorazione del 1965.



**Fig. 6** - Schizzo del complesso di Għar Mirdum esplorato dallo speleologo Paul Calleja-Gera in 1964-1965 (Tanasi D., 2014).

(a Gozo e nella parte nord-occidentale dell'Isola di Malta) che interessano le formazioni calcaree del Miocene (figg. 1, 2 - Formazione Monti Climiti a Siracusa e Upper Coralline limestone Formation a Malta). Durante l'ultimo massimo glaciale (20 Ka) il livello del mare doveva trovarsi 130 metri sotto l'attuale e ciò spiega la presenza di specie comuni di mammiferi (e.g. mammiferi nani, *Elephas falconeri* a Għar Dalam, Pedley H. M. et al., 2002; Pedley H. M., 2011) a Malta ed in Sicilia perché emerse e collegate probabilmente per tutto l'intervallo di tempo compreso tra 20.0 e 14.4 Ka (Fogliani F. et al., 2015). Ciò ci induce a pensare che a seguito di uno stimato innalzamento del mare, nel prossimo futuro, questo prezioso patrimonio geo-archeologico potrebbe scomparire del tutto (Lambeck K. et al., 1990).

### 3. Inquadramento archeologico

Le grotte e ripari sotto roccia, non solo rappresentano un'importante evidenza della produzione culturale delle genti di Sicilia e Malta di epoca Neolitica ma sono la testimonianza più significativa dello sviluppo di una religione sotterranea condivisa, che matura in modo progressivo e multifaccettato tra il III ed il II millennio a.C..

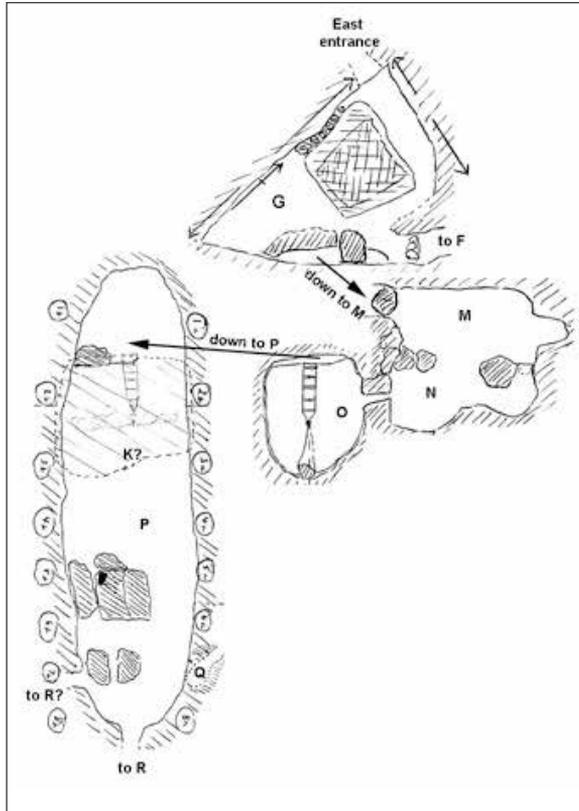
Una recente e vasta letteratura (Skeates R., 2012) ci informa come le grotte preistoriche di ambito mediterraneo non avessero una funzione eminentemente abitativa, come è *communis opinio*, ma bensì rappresentavano il focus di attività culturali e funerarie, alimentate in modo originale dalla straordinarietà di questi complessi angusti, oscuri e cunicolari. Attività che facevano da complemento alla religione ufficiale, che emerge invece da contesti più propriamente religiosi quali i templi nel caso di Malta ed i santuari rupestri nel caso della Sicilia.

Nel quadro degli stretti rapporti di interazione tra le due isole, che hanno caratterizzato l'età preistorica, sono proprio alcune grotte frequentate nell'età del Bronzo che hanno restituito tracce di scambio e fenomeni di ibridazione culturale se non veri e propri esempi di una religiosità condivisa.

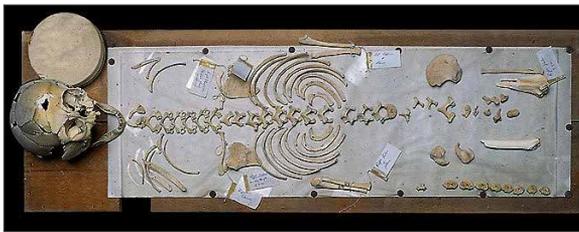
Nella preistoria maltese, la documentazione più significativa relativa all'uso ed allo sfruttamento degli spazi sotterranei naturali si inquadra tra il Neolitico e l'Età Templare, con un climax verso la fine del IV millennio a.C., (Skeates R., 2010). Le due grotte che hanno restituito l'evidenza archeologica di maggiore entità sono senza dubbio le grotte di Għar Dalam (Ashby T. et al., 1916; Evans J. D., 1971), ad oggi uno dei siti preistorici più conosciuti e visitati di Malta, e Bur Mghez (Evans J. D. 1971), il più importante contesto funerario sotterraneo di Età Templare.

Ma il caso studio più problematico ed al tempo stesso più rilevante per la preistoria dell'arcipelago maltese e per la storia di lungo periodo dei rapporti tra la Sicilia e Malta è senza dubbio la grotta di Għar Mirdum (Tanasi D., 2014).

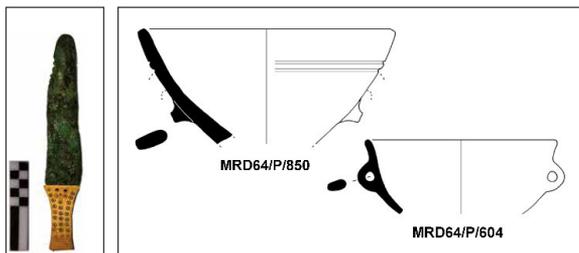
Għar Mirdum è una grotta carsica ubicata presso le falesie



**Fig. 7** - Pianta ricostruttiva del sistema di 'camere' G, M, N, O e della P (Tanasi D., 2014).



**Fig. 8** - Sepoltura infantile dalla camera P (Tanasi D., 2014).



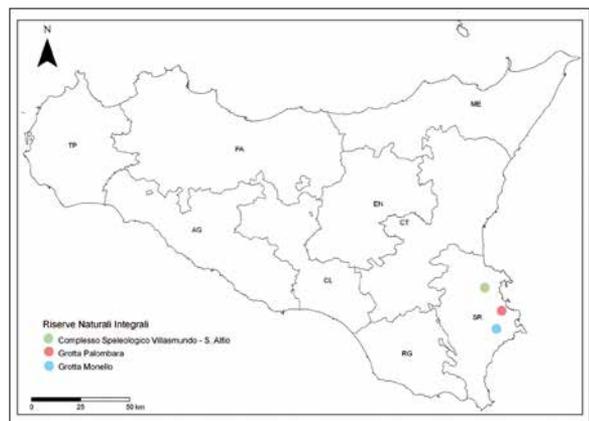
**Fig. 9** - Pugnale bronzeo con manico Borġ in osso dalla camera M (Tanasi D., 2014).

**Fig. 10** - Ceramiche da mensa dello stile di Borġ in-Nadur dalla camera funeraria P (Tanasi D., 2014).

di Dingli (figg. 3, 4) nella parte sud-ovest di Malta all'interno della "Upper Coralline Limestone Formation".

Nel corso dei tempi geologici e degli ultimi millenni, il carsismo ha profondamente mutato l'aspetto del complesso sotterraneo, per effetto del progressivo crollo delle falesie a causa dell'erosione delle Blue Clay alla base. La grotta fu esplorata tra il 1964 e 1965 da un gruppo di speleologi non professionisti assistiti da un archeologo e nel corso dell'indagine una grande quantità di materiale archeologico, per lo più relativo all'epoca preistorica, è stato raccolto senza però effettuare degli scavi veri e propri (fig.5). Come molte altre grotte carsiche, Ghar Mirdum ha una struttura cunicolare con un orientamento obliquo se non a tratti verticale, che segue il profilo della falesia, con un dislivello di 35 metri tra l'ingresso e la quota del suolo della parte più bassa esplorata.

Le gallerie sono strette e molto lunghe anche se a volte si allargano a formare dei grandi cameroni. Nel corso dell'esplorazione sono state identificate 18 "camere" (fig.6), che con tutta probabilità dovevano essere dei passaggi decisamente più ampi e larghi degli altri. Il riesame complessivo delle evidenze emergenti da Ghar Mirdum (Tanasi D., 2014) ha illustrato la presenza di chiare attività funerarie e di culto dei defunti databili all'età del Bronzo Medio (fase di Borġ in-Nadur), uniche per la preistoria maltese (figg. 7-10). Mettendo da parte la straordinaria e ben nota evidenza Ghar Dalam, sito ben più conosciuto e nel tempo ripetutamente oggetto di indagine da parte degli studiosi, di estremo interesse resta il contesto delle grotte minori dell'arcipelago maltese, tra cui spiccano per peculiarità Ghar il-Kbir a Dingli e Ghar il-Friefet a Birzebbugia (Savona-Ventura C., 2007), che potrebbe contribuire in modo sostanziale a completare il quadro documentario che emerge da Ghar Mirdum. Un contesto questo, che si configura ancora come tutto da esplorare per ciò che concerne il punto di vista geo-archeologico.



**Fig. 11** - Localizzazione delle Riserve Naturali Integrali del territorio di Siracusa (Cutgana).

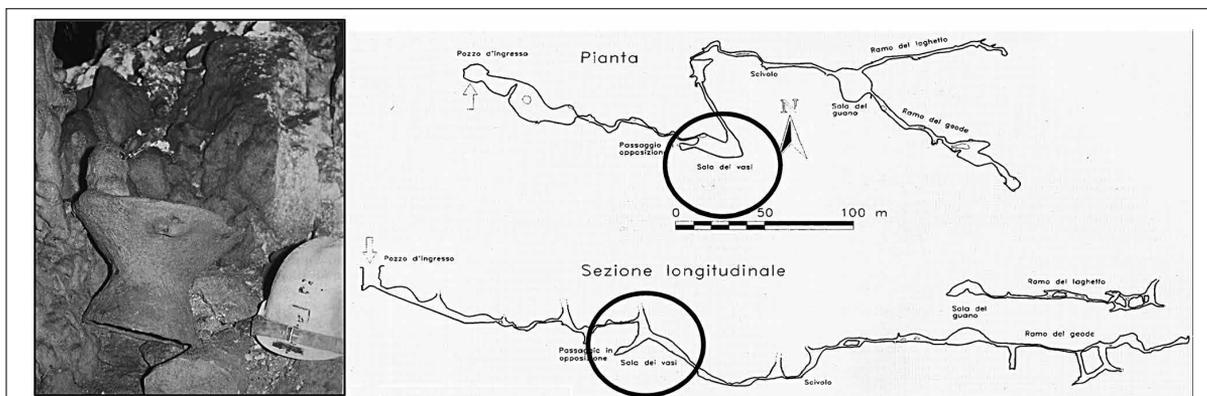


Fig. 12 - Rilievo topografico della Grotta Palombara con indicazioni di punti in cui sono stati individuati vasi inglobati nella concrezione e di uno dei vasi in situ (Cultrera D., 2014).

Il quadro siciliano, in questo caso è invece più frammentato. Le grotte in aree iblee mostrano una certa continuità di occupazione nel corso della preistoria ma con destinazioni d'uso molto differenti tra le diverse fasi dovute soprattutto alla caratteristiche geologiche delle grotte stesse e della natura dell'ambiente circostante (Crispino A. & Cultraro M., 2014).

Piuttosto che un sito guida, i dati relativi ad un uso religioso delle grotte preistoriche provengono da una serie di siti minori di area siracusana, quell'area stessa che da sempre ha restituito gli esiti più importanti di un'interazione con Malta.

Siti quali Grotta Palombara e Grotta Monello (fig. 11), ci hanno anche informato sui molti e spesso sconosciuti aspetti della religione sotterranea siciliana, che nelle sue forme e modalità si intreccia con quella maltese.

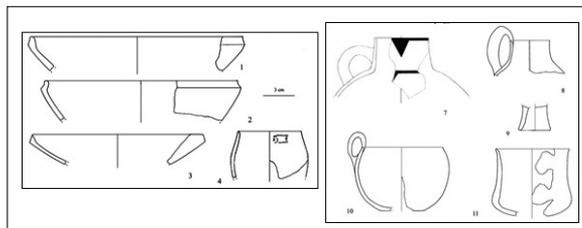
Le riserve naturali integrali "Grotta Palombara" e "Grotta Monello", istituite con decreto Assessoriale del 4/11/1998, ricadono in provincia di Siracusa e sono gestite dal Cutgana (Centro Universitario per la Tutela e la Gestione degli Ambienti Naturali e degli Agroecosistemi) dell'Università degli Studi di Catania. Le cavità carsiche sono caratterizzate dalla presenza di differenti aspetti e stadi evolutivi del carsismo ipogeo. Mentre nella prima è osservabile solo un carsismo ormai fossile, nella seconda sono attualmente prevalenti i fenomeni di stillicidio e concrezionamento con l'accrescimento di significativi speleotemi.

La Grotta Palombara (I.G.M. 274 III NE, fig. 11) ubicata 2 km a Nord di Belvedere (Siracusa), è una cavità carsica accessibile attraverso un pozzo di diametro di circa 15 metri e profondo 12 metri, facente parte di un geosito caratterizzato anche da carsismo epigeo con la presenza di doline di dimensioni metriche e decametriche e di vaschette di corrosione e micro karren. Essa presenta uno sviluppo complessivo di circa 800 metri su un dislivello di circa 80 metri (Ruggieri R. et al., 2000). L'accesso alla grotta si apre

alla base di una voragine ad andamento circolare, formata per il crollo della volta di una sottostante sala, con pareti verticali alte 12 metri e con ampiezza del medesimo diametro. La grotta si estende lungo una serie di stretti cunicoli, con interposte due ampie cavità, chiamate "sale". Il primo grande ambiente è costituito dalla "Sala dei Vasi" (fig. 12), nome che si deve al rinvenimento, avvenuto negli anni '60 di due vasi databili all'età del Rame Finale (Ruggieri R. et al., 2006); il secondo, è quello della "Sala del Guano", così denominata per la presenza di uno spesso accumulo di guano posto alla base di un'ampia volta a forma di cupola. Nel corso delle esplorazioni archeologiche (Tinè S., 1960-1961; Villari P., 1995; Cavallaro F., 1997) si è evidenziata una frequentazione, a partire dal Neolitico finale (*facies* di Diana), con momenti importanti successivi relativi al corso dell'età del Rame (*facies* di Serrafferlicchio e *facies* di Malpasso). Proprio dai livelli dell'età del Rame, provengono un punteruolo in rame e due esemplari di Bicchiere Campaniforme, gli unici per la Sicilia orientale, che affermano la straordinaria importanza del sito anche perché rappresentativo della più importante cultura preistorica pan-europea, che tra l'altro ha accomunato Sicilia e Malta, ovvero quella del Bicchiere Campaniforme (2600-1900 BC) (fig. 13, Cultrera D., 2014).

La Grotta Monello (I.G.M. 274 III SE, fig. 11) ed il vicino Torrente Moscasanti formano un sistema fluvio-carsico, in cui il sistema ipogeo drena gli afflussi del torrente, attraverso un sistema di strutture tettoniche caratterizzate da faglie dirette (Ruggieri R. & Amore C., 2000).

La grotta, ubicata nel territorio del comune di Siracusa in contrada Grotta Perciata, a circa 12 Km ad ovest della città, è un sistema di gallerie carsiche ipogee, disposte su più livelli, aventi uno sviluppo complessivo di circa 540 metri (fig. 14). Di notevole importanza è la presenza di significative concrezioni calcaree rappresentate da stalattiti, stalagmiti, vele e colonne, a luoghi anche di dimensioni decametriche che



**Fig. 13** - Ceramiche neolitiche dello stile di Diana (1-4) ed eneolitiche dello stile di Serrafferlicchio (7-11) dalla grotta Palombara (Odetti G., 2012).



**Fig. 14** - Pianta della Grotta Monello (Caruso D., 1994).

caratterizzano i livelli più superficiali della cavità. Lo sviluppo dei fenomeni di concrezionamento probabilmente ebbe inizio al passaggio tra il Pleistocene medio e il Pleistocene superiore quando la combinazione tra sollevamenti tettonici e oscillazioni eustatiche causò il definitivo abbassamento del livello marino e lo spostamento verso quote inferiori dei fenomeni carsici di tipo erosivo e di dissoluzione (Ruggieri R. & Amore C., 2000). In alcuni punti all'interno della grotta è stato stimato un tasso di crescita delle stalattiti di circa 1 mm/anno. Durante la scoperta fortuita della grotta nel 1948, fu possibile appurare che parte di essa fu utilizzata per scopi funerari nel corso dell'età del Bronzo Antico, quando probabilmente le due camere esterne vennero occupate per deporre inumazione all'interno delle nicchie (Bernabò Brea L., 1965, 9; Musumeci M., 2000).

Lungo le ripide pareti della valle sono presenti grotte di escavazione marina e altre grotte carsiche di minori dimensioni rispetto alla Grotta Monello (Ruggieri R. e Zocco M., 2000), tra cui spiccano soprattutto per l'importanza che hanno ricoperto nel corso della preistoria la Grotta del Conzo e la Grotta della Chiusazza (Odetti G., 2012).

#### 4. Conclusioni

L'elemento più significativo che emerge dalla comparazione delle grotte italiane e maltesi è senza dubbio il forte nesso tra carsismo e pratiche rituali di carattere sacro e funerario sia a Malta che in Sicilia a cavallo tra l'età del Rame e del Bronzo. Lo sviluppo frastagliato e labirintico delle grotte carsiche, la difficoltà di movimento attraverso

spazi angusti, il rischio di attraversare strozzature e cunicoli verticali nelle tenebre doveva, con tutta probabilità, esercitare una forte fascino sulle genti preistoriche (Skeates R., 2010). Ghar Mirdum, Grotta Palombara e Grotta Monello ne sono un chiaro esempio. Interessante ed insolita è invece l'evidenza di una pratica di raccolta delle acque in vasi posizionati presso punti di stillicidio della Grotta Palombara, che lascia supporre credenze di tipo religioso. In conclusione, si può affermare la necessità di una riconsiderazione del significato culturale delle grotte nella preistoria maltese e siciliana alla luce delle nuove prospettive interpretative che la chiave di lettura geologica potrebbe offrire.

#### Ringraziamenti

Si ringraziano i direttori delle Riserve Grotta Monello, Grotta Palombara, e Immacolatelle Micio Conti, Dott. Salvo Costanzo, Fabio Branca e Giovanni Sturiale.

#### Bibliografia

- ASHBY T. ZAMMIT T., DESPOTT G. (1916) - *Excavations in Malta in 1914*, in *Man*, 1-11.
- BERNABÒ BREA L. (1965) - *Segnalazioni di rinvenimenti paleolitici in Sicilia*, in *Bullettino di Paleontologia Italiana*, 74: 7-22.
- BIANCA M. (1998) - *Terrazzi marini e sollevamenti tettonici pleistocenici del settore orientale ibleo*. *Boll. Acc. Gioenia Sc. Nat.*, 31 (335): 51-60.
- BONFORTE A., CATALANO S., MANISCALCO R., PAVANO F., ROMAGNOLI G., STURIALE G. & TORTORICI G. (2015) - *Geological and geodetic constraints on the active deformation along the northern margin of the Hyblean Plateau (SE Sicily)*. *Tectonophysics*, 640-641 (2015) 80-89.
- BUROLLET, P. F., MUGNIOT, G. M., SWEENEY, P. (1978) - *The geology of the Pelagian Block: the margins and basins of southern Tunisia and Tripolitania*. In: Nairn, A., et al., Eds, *The ocean basins and margins*: 331-339. New York: Plenum Press.
- BUTLER R.W.H., MANISCALCO R., STURIALE G., & GRASSO M. (2014) - *Stratigraphic variations control deformation patterns in evaporite basins: Messinian examples, onshore and offshore Sicily (Italy)*. *Journal of the Geological Society*, 172, 113-124, <https://doi.org/10.1144/jgs2014-024>.
- CARUSO, D. (1994) - *La fauna della grotta Monello*, *Atti e Memorie dell'Ente Fauna Siciliana*, II, 1994, pp. 87-121.
- CAVALLARO F. (1997) - *Le grotte del torrente Cugno di Rio*, in *Centro speleologico etneo*, *Le grotte del territorio di Melilli, Melilli*, 169-190.
- CRISPINO, A. & CULTRARO M. (2014) - *Exploring underground paths. Caves and human landscape in the Siracusa district during prehistory*, in D. Gullì (ed.), *From Cave to Dolmen. Ritual and symbolic aspects in the prehistory between Sciacca, Sicily and the central Mediterranean*, Oxford, Archaeopress, pp. 179-194.
- CULTRERA, D. (2014) - *Strategie insediative nella Sicilia sud-orientale: le grotte dei Monti Iblei nella preistoria*, in D. Gullì (ed.), *From Cave to Dolmen. Ritual and symbolic aspects in the prehistory between Sciacca, Sicily and the central Mediterranean*, Oxford, Archaeopress, pp. 195-220.
- DEWEY J.F., HELMAN L.M., TURCO E., HUTTON D.W.H. & KNOTT S. D. (1989) - *Kinematics of the western Mediterranean*. *Spec. Publ. Geol. of Lond.*, 45: 265-283.
- EVANS J. D. (1971) - *The Prehistoric Antiquities of the Maltese Islands*: A Survey, London.
- FOGLINI F., PRAMPOLINI M.C., MICALLEF A., ANGELETTI L., VABDELLI V.,

- DEIDUN A., SOLDATI M., TAVIANI M. (2015) - *Late Quaternary coastal landscape morphology and evolution of the Maltese Islands (Mediterranean Sea) reconstructed from high-resolution seafloor data*. From: Harff, J., Bailey, G. & Luth F. (eds) *Geology and Archaeology: Submerged Landscapes of the Continental Shelf*. Geological Society, London, Special Publications, 411, <http://doi.org/10.1144/SP411.12>
- GRASSO M., PEDLEY H. M., MANISCALCO R., RUGGIERI R. (2000) - *Geological context and explanatory notes of the "Carta geologica del settore centro-meridionale dell'Altopiano Ibleo*. Mem. Soc. Geol. It., 55 (2000): 45-52.
  - LAMBECK K., ANTONIOLI F., ANZIDEI M., FERRANTI L., LEONI G., SCICCHITANO G., SILENZI S. (2011) - *Sea level change along the Italian coast during the Holocene and projections for the future*. *Quaternary International* 232 (2011): 250-257.
  - MANISCALCO R. (1998) - *I depositi messiniani dell'Avampasese Ibleo (Sicilia sud-orientale): distribuzione e ricostruzione paleogeografica*. Boll. Acc. Gionia Sci. Nat., 31 (355): 77-91.
  - MANISCALCO R., STAMILLA R. (2000) - *Tettonica plio-pleistocenica e sue possibili implicazioni sul carsismo dell'area siracusana*. Atti del I seminario di studi su Carsismo negli Iblei e nell'area sud Mediterranea. *Speleologia Iblea*, 8: 43-49. ISSN 1123-9875.
  - MUSUMECI M. (2000) - *Testimonianze archeologiche nelle grotte del territorio di Siracusa*, in Ruggieri R. (ed) 2000, *Il carsismo negli Iblei e nell'area sud mediterranea*. Atti del I seminario di studi, *Speleologia Iblea* 8, Ragusa, pp. 139-152.
  - ODETTI, G. (2012) - *Le grotte del Conzo (SR) e della Palombara (SR) nel quadro dell'Età del Rame della Sicilia orientale*, in Atti della XLI Riunione Scientifica dell'Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, San Cipirello (PA), 16-19 novembre 2006, Firenze 2012, pp. 593-600.
  - PEDLEY H.M., CLARKE M.H., GALEA P. (2002) - *Limestone isles in a crystal sea. The geology of the Maltese Islands*. Publishers Enterprises Group (PEG) Ltd., Malta. ISBN: 99909-0-318-2.
  - PEDLEY H.M. (2011) - *The Calabrian Stage, Pleistocene highstand in Malta: a new marker for unravelling the late Neogene and Quaternary history of the islands*. *Journal of the Geological Society, London*, Vol. 168, 2011, pp. 913-925. doi: 10.1144/0016-76492010-080.
  - RUGGIERI R. & AMORE C. (2000) - *Elementi geostrutturali e paleomorfologici del Sistema Carsico Grotta Monello (Sicilia sud-orientale)*. Atti del I seminario sul Carsismo negli Iblei e nell'area sud Mediterranea. *Speleologia Iblea*, 8: 75-81. ISSN 1123-9875.
  - RUGGIERI R. & ZOCCO M. (2000) - *Il carsismo dell'area Grotta Percita-Chiusazza (Sicilia sud-orientale): morfostrutture e speleogenesi*. Atti del I seminario sul Carsismo negli Iblei e nell'area sud Mediterranea. *Speleologia Iblea*, 8: 169-185.
  - RUGGIERI R., NASTASI C., ZAMMITTI P. (2000) - *Geostrutture e morfologie della Grotta Palombara (Sicilia sud-orientale)*. Atti del I seminario sul Carsismo negli Iblei e nell'area sud Mediterranea. *Speleologia Iblea*, 8: 197-205.
  - Savona-Ventura C. (2007) - *Ghar il-Friefet or The Bats' Cave at Birzebbugia: Geology, Natural History, and Antiquities, Malta 2007*.
  - SKEATES R. (2010) - *An Archaeology of the Senses: Prehistoric Malta*, Oxford.
  - SKEATES, R. (2012) - *Caves in need of context: prehistoric Sardinia*, in *Bergsvik K. A, Skeates. (eds), Caves in Context. The Cultural significance of Caves and Rockshelters in Europe*, Oxford, 166-187.
  - TANASI, D. (2014) - *Lighting up the dark. The role of Ghar Mirdum in Maltese prehistory*, in D. Gulli (ed.), *From Cave to Dolmen. Ritual and symbolic aspects in the prehistory between Sciacca, Sicily and the central Mediterranean*, Oxford, Archaeopress, pp. 287-303.
  - TINÉ S. (1960-61) - *Giacimenti dell'età del rame in Sicilia e le culture tipo 'Conca d'Oro*, in *Bullettino di Paleontologia Italiana*, 13, 133-151.
  - VILLARI P. (1995) - *Le faune della tarda preistoria nella Sicilia Orientale*, Siracusa.



# Il nostro obiettivo è la vostra sicurezza

**Incofil Tech** nasce nel 1985 come azienda all'avanguardia nel settore delle funi in acciaio per applicazioni industriali e forestali.

L'esperienza acquisita ha consentito all'azienda di diversificare negli anni i propri campi di intervento, specializzandosi nei sistemi di **consolidamento dei versanti** e di **protezione contro masse rocciose instabili e valanghe**, ricercando tecnologie sempre più evolute. **Incofil Tech** è specializzata anche nei settori del **sollevamento in campo industriale e forestale** e nell'impiego di prodotti in acciaio inox in **architettura urbana e abitativa**.

Le certificazioni acquisite sono l'impegno che l'azienda prende nei confronti di partner e clienti, ai quali mette a disposizione la propria esperienza.



Forestale



Sollevamento



Natura



Inox



Agricoltura



**incofiltech**  
Soluzioni in acciaio per la vostra sicurezza

Via degli Artigiani, 52-38057 Pergine Valsugana (TN)  
tel +39 0461 534000 - fax +39 0461 533888  
info@incofil.com - www.incofil.com



# Prima ricostruzione dei valori di fondo di arsenico, ferro e manganese nell'acquifero sotterraneo della zona industriale (ex SIR) della piana di Lamezia Terme (CZ)

Ivan Meringolo, Clemente Migliorino, Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Calabria

## Sommario

Nel presente lavoro si propone una prima analisi sulla stima dei Valori di Fondo delle specie arsenico, ferro e manganese rilevati nell'acquifero alluvionale costiero della Zona Industriale (ex SIR) della Piana di Lamezia Terme (CZ) (Fig. 1). Si tratta di sostanze, soprattutto per ferro e manganese, che possono presentare elevati tenori data la loro presenza ubiquitaria nei sedimenti e che, nella specifica area della Piana indagata, appaiono congruenti con una probabile origine naturale.

Lo studio è stato redatto nell'ambito dei lavori di un apposito Tavolo Tecnico istituito dal Dipartimento Ambiente e Territorio della Regione Calabria.

Vengono descritte le elaborazioni statistiche e geostatistiche dei dati ambientali disponibili, finalizzate alla definizione dei Valori di Fondo Naturale (VFN) nell'area di interesse, coerentemente con i criteri stabiliti dal Manuale del Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) n. 08/2018, che costituisce il riferimento tecnico a livello Nazionale sul tema dei valori di fondo.

## Aspetti idrogeologici dell'area

La pianura costiera di Lamezia costituisce un complesso alluvionale legato alla foce del corso d'acqua principale F. Amato. I materiali alluvionali presentano una granulometria molto variabile, dove livelli di deposito fluviale ciottolosi o sabbiosi si alternano a livelli e lenti limo-argillosi. La piana è sede di falde acquifere consistenti, sia pure con valori della trasmissività variabili a seconda della granulometria propria dei singoli acquiferi. Gli spessori dei materiali alluvionali sono da ritenersi elevati e dell'ordine minimo dei 90-100 m, con pelo libero della falda freatica quasi mai più profondo dei 4-5 m dal piano di campagna. Sotto la porzione superficiale, in cui la circolazione idrica

sotterranea avviene in condizioni freatiche, questi acquiferi sono confinati se non artesiani; attribuito questo che sta venendo meno a luoghi, data la persistenza degli attuali criteri di sfruttamento mediante un sempre crescente numero di pozzi (Letto, 1975; Polemio et al., 2013).

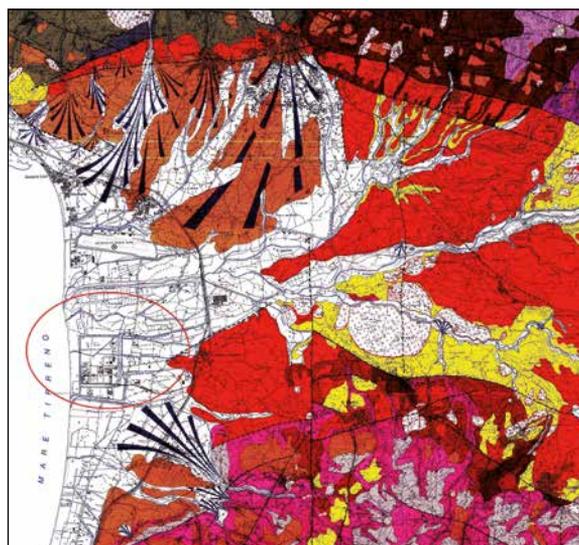


Figura 1 - Stralcio della Carta litologico-strutturale della Stretta di Catanzaro (da Antronico et al., 2001).

## Caratteri idrogeochimici e Modello Concettuale MC

Il presente articolo costituisce il proseguimento del percorso di studio di un primo lavoro sui "valori anomali riscontrati nelle acque di falda della zona industriale di Lamezia Terme" (Documento interno Regione Calabria - Arpacal, Convenzione n. 689/2017, a cura di Cuiuli E., Costabile A. Reillo O., Migliorino C., 2019.), il quale evidenzia come nell'area di studio sia stata riscontrata la presenza di significativi

banchi di torba nonché l'esistenza di condizioni riducenti determinate verosimilmente dalla decomposizione della stessa sostanza organica (torba). Tra l'altro, Studi internazionali (McArthur et al., 2001, 2004; Rowland et al., 2006) e nazionali (Francani et al., 1994; Zavatti et al., 1995, Rotiroti et al. 2012) hanno evidenziato l'importanza delle torbe nei meccanismi di rilascio di arsenico, ferro, manganese ed ammoniaca nelle acque sotterranee. La stima dei Valori di Fondo (VF) ha riguardato elementi redox-sensibili (arsenico, ferro e manganese), pertanto - nell'ambito dell'analisi preliminare dei dati disponibili - si è cercato di distinguere le osservazioni (Stazioni di Campionamento) afferenti alle facies idrochimiche riducenti da quelli afferenti a facies ossidanti. La separazione è stata effettuata sulla base delle misure dell'ossigeno disciolto e dei valori di nitrati ed ammoniaca, quali markers associati a condizioni tipicamente ossidanti e riducenti, oltre che sulla base dei valori dei metalli ferro e manganese (Protocollo BRIDGE, 2006; ARPAT, 2014; Manuale SNPA 08/2018). La distribuzione spaziale e l'analisi preliminare dei dati ha fatto supporre una possibile separazione delle condizioni dell'acquifero in campo riducente (settore della Piana in cui ricade la zona industriale ex SIR, caratterizzata dalla presenza di ferro, manganese ed arsenico in concentrazioni elevate associati all'ammoniaca) ed in campo ossidante (zone più interne della Piana alluvionale con presenza di nitrati e bassi valori di ferro, manganese, arsenico ed ione ammonio). A parità di litofacies ospitante l'acquifero si può passare dallo stato ossigenato allo stato ridotto in funzione di particolari condizioni idrogeologiche. In particolare, condizioni riducenti possono essere associate agli acquiferi confinati e/o profondi, mentre campi ossigenati sono tipici delle condizioni freatiche e/o prossime alle aree di ricarica (ARPAT, 2014; Menichetti, 2012). In tal senso, la variabilità delle condizioni redox osservata sembra essere regolata dall'assetto idrogeologico dell'area: condizioni ossigenate prevalenti sono presenti nelle zone interne della Piana alluvionale, che possono rappresentare le aree di maggiore ricarica dell'acquifero rispetto ai settori di recapito più prossimi al mare (zona Industriale ex SIR).

### Analisi spaziale dei dati

Al fine di completare il quadro conoscitivo circa la distribuzione di ferro, manganese ed arsenico nell'area di interesse, sono state realizzate delle carte di distribuzione usando metodi geostatistici, in modo tale da relazionare tali parametri con i potenziali fattori di controllo naturali (assetto idrogeologico) ed antropici (centri di pericolo all'interno dell'area).

Tutti i dati sono stati elaborati usando gli applicativi: *Rstudio* insieme con la libreria *GSTAT* per le analisi di carattere

geostatistico e *QGIS* per la gestione del dato spaziale. Per il kriging si è proceduto alla determinazione prima del semivariogramma sperimentale e poi alla scelta del modello di variogramma teorico che meglio si adattava ai dati sperimentali. L'Universal Kriging UK (Tab.1) sembra restituire i risultati migliori rispetto agli altri tipi di kriging, per cui tali modelli sono stati scelti come esempi delle mappe di stima dei valori di concentrazione (per l'UK si tiene conto del "trend" dato dalla dipendenza delle variabili con le coordinate  $x$  e  $y$ ). I risultati della procedura di interpolazione sono mostrati nelle figure 2, 3 e 4; nelle mappe delle previsioni sono rappresentate anche le linee di isoconcentrazione (isocone) con passo di 110  $\mu\text{g/l}$  per l'As, 3500  $\mu\text{g/l}$  per il Fe e 800  $\mu\text{g/l}$  per il Mn. Ferro e manganese trovano maggiore diffusione in tutto il settore occidentale della mappa; diversamente la distribuzione di arsenico è circoscritta ad una porzione più limitata di acquifero, corrispondente alla zona nord-occidentale della mappa.

**Tab. 1** – Modelli di interpolazione (Universal Kriging). Le colonne indicano il parametro, il modello di variogramma matematico, il nugget, il range, il partial sill e l'analisi di cross-validation (RMSE = root of the mean squared error, ME = mean error, MSDR = Mean Squared Deviation Ratio).

Parametro	Modello	Nugget	Range (m)	Partial sill	Cross-validation		
					RMSE	ME	MSDR
Arsenico	Sferico	0	1327	3820	43,54	-6,65	0,86
Ferro	Sferico	$7,20 \cdot 10^7$	3335	$3,81 \cdot 10^7$	11773	-351	1,34
Manganese	Sferico	$6,12 \cdot 10^6$	3336	$1,38 \cdot 10^6$	3260	-5,68	1,29

### Analisi statistica dei dati

La stima dei VF è stata condotta secondo i criteri stabiliti dal Manuale SNPA n. 08/2018, tenendo conto dei risultati dei due possibili approcci caso B e D, individuati in funzione della consistenza del dataset:

- **caso (B):** per ognuna delle N SC (numero N delle Stazioni di Campionamento SC) il valore rappresentativo è dato dalla mediana; il VFN del dataset è dato dal valore massimo degli N valori rappresentativi di ciascuna SC nel caso che gli N valori mostrino una distribuzione normale, ovvero dal 95° percentile degli N valori rappresentativi delle SC nel caso che gli N valori mostrino una distribuzione non normale (parametrica o non parametrica);
- **caso (D):** VFN provvisorio definito dal 90° percentile dell'insieme delle osservazioni disponibili  $O_{tot}$  derivate dal monitoraggio delle N SC che costituiscono il dataset (cioè includendo le dimensioni temporale e spaziale e previa valutazione degli outlier).

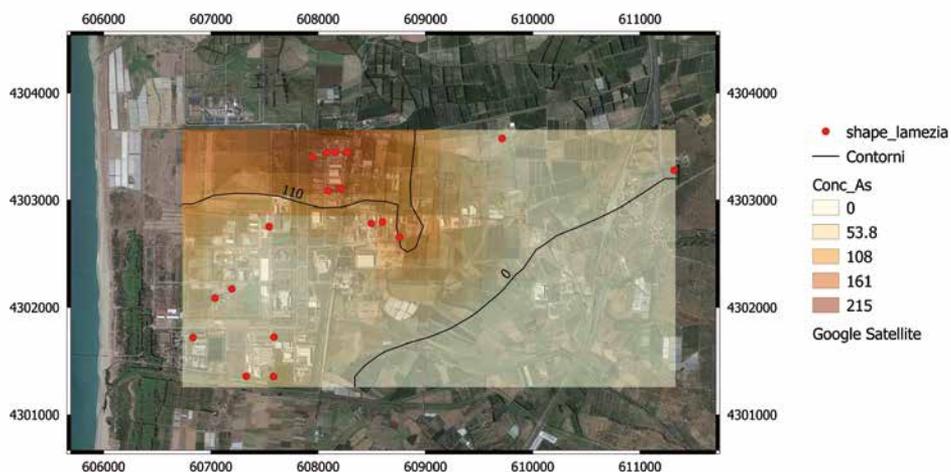


Figura 2 - Stima dei valori di concentrazione di **arsenico** (u.m. µg/l), ottenuta tramite Universal Kriging.

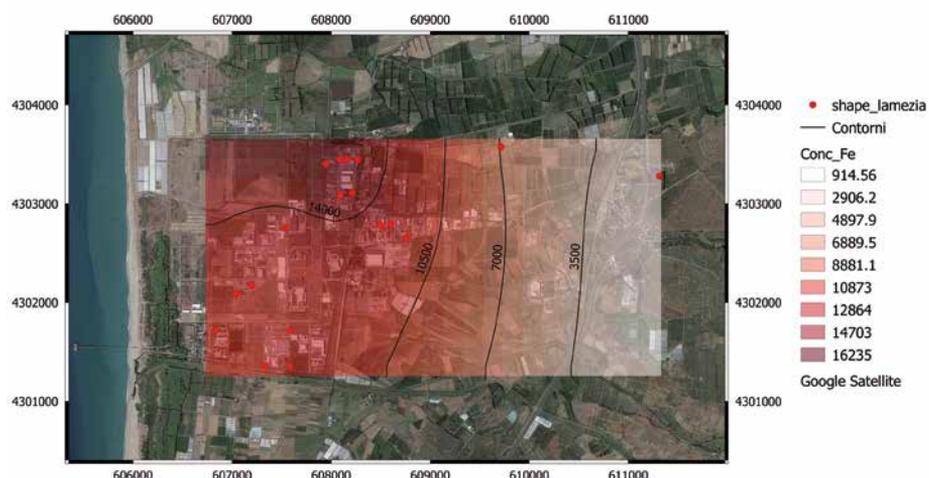


Figura 3 - Stima dei valori di concentrazione di **ferro** (u.m. µg/l), ottenuta tramite Universal Kriging.

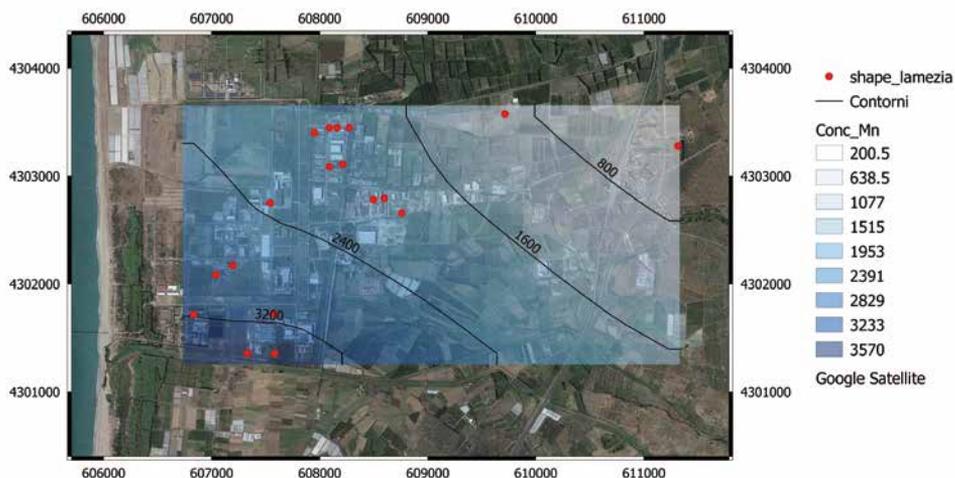


Figura 4 - Stima dei valori di concentrazione di **manganese** (u.m. µg/l), ottenuta tramite Universal Kriging.

In relazione al trattamento dei valori inferiori al limite di rilevabilità (DL), nel set di dati tali valori sono stati sostituiti con il DL stesso.

Per ciò che riguarda l'individuazione degli outlier si è fatto ricorso a: il test di Rosner ( $n^{\circ}$  oss.  $\geq 25$ ) ed il test Dixon ( $n^{\circ}$  oss.  $< 25$ ) utilizzando il software ProUCL; rappresentazione di diagrammi tipo Box-plot e QQ-plot.

Il tipo di distribuzione dei dati normale (N), log-normale (LN), gamma (G) o non parametrica (NP) è stata verificata attraverso il software ProUCL. In particolare ProUCL verifica la distribuzione normale e log-normale attraverso i test di Shapiro Wilk e Lilliefors e la distribuzione gamma attraverso i test di Anderson-Darling e Kolmogrov-Smirnoff. Si è provveduto, infine, allo studio delle distribuzioni mediante l'utilizzo di metodi grafici (QQ plot e istogrammi di frequenza).

Nella tabella Tab. 2 sono riportati i principali indicatori statistici che concorrono alla determinazione dei valori di fondo (il valore massimo, il 95-esimo percentile del campione statistico ed il parametro 95UTL95 riferito alla popolazione "parente" del campione).

**Tab. 2 -** Valori rappresentativi del fondo. Tipo di popolazione: normale (N), log-normale (LN), gamma (G) o non parametrica (NP); u. m. =  $\mu\text{g/l}$

<b>Arsenico</b>	Distrib.	max	90%ile	95%ile	UTL
Caso B	N	225,5	194,3	206,6	302,6
Caso D	NP	280	210,4	230,3	260

<b>Ferro</b>	Distrib.	max	90%ile	95%ile	UTL
Caso B	N	34505	25417	28422	38937
Caso D	N (a 1%)	50850	30036	34368	35727 (N)

<b>Mang.</b>	Distrib.	max	90%ile	95%ile	UTL
Caso B	Param. (N, G, LN)	6384	4788	5500	6926 (N)
Caso D	NP	11570	6214	9450	10415

Ulteriori considerazioni in merito ai VF sono deducibili dall'analisi delle distribuzioni di frequenza cumulata (Fig. 5); l'assunto di base è che tali rappresentazioni dei dati evidenzino delle discontinuità, dei "gap" o delle "forme" ognuna delle quali può essere considerata rappresentativa di un dato "dominio". La stima dei VF con metodi grafici è suggerita dal Manuale SNPA nei casi in cui la distribuzione non è riconducibile ad una distribuzione normale.

Infine, è stato implementato il metodo della Separazione delle Componenti (Regione Emilia - Romagna, 2015); questo metodo è basato sull'idea che la concentrazione di una specie chimica presente nelle acque sotterranee sia dovuta alla combinazione di componenti di origine naturale ed antropica (laddove quest'ultima esista).

Il metodo si propone di separare il contributo naturale da quello antropogenico attraverso una analisi statistica del campione delle concentrazioni rilevate. Secondo l'approccio viene ricostruita la distribuzione di frequenza dei valori di concentrazione successivamente interpretati mediante una miscela di distribuzioni di frequenza:

$$f_{oss}(c) = f_{nat}(c) + f_{inf}(c)$$

dove  $c$  indica la concentrazione della specie in esame,  $f_{oss}(c)$  sono le frequenze osservate e  $f_{nat}(c)$  e  $f_{inf}(c)$  sono le distribuzioni di frequenza associate rispettivamente alla componente naturale ed antropica. La funzione di distribuzione che meglio si adatta alle concentrazioni naturali è rappresentata da una distribuzione Log-Normale mentre quella che descrive le concentrazioni antropiche è la distribuzione Normale.

$$f_{oss}(c) = k \cdot \left\{ \frac{A}{\sigma_{nat} \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{c} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma_{nat}^2}(\ln c - \ln \mu_{nat})^2} + \frac{(1-A)}{\sigma_{inf} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma_{inf}^2}(c - \mu_{inf})^2} \right\}$$

I parametri di tali distribuzioni vengono calibrati imponendo un opportuno criterio di ottimizzazione. Individuato il valore dei parametri che fornisce il miglior adattamento, secondo il criterio di ottimizzazione scelto, il valore di concentrazione corrispondente al fondo naturale è ottenuto considerando il 90° percentile della componente Log-Normale che rappresenta il solo effetto naturale, depurato dal fattore antropogenico. Il modello della separazione delle componenti è stato implementato con l'ausilio del programma libero Calc della suite LibreOffice, per cui la procedura di calibrazione è stata effettuata in maniera iterativa per successivi tentativi, fino al miglior adattamento tra la distribuzione  $f_{som}$  ( $f_{nat} + f_{inf}$ ) ed i valori di frequenza osservati  $f_{oss}$  (Fig. 5).

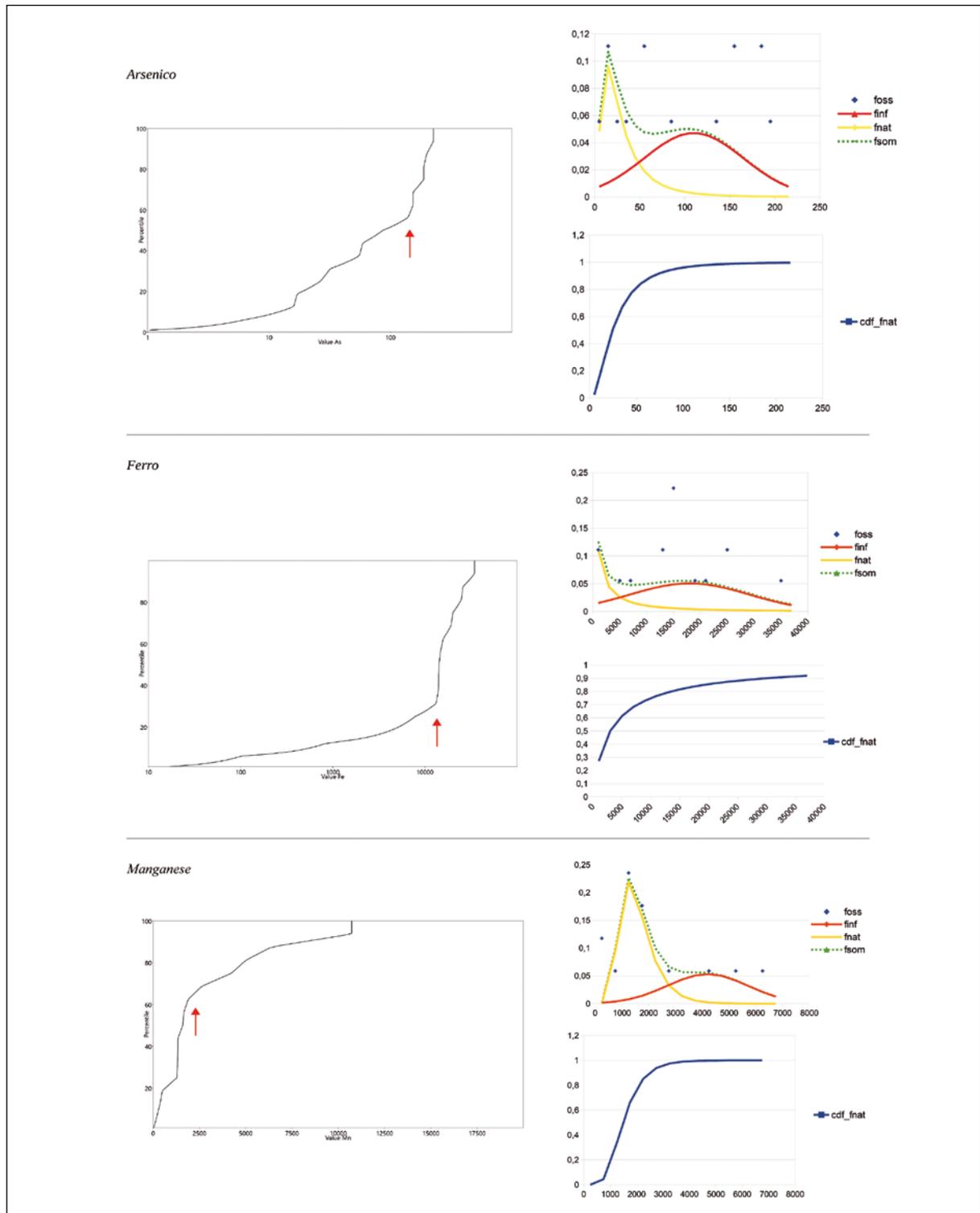


Figura 5 - Curve di frequenza cumulata (a sinistra) e distribuzioni valutate secondo la metodologia della Separazione delle Componenti (a destra).

### Discussione dei risultati e conclusioni

I descrittori statistici del Fondo determinati secondo l'approccio del Manuale SNPA sono stati raffrontati con i valori di fondo individuati con i metodi grafici e con il metodo della separazione delle componenti.

In funzione del metodo utilizzato, i valori delle concentrazioni rappresentative del fondo coprono un range abbastanza elevato (Tab. 3).

Tab. 3 - stime dei valori di fondo in funzione del metodo utilizzato

(µg/l)	Manuale SNPA		Metodo grafico	Sep. delle comp.	Range VF
	Caso B	Caso D			
As	225,5	210,4	≈ 150	≈ 70	≈ 70 - 210
Fe	34.505	30.036	≈ 15.000	≈ 30.000	≈ 15.000 - 30.000
Mn	6384	6214	≈ 2500	≈ 2.500	≈ 2.500 - 6200

In attesa di un approfondimento del Modello Concettuale (MC) che potrà ulteriormente affinare le conoscenze sul sistema in esame - tenuto conto del primo lavoro sui "valori anomali riscontrati nelle acque di falda della zona industriale di Lamezia Terme" sopra richiamato, in base al quale è ritenuta congruente la presenza degli stessi valori anomali con le caratteristiche idrogeologiche ed idrogeochimiche naturali del corpo idrico analizzato - si propongono i seguenti **Valori di Fondo**, stimati su base statistica (Tab. 4):

Tab. 4 - VF proposti (limite superiore del range delle stime)

Sostanze (µg/l)	Limite superiore del Range VF
<b>Arsenico</b>	210
<b>Ferro</b>	30.000
<b>Manganese</b>	6.200

Sulla base di tutte le valutazioni effettuate e degli elementi raccolti, i valori anomali di arsenico, ferro, manganese e ammoniaca riscontrati sono apparsi congruenti con le caratteristiche idrogeochimiche naturali dell'acquifero studiato.

Dall'altra parte, dato il particolare contesto in esame di tipo prevalentemente industriale, si deve considerare l'opportunità di approfondire il quadro conoscitivo del sistema in questione. La presenza diffusa nell'acquifero superficiale dell'area ex SIR delle specie chimiche arsenico, ferro, manganese e ione ammonio potrebbe derivare, infatti, dalla sommatoria di processi naturali (ambienti riducenti) e di quelli antropici legati a sorgenti diffuse, ossia sorgenti antropiche per le quali non sia possibile discriminare il

contributo delle singole fonti alla contaminazione riscontrata (esse includono sorgenti mobili es. traffico veicolare, sorgenti arealmente diffuse sul territorio es. attività agricola, sorgenti plurime anche puntuali es. centri urbani, emissioni di poli industriali). La distinzione tra componenti naturali ed antropiche diffuse non è sempre facile o possibile e si basa principalmente sul MC del sito.

Fatti salvi eventuali riconoscimenti di sorgenti puntuali, si evidenzia, quindi, l'opportunità di approfondire il quadro conoscitivo del sito, elaborando un robusto modello concettuale che possa attribuire la presenza dei valori anomali di arsenico, ferro, manganese ed ammoniaca alla sola componente naturale, ovvero alla combinazione di processi naturali (ambienti riducenti) ed antropici (legati magari a sorgenti diffuse).

### Bibliografia

- ANTRONICO L., SORRISO - VALVO M., TANSI C., GULLÀ G. (2001). Carta litologico-strutturale e dei movimenti in massa della stretta di Catanzaro (scala 1:50000). Consiglio Nazionale delle Ricerche - Gruppo nazionale per la difesa dalle catastrofi idrogeologiche, linea 2 - previsione e prevenzione di eventi franosi a grande rischio, unità operativa 2.56 (pubblicazione n. 2119), s.e.l.ca. - Firenze.
- ARPACAL (2017 - 2018 - 2019). Laboratorio chimico del Dipartimento provinciale Arpacal di Catanzaro - rapporti di prova analitici.
- ARPAT (2014). Definizione dei Valori di Fondo per alcuni parametri nelle acque sotterranee dei siti in bonifica della pianura di Scarlino, Grosseto (2003 - 2012).
- BRIDGE BACKGROUND CRITERIA FOR THE IDENTIFICATION OF GROUNDWATER THRESHOLDS (2006). "Final Proposal for a methodology to set up groundwater threshold value in Europe".
- CUIULI E., COSTABILE A. REILLO O., MIGLIORINO C., 2019. *Studio dei valori anomali di concentrazione degli inquinanti riscontrati nelle acque di falda della zona industriale di Lamezia Terme*. Documento interno Regione Calabria - Arpacal. Convenzione n. 689/2017.
- DLGS 152/06 E S.M.I.
- DM 05/02/98 E S.M.I.
- FRANCANI V., BERETTA G. P., BAREGGI A., NOBILE A., CREMONINI BIANCHI M., CATTANEO F., 1994. *Aspetti idrogeologici del problema della presenza di azoto ammoniacale nelle acque sotterranee della provincia di Cremona*. Pitagora Editrice, Bologna.
- GUASTALDI E., 2007. *Geostatistica ambientale*. Dispense Centro di GeoTecnologie Università degli Studi di Siena.
- HAMMER, Ø., HARPER, D.A.T., RYAN, P.D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontology Electronica* 4(1): 9pp. [http://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm).
- IETTO A. (1975). *Geologia e pianificazione territoriale e urbana in Calabria*. Mem. Soc. Geol. It., 14, 421-490.
- ISPRA (2009). Protocollo per la Definizione dei Valori di Fondo per le Sostanze Inorganiche nelle Acque Sotterranee.
- LAWA PROJECT - WORKING GROUP OF THE FEDERAL STATES ON WATER PROBLEMS (2002 - 2004). R. Kunkel, H.-J. Voigt, F. Wendland, S. Hannappel, Die natürliche, ubiquitär überprägte Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland.
- MAURIZIO POLEMIO, VITTORIA DRAGONE, ANDREA ROMANAZZI 2013. *La risorsa idrica Sfruttamento, depauperamento dei serbatoi sotterranei e utilizzo razionale nel caso della Calabria*. Rendiconti Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL L'acqua in Calabria: risorsa o problema? - ISBN 978-88-548-6138-1; DOI

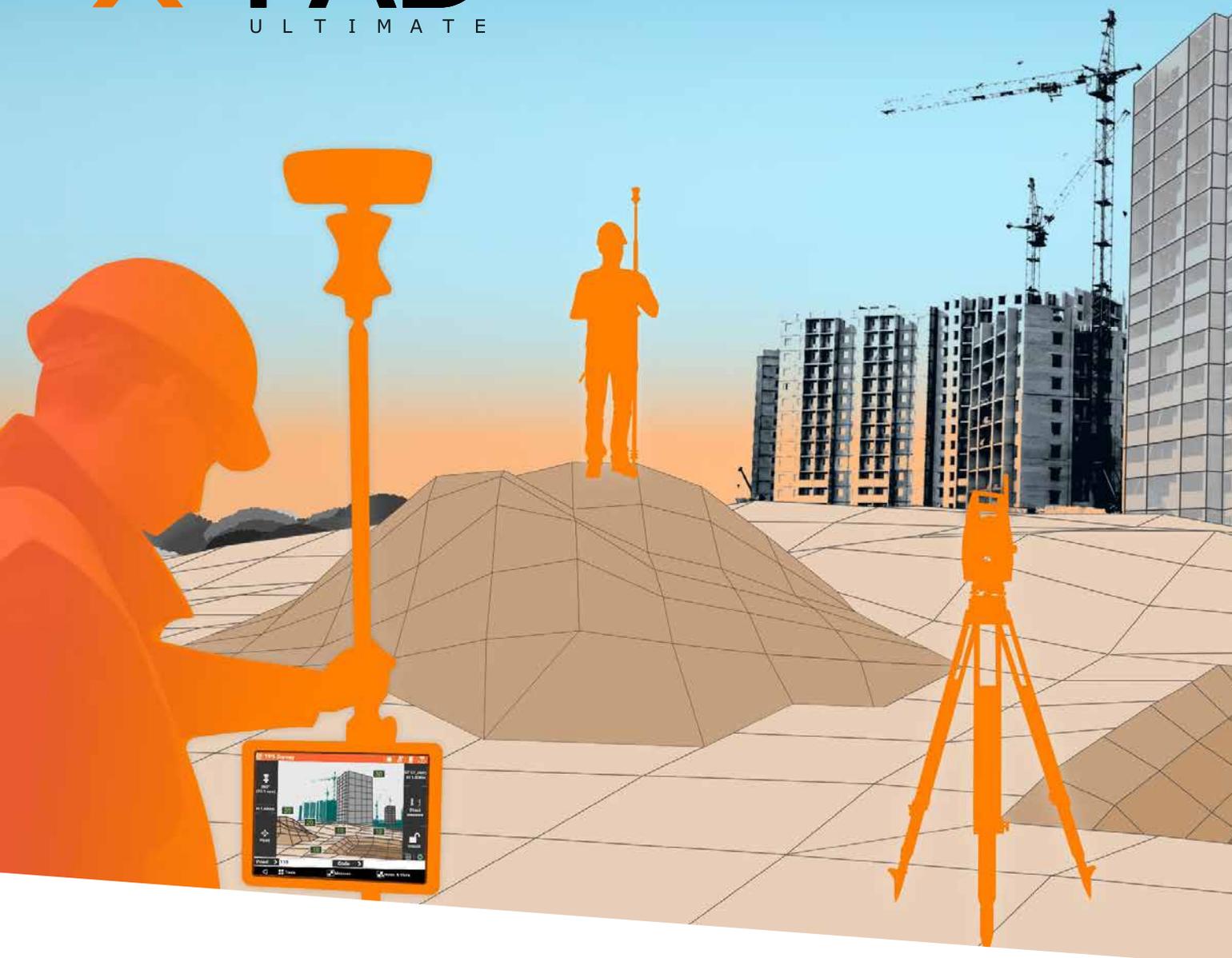
- 10.4399/97888548613811; pag. 11–29.
- MCARTHUR J. M., RAVENSCROFT P., SAFIULLA S., THIRLWALL M. F., 2001. *Arsenic in groundwater: Testing pollution mechanisms for sedimentary aquifers in Bangladesh*. *Water Resources Research* 37 (1), 109-117.
  - MCARTHUR J. M., BANERJEE D. M., HUDSONEDWARDS K. A., MISHRA R., PUROHIT R., RAVENSCROFT P., CRONIN A., HOWARTH R. J., CHATTERJEE A., TALUKDER T., LOWRY D., HOUGHTON S., CHADHA D. K., 2004. *Natural organic matter in Rotiroti M., Bonomi T., Fumagalli L., Azzoni A., Pisoni B., Demicheli G. / EngHydroEnv Geology 15 (2012) 117-128 128 sedimentary basins and its relation to arsenic in anoxic groundwater: the example of West Bengal and its worldwide implications*. *Applied Geochemistry* 19, 1255-1293.
  - MENICHELLI S. (2012). *Esperienze della Toscana sui valori di fondo naturale* - *Ecoscienza* Numero 6, Anno 2012.
  - PROVINCIA DI MILANO (2003): "Linee guida per la determinazione dei valori di fondo naturale nell'ambito della bonifica dei siti contaminati".
  - REGIONE EMILIA-ROMAGNA, 2015A. Delibera di Giunta n. 1781, "Aggiornamento del quadro conoscitivo di riferimento (carichi inquinanti, bilanci idrici e stato delle acque) ai fini del riesame dei Piani di Gestione Distrettuali 2015-2021"; All. 3 - Concentrazioni anomale di sostanze pericolose per discriminare la componente naturale da quella antropica nei corpi idrici sotterranei di pianura. A cura di Marcaccio M., Guadagnini A., Molinari A., Guadagnini L.
  - ROTIROTI M., BONOMI T., FUMAGALLI L., AZZONI A., PISONI B., DEMICHELLI G. (2012A). *Approccio metodologico nell'analisi di fenomeni di contaminazione da Arsenico, Ferro e Manganese nelle falde superficiali, il caso del territorio di Cremona "A method to analyse arsenic, iron and manganese groundwater contamination, the Cremona area case"*. *Engineering Hydro Environmental Geology* 15: 117-128.
  - ROWLAND H. A. L., POLYA D. A., LLOYD J. R., PANCOST R. D., 2006. *Characterisation of organic matter in a shallow, reducing, arsenic-rich aquifer, West Bengal*. *Organic Geochemistry* 37, 1101-1114.
  - SISTEMA NAZIONALE PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE SNPA (2018). *Linea guida per la determinazione dei valori di fondo per i suoli e per le acque sotterranee* n. 08/2018.
  - US EPA 2013: *ProUCL Version 5.0.00 technical Guide*. Statistical Software for Environmental Applications for Data Sets with and without Nondetect Observations.
  - ZAVATTI A., ATRAMINI D., BONAZZI A., BORALDI V., MALAGÒ R., MARTINELLI G., NALDI S., PATRIZI G., PEZZERA G., VANDINI W., VENTURINI L., ZUPPI G. M., 1995. *La presenza di Arsenico nelle acque sotterranee della Pianura Padana: evidenze ambientali e ipotesi geochimiche*. *Quaderni di Geologia Applicata*, suppl. n. 2, 301- 325.

---

### Applicativi

---

- QGIS (<http://www.qgis.org/>).
- R (<https://cran.r-project.org>).
- Rstudio (<https://www.rstudio.com/products/Rstudio/>) libreria GSTAT (Pebesma, 2004)
- ProUCL 5.0 realizzato da US EPA (US EPA 2013: ProUCL Version 5.0.00 technical Guide. Statistical Software for Environmental Applications for Data Sets with and without Nondetect Observations).
- PAST: pacchetto statistico free: <http://folk.uio.no/ohammer/past/>.
- Calc della suite LibreOffice (<https://it.libreoffice.org/>).



## X-PAD Ultimate

### Tutto in un unico software

X-PAD Ultimate è un software modulare, facile da usare per lavori topografici e del cantiere, come rilievi, tracciamenti, catasto, controlli BIM, strade, mappe, batimetria e GIS.

Il software è disponibile sulla piattaforma Android e porta le migliori tecnologie direttamente in campo nella tua mano: una completa visualizzazione 3D ed un sistema CAD per visualizzare e modificare i disegni,

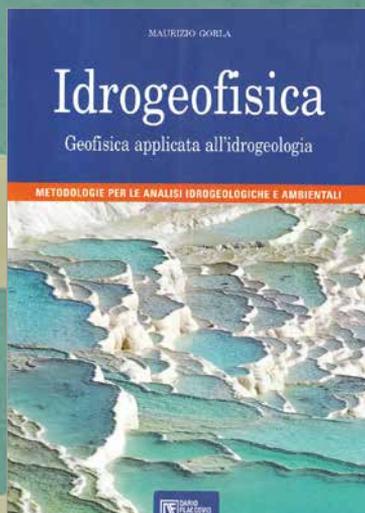
integrazione dei tuoi dati con tutte le tipologie di mappe, supporti per la realtà aumentata e molto altro. XPad Ultimate ti assicura la produttività e ti permette di avere una perfetta integrazione con tutti gli strumenti.

Disponibile in due versioni, una dedicata a chi lavora nel campo della topografia ed una dedicata alle imprese di costruzioni, offrendo ad entrambi delle caratteristiche dedicate.



**geomax-positioning.it**

©2018 Hexagon AB and/or its subsidiaries and affiliates. All rights reserved.



**Autore:** Maurizio Gorla

**Editore:** Dario Flaccovio Editore

**Pagine:** 560

**Anno:** 2009

# Idrogeofisica.

## Geofisica applicata all'idrogeologia

### Metodologie per le analisi idrogeologiche ambientali

L'esperto collega Maurizio Gorla in questo interessante libro ci propone un manuale che fornisce un'ampia e dettagliata disamina delle metodologie geofisiche che possono essere utilizzate nelle applicazioni professionali in campo idrogeologico.

In base alla sua grande esperienza illustra le metodologie geofisiche da quelle semplici a quelle più complesse, rilevando come in campo idrogeologico si possa ottenere la massima efficacia nella loro interpretazione se integrata con le conoscenze specifiche della geologia. Il testo è suddiviso in cinque capitoli: partendo da indicazioni generali sulle proprietà petrofisiche dei litotipi e sulle metodologie geofisiche di superficie e in foro, passa ad occuparsi di mappature della vulnerabilità e del grado di inquinamento. L'ultimo capitolo è un notevole compendio di esempi di caratterizzazione geofisica dei sistemi idrogeologici. Il libro è un potente strumento di conoscenza e riferimento delle metodologie geofisiche per affrontare e risolvere problematiche nell'idrogeologia applicata.

Un testo che tutti i professionisti geologi dovrebbero consultare.

**“IL MEZZO GIUSTO  
PER RAGGIUNGERE  
L’OBIETTIVO”**



# DRIVE FORWARD



RIPARTIAMO DALL'ITALIA,  
RIPARTIAMO DAI PRODOTTI ITALIANI.  
SCEGLI NUOVO ALFA ROMEO **STELVIO**.

CON **NOLEGGIO CHIARQ** NUOVO ALFA ROMEO STELVIO SUPER È TUO DA **349€**  
AL MESE, CON CERCHI IN LEGA DA 19", APPLE CARPLAY E ANDROID AUTO, RCA,  
FURTO, INCENDIO, COPERTURA DANNI E MANUTENZIONE INCLUSI NEL CANONE.

**Offerta valida fino al 31 agosto 2020, anticipo 9.900€ iva inclusa.** Alfa Romeo Stelvio, allestimento Super 2.2 Turbo Diesel 160cv AT8 RWD con cerchi in lega da 19". L'offerta include: 36 mesi e 60.000 Km. Il conduttore a scadenza del contratto, avrà diritto di prelazione per l'acquisto del veicolo a 29.445€. Servizi: copertura RCA con penale risarcitoria, tassa di proprietà, assistenza stradale, servizio di manutenzione ordinaria e straordinaria; servizio copertura incendio e furto con penale risarcitoria; servizio riparazione danni con penale risarcitoria, servizio di infomobilità I-Care; utilizzo di una APP gratuita per la gestione dei servizi. Tutti gli importi si intendono iva inclusa. Offerta soggetta a disponibilità dei veicoli, all'approvazione di **LEASYS** ed a variazione listini. Le immagini riportate sono indicative e non corrispondono necessariamente alla versione indicata nell'offerta di noleggio. **Consumi carburante ciclo misto gamma Stelvio: 5,2 - 9,8 (l/100km). Emissioni CO<sub>2</sub>: 138 - 222 (g/km). Valori omologati in base al metodo di misurazione/correlazione nel ciclo NEDC, aggiornati alla data del 31/05/2020. I valori sono indicati a fini comparativi.**

**LEASYS**

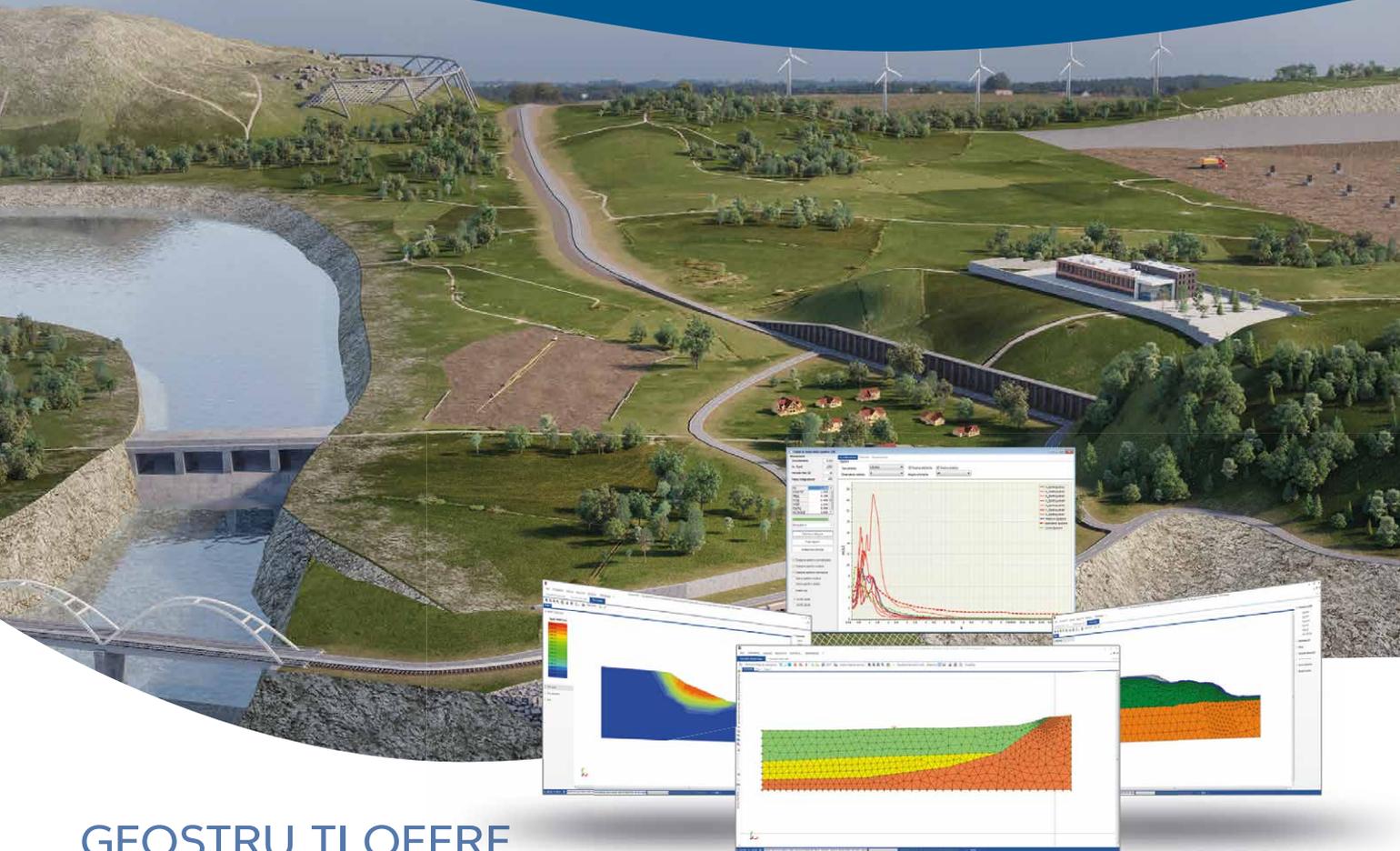
*La meccanica delle emozioni*



# GEOSTRU IL PARTNER GIUSTO PER LA TUA PROFESSIONE

Produciamo software di successo a livello mondiale.

Leggi la nostra storia su: [geostru.eu/it/storiageostru](http://geostru.eu/it/storiageostru)



## GEOSTRU TI OFFRE I SOFTWARE PIÙ POTENTI ED AFFIDABILI PER LA TUA PROFESSIONE.

Produciamo software di successo a livello mondiale per numerosi settori professionali. I nostri software sono caratterizzati da un costo molto competitivo e da una qualità garantita da oltre 36.000 installazioni in più di 135 paesi nel mondo. I prodotti GEOSTRU sono caratterizzati da un'estrema facilità d'uso: ogni software risolve uno specifico problema, riducendo i dati di input a quelli strettamente necessari. Inoltre tutti i software sono integrati fra loro con la possibilità di esportare dati da/e per ogni applicazione della suite anche in formato AGS4.

Tutti i prodotti sono pienamente compatibili con Normativa Italiana (NTC) e gli Eurocodici.

**Un partner IT che risponde  
ad ogni tua esigenza professionale.**



Per i lettori  
in esclusiva un  
codice di sconto!

Leggi il QR code

### RSL 2D

Risposta Sismica Locale 2D + GFAS  
(Geotechnical and F.E.M.  
Analysis System)

### SOFTWARE

Ingegneria - Geologia e Geotecnica - Meccanica delle rocce - Prove in situ - Idrologia e Idraulica  
Topografia - Energia - Geofisica - Ufficio

### SERVIZI GRATUITI PER I NOSTRI CLIENTI

alla pagina: [geoapp.geostru.eu](http://geoapp.geostru.eu)

Corsi certificati in collaborazione con GoMeeting.

Visita il sito [www.gomeeting.eu](http://www.gomeeting.eu)

### NUOVI SOFTWARE E SERVIZI

- Nuove versioni Geostru 2021
- Risposta sismica locale 2D
- GFAS (Geotechnical and F.E.M. Analysis System)
- GeoDropbox
- GeoApp 2021 (<https://geoapp.geostru.eu>)
- GeoStru 365

Software, risorse,  
info, servizi e offerte  
sul nostro sito:  
[www.geostru.eu/it](http://www.geostru.eu/it)

