

MONOGRAFIE DI GEOLOGIA AMBIENTALE

Geologia Ambientale in Piemonte e Valle d'Aosta

A cura di

Annalisa Bove, Luciano Masciocco, Paolo Sassone



Edizioni SIGEA

**“Investiamo con costanza
nello sviluppo di tecnologie
affidabili, innovative,
interoperabili e aperte
utili alla tutela del territorio
e alla salvaguardia
della popolazione.”**



*CAE S.p.A. propone un approccio multirischio
nella progettazione, realizzazione e manutenzione di
sistemi e tecnologie
per il monitoraggio e l'allertamento ambientale.*

CAE
innovation for a safer world.

SIGEA • Monografie di Geologia Ambientale

Monografie di Geologia Ambientale



Geologia Ambientale in Piemonte e Valle d'Aosta

A cura di

Annalisa Bove, Luciano Masciocco, Paolo Sassone



Edizioni SIGEA

MONOGRAFIE DI GEOLOGIA AMBIENTALE

Comitato scientifico

Stefano Albanese, Valeria Ancona, Anna Barra Caracciolo, Eleonora Beccaloni, Vincenzo Belgiorno, Piero Bellotti, Mario Bentivenga, Giovanni Beretta, Aldino Bondesan, Francesca Bozzano, Alessandro Bratti, Giovanni Bruno, Vito Bruno, Nicola Casagli, Sergio Castenetto, Rachele Castro, Giorgio Cesari, Vera Corbelli, Erasmo D'Angelis, Donatella De Rita, Rosa Maria Di Maggio, Massimiliano Fazzini, Dolores Fidelibus, Fabio Garbin, Francesco De Pascale, Giuseppe Gisotti, Fabrizio Gizzi, Maurizio Guerra, Massimiliano Lega, Fabio Luino, Sergio Madonna, Carlo Manzo, Luciano Masciocco, Davide Mastroianni, Giuseppe Mastronuzzi, Federica Paglietti, Mario Parise, Fabio Pascarella, Cinzia Pasquale, Laura Passatore, Raffaele Persico, Marco Petitta, Marco Petrangeli Papini, Gianluca Pirani, Francesco Pirozzi, Sabina Porfido, Enzo Pranzini, Elisabetta Preziosi, Antonio Rusconi, Fabio Sabetta, Gabriele Scarascia Mugnozza, Andrea Sconocchia, Paolo Sconocchia, Gianluca Selicato, Silvia Serranti, Rajanandrea Sethi, Andrea Sonnino, Giuseppe Spilotro, Fabio Trincardi, Maria Cristina Tullio, Vito Felice Uricchio, Giuseppe Vadalà, Gianluca Valensise, Igor Villani, Patrizio Zucca

Comitato editoriale

Silvano Agostini, Gigliola Alessandrini, Daniele Baldi, Andro Barabesi, Francesco Cancellieri, Lella Checchi, Eugenio Di Loreto, Maria Di Nezza, Daria Durante, Ilaria Falconi, Cesare Ferone, Adele Garzarella, Enrico Gennari, Giammarco Guidetti, Alessio Iacobini, Gianluca Lattanzi, Michele Macaluso, Carlo Malgarotto, Endro Martini, Fabio Oliva, Michele Orifici, Gaetano Osso, Vincent Ottaviani, Guido Pagliaga, Silvia Paparella, Aldo Papotto, Edoardo Robortella Stacul, Orietta Sala, Gaetano Sammartino, Paolo Sassone, Stefano Sorvino, Nino Tarantino, Salvatore Valletta, Pietro Zangheri

Direttore scientifico

Vito Felice Uricchio

Direttore editoriale

Antonello Fiore

Progetto grafico e impaginazione

Pino Zarbo - Fralerighe Book Farm

www.fralerighe.it

ISBN 979-12-80811-01-1

© copyright 2022 Edizioni SIGEA

E-mail: monografie@sigeaweb.it

Sito web: www.sigeaweb.it

Finito di stampare nel mese di settembre 2022 dalla Industria grafica Sagraf Srl, Capurso (BA)

Il presente volume è stato realizzato con fondi del progetto "Percorsi sostenibili" - Università di Torino - bando 2019 per il finanziamento di progetti di Public Engagement e con fondi del progetto "Studio preliminare alla realizzazione di sbarramenti nella zona a monte di Ormea per la mitigazione del rischio geo-idrologico nell'Alta Val Tanaro", finanziato dalla Fondazione Cassa di Risparmio di Cuneo con bando della Sessione Erogativa Generale 2021.

Tutti i diritti sono riservati a norma di legge e a norma delle convenzioni internazionali.

Indice

<i>Prefazione</i>	
ALESSANDRO PAVESE	9
<i>Introduzione</i>	
ANNALISA BOVE, LUCIANO MASCIOCO, PAOLO SASSONE	10
Caratterizzazione del materiale di copertura di una discarica di rifiuti solidi urbani dismessa mediante indagini geoelettriche e prove di permeabilità	
DIEGO BARBERO, ALESSANDRO ARATO, MARCO BACENETTI, MARIO NALDI	11
Le attività della struttura “Monitoraggio e Studi Geologici” di Arpa Piemonte	
SECONDO BARBERO, LUCA PARO, ILARIA PRINZI, DAVIDE TIRANTI	17
Il Parco del Marguareis: un laboratorio naturale per la didattica e la ricerca in un’area ad elevata geodiversità	
CARLO BERTOK, ANNA D’ATRI, LUCA BARALE, LUCA MARTIRE, FABRIZIO PIANA	25
“Percorsi sostenibili” - Percorsi di ricerca e di didattica dell’Università di Torino su ambiente idrico e salute umana, in accordo con gli obiettivi ONU di sviluppo sostenibile	
FRANCESCA BONA, STEFANO DE BERNARDI, ALBERTO DORETTO, ELISA FALASCO, STEFANO FENOGLIO, VALERIA FOSSA, FRANCO GIANOTTI, ANNALISA GIANSETTO, MARCO GIARDINO, MASSIMO GRISOLI, LAURA GUGLIELMONE, MANUELA LASAGNA, ANNAPAOLA MARINIELLO, LUCIANO MASCIOCO, VITO MICCOLIS, MAURICE MINGOZZI LOIČ, LUCA MORINO, MAURO PALOMBA, GIORGIA PARMEGGIANI, LUIGI PEROTTI, MARIA CONSOLATA SINISCALCO, DIEGO TARGHETTA DUR, CRISTINA VARESE, ANDREA VICO	33
Approccio multidisciplinare per lo studio di frane di grandi dimensioni: il caso della frana di Quincinetto (TO)	
MAURO BONASERA, GIANDOMENICO FUBELLI, GIUSEPPE MANDRONE, DAMIANO VACHA	38
Proposta per la mitigazione del rischio geo-idrologico nell’Alta Val Tanaro (provincia di Cuneo - Italia nord-occidentale)	
MAURO BONASERA, ANNALISA BOVE, ANNA MARIA FERRERO, GIANDOMENICO FUBELLI, MICHELE LICATA, LUCIANO MASCIOCO, BATTISTA TABONI, GESSICA UMILI	45

Metodi geofisici per la riduzione del rischio geologico nelle cave di gesso del Monferrato SABRINA BONETTO, CHIARA CASELLE, CESARE COMINA	56
Pericolosità idrologica dell'alto bacino del Torrente Bobore (Provincia di Cuneo – Italia nordoccidentale) ANNALISA BOVE, LUCIANO MASCIOTTO.....	62
TOMAPS: Un progetto per la mappatura da satellite dell'inquinamento atmosferico in Piemonte ADELE CAMPUS, MARCO LAIOLO, FIORELLA ACQUAOTTA, DIEGO COPPOLA.....	76
Considerazioni preliminari sul fondo naturale dei metalli nei suoli in Valle d'Aosta PIETRO CAPODAGLIO, FULVIO SIMONETTO	82
Analisi degli elementi di pericolosità nel bacino idrografico del Rio Maggiore di Castiglione Torinese (TO) NICOLÒ CAPURSO, MAURO BONASERA, GIANDOMENICO FUBELLI	86
Lo stoccaggio di energia termica nel sottosuolo. Un esperimento a scala reale nella pianura torinese JESSICA MARIA CHICCO, CESARE COMINA, GIUSEPPE MANDRONE.....	94
Monitoraggio sismico passivo di ammassi rocciosi potenzialmente instabili: casi di studio nel territorio piemontese CHIARA COLOMBERO, CESARE COMINA, ALBERTO GODIO, SERGIO CARMELO VINCIGUERRA	101
Le miniere di Traversella, un sito di interesse per la storia mineraria del Piemonte EMANUELE COSTA, SABRINA BONETTO, GIOVANNA ANTONELLA DINO, ARIANNA PASCHETTO, PIERA BENNA.....	106
Le attività di educazione ambientale dell'ARPA Valle d'Aosta SARA FAVRE	115
Alcuni problemi aperti sull'analisi del rischio di caduta massi: il caso di Rovenaud (AO) ANNA MARIA FERRERO, MARIA RITA MIGLIAZZA, GESSICA UMILI	118
Il Verde Cesana: una storica pietra ornamentale delle Alpi Occidentali FRANCESCA GAMBINO, ALBERTO AGOSTONI, LUCA BARALE, SABRINA BONETTO, ALESSANDRO BORGHI, ALBERTO CORNO, PIETRO MOSCA.....	124
Il Campo Geo-sperimentale dell'Orto Botanico di Torino LUCIANO MASCIOTTO	129
Studio degli aspetti del microclima di grotta fondamentali nella qualità ambientale del S.I.C. Borna Maggiore di Pignetto (Valli di Lanzo, Piemonte) MICHELE MOTTA, LUIGI MOTTA	135
Pericolosità geo-idrologica del T. Malone (provincia di Torino – Italia nordoccidentale) MARIKA NOVELLO, ANNALISA BOVE, LUCIANO MASCIOTTO	142
Studio geologico-petrografico delle pietre ornamentali della città di Ivrea (Piemonte) e loro valorizzazione in ambito culturale e divulgativo GIORGIA PARMEGGIANI, ELENA STORTA, ALESSANDRO BORGHI, LUIGI PEROTTI, ANNA D'ATRI, MAURO PALOMBA, ANGELA DEODATO	151
Cattura e stoccaggio del diossido di carbonio: casi studio in Piemonte LINDA PASTERO, ENRICO DESTEFANIS, CATERINA CAVIGLIA, DAVIDE BERNASCONI, ALESSANDRO PAVESE	158

Cambiamenti climatici e innesco di megafrane in area appenninica mediterranea. Il caso della grande frana di Gavi del 1° dicembre 2019 PAOLO SASSONE	162
Gli invasi di Rocchetta Tanaro e Castell'Alfero (AT) per la mitigazione del rischio geoidrologico MAURIZIO TOJA, LUCA DI MARTINO, LUCA ALCIATI, GIUSEPPE RICCA	170
Imparare a camminare, camminare per imparare: una nuova prospettiva educativa per riconnettersi con l'ambiente MARCO DAVIDE TONON, ANDREA CARETTO, ANDREA GERBAUDO	175
Uno streamer sismo-elettrico innovativo per misure geofisiche in movimento lungo argini fluviali FEDERICO VAGNON, CESARE COMINA, ALESSANDRO ARATO, MARIO NALDI	182
INDICE DEGLI AUTORI	189



Consolidamento di terreni e muri
Posa reti e barriere paramassi



Micropali, tiranti e chiodature
con attrezzature di minimo ingombro



Ponti Tibetani
Passerelle in fune
Vie Ferrate



www.montefuni.com



Prefazione

Il sistema Piemonte – Valle d’Aosta offre una varietà paesaggistica straordinaria, che richiede un’attenzione speciale ai fini di una gestione capace di preservare, valorizzare, tutelare e prevenire. In ciò, le conoscenze e competenze reperibili entro le Scienze della Terra in senso lato, hanno ruolo fondamentale, e andrebbero raccolte in volumi mirati a offrire panoramiche aggiornate, focalizzando l’interesse su declinazioni specifiche. In ciò, la *Geologia Ambientale* esprime un angolo visuale estremamente attuale e di straordinario impatto. Proprio nella sua capacità precipua di leggere il territorio, coglierne le potenzialità sia in negativo sia in positivo e sviluppare costrutti guida per condotte cautelative o azioni d’intervento, la *Geologia Ambientale* è uno dei punti di raccordo tra manifestazioni del nostro Pianeta e sfera antropica, e pone i termini di convivenza tra comunità che abitano un’area ed un’ampia classe di fenomenologie naturali.

L’attenzione e la cura del proprio territorio è un impegno della società che lo abita, non solo alla luce di una convenienza immediata, ma piuttosto nel quadro di una presa di coscienza della necessità d’una sinergia, da svilupparsi nella declinazione della *geo-sostenibilità* e nel contesto di una forte e continuativa interazione tra istituzioni pubbliche e soggetti privati.

Si tratta certo di una sfida quotidiana, complessa ma dal cui esito dipende oggi la possibilità di proiezione futura della nostra società, dei suoi assetti in aree sia urbane sia rurali, della sua integrazione con il territorio, quest’ultimo non già da sfruttare ma da considerare pariteticamente e preservare, in un quadro di scambio reciproco di attenzioni e risorse.

Si tratta di una sfida culturale, che ritengo trovi esplicitazione a diversi livelli. Un livello di *conoscenza*, intesa nella capacità di leggere la natura, comprenderne i fenomeni e saperne gestire in positivo quanto essi comportino. In tali termini, l’*interdisciplinarietà* e la *transdisciplinarietà* descrivono bene l’articolato del sapere che è declinato dalla *Geologia Ambientale*, punto di raccordo e sintesi del *ma-*

croscopico con il *microscopico*. Un livello di *percezione*, che impone con forza il paradigma della *geo-sostenibilità*, nelle scelte e pianificazioni di scala, nelle normative al riguardo e in ogni altro aspetto che regolamenti la condotta in relazione al territorio. Un livello di *pragmatismo*, che aiuti nel raccordo tra la sfera normativa e quella sostanziale dell’esistente, nei tempi e modi governati dalla fattibilità, sempre con lo sguardo alle comunità che vivono il territorio, e che amano il territorio.

È in una cornice come tracciato sopra, che scrivo con piacere questa *prefazione* al volume *Geologia Ambientale in Piemonte e Valle d’Aosta*, che soggettivamente leggo non solo come un punto di raccolta per riflessioni e analisi a carattere tecnico e scientifico, ma anche come una dichiarazione di sensibilità verso ed affetto per le nostre bellissime regioni, Piemonte – Val d’Aosta, e per le comunità che le vivono.

Alessandro Pavese

*Direttore del Dipartimento di Scienze della Terra
Università degli Studi di Torino*

Introduzione

Il volume è stato realizzato in vista della prossima costituzione della nuova Sezione interregionale Piemonte – Valle d’Aosta della SIGEA – APS e pertanto è stato opportunamente intitolato *Geologia Ambientale in Piemonte e Valle d’Aosta*.

L’insieme delle due regioni mostra una composizione territoriale tale da potersi presentare come un sistema di paesaggi unici e molto differenziati tra loro, che devono essere preservati e gestiti attraverso la valutazione preventiva degli effetti sull’ambiente. La pianificazione e la gestione del territorio rappresentano quindi aspetti essenziali per il governo del territorio, una materia trasversale delle varie discipline ambientali. In questo contesto si vuole inserire l’apporto della *Geologia Ambientale*, materia che studia la coesistenza tra l’uomo e l’ambiente geologico, sotto due punti di vista. Da un lato, la *Geologia Ambientale* studia i *pericoli* ai quali l’uomo può essere sottoposto a causa di fenomeni geologici, al fine della salvaguardia delle vite umane e delle strutture antropiche. In questo caso i fenomeni geologici vengono studiati in una *prospettiva attiva* nei confronti dell’attività umana e lo studio geo-ambientale porta alla valutazione dei *rischi geologici* (le *sorgenti* di tali rischi in Piemonte e Valle d’Aosta includono principalmente *alluvioni, frane e terremoti*). Dall’altro lato, la *Geologia Ambientale* studia le modalità con le quali l’attività dell’uomo possa svolgersi col minore impatto sulle *risorse geologiche* che fanno parte della biosfera (*aria, suolo, acque sotterranee*). L’ambiente geologico, rappresentato dalle tali risorse, si pone stavolta in una *prospettiva passiva* rispetto all’attività dell’uomo e lo studio geo-ambientale porta alla valutazione dei *rischi ambientali*. In questo caso, il geologo ambientale interviene soprattutto nella valutazione della *vulnerabilità* e del *valore* delle matrici geologiche esposte, anche se per la definizione del rischio deve anche saper riconoscere la presenza dei *centri di pericolo* ed avere sufficienti nozioni sui *composti chimici pericolosi sia inorganici sia organici* che da questi possono incidentalmente fuoriuscire, andando a contaminare l’aria, il terreno e le acque sotterranee.

Il volume tratta ampiamente questi due aspetti della *Geologia Ambientale*, con 12 articoli sui *rischi geologici* (BARBERO S. *et al.*, BONASERA *et al.* 1, BONASERA *et al.* 2, BONETTO *et al.*, BOVE & MASCIOCO, CAPURSO *et al.*, COLOMBERO *et al.*, FERRERO *et al.*, NOVELLO *et al.*, SASSONE, TOJA *et al.*, VAGNON *et al.*) e 4 articoli sui *rischi ambientali* (BARBERO D. *et al.*, CAMPUS *et al.*, CAPODAGLIO & SIMONETTO, PASTERO *et al.*), senza trascurarne altri, da sempre trattati dalla SIGEA – APS, come ad esempio l’*educazione ambientale* con 5 articoli (BONA *et al.*, FAVRE, MASCIOCO, PARMEGGIANI *et al.*, TONON *et al.*), i *geositi* con 4 articoli (BERTOK *et al.*, COSTA *et al.*, GAMBINO *et al.*, MOTTA M. & MOTTA L.) e l’*energia* con 1 articolo (CHICCO *et al.*).

Gran parte dei testi sono frutto del lavoro dei ricercatori del Dipartimento di Scienze della Terra dell’Università di Torino, ma nella realizzazione del volume sono stati proficuamente coinvolti anche i colleghi del Politecnico di Torino, il mondo professionale, le Amministrazioni Regionali del Piemonte e della Valle d’Aosta e le corrispettive Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale.

Il volume sarà presentato in un convegno che si vuole organizzare presso l’Università di Torino, in collaborazione con gli Ordini Regionali dei Geologi di Piemonte e Valle d’Aosta e in occasione del quale verrà ufficialmente costituita la Sezione interregionale Piemonte – Valle d’Aosta della SIGEA - APS.

Annalisa Bove
Socia SIGEA - APS

Luciano Masciocco
Consigliere Nazionale SIGEA - APS

Paolo Sassone
*Socio SIGEA - APS, referente Sezione interregionale
Piemonte - Valle d’Aosta*

Caratterizzazione del materiale di copertura di una discarica di rifiuti solidi urbani dismessa mediante indagini geoelettriche e prove di permeabilità

Characterization of the soil capping layer at an urban waste landfill by means of geoelectrical measurements and hydraulic permeability tests

DIEGO BARBERO^{1*}, ALESSANDRO ARATO², MARCO BACENETTI², MARIO NALDI²

¹ Studio Geologico, Geotecnico e Geofisico Dott. Diego Barbero, San Martino Alfieri, Italy

² Techgea S.r.l., Torino, Italy

*E-mail: diego-barbero@libero.it

Parole chiave: discarica di rifiuti solidi urbani, indagini geoelettriche, prove permeabilità

Key words: urban waste landfill, geoelectrical measurements, hydraulic permeability tests

SOMMARIO

La gestione *post-mortem* di una discarica, presso la quale sono stati conferiti rifiuti solidi urbani o non pericolosi, prevede innanzitutto la realizzazione in uno strato di copertura superficiale (*capping*) che prevenga l'ingresso di acqua meteorica verso il corpo rifiuti, con l'obiettivo primario di ridurre la formazione di percolato e di conseguenza un potenziale impatto negativo verso l'ambiente esterno. La caratteristica fondamentale di uno strato di *capping* è la bassa conducibilità idraulica (*cm/s*), che va garantita con teli in materiale plastico impermeabile e/o livelli di materiale argilloso compattato. Molte discariche costruite nel secolo scorso sono prive di *capping* superficiale o non soddisfano i requisiti minimi di isolamento idraulico superficiale. Definire a posteriori le caratteristiche dei materiali che compongono il *capping* può aiutare a comprendere il ruolo del *capping* stesso nel bilancio idraulico complessivo della discarica. Una metodologia geofisica appropriata alla caratterizzazione di materiali argillosi (a bassa conducibilità idraulica) è la geoelettrica, attraverso la misura dei parametri quali la resistività elettrica e la polarizzazione indotta. Tali indagini consentono di ottenere, in maniera indiretta e non invasiva, sezioni verticali di questi parametri, da correlare con la composizione e le caratteristiche granulometriche dei materiali utilizzati. Prove di permeabilità dirette (infiltrometriche) in situ e/o di permeabilità in laboratorio, associate alla realizzazione di pozzetti esplorativi, consentono di tarare i modelli geofisici in modo da restituire una caratterizzazione accurata dei materiali di copertura di discarica.

Il caso studio qui presentato riguarda un esempio di caratterizzazione effettuata a mezzo di indagini geoelettriche associate a prove di permeabilità in situ e in laboratorio, su due vasche della discarica di Lesegno (CN), in Loc. Prata, attualmente in fase di gestione *post-mortem*. La discarica in esame presenta livelli critici di percolato all'interno del corpo rifiuti, con un andamento che non diminuisce nel

tempo nonostante il prelievo continuo e gli ingenti volumi smaltiti annualmente. La discarica non presenta un *capping* con telo di impermeabilizzazione, ma pare essere costituita da un pacchetto composto da uno strato di drenaggio (ghiaia), uno strato impermeabile argilloso e terreno vegetale di copertura. Inoltre, la discarica poggia direttamente su terreni riferibili al substrato terziario (Marne di Paroldo) senza un sistema di impermeabilizzazione continuo.

1. INTRODUZIONE

La caratterizzazione ambientale di discariche di rifiuti solidi urbani (RSU) è fondamentale per valutarne l'impatto sull'ambiente circostante. Se le discariche di nuova concezione e realizzazione sono progettate e costruite per minimizzare i rischi di contaminazione verso l'esterno, spesso ciò non vale per le discariche storiche, costruite quando non erano ancora considerate come sorgenti di inquinamento verso le matrici ambientali esterne.

La caratterizzazione ambientale di una discarica prevede la valutazione dell'integrità dell'impermeabilizzazione basale, principale via di fuga del percolato verso i depositi sottostanti e l'acquifero superficiale, di eventuali accumuli di percolato interni al corpo rifiuti e la verifica della continuità del pacchetto di *capping* superficiale.

I metodi geofisici, per la loro non invasività e rapidità di esecuzione, trovano ampie applicazioni nella caratterizzazione estesa delle discariche RSU (Carpenter *et al.*, 1990; Cossu *et al.*, 1990). La metodologia geoelettrica, in particolare, è in grado di evidenziare disomogeneità interne ai rifiuti (Bernstone *et al.*, 2000; Guerin *et al.*, 2004), di consentire di verificare la continuità idraulica dell'impermeabilizzazione e di eventuali fuoriuscite di percolato (Chambers *et al.*, 2006; Martorana *et al.*, 2016). Altre applicazioni sono orientate alla caratterizzazione e alla ricerca di discontinuità nel pacchetto di copertura sommitale (Carpenter *et al.*, 1991; Genelle *et al.*, 2014) di vecchie discariche di rifiuti urbani e pericolosi.

La misura diretta della conducibilità idraulica verticale, effettuata attraverso prove di permeabilità in situ (prove infiltrometriche) e di laboratorio (prove di permeabilità a carico variabile in cella), costituisce un parametro idrogeologico essenziale per il collaudo delle barriere di impermeabilizzazione realizzate con materiale argilloso e finalizzate a garantire l'isolamento dei rifiuti per scongiurare l'infiltrazione del percolato nel sottosuolo generato dalla decomposizione dei rifiuti stessi (Barbero *et al.*, 2020a; Barbero *et al.*, 2020b; Boutwell & Derick, 1986; Carslaw & Jaeger, 1959; Hvorslev, 1951). Infatti, l'utilizzo di materiali minerali non del tutto impermeabili, e di conseguenza non in grado di garantire un completo isolamento del corpo rifiuti, costituisce un problema ambientale non trascurabile, poiché l'eventuale fuoriuscita e infiltrazione di percolato nel sottosuolo al di sotto del corpo rifiuti della discarica diviene causa principale di inquinamento, specie laddove è presente una falda sotterranea. Nel caso di barriere di impermeabilizzazione di copertura (sommità e scarpate del rilevato) il valore di conducibilità idraulica richiesto non dovrà risultare superiore a 1.00×10^{-6} cm/s.

Dal punto di vista del bilancio idraulico interno alla discarica, la formazione di percolato è dovuta alla decomposizione della frazione organica dei rifiuti, limitatamente all'umidità degli stessi al momento del conferimento e agli apporti meteorici durante la fase di coltivazione a cielo aperto. Alla fine del periodo di gestione operativa, il *capping* superficiale ha la funzione primaria di prevenire ulteriori apporti di acqua dall'esterno, e diminuire quindi la formazione di percolato nel tempo. È quindi fondamentale conoscere le caratteristiche del materiale di copertura, per stimarne l'efficacia di tenuta idraulica, valutarne l'integrità e definire eventuali azioni correttive/migliorative.

Per questo motivo, è stato condotto uno studio integrato tra indagini geoelettriche, pozzetti esplorativi e prove di permeabilità in situ e in laboratorio, presso la discarica RSU nel comune di Lesegno (CN), in Piemonte. I risultati delle indagini hanno consentito di caratterizzare il materiale di copertura superficiale e di valutarne le proprietà idrauliche. Le prove dirette sono servite inoltre per tarare i risultati delle indagini geoelettriche, consentendo di estendere le informazioni ricavate a tutte le porzioni della discarica investigate.

2. CASO DI STUDIO

La discarica di Lesegno si localizza nei rilievi collinari delle Langhe, modellati nella successione terrigena (Oligocene e il Miocene sup.), con spessore massimo di 5000-6000 m, nota in letteratura come Bacino Terziario Piemontese (BTP). Il BTP costituisce un bacino post-collisionale situato al limite tra la catena alpina ed appenninica, le cui formazioni corrispondono a depositi molassici di riempimento di fossa. La successione sedimentaria del BTP costituisce una larga monoclinale, con immersione verso NO e inclinazione compresa tra 8° e 15°, costituita da diversi depositi sovrapposti e interdigitati tra loro. Il substrato dell'area indagata è costituito da marne, marne siltose e marne argillose grigie e grigio-azzurre con subordinate interca-

lazioni di arenarie grigiastre in strati sottili, riferibili alle Marne di Paroldo (Burdigagliano-Langhiano), riferibili a un ambiente di sedimentazione marino profondo emipelagico (facies marnoso-siltose) con episodi torbiditici (facies sabbioso-arenacee). Le Marne di Paroldo risultano stratigraficamente comprese tra le Formazioni di Monesiglio inferiormente e di Murazzano superiormente, e mostrano rapporti eteropici con la Formazione di Cortemilia.

La discarica oggetto delle indagini è costituita da due vasche distinte collocate su un versante con inclinazione circa O-E. I due lotti si collocano su due diversi livelli altimetrici: la cella di monte (quota media di 450 m s.l.m.) sita nel settore Est, ospita i rifiuti solidi assimilabili a urbani (RSAU), mentre quella di valle (quota media di 425 m s.l.m.) sita nel settore Ovest, ospita RSU.

Dati pregressi a disposizione indicano la presenza di un *capping* di materiale argilloso compattato, a bassa conducibilità idraulica, priva di telo di impermeabilizzazione in HDPE, nonché di impermeabilizzazione basale e laterale. Inoltre, studi sul bilancio idrico della discarica, valutati sulla base dei volumi di percolato interni, testimoniano, a fronte di una ingente campagna di prelievo periodico, un sensibile disequilibrio idraulico da ricercarsi in apporti esterni alla discarica, per filtrazione attraverso il *capping* e/o lateralmente.

3. METODOLOGIA

Al fine di definire le caratteristiche del materiale di copertura delle due vasche e individuare la presenza di possibili ingressi di acqua da falde sospese esterne, con particolare riferimento al versante di monte, sito a Est della vasca RSAU, è stata effettuata una campagna di indagini geofisiche, idrogeologiche e geotecniche che si compone di (Fig. 1):

- 9 stendimenti geoelettrici, indicati da linee bianche in Figura 1, di cui 3 sulla vasca RSAU (A÷C), 5 sulla vasca RSU (D÷H) e 1 esterno al corpo rifiuti (X), a monte della vasca RSAU;
- 12 pozzetti esplorativi (cerchi rossi, denominati con la sigla "SG" in Fig. 1) ubicati sulle due vasche in modo da verificare lo spessore dello strato di *capping*, contestualmente, verificarne le caratteristiche idrogeologiche a mezzo di prove di permeabilità. La profondità media raggiunta dagli scavi è di 1.5 m in modo da intercettare il contatto tra il *capping* e rifiuti;
- 6 prove di permeabilità in situ per la misura della componente verticale della conducibilità idraulica verso il corpo rifiuti (quadrati bianchi, denominati con la sigla "P" in Fig. 1);
- 6 prove di permeabilità a carico variabile eseguite in laboratorio su campioni indisturbati prelevati in corrispondenza dei siti di esecuzione delle prove in situ.

La lunghezza degli stendimenti geoelettrici è compresa tra 76 e 142 m. La misura dei dati di resistività elettrica e polarizzazione indotta (IP) nel dominio di tempo (caricabilità) è stata realizzata con un georesistivimetro Syscal-Pro a 72 canali (Iris Instruments, FR). Per garantire la risoluzione necessaria a caratterizzare il materiale di copertura (avente

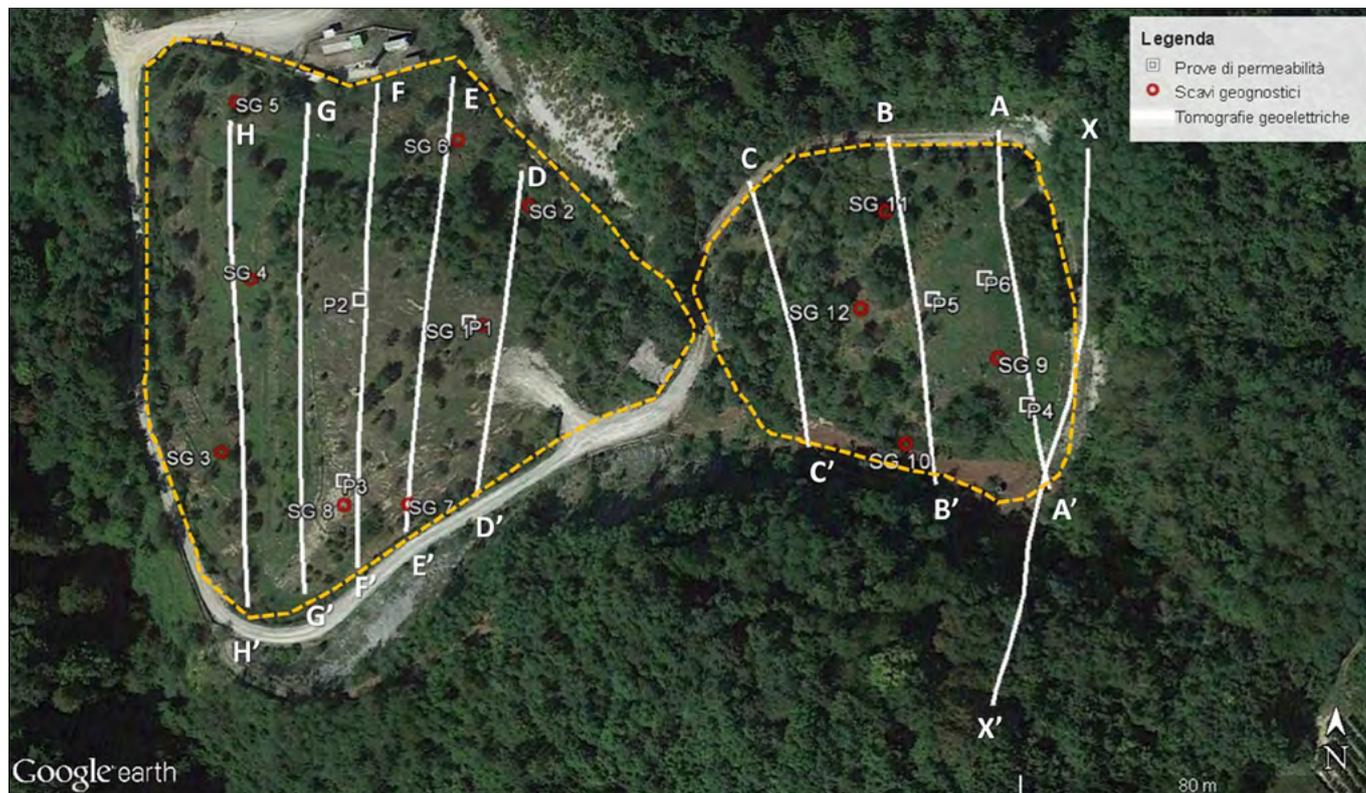


FIGURA 1. Ubicazione della discarica (le due vasche sono indicate da linee gialle tratteggiate) e delle indagini eseguite: le linee bianche indicano gli stendimenti geoelettrici; i quadrati bianchi indicano le posizioni delle prove di permeabilità; i cerchi rossi indicano gli scavi geognostici realizzati.

spessore di circa 2 m) e raggiungere una profondità di indagine di circa 15-20 m (corrispondente alla profondità massima stimata del fondo delle vasche) è stato utilizzato un interasse elettrodo di 2 m, con configurazione elettrodo multi-gradient (Dahlin & Zhou, 2006), per ottimizzare il dettaglio laterale delle indagini. I dati grezzi sono stati pre-filtrati per eliminare gli outlier e le misure con un valore di deviazione standard strumentale superiore al 5%. L'elaborazione dei dati geoelettrici è stata effettuata con il software commerciale Res2DInv (Loke and Barker, 1996). I modelli geoelettrici sono stati interpolati con il software Surfer 11 (Golden Software), con algoritmo di *kriging* e maglia di 0.5 m (orizzontalmente) x 0.25 m (verticalmente).

4. RISULTATI

4.1 Modelli tomografici di resistività elettrica e polarizzazione indotta

La sezione X-X' (Figura 2), effettuata a monte della vasca RSAU per la valutazione di eventuali falde sospese e la caratterizzazione dei depositi naturali su cui poggia la discarica, mostra una distribuzione di resistività elettrica priva di variazioni significative, con valori globalmente compresi nell'intervallo 30÷70 Ωm, e valori di polarizzazione indotta inferiori a 10 mV/V. I depositi che costituiscono il versante di monte sono quindi associabili al substrato marnoso, e non suggeriscono la presenza di anomalie significative, compatibili con flussi d'acqua tali da modificare significativamente la resistività elettrica al di sotto dell'area di indagine. I bassi valori di IP suggeriscono pertanto sia l'assenza di orizzonti argillosi che di percolato

verso l'esterno lungo il lato di monte. Nella porzione Nord della sezione, verso il punto X, si nota l'influenza del corpo rifiuti adiacente, che provoca un abbassamento dei valori di resistività elettrica (fino a 20 Ωm) e contestualmente un lieve incremento dei valori di IP (fino a 15-20 mV/V). Le sezioni geoelettriche interne alla discarica mostrano con buona evidenza lo strato di copertura, ben riconoscibile dal contrasto di polarizzazione indotta (IP) con i rifiuti sottostanti, i quali presentano valori generalmente superiori a 40 mV/V (Fig. 2, sezione B-B'). Lo strato di copertura presenta valori di IP molto bassi, inferiori a 10 mV/V, analoghi a quelli ottenuti dall'elaborazione della sezione X-X' sui terreni marnosi di monte, ed ha uno spessore compreso tra 1.5 ÷ 2.5 m. L'assenza di matrice argillosa è confermata dai valori di resistività elettrica, compresi tra 30 e 80 Ωm (i valori dei terreni argillosi sono generalmente compresi tra 5 e 10 Ωm). In alcuni punti si rileva un abbassamento locale dei valori di resistività elettrica (attorno ai 20 Ωm). Infine, lo spessore dello strato di copertura non è univocamente definibile sulla base dell'elettrostrato superficiale, che può essere associato in parte al terreno di copertura e in parte allo strato superiore dei rifiuti insaturi (con basso o nullo contenuto di acqua/percolato).

Il corpo rifiuti presenta valori di resistività elettrica decisamente bassi (5÷15 Ωm) e valori di polarizzazione indotta medio-alti (40÷60 mV/V). La resistività elettrica della parte più superficiale del corpo rifiuti mostra valori simili ai terreni di copertura: ciò può essere messo in relazione al fatto che i rifiuti nella loro porzione più superficiale siano verosimilmente insaturi. Il confronto con i valori di IP, ca-

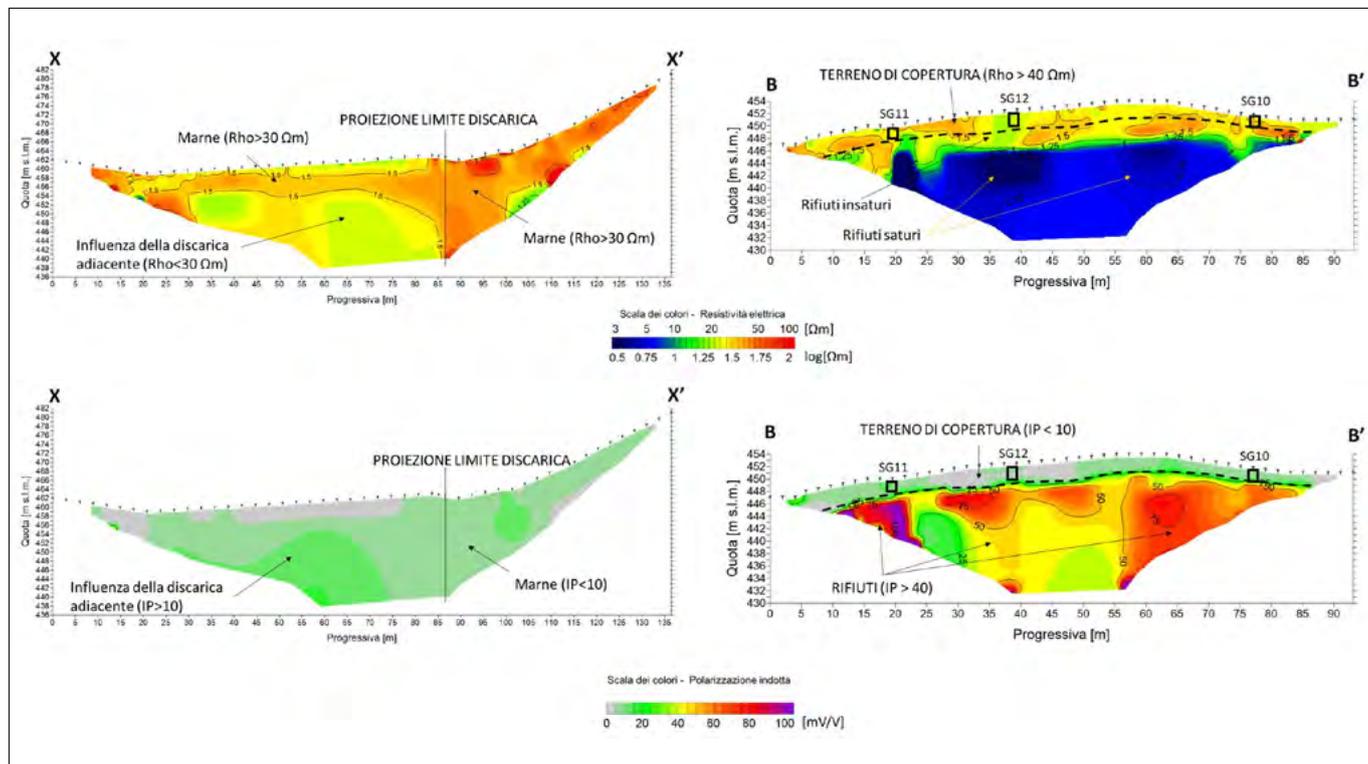


FIGURA 2. Modelli tomografici di resistività elettrica (in alto) e IP (in basso), lungo la sezione X-X' (a sinistra) e B-B' (a destra).

librati con le stratigrafie dei pozzetti geognostici eseguiti, mette in evidenza il contatto tra i rifiuti insaturi e i rifiuti saturi (percolato). Valori di resistività pressoché uguali lungo tutto lo spessore delle sezioni non consentono di definire con precisione la base di appoggio dei rifiuti. Al contrario, la presenza di un telo plastico impermeabile di contenimento continuo avrebbe, invece, evidenziato un passaggio netto a valori di resistività più elevati. L'unica sezione che mostra un possibile effetto riconducibile all'eventuale presenza di un possibile telo di contenimento laterale, di cui però non vi è notizia negli elaborati progettuali, è visibile sulla sezione H-H' (Figura 3). Nelle altre sezioni si rileva, talora, un'anomalia interna al corpo rifiuti riconducibile a

una possibile strada di accesso realizzata per le operazioni di coltivazione della discarica (Figura 3, sez. G-G').

4.2 Pozzetti esplorativi

Gli scavi esplorativi hanno consentito di verificare lo spessore del materiale di copertura sovrastante i rifiuti, compreso tra 1.5÷2.5 m (Figura 4). La natura di tale materiale, a composizione eterogenea e variabile, suggerisce che derivi dalle terre di scavo prodotte dalle operazioni di riprofilatura del versante durante le operazioni di coltivazione. Si osserva infine come le anomalie di bassa resistività elettrica nei pozzetti SG11 e SG12 siano correlabili con la presenza di acqua effettivamente riscontrata.

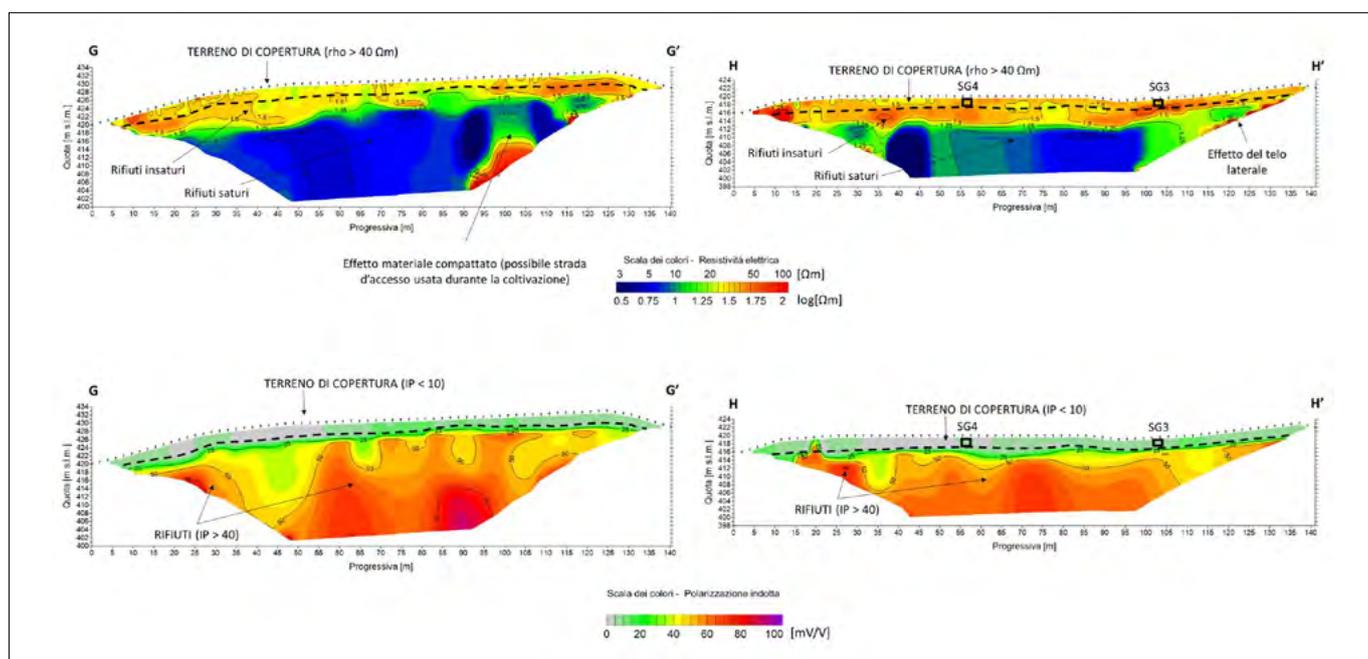


FIGURA 3. Modelli tomografici di resistività elettrica (in alto) e IP (in basso), lungo la sezione G-G' (a sinistra) e H-H' (a destra).

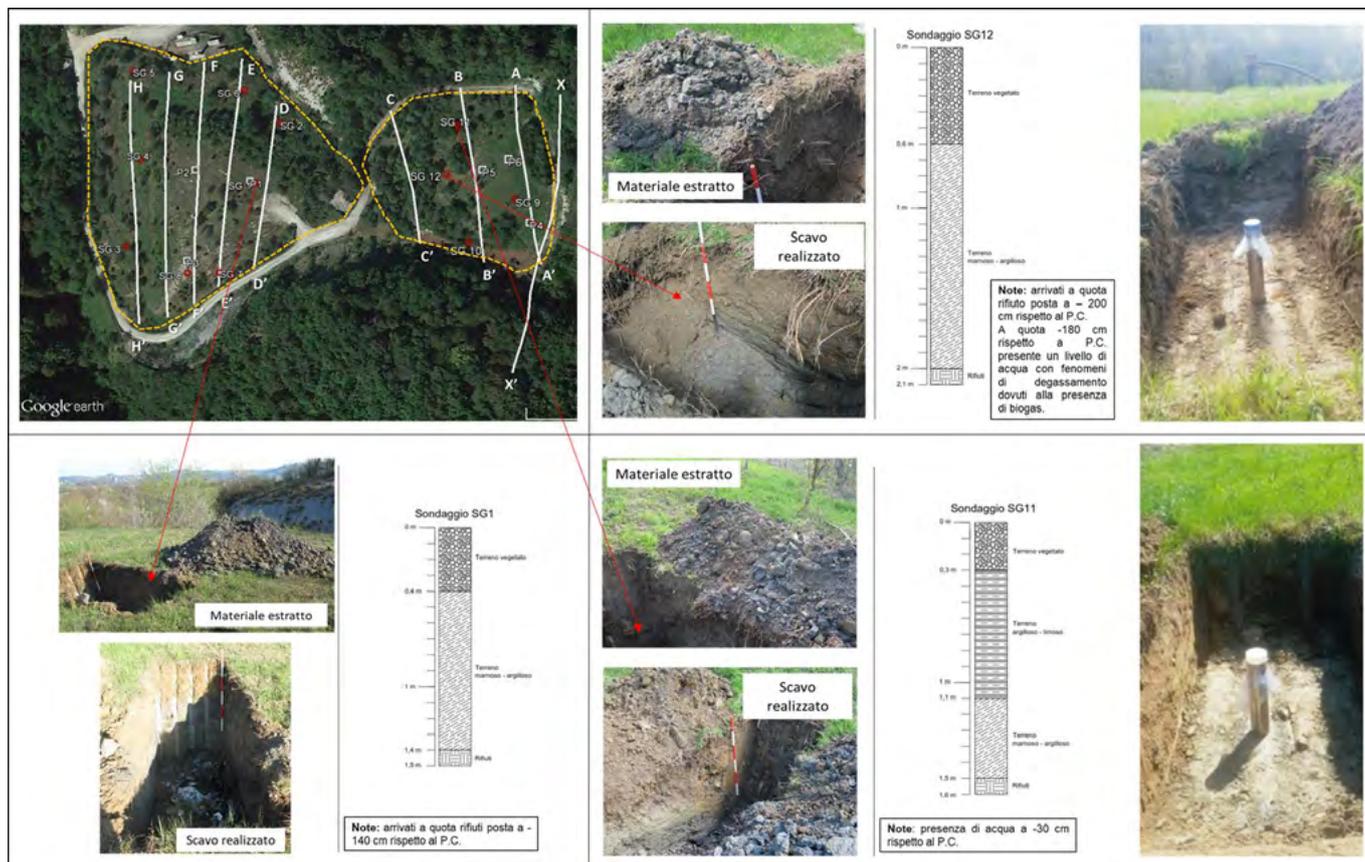


FIGURA 4. Pozzetti esplorativi più rappresentativi con relativa stratigrafia e prove di permeabilità in situ.

4.3 Prove di permeabilità

Le prove di permeabilità in situ (Fig. 4) hanno fornito un valore di conducibilità idraulica verticale (K_v), attribuibile al terreno sottostante e direttamente circostante il permeametro. L'intervallo di variazione della K_v misurata è compreso tra $9.08 \cdot 10^{-8} \div 1.23 \cdot 10^{-6}$ cm/s. Se si assume come valore di riferimento per il materiale di copertura $K = 10^{-6}$ cm/s, i risultati ottenuti non soddisfano i requisiti minimi di legge: solo le prove P1 e P4 hanno dato un valore di permeabilità accettabile, anche se leggermente superiore al valore di riferimento (Tabella 1). I risultati ottenuti dalle prove di permeabilità in laboratorio hanno un range compreso tra $5.16 \cdot 10^{-7} \div 2.27 \cdot 10^{-6}$ cm/s: essi trovano corrispondenza con i valori ottenuti dalle prove in situ, pur risultando sempre leggermente superiori. Ciò è verosimilmente riconducibile all'inevitabile disturbo nella fase di campionamento in situ, nella confezione dei provini in laboratorio e al tipo di terreno limoso-argilloso facilmente fratturabile e con basso contenuto naturale d'acqua.

5. CONCLUSIONI

Le indagini geoelettriche (resistività elettrica e polarizzazione indotta), associate a misure puntuali di permeabilità dei terreni e a indagini geognostiche di esplorazione del sottosuolo di calibrazione, si sono rivelate un valido strumento per la caratterizzazione stratigrafica e idrogeologica del sottosuolo dell'area di discarica. L'utilizzo di tale metodologia d'indagine indiretta ha permesso di verificare come lo strato di copertura (*capping*) (spessore $1.5 \div 2.5$ m) di entrambe le vasche della discarica non possieda caratteristiche idrauliche soddisfacenti a prevenire infiltrazioni di acqua verso il corpo rifiuti. Esso non è composto da materiale a prevalenza argilloso, bensì da terreno vegetato e suolo limoso debolmente argilloso. I risultati dell'indagine mettono in luce pertanto l'analogia tra il terreno limoso-argilloso che costituisce il versante sul quale si appoggia la discarica, e il materiale posto a copertura dei rifiuti; tale considerazione è ulteriormente suffragata dai risultati delle sezioni geoelettriche, le quali individuano in tutti i casi

Tabella 1. Risultati prove di permeabilità

Punto di prova	Prova infiltrometrica K (cm/s)	Prova in laboratorio K (cm/s)
P1	$1.34 \cdot 10^{-6}$	$3.40 \cdot 10^{-6}$
P2	$9.08 \cdot 10^{-8}$	$2.06 \cdot 10^{-7}$
P3	$1.32 \cdot 10^{-7}$	$4.26 \cdot 10^{-7}$
P4	$1.23 \cdot 10^{-6}$	$2.27 \cdot 10^{-6}$
P5	$3.65 \cdot 10^{-7}$	$4.07 \cdot 10^{-7}$
P6	$1.98 \cdot 10^{-7}$	$5.16 \cdot 10^{-7}$

un livello superficiale con valori di IP molto bassi. Inoltre, la presenza di acqua riscontrata in due pozzetti esplorativi nella vasca superiore, suggerisce una possibile provenienza meteorica, connessa ad acque di ruscellamento provenienti dal versante a monte, con successiva “stagnazione” nello strato argilloso-marnoso di copertura. Tale ipotesi è suffragata dall’assenza di flussi canalizzati di acqua sotterranea all’interno della formazione rocciosa a monte della discarica, come verificato dall’analisi delle sezioni geoelettriche elaborate. I valori di conducibilità idraulica misurata in situ risultano superiori in almeno due casi al valore di riferimento. Le prove di laboratorio evidenziano valori di conducibilità idraulica ancora maggiori, giustificabili dal disturbo inevitabile provocato nella fase di prelievo e di lavorazione dei campioni. Infine, le indagini geoelettriche non hanno evidenziato la presenza di uno strato di discontinuità resistiva alla base e lateralmente al corpo rifiuti: ciò non esclude del tutto l’eventuale presenza di un telo in HDPE di impermeabilizzazione, ma evidenzia come diffuse discontinuità del telo non siano in grado di isolare elettricamente la discarica.

BIBLIOGRAFIA

- BARBERO D., MARONI A., PEYROT S. (2020a), *Laboratory permeability and single ring infiltration tests for the testing of waterproofing barriers of landfill tanks*. Journal of Geotechnical Engineering, 7(2): 29–37p.
- BARBERO D., MARONI A., PEYROT S. (2020b), *First Experimental Results on “Clay and Bentonite” Mixtures for the Water Proofing of a Landfill in North-western Piedmont Region (NW Italy)*. Journal of Geotechnical Engineering. 2020; 7(2): 13–17p.
- BERNSTONE C., DAHLIN T. (1997), *DC resistivity mapping of old landfills: two case studies*, Eur. Journal of Environmental Engineering Geophysics, 2, 121-136.
- BERNSTONE C., DAHLIN T., OHLSSON T. AND HOGLAND W. (2000) *DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excavation surveys*, Environmental Geology 39, 360-371.
- BOUTWELL, G.P., DERICK R.K. (1986), *Groundwater protection for sanitary landfills in the saturated zone*. Proc. NWWA Waste – Tech ’86, Chicago.
- CARPENTER P.J., KAUFMANN R.S. PRICE B. (1990), *Use of resistivity soundings to determine landfill structure*, Ground Water, 28, 569-575.
- CARPENTER P.J., CALKIN S.F., KAUFMANN R.S. (1991), *Assessing a fractured landfill cover using electrical resistivity and seismic refraction techniques*, Geophysics 56, 1896-1904.
- CASLAW H.S., JAEGER J.C. (1959), *Conduction of heat in solids*. 2nd ed., Oxford University Press, London, UK.
- CHAMBERS J.E., KURAS O., MELDRUM P.I., OGILVY R.D., HOLLANDS J. (2006), *Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site*, Geophysics., 71, B231- B239, doi:10.1190/1.2360184
- COSSU R., RANIERI G., MARCHISIO M., SAMBUELLI L., GODIO A., MOTZO G.M. (1990), *Geophysical methods in surveying old landfill*, In: Proc. 3rd Int. KfK/TNO Conf. Contam. Soil, Arendt F., Hinsenvald M. and van den Brink W.J. (eds), Karlshue, Germany, pp. 575-582, doi:10.1007/978-94-011-3270-1_130.
- DAHLIN T., ZHOU B. (2006), *Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging*, Near Surface Geophysics, 4, 113-123
- GENELLE F., SIRIEIX C., RISS J., NAUDET V., RENIE S., DABAS M., BEGASSAT P., HVORSEL J. (1951), *Time lag and soil permeability in ground water observations*, Bulletin n. 36, USA/COE WES Vicksburg, MS.
- LOKE M.H., BARKER R.D. (1996), *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method*, Geophysical Prospecting n. 44(1): 131–152.
- MARTORANA R., CAPIZZI P., D’ALESSANDRO A., D. LUZIO (2016), *Electrical resistivity and induced polarization tomographies to test the efficiency and safety of the new landfill of Bellolampo (Palermo, Italy)*, Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata Vol. 57, n. 4, pp. 313-327; DOI 10.4430/bgta0184
- NAESSENS F. (2014), *Detection of landfill cover damage using geophysical methods*, Near Surface Geophysics, 12 (5), pp.599-611.

Le attività della struttura “Monitoraggio e Studi Geologici” di Arpa Piemonte

Activities of the Structure “Monitoring and Geological Studies” of the Regional Agency for Environmental Protection of Piemonte (Arpa Piemonte)

SECONDO BARBERO, LUCA PARO, ILARIA PRINZI, DAVIDE TIRANTI

Con la collaborazione di:

BONADIO C., BOSCO F., BORMIOLI D., COZZULA S., CUCCHI A., FALETTO M., FALLETTI P., LANTERI L., LANZA P., MOLETTA G., RE FIORENTIN G., SCALENGHE S., SOLERO E., TARARBRA M., VIGLIETTI D.

Arpa Piemonte, Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali, S.S. Monitoraggio e Studi Geologici

*E-mail: geologico@arpa.piemonte.it

Parole chiave: ARPA Piemonte, cartografia geologica, geotecnica, radon, sismica, frane, monitoraggio, criosfera, processi geo-idrologici, sistemi di allerta precoce, educazione ambientale

Key words: ARPA Piemonte, geological cartography, geotechnics, radon, seismicity, landslides, monitoring systems, cryosphere, geo-hydrological processes, early warning systems, environmental education

INTRODUZIONE

L’Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte (Arpa Piemonte) è un ente pubblico istituito con L.R. n. 60/1995 a seguito di un referendum popolare del 1993, che affidava i controlli ambientali a un sistema di prevenzione e protezione articolato, formato da apposite Agenzie istituite a livello regionale: le Arpa. Nel 2002 la legge regionale n. 28 ha assegnato all’Agenzia anche le competenze su previsione e prevenzione dei rischi naturali, rendendola così titolare di tutte le funzioni di tutela e controllo in materia ambientale, funzioni riconfermate dalla più recente L.R. n. 18/2016. In particolare Arpa svolge attività di controllo dei fattori geologici, meteorologici e nivologici per la tutela dell’ambiente, nonché per la previsione finalizzata alla prevenzione dei rischi naturali utilizzando strumentazioni automatiche d’avanguardia per il rilevamento al suolo e in atmosfera. L’interpretazione dei dati acquisiti e le risultanze della loro elaborazione modellistica permettono la costante sorveglianza dell’ambiente e del territorio, la gestione dei sistemi di previsione, allertamento e monitoraggio delle situazioni di particolare attenzione, l’aggiornamento costante del quadro del dissesto utile alle attività di pianificazione e programmazione. Nel presente articolo vengono riassunte tutte le principali attività geologiche svolte dalla Struttura Semplice Monitoraggio e Studi Geologici del Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali di Arpa Piemonte, al fine di fornire un quadro del contesto operativo e dei servizi offerti agli enti ed ai cittadini.

CARTOGRAFIA GEOLOGICA, BANCA DATI GEOTECNICA E MAPPATURA ROCCE RADIOGENE

Arpa Piemonte raccoglie, elabora e organizza informazioni sulle caratteristiche geologiche del territorio piemontese, con la finalità di fornire ai cittadini e alla comunità

tecnico-scientifica un quadro organico a scala regionale costantemente aggiornato di dati facilmente leggibili e interpretabili. Sul Geoportale dell’Agenzia è stata pubblicata nel 2021 la “Carta Geologica del Piemonte”, moderna rappresentazione geologica di sintesi alla scala 1:250.000 con relativo geodatabase (Progetto GeoPiemonte Map., a cura di CNR IGG (Istituto di Geoscienze e Georisorse, sede di Torino), ARPA Piemonte, e con il contributo di

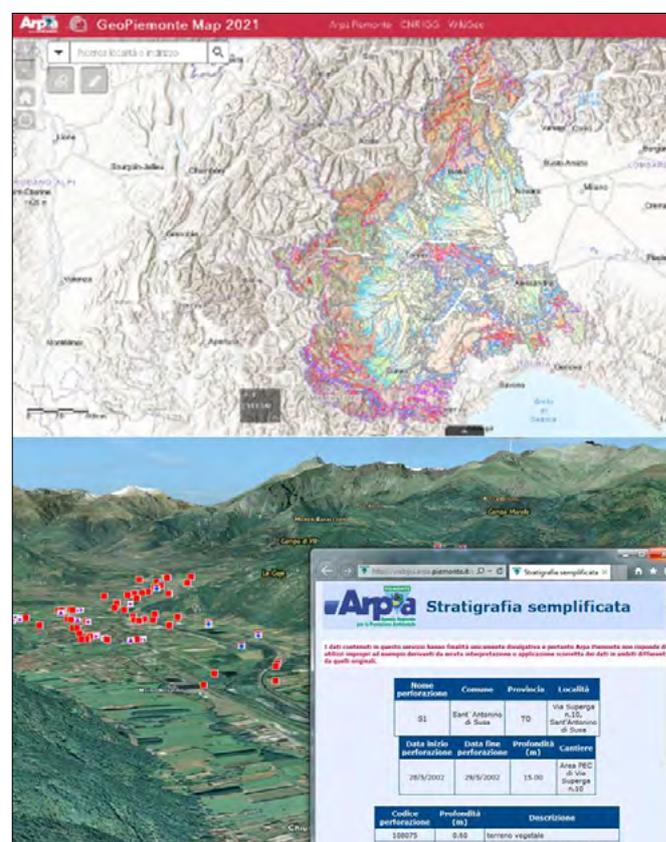


FIGURA 1. GeoMap Piemonte 2021 e Banca Dati Geotecnica dal Geoportale di Arpa Piemonte.

Dipartimenti di Scienze della Terra e di Informatica dell'Università di Torino). Arpa si occupa anche della raccolta di stratigrafie, prove su campioni derivanti da indagini geognostiche e indagini geofisiche condotte sul territorio piemontese, che vengono implementate nella *Banca Dati Geotecnica e Geofisica*, che attualmente comprende circa 12500 Sondaggi, 6800 Campioni di terreno sottoposti a indagini di laboratorio, circa 1700 informazioni relative a prove penetrometriche statiche e dinamiche e 1600 indagini geofisiche; inoltre, raccoglie informazioni relative alle Microzonazioni Sismiche di oltre 40 comuni piemontesi. Tutti i dati, aggiornati settimanalmente, sono consultabili e scaricabili liberamente dal Geoportale.

In collegamento con queste attività sul controllo delle radiazioni, viene effettuata anche la mappatura di litologie produttori gas radiogeni, che consente l'individuazione delle aree a 'rischio radon'. Il metodo prevede l'utilizzo di un modello predittivo radio-geolitologico che aggrega le più aggiornate conoscenze geologiche con quelle radiometriche derivanti dall'analisi del contenuto di radioattività naturale dei suoli e delle rocce di tutto il Piemonte. I risultati hanno contribuito alla pubblicazione nel 2020 dell'Atlante Europeo delle Radiazioni Naturali, a cura del JRC della Commissione Europea.

SISMICA E MONITORAGGIO MOVIMENTI CROSTALI

Viene garantito il rilevamento dell'attività sismica piemontese tramite una rete di stazioni installate sul territorio regionale, integrate con altre stazioni presenti nell'area alpina occidentale e nord-appenninica. Le 11 stazioni piemontesi gestite dall'Agenzia fanno parte infatti della rete sismica dell'Italia nordoccidentale (RSNI, Regional Seismic network of Northwestern Italy), gestita dall'Uni-

versità di Genova. La rete copre l'arco alpino occidentale interno, fornendo la copertura dell'area anche al servizio di sorveglianza sismica nazionale (INSN, Italian National Seismic Network) svolto dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

Inoltre, attraverso il progetto ALPS GPS QUAKE-NET, è stata realizzata una rete geodetica transnazionale in ambito alpino, costituita da stazioni permanenti GPS (Global Positioning System). Le 6 stazioni realizzate in Piemonte sono certificate a livello internazionale ed i ricevitori hanno caratteristiche di elevatissima precisione, in grado di registrare movimenti sub-centimetrici. Tutte le stazioni fanno parte della rete del Progetto RING dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e della rete europea GAIN (Geodetic Alpine Integrated Network), sviluppate allo scopo di monitorare dal punto di vista sismico e geodetico il territorio italiano. Inoltre, la stazione di Baceno (VB) è inserita nel Progetto RDN dell'Istituto Geografico Militare (IGM), per la definizione dei sistemi geodetici globali in ambito nazionale.

La *Banca Dati da telerilevamento* raccoglie le informazioni derivanti dalle attività di elaborazione di immagini satellitari tramite tecniche di interferometria differenziale multi-temporale sull'intero territorio regionale, per lo studio dei fenomeni franosi e di altri fenomeni di deformazione della superficie terrestre quali subsidenza e tettonica attiva. Questa attività rientra nei lavori del Tavolo Nazionale per i Servizi di Geologia Operativa coordinato da Ispra e composto dai Servizi Geologici regionali, delle province autonome e delle Arpa con competenze nel campo della geologia. A questo proposito, Arpa Piemonte partecipa alle attività del tavolo nazionale "Ground Motion", finalizzato alla realizzazione di servizi operativi di monitoraggio con tecniche satellitari interferometriche nell'ambito del progetto Copernicus (iniziativa dell'Agenzia Spaziale Europea e della Commissione europea).

STUDIO, MONITORAGGIO E PREANNUNCIO DELL'INNESCO DEI FENOMENI FRANOSI

Arpa gestisce la *Rete Regionale di Controllo sui Movimenti Franosi* (ReRCoMF), costituita da circa 245 siti. La rete è dotata di punti di misura sia di tipo superficiale (circa 600 capisaldi topografici), sia di tipo profondo (circa 550 inclinometri, 77 piezometri automatizzati, 30 sonde inclinometriche automatizzate, 5 colonne multiparametriche). In misura minore sono presenti altri strumenti di tipo topografico (GPS e stazioni totali automatizzate) e di tipo estensimetrico.

Per i limiti intrinseci alla strumentazione e per la periodicità con cui vengono effettuate le misure, si prestano ad essere monitorate le frane a lenta evoluzione. Per le stesse ragioni e per l'estensione della rete, il sistema non si adatta in modo diretto a finalità di allertamento. I risultati del monitoraggio costituiscono un valido supporto alla pianificazione territoriale, alla predisposizione di piani di protezione civile, al corretto dimensionamento di interventi di sistemazione dei versanti e alla valutazione della loro efficacia. Viene garantito agli enti proprietari della stru-

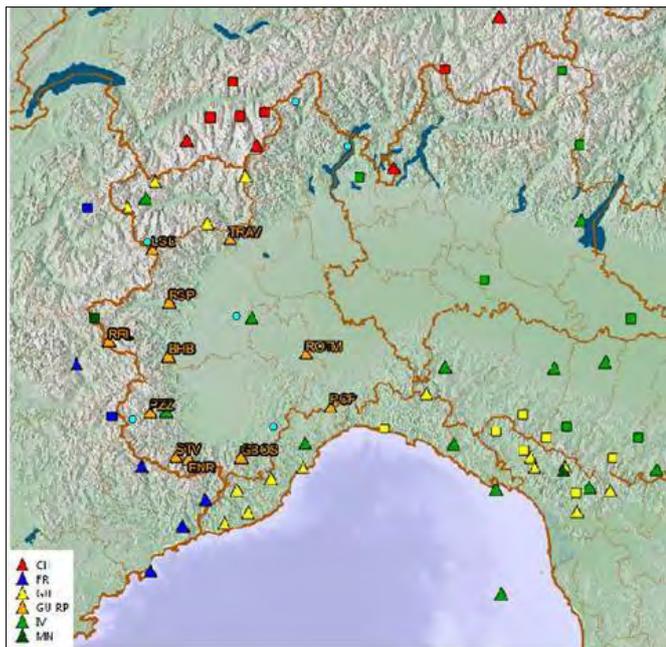


FIGURA 2. Stazioni sismiche presenti in Piemonte e nelle aree limitrofe. Legenda: CH: stazioni svizzere, FR: stazioni francesi, IV: stazioni INSN (INGV), GU-RP: stazioni RSNI (Arpa Piemonte), GU: stazioni RSNI (altri enti), MN: stazioni MedNet (INGV). Con i cerchi azzurri, ubicazione delle stazioni permanenti GPS.

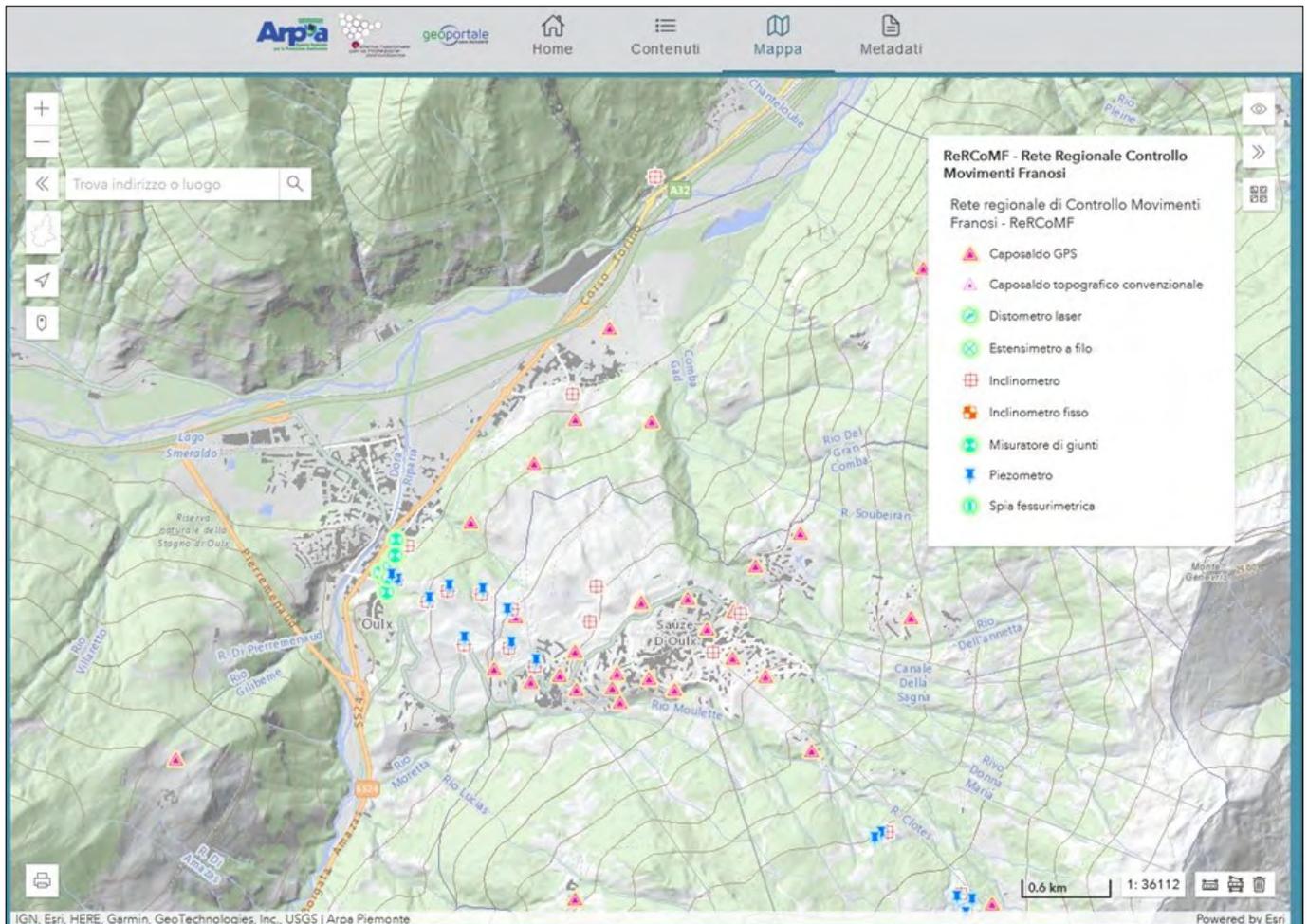


FIGURA 3. Esempio di visualizzazione di alcune informazioni di sintesi sulla rete di monitoraggio frane tratto dal servizio webgis Rercomf sul Geoportale di Arpa.

mentazione (solitamente i Comuni) un servizio di gestione di ciascun sistema di controllo strumentale, ponendosi come priorità di: 1) verificare utilizzo e manutenzione delle strumentazioni, 2) costituire una serie storica di dati, 3) informare regolarmente le autorità competenti (Comuni, Regione, Province, ecc.) sullo stato di evoluzione dei fenomeni, 4) contribuire ad individuare le tecniche di monitoraggio più adeguate alle tipologie franose da porre sotto controllo e alle risorse disponibili.

L'attività di monitoraggio è regolamentata dalla norma "D.G.R. 13 Maggio 2022, n. 35-5029 Legge regionale 44/2000. Approvazione Disciplinare per lo sviluppo, la gestione e la diffusione dati di sistemi di monitoraggio su fenomeni franosi del territorio regionale con finalità di prevenzione e governo del territorio, in sostituzione di quello approvato con DGR n. 18-3690 del 16/04/2012", e comporta un processo complesso che va dall'acquisizione dati (anche tramite attività in campo), alla validazione, elaborazione ed interpretazione delle risultanze strumentali, alla predisposizione di relazioni tecniche interpretative.

Per i fenomeni franosi a rapida evoluzione, il cui innesco è connesso in modo specifico alle precipitazioni, il Centro Funzionale di Arpa Piemonte (affidente al Dipartimento Rischi Naturali ed Ambientali) ha sviluppato il sistema di allerta regionale per la previsione dei processi di versante. Tale sistema è basato su tre modelli concepiti *ad hoc* per fenomeni gravitativi di diversa tipologia, il cui innesco è generalmente determinato

da precipitazioni di diversa durata ed intensità, nonché da una diversa influenza esercitata dalle precipitazioni antecedenti.

SLOPS (Shallow Landslides Occurrence Prediction System) (Tiranti *et al.*, 2019) è un modello per il preannuncio delle frane superficiali basato su soglie pluviometriche che, a partire da una Mappa di suscettibilità per l'innesco di frane superficiali, restituisce il probabile numero atteso di fenomeni franosi al superamento delle soglie di innesco per una data area.

TRAPS (Translational/Rotational slides Activation Prediction System) (Tiranti *et al.*, 2013) è il modello che valuta la probabilità di attivazione di frane per scivolamento traslativo/rotazionale, ed è basato sulla relazione tra attivazioni storiche di scivolamenti e valori di precipitazione critici per l'innesco di tali fenomeni (somma della pioggia scatenante l'innesco e delle precipitazioni cadute nei 60 giorni antecedenti). L'area oggetto della valutazione include il territorio collinare delle Langhe cuneesi e astigiane.

DEFENSE (DEbris Flows triggered by storms - Nowcasting System) (Tiranti *et al.*, 2014) è un sistema di monitoraggio e nowcasting che consente di stabilire la probabilità di innesco di un processo torrentizio in bacini idrografici interessati da precipitazioni temporalesche. È basato sulla classificazione dei bacini alpini attraverso il Clay Weathering Index (CWI) e sull'identificazione dei temporali tramite il radar meteorologico che, attraverso l'utilizzo dell'algoritmo TREC (Tracking Radar Echoes by Correlation), è in grado di seguire una o più celle temporalesche durante la loro evoluzione.

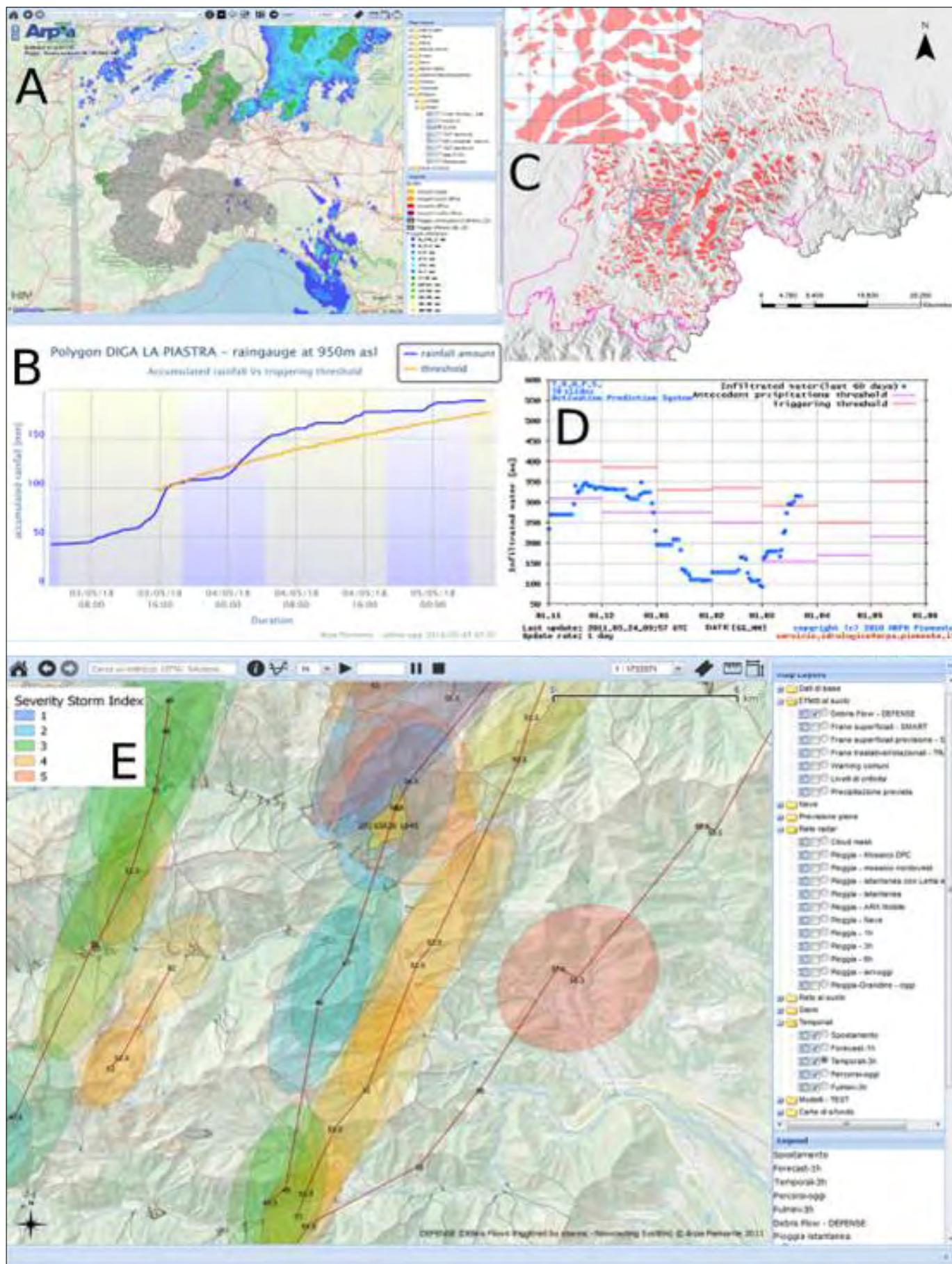


FIGURA 4. Interfaccia dei modelli previsionali: (A) Mappa SLOPS: i poligoni rappresentano le unità di area fondamentali su cui il modello opera le simulazioni, che si colorano in base allo scenario di innesco simulato; (B) esempio di soglia di innesco SLOPS superata dalle precipitazioni; (C) distribuzione degli scivolamenti traslativi e rotazionali simulati dal modello TRAPS nelle Langhe; (D) esempio del sistema a soglie del modello TRAPS. (E) interfaccia del modello DEFENSE: le ellissi rappresentanti le celle temporalesche viste da radar sono contraddistinte da un colore diverso in base alla loro severità. Le loro traiettorie sono rappresentate dalle linee rosse. Se una cella temporalesca di una adeguata intensità interseca un bacino, scatta l'allarme per avvenuto superamento della soglia di innesco (poligono giallo).

La valutazione sulla probabilità di innesco delle frane superficiali è sintetizzata in un bollettino emesso quotidianamente, mentre per gli scivolamenti traslativi è emesso mensilmente un prodotto che descrive lo scenario di probabilità di attivazione/riattivazione dei fenomeni contemplati. La valutazione sull'innesco dei fenomeni torrentizi è invece integrata direttamente all'interno del bollettino di allerta meteoroidrologica e idraulica emesso quotidianamente dal Centro Funzionale. (<https://www.arpa.piemonte.it/bollettini/elenco-bollettini>)

RILEVAMENTO E BANCHE DATI DEI PROCESSI GEO-IDROLOGICI

L'aggiornamento del quadro conoscitivo in merito ai processi di modellamento naturale del territorio, soprattutto in seguito ad eventi alluvionali, è fondamentale per la definizione del quadro del dissesto in Piemonte e l'individuazione delle zone soggette a rischi naturali.

Arpa effettua attività di rilievo in campo, raccoglie informazioni, omogeneizzazione, strutturazione, validazione ed aggiornamento dei dati inerenti ai processi morfodinamici.

I dati vengono acquisiti nell'ambito di attività ordinarie o di rilievi straordinari effettuati in seguito ad eventi parossistici o nel contesto di specifiche attività progettuali. I dati, in formato alfa-numerico, iconografico e cartografico, vengono quindi organizzati all'interno del *SIGeo - Sistema Informativo Geologico* e diffusi attraverso il Geoportale ed il sito istituzionale.

Una parte significativa del SIGeo è rappresentata dalla *Banca Dati Processi ed Effetti* in cui sono contenute informazioni relative ai fenomeni geo-idrologici particolarmente significativi, dai più recenti a quelli storici (risalenti fino al XV secolo). I dati derivano da rilievi dei processi di instabilità naturali effettuati a partire dalla fine degli anni '70 del XX secolo e di dati storici tratti da documentazione archivistica, fonti specialistiche, pubblicazioni scientifiche, articoli di giornale, cronache locali e perizie tecniche.

L'archivio contiene oltre 30.000 informazioni relative ai 32 principali eventi alluvionali, che hanno colpito il territorio piemontese nel XX e XXI secolo, ed ai circa 100 eventi, anche di minor intensità, verificatisi in un arco temporale esteso fino alla metà del XIX secolo.

Il *Sistema Informativo Frane in Piemonte (SIFraP)*, anch'esso sotto-sistema del SIGeo, nasce come estensione del progetto nazionale "Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia" (IFFI, 2002-2005), con l'obiettivo di integrare, sviluppare ed aggiornare costantemente la base dati relativa ai fenomeni franosi in Piemonte. La banca dati è alimentata attraverso il rilievo in campo, lo studio foto-intepretativo di voli aerei multi-temporali e la raccolta ed analisi di dati d'archivio. Le circa 40.000 frane contenute nel SIFraP sono ubicate geograficamente con rappresentazione puntuale o areale e contengono informazioni di base standardizzate (I livello). Parte di queste frane sono corredate di ulteriori informazioni di dettaglio (II livello) o anche di una monografia approfondita (II livello).

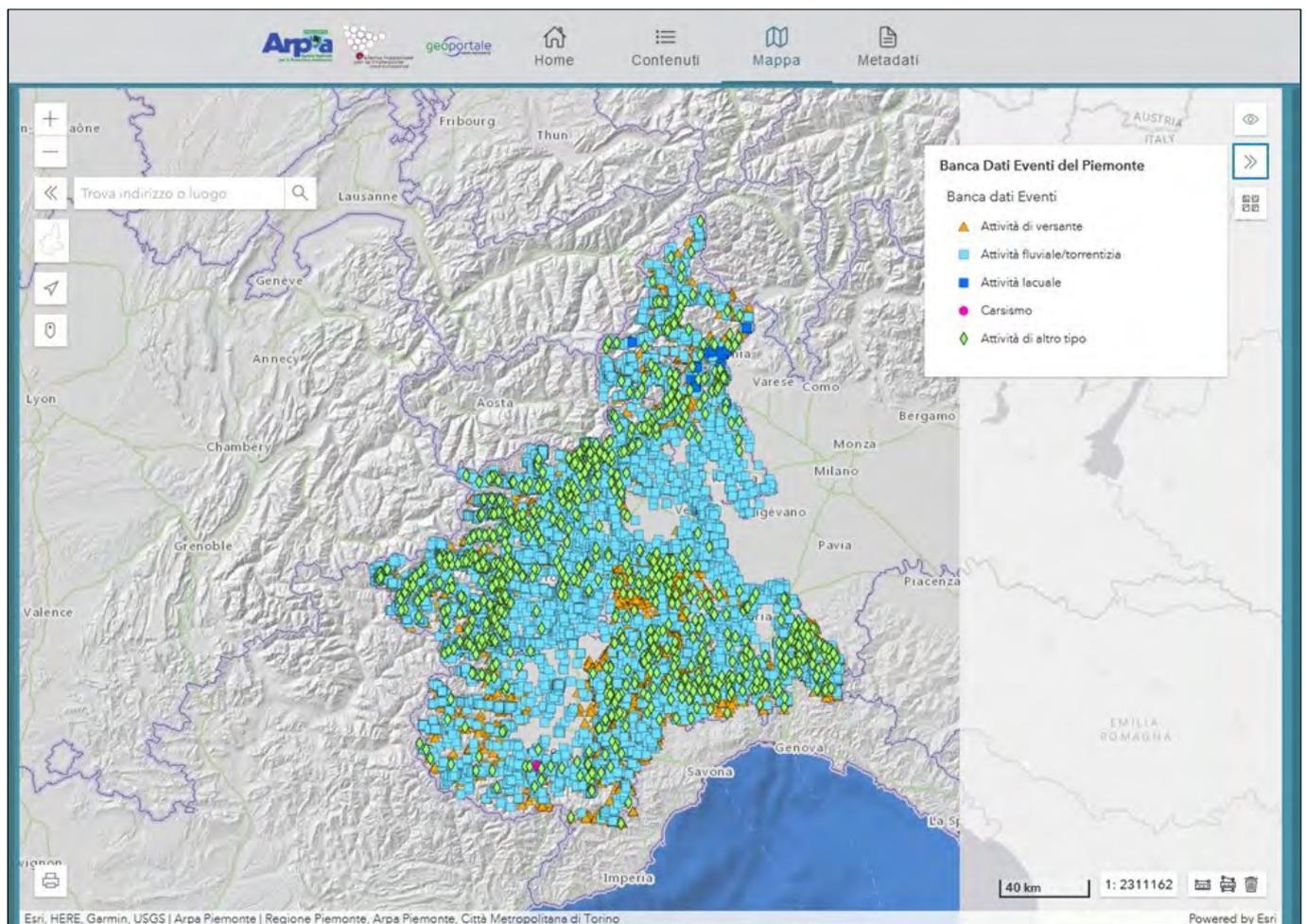


FIGURA 5. Visualizzazione del servizio Banca Dati Eventi del Piemonte nel Geoportale di Arpa Piemonte.

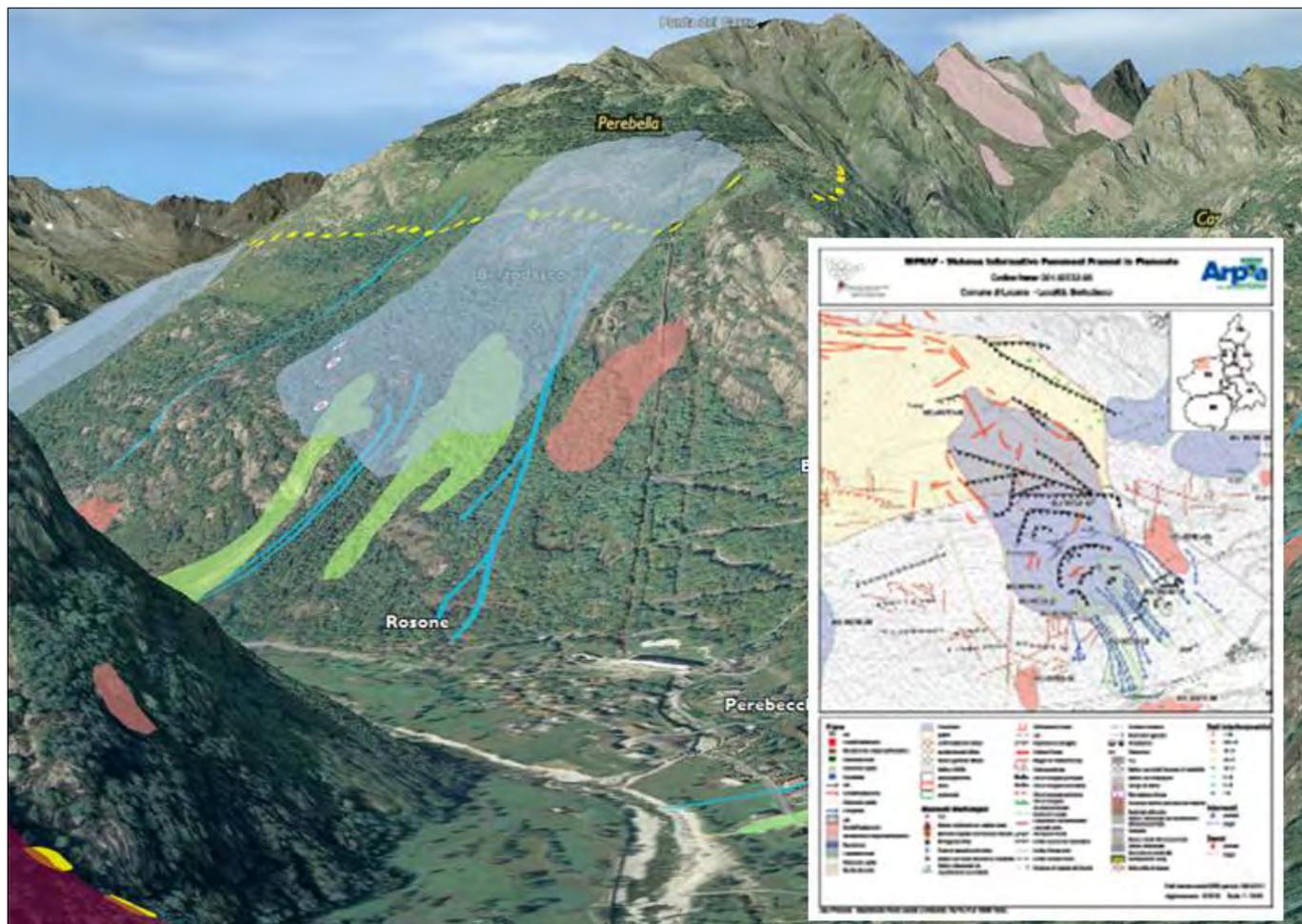


FIGURA 6. Esempio di visualizzazione su modello 3D virtuale del SIFRAP nel Geoportale di Arpa Piemonte. Le aree in frana sono rappresentate con colori diversi in base alla loro classificazione. Ogni geometria è interrogabile per avere informazioni tabellari e grafiche di dettaglio.

STUDIO E MONITORAGGIO DELLA CRIOSFERA

La struttura Monitoraggio e Studi Geologici di Arpa è coinvolta anche nello studio e monitoraggio delle componenti della criosfera delle Alpi piemontesi, in particolare quelli riguardanti la neve, le valanghe, il permafrost e l'ambiente periglaciale.

Arpa Piemonte è membro dell'AINOVA (Associazione Italiana Neve e Valanghe) e in tale ambito fornisce supporto alle attività di *prevenzione del rischio valanghivo*. Con questo obiettivo vengono raccolti dati di altezza del manto nevoso e delle sue caratteristiche sull'intero arco alpino per mezzo della Rete Nivometrica Automatica e della Rete Nivometrica Manuale e del Radar. I dati del manto nevoso vengono elaborati e successivamente integrati con le previsioni meteorologiche nell'ambito delle competenze del Centro Funzionale, al fine della pubblicazione del bollettino di previsione per l'arco alpino piemontese del pericolo valanghe e dei relativi effetti attesi sul territorio. Viene inoltre curato e gestito l'aggiornamento della base dati del *SIVA, Sistema Informativo VALanghe regionale*. Nel sistema informativo confluiscono informazioni cartografiche e descrittive, documenti storici e d'archivio, raccolte nell'ambito della realizzazione di Carte di Localizzazione Probabile delle Valanghe e di carte tematiche specifiche, attraverso studio foto-interpretativo di immagini aeree, rilevamenti di terreno e reperimento di informazioni storiche e testimonianze orali.

La creazione di una base dati ormai più che ventiquennale sull'innnevamento in Piemonte contribuisce inoltre in modo determinante alla caratterizzazione climatica del Piemonte ed alla valutazione ed alla evoluzione della disponibilità delle risorse idriche nella regione.

Le attività di studio e monitoraggio del permafrost e dell'ambiente periglaciale, sono state avviate dal 2006. Nel 2009, grazie all'importante contributo del progetto europeo Alpine Space "PermaNET – Permafrost long-term monitoring Network" (2008÷2011), Arpa ha installato una rete di monitoraggio del permafrost alpino costituita da cinque stazioni ubicate tra i 2500 ed i 3020 m di quota (attrezzate con catene termometriche inserite in fori di sondaggio verticali, profondi da 5 a 100 m) e ha implementato un servizio istituzionale specifico denominato "B3.19 - Monitoraggio del permafrost". Il *permafrost* (contrazione dei termini inglesi "*perennially frozen ground*") viene definito come terreno o roccia che presenta una temperatura minore o uguale a 0 °C per almeno due anni consecutivi, indipendentemente dalla presenza di ghiaccio (Muller, 1947; French, 2007). Il permafrost e la sua evoluzione sono importanti indicatori del cambiamento climatico, condizionano la stabilità dei versanti e influiscono sulla idrologia ed idrogeologia delle acque alpine.

Nell'ambito del servizio B3.19, Arpa si occupa anche del monitoraggio GST (Ground Surface Temperature), delle misurazioni BTS (Bottom Temperature of the Snow) e di approfondimenti specialistici. Il monitoraggio GST,

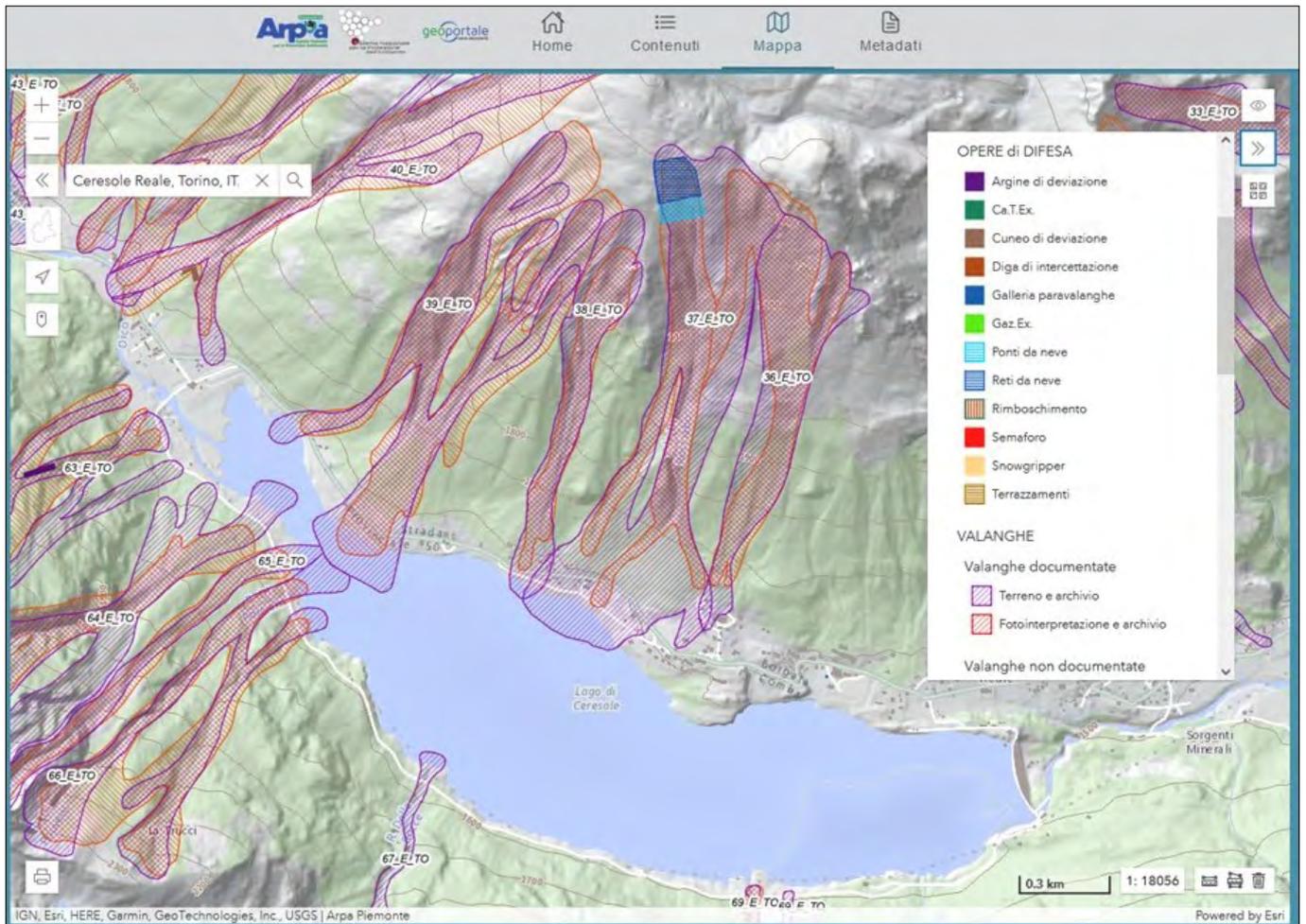


FIGURA 7. Esempio di visualizzazione del servizio SIVA dal Geoportale di Arpa Piemonte con la perimetrazione delle aree di valanga ed un esempio di scheda tabellare di dati a corredo.

che consente di valutare il trasferimento di calore tra atmosfera e geosfera, viene effettuato tramite termometri inseriti nei geomateriali a profondità variabili da 2 a 120 cm (circa 150 sensori in tutte le Alpi piemontesi). Un particolare ambiente in cui viene effettuato tale monitoraggio è quello delle cavità ipogee con e senza ghiaccio. Le misure BTS consistono in misure della temperatura dell'interfaccia

neve-suolo, effettuate verso la fine dell'inverno o all'inizio della primavera, prima che inizi la fusione nivale. In base a regole empiriche, l'interpolazione su una superficie ampia di tali punti consente di spazializzare la distribuzione del permafrost (circa 2000 punti BTS nel periodo 2009-2021). Gli approfondimenti specialistici vengono effettuati in collaborazione con vari enti ed istituzioni, in occasione dei



FIGURA 8. Nel Geoportale di Arpa è stata creata un'apposita sezione dedicata agli itinerari geologici in Piemonte, fruibili attraverso il web.

progetti europei o in ambito di collaborazioni sviluppate ad hoc. Tra le tecniche maggiormente utilizzate vi sono le campagne geofisiche (tomografie di resistività elettrica, geo-radar, sisimica passiva), i rilievi fotogrammetrici di precisione tramite “drone” e le analisi delle relazioni tra criosfera e le risorse idriche (maggiori info: <https://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/temi-ambientali/geologia-e-dissesto/permafrost/monitoraggio-permafrost>).

EDUCAZIONE AMBIENTALE E DIVULGAZIONE DELLE GEOSCIENZE

L'attività di informazione, formazione ed educazione ambientale costituisce parte integrante dei compiti istituzionali dell'Agenzia come previsto esplicitamente già nella legge istitutiva. La struttura Monitoraggio e Studi Geologici è attiva in questo ambito con numerose iniziative di educazione ambientale, rivolte in particolare alle scuole primarie e secondarie, per diffondere la conoscenza del territorio, del patrimonio geologico della regione e delle problematiche legate ai rischi naturali. Numerose anche le proposte per la divulgazione delle Geoscienze rivolte alla cittadinanza, ad esempio nell'ambito di eventi come la Settimana del Pianeta Terra, la Settimana della Scienza e le Porte aperte all'Arpa. In questi contesti vengono proposti incontri, conferenze, esperimenti, eventi web, geo-itinerari reali o virtuali per consentire alle numerose persone interessate di conoscere le peculiarità geologiche e geomorfologiche del Piemonte.

CONCLUSIONI

Il Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali di Arpa Piemonte realizza, nei diversi ambiti geografici del Piemonte, processi di studio, analisi, monitoraggio e controllo nel campo della geologia, in merito a litologia, assetto geologico-strutturale, idrogeologia e geomorfologia, con particolare attenzione ai processi di modellamento naturale che agiscono sul territorio, in particolare riguardanti le piene fluviali e torrentizie e le frane, noti comunemente come fenomeni di “dissesto geo-idrologico”.

Le competenze in ambito geologico sono alla base del programma di previsione del rischio di origine naturale che Arpa Piemonte promuove per un'equilibrata pianificazione delle attività antropiche, governo del territorio e per una concreta azione di salvaguardia ambientale e della salute delle persone.

I variegati aspetti connessi alle conoscenze geologiche del territorio confluiscono nel sistema informativo della Banca Dati Geologica che consente di effettuare in tempi brevi analisi complesse di dati, quali aggregazioni, associazioni e confronti simultanei delle differenti informazioni. I dati geotematici della BDGeo sono distribuiti in rete attraverso vari servizi del Geoportale. Le informazioni sono rese fruibili al pubblico dando ragione della genealogia e qualità del dato ed esplicitando i vincoli per un loro corretto utilizzo.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E INTERNET

Carta Geologica Interattiva del Piemonte (Progetto GeoPiemonteMap), a cura di CNR IGG (Istituto di Geoscienze e Georisorse, sede di Torino), ARPA

Piemonte, e con il contributo di Dipartimenti di Scienze della Terra e di Informatica dell'Università di Torino 2021 - Accademia delle Scienze di Torino.

Linee Guida per il monitoraggio delle frane, Linee guida SNPA n. 32/2021 – ISBN: 978-88-448-1071-9.

Atlante Europeo delle Radiazioni Naturali, a cura del JRC della Commissione Europea, luglio 2020.

Dalla valutazione alla previsione dei rischi naturali, Arpa Piemonte - Area Regionale di Previsione e Monitoraggio Ambientale; Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche, 2005.

ARPA PIEMONTE (2004), *Il Progetto IFFI in Piemonte: Inventario dei fenomeni franosi in Italia*. Archivio Centro regionale per le ricerche territoriali e geologiche.

TIRANTI D., NICOLÒ G., GAETA A. R. (2019). *Shallow landslides predisposing and triggering factors in developing a regional early warning system*. *Landslides* 16:2, 235-251. doi:10.1007/s10346-018-1096-8.

TIRANTI D., CREMONINI R., MARCO F., GAETA A.R., BARBERO S. (2014). *The DEFENSE (DEbris Flows triggered by storms - Nowcasting SystEm): an early warning system for torrential processes by radar storm tracking using a Geographic Information System (GIS)*. *Computers & Geosciences* 70: 96-109. doi:10.1016/j.cageo.2014.05.004.

TIRANTI D., RABUFFETTI D., SALANDIN A., TARABRA M. (2013). *Development of a new translational and rotational slides prediction model in Langhe hills (north-western Italy) and its application to the 2011 March landslide event*. *Landslides* 10 (2): 121-138. doi:10.1007/s10346-012-0319-7.

Link a pagine internet

<http://www.arpa.piemonte.it/>

<http://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/temi-ambientali/geologia-e-dissesto>

Modelli previsionali frane – sito istituzionale Arpa Piemonte

<http://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/temi-ambientali/idrologia-e-neve/frane>

Geoportale Arpa

<https://geoportale.arpa.piemonte.it/app/public/>

Portale Rischi Naturali – Arpa Piemonte

<http://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali>

Relazione Stato Ambiente Piemonte 2021

<http://relazione.ambiente.piemonte.it/2022/it>

GeoPiemonteMap

<https://webgis.arpa.piemonte.it/agportal/apps/webappviewer/index.html?id=6ea1e38603d6469298333c2efbc76c72>

Banca dati Geotecnica

<https://webgis.arpa.piemonte.it/agportal/apps/webappviewer/index.html?id=2067aa1af4aa44a5a6855a9d30cb5467>

Banca Dati Eventi

<https://webgis.arpa.piemonte.it/agportal/apps/webappviewer/index.html?id=64fa4e903e684743b19d2cf4c0966b79>

Itinerari Geologici in Piemonte

https://webgis.arpa.piemonte.it/secure_apps/geoitinerari_piemonte/

Il Parco del Marguareis: un laboratorio naturale per la didattica e la ricerca in un'area ad elevata geodiversità

The Marguareis Park: a natural laboratory for teaching and research in an area of high geodiversity

CARLO BERTOK¹, ANNA D'ATRI*^{1,2}, LUCA BARALE², LUCA MARTIRE¹, FABRIZIO PIANA²

¹ Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra, Torino, Italy

² CNR-IGG unità di Torino, Italy

*E-mail: anna.datri@unito.it

Parole chiave: Geoturismo, Geodiversità, Ambienti sedimentari, Parco del Marguareis, storia Permiano-Cenozoico
Key words: Geotourism, Geodiversity, Sedimentary environments, Marguareis Park, Permian–Cenozoic history

RIASSUNTO

Il Parco naturale del Marguareis è un'area protetta che si trova nelle Alpi Liguri occidentali. All'interno del parco grazie all'esposizione spettacolare è possibile vedere in modo completo la successione delle rocce formate tra il Permiano (300 Ma) e l'Oligocene inferiore (34 Ma), deformate durante la formazione della catena alpina e infine modellate dagli agenti atmosferici negli ultimi milioni di anni, creando il paesaggio come lo vediamo oggi. La storia geologica del Massiccio del Marguareis è raccontata lungo un itinerario escursionistico segnalato sul territorio (il Geotour del Marguareis) e per il quale è stata prodotta una cartoguida per "leggere" il paesaggio nei suoi aspetti geologici e morfologici. Essa comprende una carta geologica di parte dell'area del Parco su cui è stato riportato un itinerario geologico che segue uno dei principali percorsi escursionistici (il Giro del Marguareis), su cui sono posizionati 16 stop segnalati sul terreno e descritti con linguaggio semplice in modo da permettere anche ad un pubblico non specialista di riconoscere i diversi momenti della storia geologica dell'area del Parco del Marguareis.

1. INTRODUZIONE

Il Parco naturale del Marguareis, che fa parte dell'Ente Aree Protette Alpi Marittime, è un'area naturale protetta della Regione Piemonte che copre parte della Valle Pesio e dell'Alta Val Tanaro, nelle Alpi Liguri occidentali. Prende il nome dalla Punta Marguareis, la più alta delle Alpi Liguri. All'interno del parco, al di sopra dei 2000 m, l'altitudine e l'assenza di vegetazione dovuta alla composizione prevalentemente carbonatica del substrato permettono un'esposizione spettacolare delle rocce che costituiscono il massiccio del Marguareis. Questo consente di poter leggere in modo completo e dettagliato la storia geologica dell'area durante l'intervallo di tempo che va dalla formazione delle rocce più antiche presenti (Permiano, 300 Milioni di anni fa) fino all'attuale rendendo questa zona un vero e proprio laboratorio naturale sia per l'attività di ricerca sia

per la divulgazione scientifica. La grande geodiversità che caratterizza l'area, dove è possibile osservare rocce di età e ambienti molto diversi, permette di descrivere in modo semplice e adatto anche ad un pubblico non specialista una storia geologica lunga 300 Milioni di anni.

A partire dagli anni '60 l'attività di ricerca in quest'area si è concentrata nello studio stratigrafico e sedimentologico della successione stratigrafica affiorante (Campredon *et al.* 1967; Vanossi 1970), appartenente al dominio Brianzone-Ligure Esterno, e nell'analisi strutturale degli eventi deformativi responsabili della formazione della catena alpina (Gosso *et al.* 1983). A partire dagli anni 2000 si è formato un gruppo di ricerca costituito da personale del Dipartimento di Scienze della Terra di Torino e del CNR-IGG Unità di Torino, che ha svolto una attività di ricerca documentata dalla pubblicazione di numerosi lavori (Piana *et al.* 2009, 2014, Bertok *et al.* 2011, 2012, 2018), alla realizzazione di parecchie tesi triennali e magistrali e di due tesi di dottorato che hanno permesso di chiarire l'evoluzione tettonico-sedimentaria della successione affiorante nel Massiccio del Marguareis. A partire dagli anni '80 il Parco del Marguareis è diventato sede di attività didattiche per gli studenti dei corsi di laurea in Scienze geologiche dell'Università di Torino, che svolgono escursioni didattiche e stage di Rilevamento geologico, Geologia strutturale e Geologia del sedimentario con sede alla Capanna Morgantini e più recentemente al rifugio Don Barbera. Negli ultimi anni a queste attività si è affiancata un'attività di divulgazione da parte di personale del Dipartimento di Scienze della Terra di Torino e del CNR-IGG Unità di Torino, in collaborazione con il Parco del Marguareis, con la realizzazione di itinerari geologici lungo i sentieri del parco. Il primo itinerario proposto (d'Atri *et al.*, 2012; Bertok *et al.*, 2015) è stato realizzato all'interno del progetto multidisciplinare "PROGEO-Piemonte" (PROactive management of Geological heritage in the PIEMONTE region, Giardino, 2012), cofinanziato da Compagnia di San Paolo e Università di Torino; questo itinerario è anche disponibile on line

sul sito di ProGeo Piemonte (<http://progeopiemonte.it/aree/il-massiccio-del-marguareis/>) e descritto nel volume Perotti *et al.* (2019).

L'ultima pubblicazione divulgativa realizzata dal gruppo di ricerca di Torino è stata il Geotour del Marguareis (Bertok *et al.* 2017), una cartoguida che comprende una carta geologica di parte dell'area del parco su cui è stato riportato un itinerario geologico lungo uno dei principali percorsi all'interno del parco (il Giro del Marguareis), con 16 stop segnalati sul terreno. Questo itinerario permette di descrivere la storia geologica che possiamo leggere osservando la successione affiorante nel Massiccio del Marguareis.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area del Parco del Marguareis appartiene alla porzione centrale del Dominio Brianzonese Ligure Esterno (Fig. 1), corrispondente a parte del margine passivo europeo formato in seguito all'apertura nel Giurassico Medio della Tetide alpina. Questo settore è costituito da unità tettoniche di estensione chilometrica, in cui le successioni sono caratterizzate da un grado metamorfico molto basso (Piana *et al.* 2014). La deformazione si concentra in particolari livelli stratigrafici caratterizzati da una composizione calcareo-marnosa, per cui le caratteristiche sedimentolo-

giche delle diverse unità e le loro relazioni stratigrafiche originarie risultano ben preservate (Piana *et al.* 2009), ed è quindi facilmente riconoscibile l'evoluzione tettonico-sedimentaria nel tempo.

Il termine più antico che affiora nel Parco del Marguareis (Bertok *et al.*, 2018) è rappresentato da rocce vulcaniche e vulcanoclastiche di età Carbonifero superiore-Permiano seguite da depositi terrigeni e poi carbonatici di mare basso del Triassico e da una successione giurassico-cretacea condensata deposta in un settore rilevato del margine passivo europeo della Tetide alpina, il Brianzonese Ligure. La successione termina con sedimenti cenozoici deposti nel Bacino di avansfossa alpino che si è formato a partire dalle prime fasi collisionali che hanno portato alla formazione della catena alpina.

Nella letteratura geologica la successione del Dominio Brianzonese Ligure è stata suddivisa in unità litostratigrafiche delimitate da superfici di discontinuità corrispondenti a hiatus importanti che corrispondono ad eventi significativi nell'evoluzione geologica dell'area (Vanossi 1970, 1972; Boni *et al.* 1971; Vanossi *et al.* 1984; Bertok *et al.* 2018). Per facilitare la lettura da parte del pubblico non specialista nella carta del Geotour del Marguareis i nomi formali delle unità litostratigrafiche non sono stati utilizzati; le unità sono state invece denominate utilizzando la

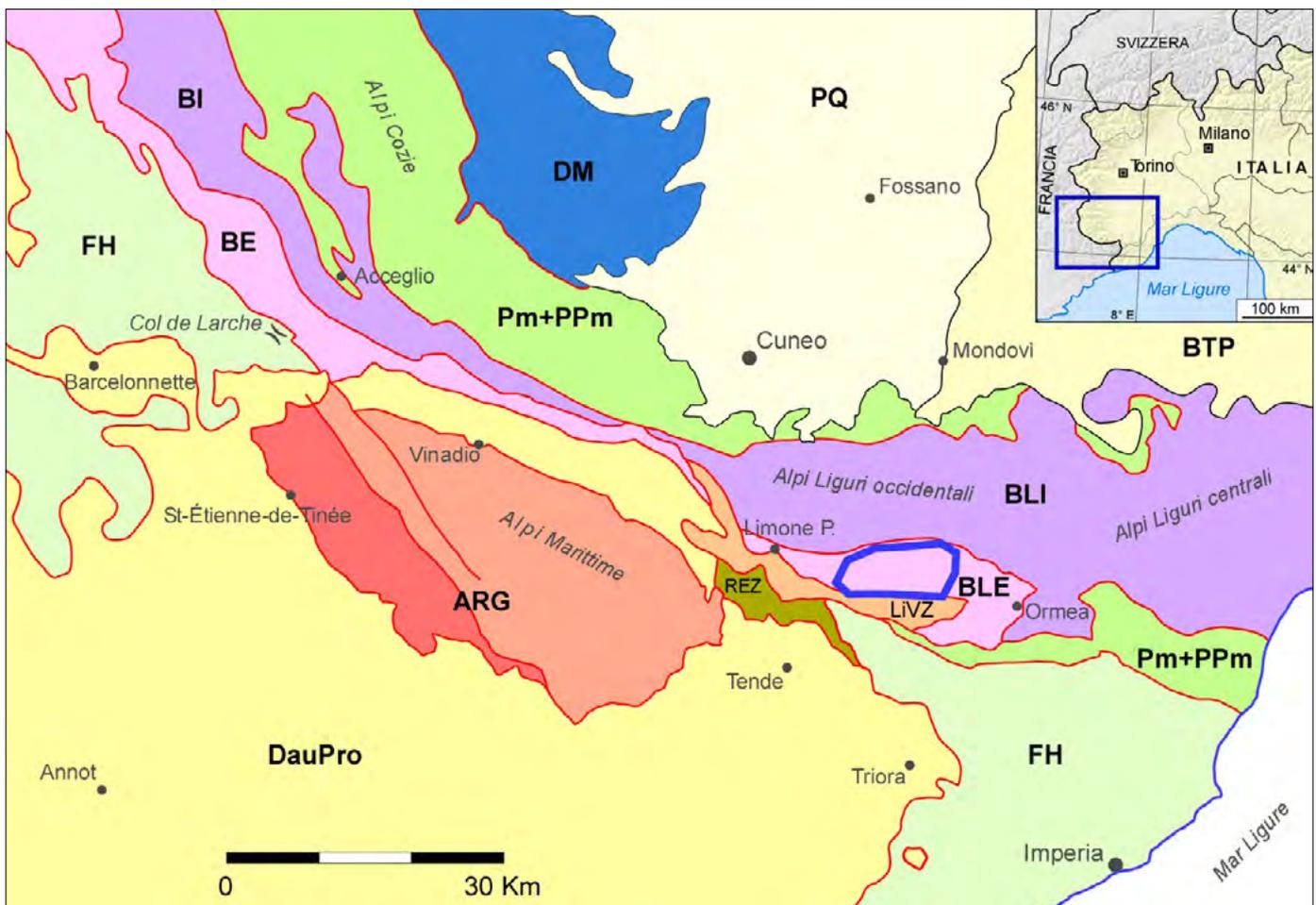


FIGURA 1. Schema geologico delle Alpi sud-occidentali. Il poligono blu individua l'area del Geotour del Marguareis. ARG: massiccio dell'Argentera; BE: dominio Brianzonese Esterno; BI: dominio Brianzonese Interno; BLE: dominio Brianzonese Ligure Esterno; BLI: dominio Brianzonese Ligure Interno; BTP: Bacino Terziario Piemontese; DauPro: domini Delfinese e Provenzale; DM: massiccio del Dora Maira; FH: Flysch ad *Helminthoides*; LiVZ: Zona di deformazione Limone-Viozene; Pm+PPm: domini Piemontese e Pre-Piemontese; PQ: depositi Plio-Quaternari; REZ: zona di deformazione del Refrey. Ridisegnato da d'Atri *et al.* (2016).

litologia prevalente e l'età. In Fig. 2 è riportata la colonna stratigrafica utilizzata nella carta; per completezza sono indicati anche i nomi formali delle unità litostratigrafiche (Bertok *et al.*, 2018).

3. IL GEOTOUR DEL MARGUAREIS

L'oggetto del Geotour del Marguareis, realizzato nel 2017, è la storia geologica del Massiccio del Marguareis: si tratta di un percorso escursionistico segnalato sul ter-

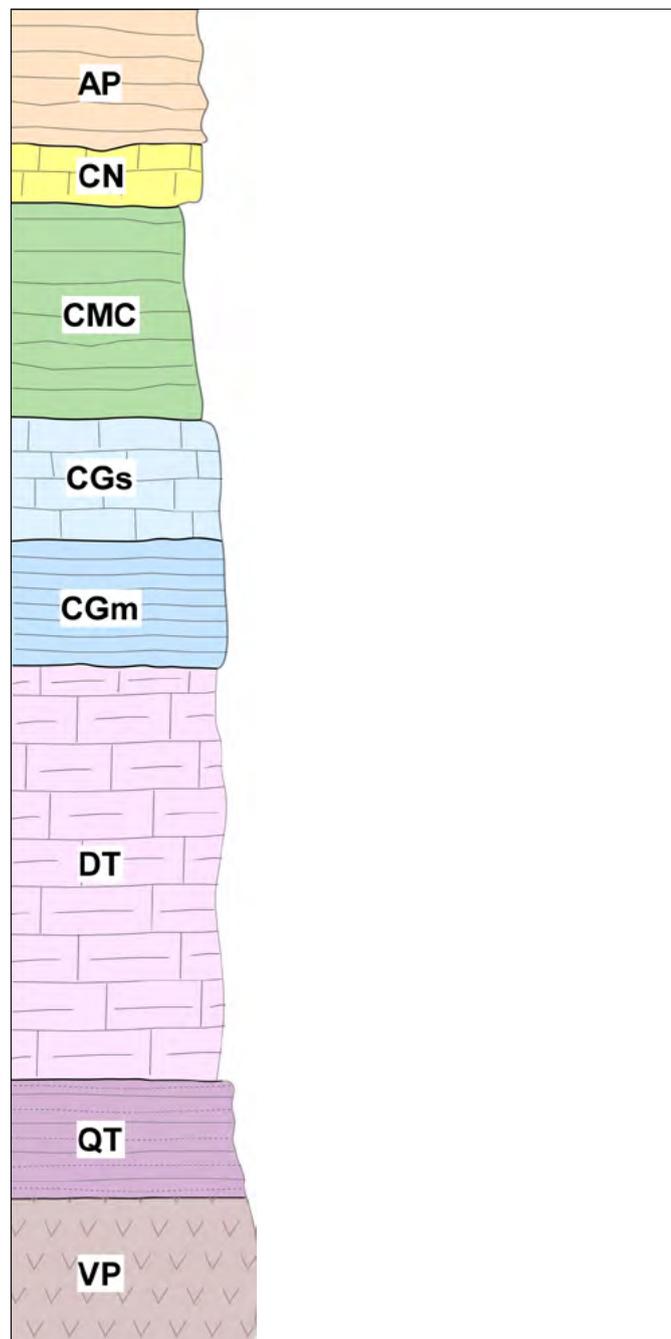


FIGURA 2. Colonna stratigrafica utilizzata nella carta del Geotour del Marguareis. Di seguito, tra parentesi, si riportano anche i corrispondenti nomi formali delle unità litostratigrafiche. VP: Vulcaniti del Permiano (Porfiroidi del Melogno); QT: Quarzareniti del Triassico inferiore (Quarzareniti di Ponte di Nava); DT: Dolomie del Triassico medio (Dolomie di San Pietro dei Monti); CGm: Calcarei del Giurassico medio (Calcarei di Rio di Nava); CGs: Calcarei del Giurassico superiore (Calcarei di Val Tanarello); CMC: Calcarei marnosi del Cretacico superiore (Calcarei di Upega); CN: Calcarei a Nummuliti (Calcarei a Nummuliti); AP: Argilliti del Paleogene (Grès d'Annot).

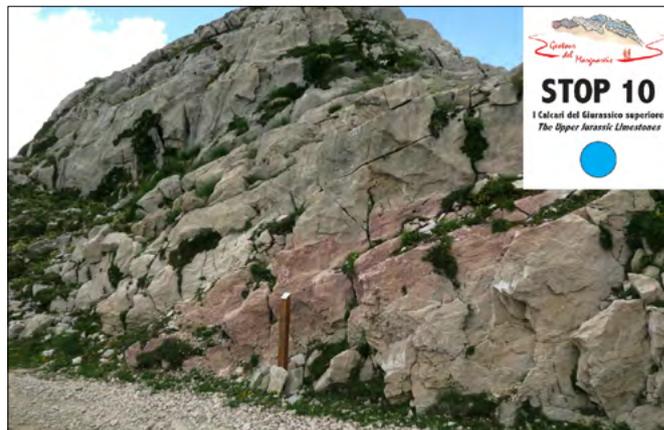


FIGURA 3. Esempio di Stop, individuato da corrispondente palo segnaletico. In alto a destra dettaglio della targhetta apposta sull'estremità superiore del palo.

ritorio e per il quale è stata prodotta una cartoguida che illustra il paesaggio nei suoi aspetti geologici e morfologici. L'iniziativa è frutto di un progetto di divulgazione geologico-turistica realizzato da personale del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Torino, del CNR-IGG di Torino e del DIATI del Politecnico di Torino, in collaborazione con l'Ente Aree Protette Alpi Marittime e finanziato da CRT. Il Geotour del Marguareis si sviluppa in parte lungo il tracciato del Giro del Marguareis (<https://www.alpicuneesi.it/percorsi/giodelmarguareis/>) e relative varianti, in parte lungo l'Alta Via del Sale, percorsi molto noti e frequentati all'interno del parco. Il Geotour offre a tutti gli escursionisti impegnati su tali sentieri l'opportunità di osservare molteplici aspetti della geologia di questa regione, caratterizzata da eccezionali condizioni di esposizione delle rocce.

Sulla cartoguida è presente una carta geologica semplificata su cui sono riportati il tracciato del Geotour del Marguareis e 16 punti di osservazione (Stop). Sono anche descritti i principali processi geologici riconoscibili lungo il percorso, ciascuno indicato con un colore diverso:

- *Le rocce si formano (blu)*: viene riportata una sintesi della storia geologica tra 300 e 30 Ma attraversata dall'itinerario.
- *Le rocce si deformano (rosso)*: si descrive quello che succede a partire da 30 Ma fa, quando inizia a formarsi la catena alpina e le rocce, portate in profondità, vengono sottoposte a sforzi tettonici e deformate.
- *Le rocce si modellano (verde)*: viene descritto quello che accade negli ultimi milioni di anni quando le rocce vengono esposte all'azione delle acque e dei ghiacciai, lasciando sulla superficie forme caratteristiche e nel sottosuolo sistemi carsici importanti.

Sul retro della carta gli Stop sono descritti con testi, foto e disegni. Ad ogni Stop corrisponde un palo segnaletico sul terreno (Fig. 3), contrassegnato dal logo del Geotour, da un numero e da uno o più pallini il cui colore fa riferimento ai principali processi geologici illustrati nello Stop.

Gli Stop sono descritti secondo una ideale progressione in senso orario lungo tutto il tracciato escursionistico, con punto di partenza e arrivo in località Pian delle Gorre. Tuttavia, ognuno di essi è stato realizzato per una lettura

indipendente, in modo da permettere la fruizione del Geotour anche a chi percorre solo alcuni tratti dell'itinerario, o ne inizi la percorrenza da un diverso punto di partenza.

La carta del Geotour del Marguareis è in vendita in tutti i rifugi del Giro del Marguareis, presso la sede dell'Ente Aree Protette Alpi Marittime e i Centri visita e informazioni. La cartoguida si acquista anche sul sito fraternalieditore.com

4. LA STORIA GEOLOGICA DEL MARGUAREIS

La storia geologica che possiamo ricostruire dalla successione affiorante nel Parco del Marguareis è principalmente legata all'apertura dell'oceano della Tetide alpina e alla sua successiva chiusura a partire dal Cretacico Superiore che ha portato alla collisione fra i due margini continentali e la conseguente formazione della catena alpina. Questa storia molto lunga e complessa è testimoniata dal cambiamento degli ambienti di sedimentazione nel tempo, facilmente riconoscibile nelle rocce che si incontrano nel Massiccio del Marguareis.

Questa lunga storia è suddivisibile in 4 momenti (Lemoine *et al.*, 1986; Mohn *et al.*, 2010; Bertok *et al.*, 2011): una fase precedente il rifting giurassico (fase pre-rift), una fase distensiva di rifting nel Giurassico Inferiore (fase sin-rift), una fase di apertura dell'oceano con formazione dei due margini continentali europeo e africano nel Giurassico Medio-Cretacico Superiore (fase post-rift), una di chiusura definitiva dell'oceano con collisione tra i due margini continentali e inizio della formazione della catena alpina tra la fine del Cretacico Superiore e l'Eocene medio.

Fase pre-rift. Dopo l'orogenesi varisica nel Carbonifero-Permiano si depone una potente successione vulcanica e vulcanoclastica legata ad un magmatismo riolitico (Vulcaniti del Permiano-Porfroidi del Melogno), seguita nel Triassico Inferiore da quarzareniti e conglomerati dapprima continentali poi di mare basso (Quarzareniti del Triassico Inferiore-Quarzareniti di Ponte di Nava). Questa fase si conclude con la deposizione nel Triassico Medio di calcari e dolomie di piana tidale in condizioni di clima arido evidenziato dalla presenza di pseudomorfo di minerali evaporitici (Dolomie del Triassico Medio-Dolomie di San Pietro dei Monti).

Fase sin-rift. La fase distensiva di rifting porta alla creazione di alti e bassi strutturali all'interno del settore che diventerà il margine passivo europeo. Il Brianzonese rappresenta il settore più rilevato, che nel Triassico Superiore-Giurassico Inferiore emerge. Si forma una superficie di discontinuità erosionale corrispondente ad una lacuna di circa 67 Ma, in corrispondenza della quale si ritrovano indizi di emersione, con suoli rossastri, breccie a matrice pelitica rossa e sviluppo di morfologie carsiche (Siderolitico *Auct.*).

Fase post-rift. Nel Giurassico Medio, quando inizia ad aprirsi l'oceano della Tetide alpina, il Brianzonese subisce una fase di subsidenza che porta ad una trasgressione, con la

deposizione di calcari neri ricchi di sostanza organica depositi in un ambiente di mare basso con scarsa circolazione delle acque (Calcari del Giurassico Medio-Calcari di Rio di Nava). Seguono nel Giurassico Superiore depositi carbonatici di ambiente sempre più profondo, fino ad arrivare a calcari nodulari depositi in un ambiente di altofondo pelagico spazzato dalle correnti (Calcari del Giurassico Superiore-Calcari di Val Tanarello). Nel Cretacico Inferiore su questo altofondo non si ha sedimentazione, ma la formazione di un hard ground mineralizzato corrispondente ad una lacuna stratigrafica. Nel Cretacico Superiore, infine, si depongono calcari marnosi emipelagici di ambiente relativamente profondo in cui gli apporti terrigeni argillosi sono da mettere in relazione con le prime fasi compressive che porteranno alla chiusura della Tetide alpina (Calcari marnosi del Cretacico Superiore-Formazione di Upega).

Fase di collisione e formazione della catena alpina. Tra la fine del Cretacico Superiore e l'Eocene medio avviene la chiusura della Tetide alpina e la collisione tra i due margini continentali europeo e africano. Al di sopra del margine passivo europeo si sviluppa un nuovo bacino (denominato Bacino di avanfossa alpina) in cui si depongono tra l'Eocene medio e l'Oligocene inferiore prima sedimenti di mare basso ricchi di fossili (Calcari a Nummuliti), poi marne emipelagiche (Marne a *Globigerina*) ed infine depositi torbiditici fini (Argilliti del Paleogene-Flysch Noir). Successivamente, durante l'Oligocene ed il Miocene, anche i sedimenti del bacino di avanfossa sono incorporati nella catena orogenica ad opera della tettonica alpina, che ne modifica i rapporti originari con il substrato mesozoico e determina il sollevamento generale della catena nel Pliocene.

5. ITINERARIO E STOP

L'itinerario proposto (Fig. 4) parte e arriva al Rifugio Pian delle Gorre e segue un percorso circolare lungo il Giro del Marguareis, con una deviazione verso il Rifugio Mongioie. Il percorso passa dai principali rifugi della zona (Rifugio Garelli, Rifugio Mondovì, Rifugio Mongioie, Rifugio Don Barbera, Capanna Morgantini) e comprende 16 Stop descritti sul retro della cartoguida.

Pian delle Gorre è un piccolo pianoro impostato sui resti di un'antica morena. Il primo tratto del percorso segue una pista forestale e poi una serie di pianori poco pendenti legati all'azione glaciale. Nei pressi del Rifugio Garelli si gode una vista panoramica sulla parete nord del Marguareis dove si ha una prima vista d'insieme di quasi tutte le rocce osservabili lungo l'intero Geotour (Stop 1, Fig. 5); tornati al rifugio è invece possibile osservare da vicino e toccare con mano le rocce più antiche affioranti nel Marguareis, le Vulcaniti del Permiano (Stop 2) legate ad un'intensa attività vulcanica in un ambiente continentale.

Dal Rifugio Garelli l'itinerario prosegue verso Porta Sestrera superando una serie di salti ricoperti da prati inerbiti; sulla destra rispetto al senso di marcia si sviluppa una dorsale rocciosa molto articolata denominata Rastelli Sestrera, costituita dalle Quarzareniti del Triassico Inferiore. Giunti a Porta Sestrera la vista spazia sulle dorsali calcaree

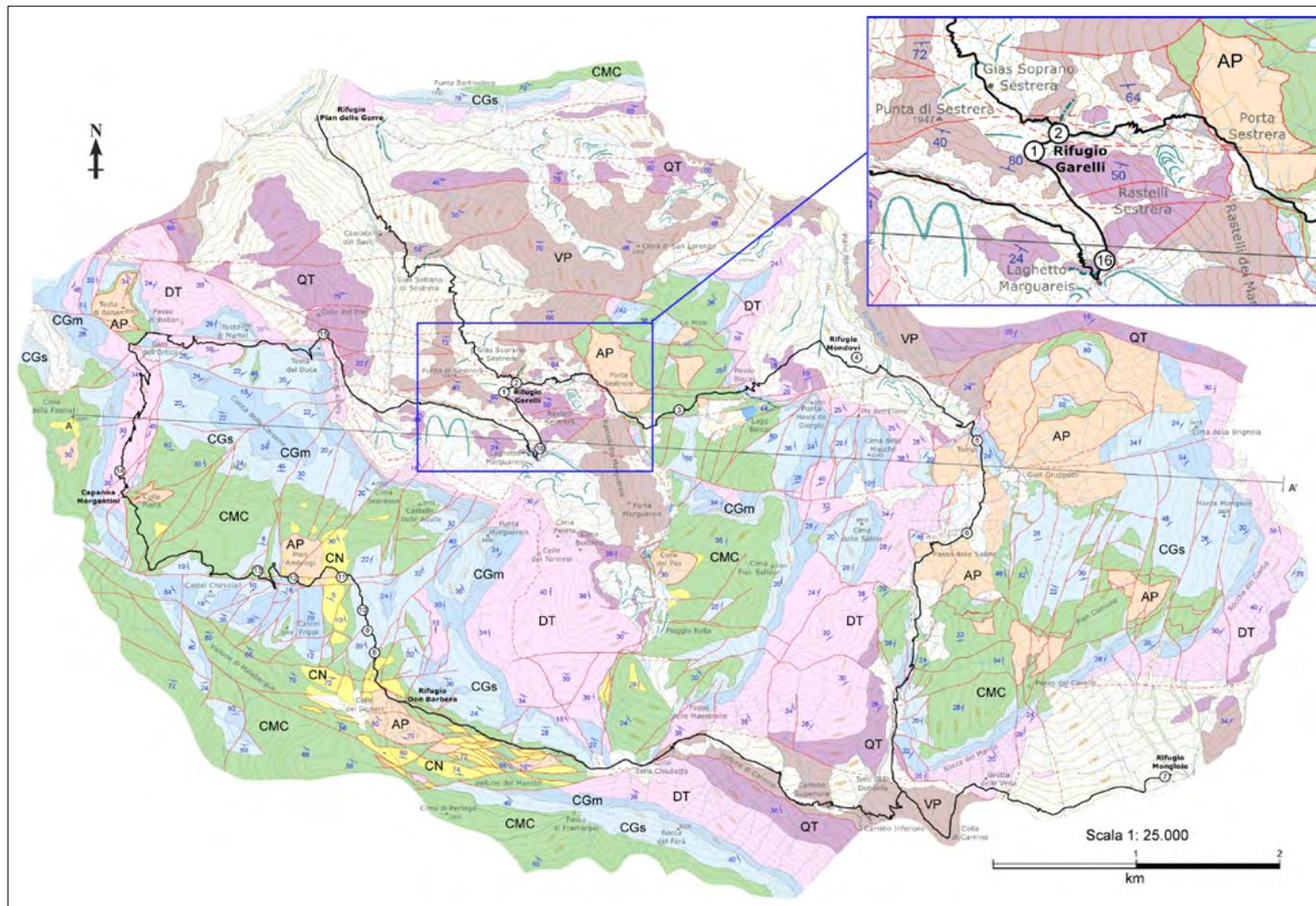


FIGURA 4. Carta geologica presente sul fronte della cartoguida del Geotour del Marguareis, su cui è riportato il tracciato del Geotour e l'ubicazione dei 16 Stop. Nel rettangolo blu è riportato un ingrandimento. Le sigle sono quelle indicate nella legenda di Fig. 2.

del massiccio Masche-Saline-Pian Ballaur, in gran parte costituite dai Calcari del Giurassico Medio e Superiore. Nella prima parte della discesa verso il Rifugio Mondovì è sempre ben visibile la conca del Biecai formata per sottoscavazione glaciale, parzialmente riempita da un lago effimero durante il periodo primaverile (Stop 3). Dopo alcune centinaia di metri si raggiunge il Passo Biecai, seguito da un ripido pendio sospeso sulla sottostante vallata che rappresenta un bell'esempio di valle sospesa e soglia glaciale. I tornanti del sentiero che discendono il ripido pendio sono impostati all'interno delle Dolomie del Triassico Medio, riconoscibili per il colore grigio chiaro e la visibile stratificazione. Dalla base del pendio la natura delle rocce cambia completamente, e corrisponde a un brusco cambio della vegetazione. Da questo punto in poi, fin quasi al Rifugio Mondovì, il sentiero attraversa le Quarzareniti del Triassico Inferiore, la cui composizione chimica molto ricca di silice favorisce la crescita di piante acidofile come il rododendro, che al contrario non possono sopravvivere su un substrato costituito da rocce carbonatiche come le Dolomie del Triassico Medio. Nell'area circostante il Rifugio Mondovì si riconoscono una serie di affioramenti rocciosi costituiti da Vulcaniti del Permiano. Da questa posizione è possibile osservare con continuità un'ampia porzione della successione stratigrafica, esposta sulle pareti settentrionali della Cima delle Masche e della Punta Havis de Giorgio (Stop 4).

Dal Rifugio Mondovì l'itinerario si sviluppa in direzione del Monte Mongioie lungo un tipico vallone glaciale. Il

percorso principale segue la pista verso il Gias Gruppetti fino a una zona caratterizzata da numerose depressioni carsiche, conosciute con il nome di Tumpi (Stop 5, Fig. 6). Dai Tumpi il tour abbandona la pista e segue un sentiero che si snoda su versanti prativi impostati sulle Argilliti del Paleogene fino a raggiungere il Passo delle Saline, localizzato in corrispondenza di una importante faglia (Stop 6). Oltre il Passo delle Saline il sentiero prosegue in discesa verso l'abitato di Carnino con una serie di tornanti scavati ancora nelle Argilliti del Paleogene. Qualche centinaio di metri più in basso, il sentiero passa nei Calcari del Giurassico Superiore. Il cambio di rocce corrisponde anche ad un brusco cambiamento della morfologia del vallone: il percorso ora si snoda sul fianco di una stretta forra incisa da un piccolo corso d'acqua. Superata la forra il sentiero scende più dolcemente, sempre in sinistra idrografica, mantenendosi alla base di pareti quasi verticali impostate nei Calcari del Giurassico Superiore e Medio. Superato il bivio per Carnino inferiore il sentiero risale brevemente fino alla Colla di Carnino, la cui dolce morfologia è legata alla presenza di una faglia quasi verticale molto importante, che si estende in direzione est-ovest per diversi chilometri, e che in questo punto mette direttamente a contatto le Dolomie del Triassico Medio con le Vulcaniti del Permiano.

Alcune centinaia di metri dopo la Colla di Carnino il sentiero incontra la sorgente delle Vene, caratterizzata in primavera o dopo abbondanti piogge da una portata che supera i 3.000 litri al secondo. Le acque vengono alla luce

STOP 1 - Le pareti del Marguareis

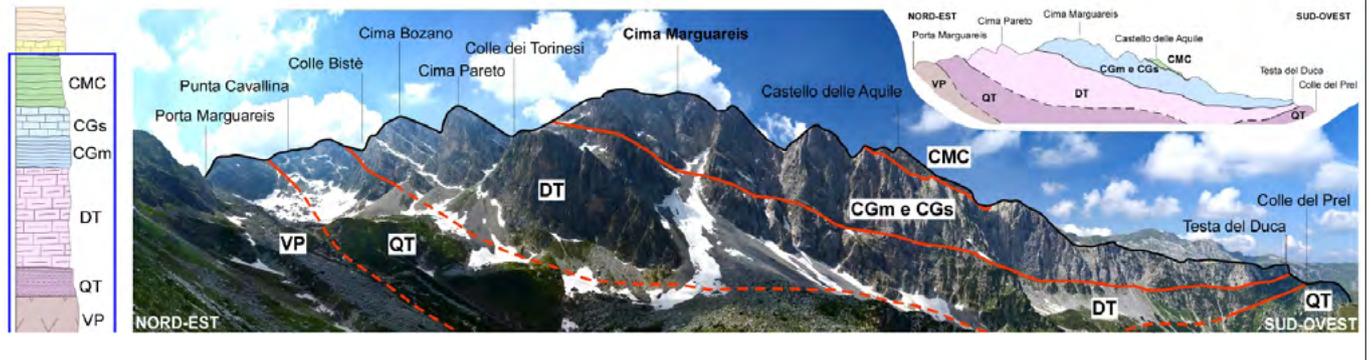


FIGURA 5. Nella descrizione dello Stop 1 è stata riportata una foto della vista panoramica sulle pareti settentrionali del Marguareis che si può ammirare da questa posizione. Sulla foto sono stati evidenziati i limiti delle unità litostratigrafiche (identificati anche dalle sigle già riportate sulla colonna stratigrafica, vedi Fig. 2) per facilitarne il riconoscimento nel paesaggio. L'intervallo stratigrafico osservabile in questo Stop è inoltre evidenziato nella miniatura della colonna stratigrafica riportata a sinistra della foto.

in mezzo ad una serie di grandi blocchi crollati dalla parete sovrastante, ma provengono da una vasta cavità naturale situata pochi metri più in alto: la Grotta delle Vene. Questa cavità è un importante collettore carsico, cioè una zona in cui si raccolgono le acque infiltrate nel sottosuolo da aree molto distanti. Alcuni test eseguiti con traccianti artificiali hanno dimostrato che qui giungono anche acque provenienti dalla zona dei Tumpi: gli spartiacque geografici e quelli sotterranei spesso non coincidono, e le acque sotterranee seguono percorsi diversi rispetto ai corsi d'acqua superficiali.

Il percorso prosegue a mezzacosta fino a raggiungere il Rifugio Mongioie. Le ampie pareti sovrastanti ci offrono la possibilità di osservare con continuità i limiti tra le unità geologiche comprese tra le Dolomie del Triassico Medio e i Calcari Marnosi del Cretacico Superiore (Stop 7).

Dal Rifugio Mongioie si percorre a ritroso l'ultimo tratto del percorso Rifugio Mondovì - Rifugio Mongioie scendendo poi verso il paese di Carnino. Da Carnino il percorso risale in sinistra idrografica il Vallone di Carnino, una valle di origine glaciale. Nel primo tratto, all'interno di un bosco rado, il sottosuolo è costituito dalle Vulcaniti del Permiano, di cui qua e là affiorano alcune porzioni, talvolta modellate dai ghiacciai come rocce montonate. All'uscita dal bosco ci si ritrova improvvisamente all'interno delle Dolomie del Triassico Medio: il sentiero ha attraversato una importante faglia verticale (qui non visibile a causa della copertura boschiva), che dal Colle dei Signori si estende lungo tutta la Valle dei Maestri e il Vallone di Carnino fino a questo punto, e ancora prosegue verso est fino alla Colla di Carnino e oltre ancora, per una lunghezza complessiva di parecchi chilometri. Da questo punto il sentiero si inerpica con alcuni tornanti alla Gola della Chiusetta, da cui volgendosi indietro si può ammirare la morfologia glaciale del Vallone di Carnino e, sulla destra orografica, le ripide pareti della Rocca del Ferà. Tutta la porzione inferiore di queste ultime è costituita dalle Dolomie del Triassico Medio, ben riconoscibili per l'evidente stratificazione; la porzione medio-superiore, molto più massiccia, è costituita dai Calcari del Giurassico Medio e Superiore, mentre i sottili lembi

ricoperti da prati presenti tra il Passo di Framargal e la Cima di Pertega corrispondono ai Calcari Marnosi del Cretacico Superiore. Dalla Gola della Chiusetta il sentiero risale verso il Rifugio Don Barbera lungo la Valle dei Maestri, anch'essa di origine glaciale, ma in seguito profondamente rimodellata dal carsismo. Nell'ultimo tratto del percorso il sentiero segue il limite geologico tra Calcari del Giurassico superiore e Calcari Marnosi del Cretacico Superiore, spostandosi ora all'interno degli uni ora degli altri.

I tipici prati alpini compresi tra il Rifugio Don Barbera e il Colle dei Signori sono impostati sulle Argilliti del Paleogene, la cui bassa permeabilità permette un ruscellamento delle acque superficiali in grado di erodere numerose piccole incisioni. Oltre il colle il Geotour percorre la strada militare dell'antica Via del Sale, che attraversa per diversi chilometri un vasto altopiano carsico fino alla Colla Piana. Nel primo tratto, ai lati della strada, a causa dell'effetto di alcune piccole faglie, si succedono ripetutamente affioramenti di Calcari a Nummuliti e di Calcari Marnosi del Cretacico Superiore, intensamente piegati dalla tettonica alpina (Stop 8).

Dopo alcune centinaia di metri la strada entra nei Calcari del Giurassico Superiore, che attraversa per un lungo tratto. I calcari sono fortemente incassati, cioè attraversati da numerosissime fessure e cavità formatesi grazie alla dissoluzione operata dall'acqua piovana.

I Calcari del Giurassico superiore si presentano in questa zona con il loro aspetto più caratteristico: colore chiaro, in alcuni livelli debolmente rosato, con un aspetto nodulare legato alla loro deposizione su altofondi pelagici spazzati dalle correnti (Stop 10), e una stratificazione poco evidente. Guardando nella stessa direzione, subito oltre la piccola incisione sotto la strada, è possibile osservare le unità geologiche più recenti, i Calcari del Cretacico Superiore di ambiente profondo seguiti con un contatto erosionale dai Calcari a Nummuliti eocenici di mare basso (Stop 9); alla base dei Calcari a Nummuliti è quindi registrata una lunga interruzione nella sedimentazione (più di 20 milioni di anni). I Calcari a Nummuliti sono visibili da vicino più avanti lungo la strada (Stop 11), dove è possibile os-

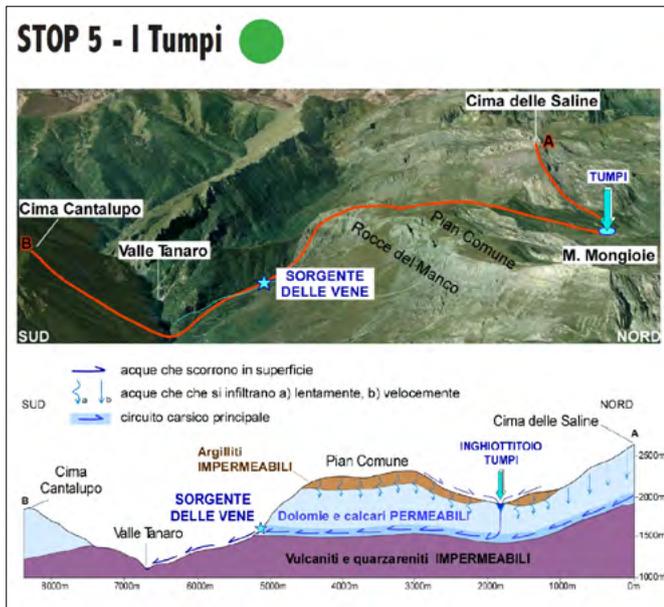


FIGURA 6. Lo stralcio di immagine satellitare e lo schema grafico utilizzati nella descrizione dello Stop 5 illustrano il percorso delle acque che in questa località si infiltrano nel sottosuolo attraverso ampie depressioni carsiche (i Tumpi).

servare la presenza di abbondanti fossili, prevalentemente nummuliti, indicativi di una deposizione in un ambiente di mare basso.

Proseguendo lungo la strada si giunge velocemente a Pian Ambrogi, un pianoro ricoperto da prati impostati sulle Argilliti del Paleogene, limitato verso ovest da alcune faglie a direzione nord-sud (Stop 12; Fig. 7). Sopra Pian Ambrogi la strada militare si snoda per alcuni chilometri lungo un altopiano carsico impostato sia sui Calcari del Giurassico Superiore che sui Calcari Marnosi del Cretacico Superiore. Ai lati della strada è possibile osservare il tetto dei Calcari del Giurassico Superiore (Stop 13), caratterizzato dalla presenza di piccole tasche riempite di un sedimento rosso molto ricco di fossili (ammoniti, belemniti) associate a lembi isolati di croste mineralizzate nero-rossastre di ossidi di ferro e manganese e fosfati (hard ground), conte-



FIGURA 7. Dallo Stop 12 è possibile osservare l'espressione superficiale di due faglie normali molto inclinate. La foto panoramica è stata "vestita" per facilitare il riconoscimento degli elementi geologici nel paesaggio. Lo schema grafico illustra in tre dimensioni la cinematica delle faglie e gli effetti su geometrie e disposizione degli ammassi rocciosi.

nenti foraminiferi planctonici di età Cretacico Inferiore. La formazione di questa superficie, a cui è associata una lacuna di parecchi milioni di anni, è connessa all'azione delle correnti sottomarine che spazzavano continuamente il fondale marino.

Più avanti si abbandona la strada per raggiungere Colla Piana, nuovamente impostata sulle Argilliti del Paleogene. Da qui è possibile osservare l'intero versante orientale della Cima della Fascia: la porzione basale è costituita dalle ben stratificate Dolomie del Triassico Medio; quella mediana è costituita dai Calcari del Giurassico Medio e Superiore, più chiari e massivi e con una stratificazione mal definita; tutta la porzione superiore è impostata sui Calcari Marnosi del Cretacico Superiore, chiaramente distinguibili per il colore marrone scuro e la parziale copertura erbosa.

Oltre Colla Piana un'antica pista militare scende con una serie di tornanti verso il Gias dell'Ortica, seguendo un vallone impostato lungo una importante faglia a direzione nord-sud che mette a contatto le Dolomie del Triassico Medio (sulla sinistra idrografica) con i Calcari Marnosi del Cretacico Superiore (sulla destra idrografica). Le Dolomie del Triassico Medio possono essere toccate con mano nello Stop 14; si tratta di dolomie massicce o laminate caratterizzate dalla presenza di cavità da disseccamento e pseudomorfosi di cristalli di gesso, indicando quindi la deposizione in un ambiente di piana di marea in condizioni di clima arido (sabhka).

Arrivando in prossimità del Gias dell'Ortica è possibile osservare, volgendosi a est verso Punta Marguareis, la conca glacio-carsica delle Carsene. Tale conca è il risultato di due differenti fenomeni di erosione, ripetutamente succedutisi durante le alternanze di fasi glaciali e interglaciali dell'ultimo milione di anni.

Durante le fasi glaciali tutta l'area era ricoperta da un ghiacciaio che, scendendo verso valle, scavò una depressione sempre più ampia e profonda; durante le fasi interglaciali, caratterizzate da clima molto più mite, il ghiacciaio si ritirò completamente lasciando esposte le rocce carbonatiche alla dissoluzione delle acque meteoriche che ne provocarono un intenso incarsimento. Da questo punto il sentiero riprende a salire verso la Testa del Duca, per poi scendere velocemente al Colle del Prel, da cui si possono osservare i principali caratteri della morfologia glaciale del Vallone del Marguareis (Stop 15). Oltre il Colle del Prel il sentiero scende gradualmente verso il fondovalle attraversando per lunghi tratti i grandi accumuli di detriti alla base delle Rocce Scarason. Con un ultimo strappo il sentiero supera una soglia in roccia per giungere al Laghetto del Marguareis (Stop 16), dove affiora la parte basale delle Quarzareniti del Triassico Inferiore, costituita da conglomerati ed areniti con clasti ben arrotondati di quarzo e vulcaniti depositi da fiumi ad alta energia. Da qui, il sentiero cambia bruscamente direzione verso nord. Dopo una breve risalita su affioramenti di Quarzareniti del Triassico Inferiore, si prosegue attraversando alcuni ghiaioni di detrito fino a giungere al punto panoramico dello Stop 1 e quindi al Rifugio Garelli. Il rientro a Pian delle Gorre si effettua lungo il sentiero dell'andata.

6. CONCLUSIONI

L'area del massiccio del Marguareis presenta caratteristiche geologiche non comuni che si prestano a diversi livelli di lettura, dai geologi professionisti ad un pubblico di non specialisti interessati alle Scienze della Terra. L'itinerario del Geotour del Marguareis si avvale di una cartografia geologica aggiornata, frutto di decenni di attività di ricerca, utilizzabile anche come strumento di divulgazione scientifica in ambito geologico. L'itinerario si sviluppa in un'area di parco di alta montagna che gode di un'attività di tutela e manutenzione della rete di sentieri. Nel corso di una piacevole camminata di più giorni si viaggerà nel tempo per oltre 300 milioni di anni, passando da rocce vulcaniche del Permiano a sedimenti oligocenici di ambiente marino profondo. Questa successione è intervallata da numerose e importanti superfici di discontinuità che testimoniano l'influenza della tettonica sulla sedimentazione. Le successioni sono state poi deformate nel corso della formazione della catena alpina. Inoltre, sono ben riconoscibili gli effetti del modellamento relativi all'evoluzione geomorfologica recente. Il Geotour del Marguareis rappresenta quindi un esempio virtuoso di scambio culturale tra la comunità accademica e la società civile, che permette di rendere accessibili ad un pubblico di non specialisti i risultati conseguiti dalla ricerca, in un'ottica di disseminazione del patrimonio geologico.

BIBLIOGRAFIA

- BERTOK C., MARTIRE L., PEROTTI E., D'ATRI A., PIANA F. (2011), *Middle-Late Jurassic syndepositional tectonics recorded in the Ligurian Briançonnais succession (Marguareis–Mongioie area, Ligurian Alps, NW Italy)*. *Swiss Journal of Geosciences* v. 104, pp. 237–255.
- BERTOK C., MARTIRE L., PEROTTI E., D'ATRI A., PIANA F. (2012), *Kilometre-scale palaeoescarpments as evidence for Cretaceous synsedimentary tectonics in the External Briançonnais Domain (Ligurian Alps, Italy)*. *Sedimentary Geology* v. 251, pp. 58–75.
- BERTOK C., D'ATRI A., MARTIRE L., BARALE L., PIANA F., VIGNA B. (2015), *A trip through deep time in the rock succession of the Marguareis area (Ligurian Alps, South Western Piemonte)*. *Geoheritage* v. 7, pp. 5–12.
- BERTOK C., MUSSO A., D'ATRI A., VIGNA B. (2017), *Geotour del Marguareis. Un viaggio lungo 300 milioni di anni*. Fraternali Editore,
- BERTOK C., MUSSO A., D'ATRI A., MARTIRE L., PIANA F. (2018), *Geology of the Colle di Tenda – Monte Marguareis area (Ligurian Alps, NW Italy)*. *Journal of Maps* v. 14, pp. 542–551.
- BONI A., CERRO A., G. R., VANOSSI M. (1971), *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000, foglio 92–93 Albenga-Savona*. Servizio Geologico d'Italia, Roma.
- CAMPREDON R., HACCARD D., LANTEAUME M. (1967), *Précision sur la stratigraphie de la série Eocène de l'unité briançonnaise du Marguareis (Massif du Marguareis, Alpes-Maritimes franco-italiennes)*. *Accademia Nazionale dei Lincei, Rendiconti della Classe di Scienze fisiche matematiche e naturali (Serie VIII)* v. 42, pp. 223–232.
- D'ATRI A., BARALE L., BERTOK C., MAGAGNA A., MARTIRE L., PIANA F., VIGNA B. (2012), *Pages of the Earth history book recorded in the successions of the Marguareis area (PROGEOPIemonte Project)*. *Geologia dell'Ambiente* v. 3, pp. 152–153.
- D'ATRI A., PIANA F., BARALE L., BERTOK C., MARTIRE L. (2016), *Geological setting of the southern termination of Western Alps*. *International Journal of Earth Sciences*, DOI 10.1007/s00531-015-1277-9
- GIARDINO M. (2012), *Progeo-Piemonte: a multidisciplinary research project for developing a proactive management of geological heritage in the Piemonte region*. *Geologia dell'ambiente* v. 3, pp.196–197.
- GOSSO G., BRIZIO D., DEREGIBUS C., EUSEBIO A., GALLO M., RATTALINO E., ROSSI F., TOSETTO S. (1983), *Due cinematiche possibili per la coppia di falde Brianzonese ligure - Flysch ad Elmintoidi*. *Memorie della Società Geologica Italiana* v. 26, pp. 463–472.
- LEMOINE, M., BAS, T., ARNAUD-VANNEAU, A., ARNAUD, A., DUMONT, T., GIDON, M., BOURBON, M., DE GRACIANSKY, P. C., RUDKIEWICZ, J. L., MÉGARD-GALLI, J., TRICART, P. (1986), *The continental margin of the Mesozoic Tethys in the Western Alps*. *Marine and Petroleum Geology* v. 3, pp. 179–199.
- MOHN G., MANATSCHAL G., MÜNTENER O., BELTRANDO M., MASINI E. (2010), *Unravelling the interaction between tectonic and sedimentary processes during lithospheric thinning in the Alpine Tethys margins*. *International Journal of Earth Sciences* v. 99, pp. 75–101.
- PEROTTI L., PALOMBA M., D'ATRI A., LOZAR F., GIARDINO M. (2019), *Tutti i colori di una regione - 13 itinerari geologici in Piemonte*. Museo regionale di Scienze Naturali, Torino.
- PIANA F., MUSSO A., BERTOK C., D'ATRI A., MARTIRE L., PEROTTI E., VARRONE D., MARTINOTTI G. (2009), *New data on post-Eocene tectonic evolution of the External Ligurian Briançonnais (Western Ligurian Alps)*. *Bollettino della Società Geologica Italiana* v. 128, pp. 353–366.
- PIANA F., BATTAGLIA S., BERTOK C., D'ATRI A., ELLERO E., LEONI L., MARTIRE L., PEROTTI E. (2014), *Illite (KI) and chlorite (AI) "crystallinity" indices as a constraint for the evolution of the External Briançonnais Front in Western Ligurian Alps (NW Italy)*. *Italian Journal of Geosciences* v. 133, pp. 445–454.
- VANOSSI M. (1970), *Contributi alla conoscenza delle unità stratigrafico-strutturali del Brianzonese ligure s.l. IV - Messa a punto generale*. *Atti dell'Istituto di Geologia dell'Università di Pavia* v. 21, pp. 109–114.
- VANOSSI M. (1972), *Rilevamento geologico ed analisi strutturale delle dorsali del M. Mongioie e del M. Cimone (Brianzonese ligure)*. *Atti dell'Istituto di Geologia dell'Università di Pavia* v. 23, pp. 29–71.
- VANOSSI M., CORTESOGNO L., GALBIATI B., MESSIGA B., PICCARDO G., VANNUCCI R. (1984), *Geologia delle Alpi Liguri: dati, problemi, ipotesi*. *Memorie della Società Geologica Italiana* v. 28, pp. 5–75.

“Percorsi sostenibili” - Percorsi di ricerca e di didattica dell’Università di Torino su ambiente idrico e salute umana, in accordo con gli obiettivi ONU di sviluppo sostenibile*

“Percorsi sostenibili” - Research and teaching paths of Turin University on water environment and human health, in accordance with the UN Sustainable Development Goals*

FRANCESCA BONA, STEFANO DE BERNARDI, ALBERTO DORETTO, ELISA FALASCO, STEFANO FENOGLIO, VALERIA FOSSA, FRANCO GIANOTTI, ANNALISA GIANSETTO, MARCO GIARDINO, MASSIMO GRISOLI, LAURA GUGLIELMONE, MANUELA LASAGNA, ANNAPOALA MARINIELLO, LUCIANO MASCIOTTO, VITO MICCOLIS, MAURICE MINGOZZI LOČ, LUCA MORINO, MAURO PALOMBA, GIORGIA PARMEGGIANI, LUIGI PEROTTI, MARIA CONSOLATA SINISCALCO, DIEGO TARGHETTA DUR, CRISTINA VARESE, ANDREA VICO

* Progetto di Public Engagement finanziato dall’Università degli Studi di Torino (Bando 2019). Parte dei fondi sono stati utilizzati per la pubblicazione della presente monografia.

E-mail: luciano.masciocco@unito.it

Parole chiave: Università di Torino, ricerca e didattica, ambiente idrico e salute umana

Key words: University of Turin, research and teaching, water environment and human health

INTRODUZIONE

“Percorsi Sostenibili” è un progetto dell’Ateneo torinese per la promozione di contenuti scientifici e didattici in accordo con gli obiettivi ONU di sviluppo sostenibile.

Al centro del progetto, focalizzato in particolare sull’acqua, le risorse idriche e la salute umana, si collocano le attività di tre laboratori di UniTo: l’Orto Botanico di Torino, fondato nel 1729, il Geodidalab di Ivrea, specializzato in educazione ambientale, e l’Alpstream di Oстана, che si occupa della tutela dei sistemi fluviali delle Alpi.

Il progetto intende rendere partecipe il grande pubblico dei temi ambientali relativi alla salvaguardia degli ecosistemi coinvolti nel ciclo dell’acqua e delle relazioni di questo con uno sviluppo sostenibile della società. Vuole offrire inoltre una visione d’insieme per ampliare il più possibile la conoscenza di pratiche virtuose, scientifiche e comportamentali, ed avviare processi di consapevolezza e di comprensione nel campo della gestione degli equilibri socio-ambientali. Intende valorizzare le attività di ricerca e di didattica dell’Università di Torino sull’ambiente idrico, in particolare sui temi che rientrano negli seguenti obiettivi ONU di sviluppo sostenibile: assicurare la salute e il benessere per tutti e per tutte le età; proteggere e risanare gli ecosistemi legati all’acqua; rafforzare la capacità di ripresa e di adattamento ai rischi legati al clima e ai disastri naturali; migliorare l’istruzione, la sensibilizzazione e la capacità umana e istituzionale per quanto riguarda la mitigazione del cambiamento climatico.

Concepito nel 2019, il progetto prevedeva l’organizzazione di tre incontri con i ricercatori, presso strutture universitarie sul territorio regionale – Orto Botanico a Torino, GeoDidaLab a Ivrea e Centro Alpstream a Oстана – che rappresentano luoghi esemplificativi di specifici ambienti

naturali all’interno dei quali, già da tempo, si organizzano attività rivolte a un pubblico di non esperti. Le iniziative sarebbero state sostenute da una forte presenza sul web, attraverso i siti delle strutture e dei partner coinvolti, e dei canali social associati.

ORTO BOTANICO DELL’UNIVERSITÀ DI TORINO: 2500 SPECIE PER FAR CONOSCERE LA BIODIVERSITÀ

L’Orto Botanico di Torino è stato fondato nel 1729 per volere di Vittorio Amedeo II.

Sin dalla sua fondazione si è posto come obiettivo quello di divulgare la conoscenza delle piante, i loro usi e la loro ecologia ed è coinvolto dall’Università di Torino (Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi) nella ricerca scientifica sulle piante e sulla loro conservazione.

Dal 1997 è aperto al pubblico, offrendo attività didattiche per le scolaresche e organizzando conferenze e visite guidate tematiche.

L’Orto Botanico di Torino è costituito da una parte allestita a giardino, compresa tra l’edificio del Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi e il Castello del Valentino, e una parte retrostante, il Boschetto.

Il *Giardino* occupa circa 9000 mq (0,9 ettari); è diviso in aiuole tematiche (per famiglie botaniche) e ospita un *Alpineto* all’estremità sud-ovest (realizzato nel 1962-1963 dal prof. Bruno Peyronel), 4 serre (la Serra del Sudafrica, inaugurata nel 2007 e collocata sul lato ovest del *Giardino*, la Serra delle piante Succulente, la Serra tropicale e la nuova serra di moltiplicazione, sul lato est del giardino), tre vasche, e una serie di vasche in pietra, lungo il lato nord del giardino che ospitano la collezione di piante officinali.



FIGURA 1. L'Orto Botanico di Torino

Il *Boschetto* ha una superficie di circa 18000 mq (1,8 ettari). Al suo interno sono installate da tempo delle arnie dalle quali si produce un miele di città che poi viene venduto ai visitatori durante le visite guidate.

L'attuale allestimento deriva dalla ristrutturazione iniziata nel 1995, che ha adeguato l'Orto Botanico alle linee guida dei moderni Orti Botanici (Fig. 1).

All'interno dell'Orto Botanico è anche localizzata la *Micoteca Universitatis Taurinensis*. È una delle *biobanche* di microrganismi più importanti in Italia e in Europa. Qua vengono conservati circa 7000 ceppi di funghi che sono stati isolati a partire dagli anni '70.

Per quanto riguarda le preferenze dei visitatori, molto richiesto ovviamente è il settore con le piante carnivore

FIGURA 2. Il settore più visitato dell'Orto Botanico è quello delle piante carnivore (nella foto: *Dionaea discipula*).

(Fig. 2), quello che interessa di più i ragazzini, ma molti chiedono approfondimenti anche sulle piante succulente, soprattutto sulle loro diverse morfologie, che sono una forma di adattamento proprio ai climi desertici.

La vita dipende dalle piante. Questo è il motivo fondamentale che spiega l'importanza degli orti botanici, creati con uno scopo fondamentale: quello di mostrare la diversità delle piante, farle conoscere e far conoscere i loro usi e i modi di coltivarle. Sapere a che cosa servono le piante, permette oggi di capire quanto sia importante la conservazione della biodiversità vegetale, sulla base della quale si appoggia la conservazione della biodiversità in generale.

GEODIDALAB: DIDATTICA E RICERCA TRA I LAGHI E LE COLLINE MORENICHE

Il GeoDidaLab è un laboratorio di didattica che svolge principalmente attività con le scuole di ogni ordine e grado. È situato a due passi dal centro di Ivrea ma, allo stesso tempo, già immerso in un ambiente naturale: siamo nella zona dei cinque laghi, all'interno dell'Anfiteatro Morenico di Ivrea, uno dei più conosciuti al mondo. Questo anfiteatro contiene due gioielli geomorfologici: la *Serra d'Ivrea*, un'imponente morena rettilinea lunga 16 km e pertanto la maggiore delle Alpi, esemplare modello di morena laterale e di sedimentazione al margine glaciale; all'interno della depressione si innalzano i *Colli d'Ivrea*, un gigantesco affioramento di rocce di crosta continentale sudalpina esteso per 21 km², modellato sotto il ghiacciaio in collinette

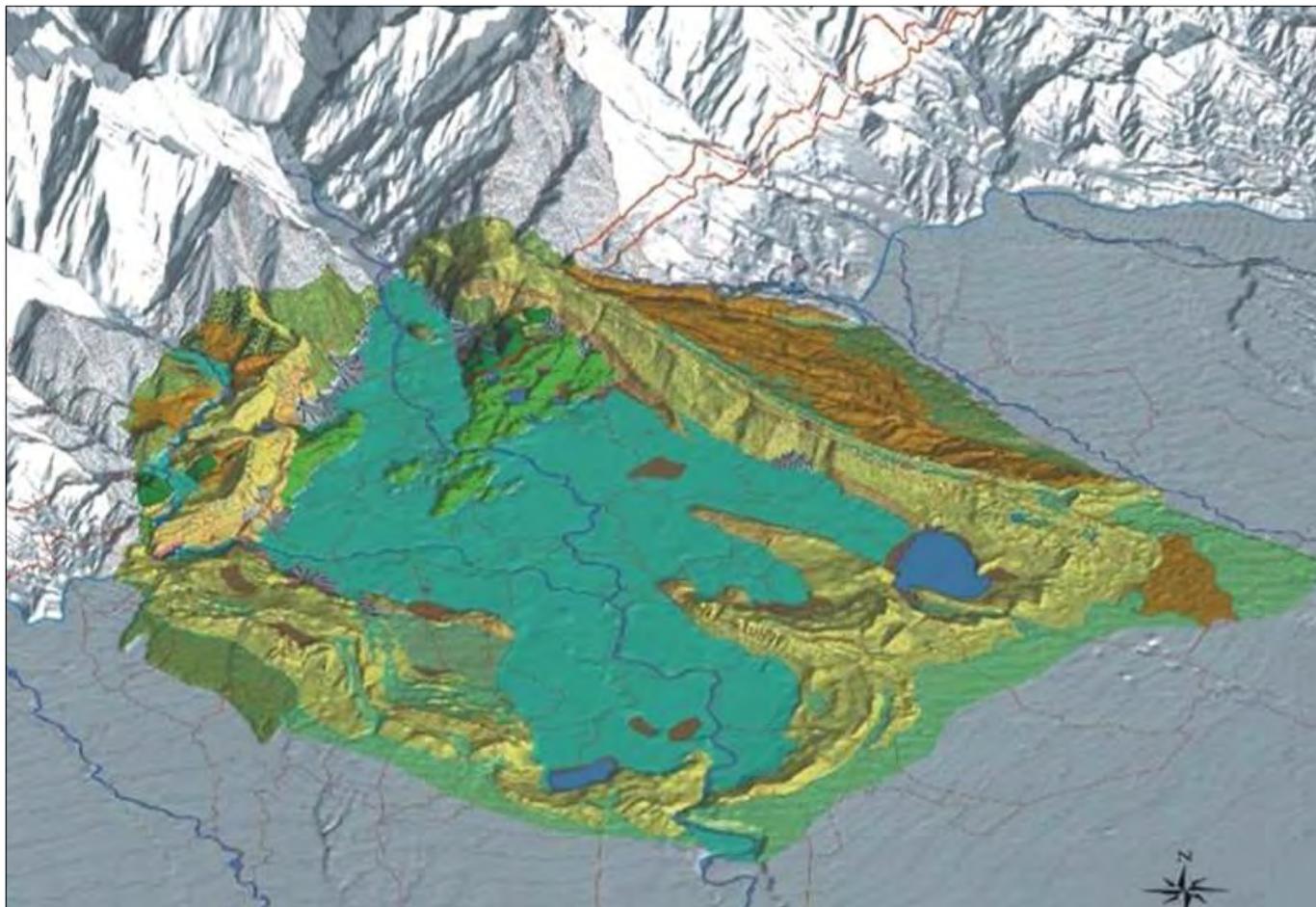


FIGURA 3. Rappresentazione tridimensionale dell’ Anfiteatro Morenico di Ivrea: sul fianco destro spicca la Serra d’Ivrea, imponente morrena rettilinea lunga 16 km, a contatto con i Colli di Ivrea sui quali è ubicata Ivrea e il GeoDidaLab.

rocciose inframmezzate da profondi bacini lacustri (Sirio, San Michele, Pistono, Campagna, Nero), con diffuse rocce montonate, levigature, strie glaciali e solchi, oltre a numerosissimi massi erratici (Fig. 3).

Seguendo l’obiettivo di trasferire l’esperienza scolastica dalle aule al territorio e all’ambiente, gli studenti potranno svolgere attività sperimentali in laboratorio, nonché

uscite guidate che hanno sempre una forte componente di attività pratica. L’uscita “ Acqua e Riflessi” ha la finalità di conoscere e proteggere l’ambiente lacustre. Gli studenti sono stimolati ad approcciarsi alla metodologia scientifica sul campo grazie all’uso di speciali e sicure imbarcazioni, le “catacanoe”, e di specifiche strumentazioni scientifiche (Fig. 4).



FIGURA 4. L’uscita “ Acqua e Riflessi” ha la finalità di conoscere e proteggere l’ambiente lacustre.



FIGURA 5. Nella Città di Ivrea, si vede il legame tra le rocce che ne costituiscono il substrato, la Dora che l'attraversa e gli elementi antropici.

Affiancati da personale qualificato, gli studenti effettuano in prima persona i campionamenti delle acque lacustri a varie profondità e le misurazioni dei parametri fisici e chimici e della trasparenza delle acque. In laboratorio, attraverso il riconoscimento guidato al microscopio ottico delle popolazioni planctoniche, gli studenti scoprono la biodiversità esistente in una goccia d'acqua di lago.

A fine giornata, elaborando i risultati ottenuti dalle misurazioni effettuate sul lago e dalle osservazioni al microscopio, è possibile determinare lo stato qualitativo delle acque del bacino lacustre, invitando alla riflessione sulle buone pratiche da attuare per la sua salvaguardia.

L'uscita "I Paesaggi Geologici di Ivrea" costituisce invece un'esperienza geologica in campo di un'intera giornata nel contesto territoriale dell'Anfiteatro Morenico d'Ivrea, in cui gli studenti sono stimolati ad applicare il metodo scientifico e a collaborare in gruppi di lavoro. Nel corso delle attività, gli studenti vengono motivati a osservare il territorio, con l'ausilio di carta topografica e bussola, per cogliere gli indizi utili a ricostruirne la storia geologica. Il modellamento del paesaggio da parte degli agenti esogeni costituisce il tema portante della giornata, ma vengono fornite anche informazioni di carattere petrografico e, a seconda del livello scolastico, approfondimenti di tettonica. La giornata fornisce agli studenti gli strumenti utili per produrre una successiva relazione scientifica che illustri le attività eseguite sul terreno.

Il GeoDidaLab mette a disposizione degli studenti la cartografia dell'area e le bussole. Uno dei siti principali

dell'itinerario geoturistico interessa la Città di Ivrea, dove si vede il legame tra gli elementi naturali del territorio, quindi principalmente le rocce che costituiscono il substrato della città, l'acqua, con la Dora che attraversa la città stessa, e gli elementi antropici (Fig. 5).

ALPSTREAM: CENTRO PER LO STUDIO DEI FIUMI ALPINI

Il Centro ALPSTREAM è nato nel 2019 a Ostrana, in Valle Po, come centro di ricerca per lo studio, la gestione sostenibile e la tutela dei sistemi fluviali delle Alpi. Questi ambienti costituiscono un patrimonio unico, irripetibile e indispensabile ma anche estremamente fragile, che si regge su un delicato equilibrio di processi biotici e abiotici, molti dei quali messi a rischio dai cambiamenti climatici in atto e dall'impatto delle attività umane.

Il Centro promuove attività di ricerca sia applicata che di base: tra le prime, si ricorda ad esempio l'analisi dell'impatto del cambiamento climatico (e in particolare della siccità) sulla capacità autodepurativa dei fiumi, cioè sulla loro funzione di aiuto nello smaltimento dei reflui organici derivanti dall'attività dell'uomo, oppure lo studio dei metodi che permettono di minimizzare l'impatto legato agli svasi delle grandi dighe alpine; tra le seconde, annoveriamo ad esempio lo studio della dinamica dei nutrienti in ambiente montano, l'analisi della biodiversità e dei processi erosivi e deposizionali.

Tra i vari progetti di ricerca spiccano quelli incentrati sulla protezione di questi ecosistemi unici: studio degli

effetti degli invasivi e del cambiamento climatico sul biota e sulla funzionalità fluviale, analisi della connessione tridimensionale fra le aste secondarie e quelle principali e studio e tutela della fauna ittica.

Negli ultimi anni, il gruppo di ricerca sugli ecosistemi acquatici del centro ALPSTREAM si è occupato di studiare la flora di diatomee bentoniche che colonizzano i corsi d’acqua alpini, con particolare attenzione alla ricchezza e biodiversità di queste comunità, nonché l’ecologia e la distribuzione delle specie presenti. Il riconoscimento di una specie richiede lo studio dei caratteri morfometrici e morfologici presenti sul guscio protettivo (frustolo), che caratterizza le diatomee. Il riconoscimento a livello di specie avviene pertanto su base morfologica e richiede una elevata specializzazione e continuo aggiornamento della sistematica; allo stesso tempo, la corretta identificazione è fondamentale, poiché alla base del calcolo degli indici di qualità.

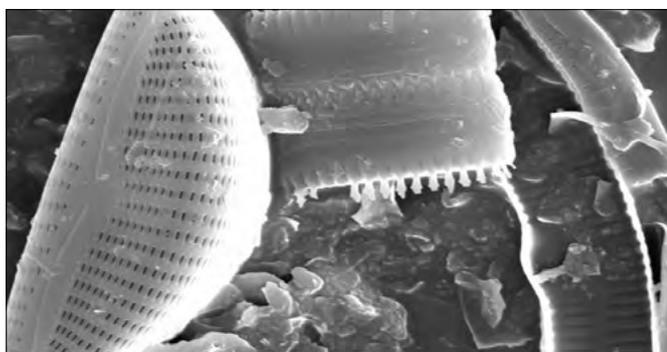


FIGURA 6. Diatomee al microscopio elettronico.

Da diversi anni i docenti universitari del gruppo ALPSTREAM uniscono le tradizionali lezioni in aula ad una didattica di tipo esperienziale sul campo. Durante le escursioni, gli studenti hanno la possibilità di osservare dal vivo quelle che sono le attività principali svolte da un ecologo fluviale nel corso di un monitoraggio. Possono utilizzare strumentazione da campo specifica ed apprendere il funzionamento. Effettuano loro stessi prelievi biologici di macroinvertebrati (Fig. 6), osservando gli individui diretta-



FIGURA 7. Utilizzo della rete SURVER per campionare i macroinvertebrati bentonici in un tratto di fondo fluviale.

mente in campo, campionano le comunità del fitobenthos ed hanno la possibilità di assistere ad un campionamento della fauna ittica tramite elettropesca. I campioni raccolti vengono poi analizzati nei corsi in cui sono previste attività di laboratorio successive all’escursione.

RISULTATI OTTENUTI DAL PROGETTO “PERCORSI SOSTENIBILI”

Il progetto “Percorsi Sostenibili”, sviluppatosi durante il periodo della pandemia, non ha potuto prevedere gli eventi in presenza e quindi si è articolato secondo modalità on line, che sono state offerte al pubblico e vengono ora offerte di seguito ai lettori:

- 1) realizzazione di tre video di ca. 4 minuti ciascuno di presentazione dei laboratori dei dipartimenti coinvolti:
 - ORTO BOTANICO
<https://youtu.be/AdmT7Tst3uDk>
 - ALPSTREAM
<https://youtu.be/Im3C6bDH3gI>
 - GEODIDALAB
<https://youtu.be/ZO0cf8fyk40>
- 2) realizzazione di sette incontri online dal titolo “Invito alla Scienza” coordinati dai rappresentanti dei laboratori, curati da Luca Morino (musicista, storico leader dei Mau Mau, ma anche geologo di formazione) e presentati in diretta da Vito Miccolis:
 - *Geologia è cultura: IVREA geoTOUR - un itinerario nella Città Industriale patrimonio UNESCO* - a cura di Geodidalab <https://www.youtube.com/watch?v=8zV2uv7oPuQ&list=PLKCAjXgUt0vsSV6kqEn7ijnkeI98lv8Mq&index=6>
 - *Quella volta che... Aneddoti di ricerca sui fiumi alpini* a cura di Centro Alpstream <https://youtu.be/CN0mLONjtmg>
 - *Geologia è natura: dai laghi alla Serra, le eredità degli antichi ghiacciai a Ivrea* a cura di Geodidalab <https://youtu.be/Vd6EqQ8WkZo09.02.2021>
 - *Le piante e l’acqua: succulente e acquatiche, due mondi meravigliosi a confronto* a cura di Orto Botanico <https://www.youtube.com/watch?v=TSIQs0HECLo&list=PLKCAjXgUt0vsSV6kqEn7ijnkeI98lv8Mq&index=1&ct=2s>
 - *Attacco alieno: come l’arrivo delle specie alloctone sta silenziosamente cambiando i nostri fiumi* a cura di Centro Alpstream
<https://youtu.be/AoPwSr5p-AQ>
 - *I laghi: un tesoro naturale da conservare e valorizzare* a cura di Geodidalab <https://youtu.be/cmyYsuFOw7w>
 - *Crisi climatica, geodiversità e minacce alla biodiversità: quale futuro per le acque del Pianeta?* a cura di Orto Botanico, Geodidalab e Centro Alpstream <https://youtu.be/kWph5LD1mWo>
- 3) realizzazione di un video riassuntivo del progetto che prospetta gli sviluppi futuri:
 - <https://vimeo.com/670173488/c4fdf1fe94>

Approccio multidisciplinare per lo studio di frane di grandi dimensioni: il caso della frana di Quincinetto (TO)

Multidisciplinary approach for the study of large landslides: the case of Quincinetto (TO)

MAURO BONASERA¹, GIANDOMENICO FUBELLI², GIUSEPPE MANDRONE³, DAMIANO VACHA²

¹ Servizio Geologico d'Italia - ISPRA

² Dipartimento di Scienze della Terra – Università degli Studi di Torino

³ Dipartimento Interateneo di Scienze, progetto e politiche del Territorio – Università degli Studi di Torino

E-mail: mauro.bonasera@isprambiente.it

Parole chiave: Frane, Pericolosità, Infrastrutture, Approccio multidisciplinare

Key words: Landslide, Hazard, Infrastructure, multidisciplinary approach

1. INTRODUZIONE

L'area oggetto della presente memoria è situata a Nord dell'abitato di Quincinetto (TO), sul versante idrografico destro del Fiume Dora Baltea, al confine fra la Regione Piemonte e la Valle d'Aosta. L'area di interesse si trova nel settore Nord-Orientale delle Alpi Graie (Alpi Occidentali), quasi allo sbocco in pianura della Dora Baltea.

Questa zona è conosciuta da tempo per i fenomeni di instabilità che affliggono tutti e due i versanti della valle (Bottino & Mandrone, 1991; Pirulli *et al.*, 2015, Filipello *et al.*, 2015), probabilmente in gran parte legati al detensio-namento degli stessi a causa dello scioglimento del ghiacciaio balteo che qui potrebbe aver raggiunto più di 1000 m di spessore (Forno *et al.*, 2010). Tali dinamiche caratteristiche delle fasi post-glaciali si inseriscono in un contesto di forte deformazione tettonica che si realizza attraverso discontinuità e zone di taglio di importanza regionale. L'attenzione si è concentrata su quest'area a causa di una caduta massi registratasi nel 2012 in cui alcuni blocchi di ridotte dimensioni hanno raggiunto l'autostrada. Questo fenomeno è classificato sul Sistema Informativo Fenomeni Franosi in Piemonte (SIFRaP a cura di Arpa Piemonte) con numero identificativo ID 001-76623-00. A seguito di questa caduta massi diversi enti si sono mobilitati nello studio della zona: dalle due Regioni, al comune alla SITAV (il gestore dell'autostrada TO-AO) ed i relativi consulenti, tra cui anche le università di Torino e Firenze (Casagli *et al.*, 2021).

Il versante interessato dallo studio è scarsamente antropizzato ma la valle è percorsa da una importante infrastruttura quale la A5 Torino – Aosta e da diverse altre infrastrutture strategiche. Il fondovalle si trova ad una quota di circa 290 metri s.l.m. mentre la parte sommitale del versante da cui parte la caduta massi raggiunge i 1250 metri s.l.m., mentre l'area a dubbia stabilità si estende fino a circa 2000 m di quota (Fig. 1). Il presente lavoro si configura come un report delle attività preliminari svolte con l'obiettivo di inquadrare l'area di studio dal punto di vista geologico, di valutare i processi in atto e di comprenderne l'effettiva magnitudo e di rilevare le caratteristiche dimensionali del fenomeno ai fini di supporto per le attività di monitoraggio e mitigazione del rischio.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La zona in studio ricade interamente all'interno della Zona Sesia Lanzo, una delle principali unità del Dominio Australpino, costituita da un basamento metamorfico policiclico sedimentario intruso da corpi basici e granitoidi tardo Varisici. Comprende tre sottounità: gli Gneiss Minuti, la II Zona Diorito-Kinzigitica e il Complesso dei Micascisti Eclogitici. È proprio dentro quest'ultima che ricade interamente la zona di versante interessata dalla frana. I Micascisti eclogitici consistono essenzialmente in paragneiss di alta pressione con minori corpi mafici, ortogneiss e marmi (Fig. 2).

L'analisi micro- e meso-strutturale ha permesso di riconoscere almeno 4 fasi deformative (Regis *et al.*, 2014 e



FIGURA 1. La zona in frana, indicata con il segnalino P3-P4, si inserisce in un contesto più ampio (linea gialla) a dubbia stabilità. Sono individuati anche i target strategici potenzialmente a rischio: l'autostrada, la ferrovia, il fiume e due centrali idroelettriche (Q1, Q2). Sono evidenziati anche i paesi di Quincinetto, Carema e di Pont Saint Martin (quest'ultimo in Valle d'Aosta) e l'area in cui sono stati posizionati la stazione totale ed il radar terrestre che monitorano il settore di frana più attivo (P3/P4).

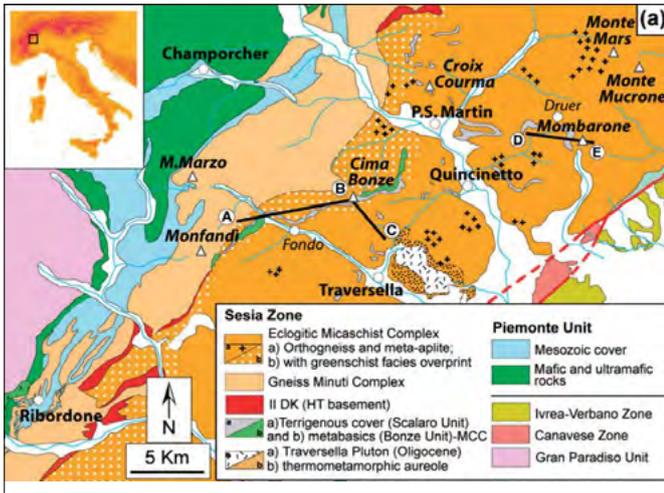


FIGURA 2. Schema geologico della zona del Sesia-Lanzo. Da: Regis *et al.* 2014.

2016). Alla scistosità primaria in facies eclogitica si sono sovrimate condizioni in facies scisti blu/scisti verdi. Queste strutture sovrimate sono rappresentate da un piegamento isoclinal, anche con la produzione di fasce milonitiche. I piani assiali delle pieghe sono orientati verso E-NE di 20-30°. Questa struttura è a sua volta deformata da altre pieghe isoclinali con piano suborizzontale anch'esso debolmente pendente verso E ed anch'esso pervasivo (è la scistosità prevalente nell'area di studio). Esiste un'ultima fase deformativa a larga scala che produce una modesta ondulazione delle strutture precedenti ad assi suborizzontali orientati circa N-S.

La deformazione fragile successiva all'impilamento delle unità tettoniche si è esplicata nel settore Austroalpino-Pennidico in due fasi distinte (D1: tardo Oligocene; D2: Miocene-Presente). Le principali strutture ascrivibili alla fase D1, tra le quali il semigraben Aosta-Ranzola e il sistema di faglie normali dell'Ospizio Sottile sono orientate in direzione E-W e NE-SW. Dal Miocene (fase D2) la deformazione si è realizzata mediante un set regolare di faglie con direzione NW, dalla Linea del Sempione al Massiccio del Gran paradiso; in questa fase il sistema dell'Ospizio Sottile ha subito la riattivazione come una faglia trascorrente sinistra per accomodare lo svincolo del blocco sudorientale delle alpi Pennine e Graie (Fig. 3) (Bistacchi *et al.* 2001).

3. OSSERVAZIONI SULL'ASSETTO MORFO-STRUTTURALE

L'intero tratto della vallata principale in cui si trova il versante in frana è visibilmente modellato dai fenomeni di esarazione glaciale avvenuti durante il Quaternario e precedenti all'erosione e sedimentazione fluviale attuali, operate da una ricca rete idrografica con notevoli capacità di incisione e trasporto. Questi processi hanno portato alla genesi di rotture di pendenza, formando superfici terrazzate interrotte da scarpate molto acclivi, che si rinvengono sia in destra che in sinistra idrografica della Dora Baltea (Fig. 4). Più nel dettaglio, il tratto di versante in esame è situato ai piedi di una paleovalle glaciale sospesa (Vallone di Scalaro). In essa si rilevano diffusamente accumuli di dimensioni non cartografabili costituiti da blocchi eterometrici, prevalentemen-

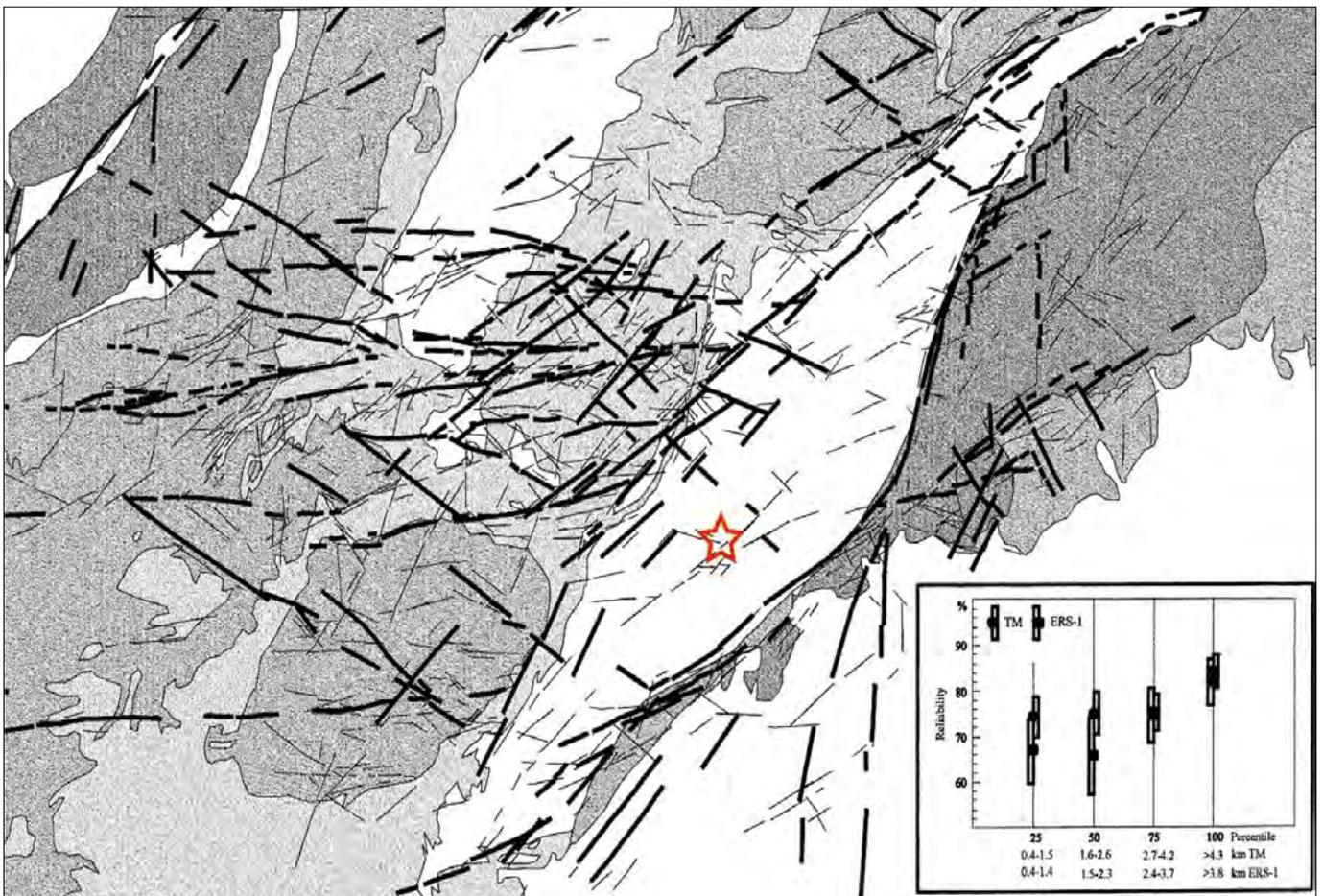


FIGURA 3. Principali lineamenti individuati nel settore in studio (Bistacchi *et al.* 2000). La stella indica la posizione dell'area di studio.

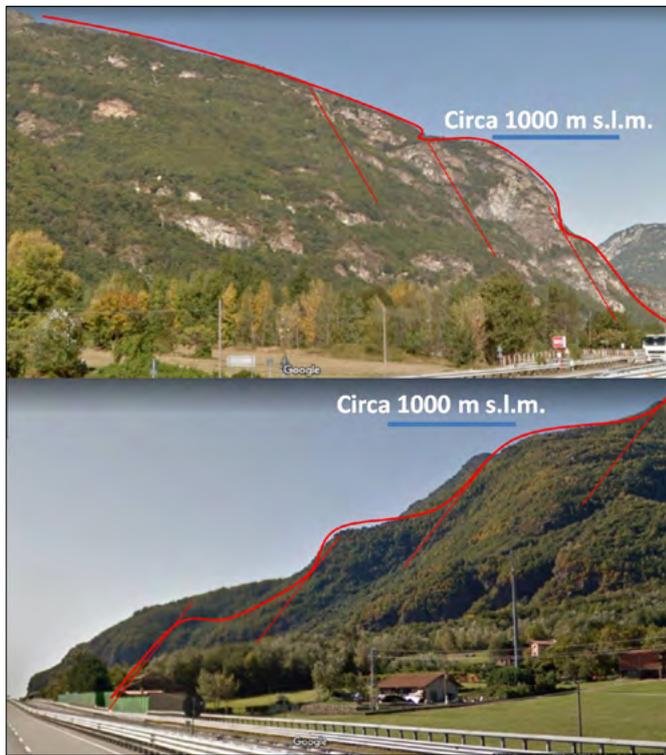


FIGURA 4. Vista, da sud verso nord (sopra) e da nord verso sud (sotto) all'incirca dal concentrico di Quincinetto: si possono osservare chiaramente i versanti dominati da strutture a gradoni degradanti verso valle, probabilmente di natura mista (tettonico/gravitativa e glaciale) visibili anche sul versante opposto della valle.

te sfaccettati con spigoli smussati, mescolati a una matrice siltoso-sabbiosa mediamente addensata, di colore bruno. Questi depositi costituiscono un insieme di rilievi allungati in direzione prevalente WSW-ENE e E-W, corrispondenti a cordoni morenici laterali. Tra i diversi cordoni si sviluppano depressioni allungate, interpretabili come relitti di scaricatori glaciali, in parte colmati da depositi fluvioglaciali. In corrispondenza alle depressioni comprese tra i diversi accumuli si impostano venute d'acqua di modesta entità.

Le forme tipiche dell'ambiente glaciale sono però fortemente rimodellate da fenomeni gravitativi di grandi dimensioni dovuti probabilmente al rilascio tensionale subito dal substrato roccioso, soprattutto a carico delle spalle glaciali che limitano la valle principale. I fenomeni recenti rendono ancor più palese che la stabilità naturale del versante non sia stata ancora raggiunta (vedi foto di Fig. 5).

Gli ammassi rocciosi affioranti alle quote più elevate presentano una diffusa fratturazione, risultando disarticolati da sistemi di frattura notevolmente aperti e discontinuità per lo più parallele alla direzione del versante. Nella fascia altimetrica inferiore invece l'ammasso roccioso presenta una qualità maggiore, presentando un numero limitato di discontinuità, riempite da carbonati. La porzione sommitale del versante è interessata da numerose scarpate impostate nei micascisti eclogitici di altezza ed estensione di alcune decine di metri, corrispondenti a nicchie di distacco favorite dal sensibile stato di fratturazione della porzione più superficiale del substrato. La loro geometria cuneiforme è infatti governata dall'orientazione dei principali sistemi di discontinuità. A queste nicchie sono associati depositi gravitativi o discontinui depositi detritici.

Tra di esse e i relativi accumuli si osservano depressioni con profondità di alcuni metri.

I depositi di frana e di crollo, organizzati nella forma di conoidi coalescenti, mostrano spessore visibile di alcuni metri e sono costituiti da elementi angolosi eterometrici mescolati a una subordinata matrice fine e formati dai litotipi locali. Elementi distribuiti al margine inferiore degli accumuli, su cui è edificata la porzione occidentale dell'abitato di Quincinetto, mostrano dimensioni particolarmente rilevanti, fino ad alcune migliaia di m^3 , determinando una possibile confusione con affioramenti del substrato. I conoidi di deiezione, caratterizzati da notevole inclinazione, sono costituiti da materiali per lo più grossolani e la loro alimentazione è suggerita dalla costituzione locale degli elementi (micascisti eclogitici, eclogiti, prasiniti, marmi e quarziti). Alla base di questi sedimenti si osservano localmente materiali fini (till subglaciale) deposti da piene torrentizie. Le alluvioni della Dora risultano invece piuttosto grossolane con qualche sacca limoso-argillosa.

Le forme di questo tratto di valle sono evidentemente frutto di una serie di agenti che hanno agito contemporaneamente e/o in successione nell'arco degli ultimi migliaia di anni: ad un assetto tettonico fragile originario si è sovrapposta l'azione del ghiaccio che ha rimarcato le zone a minore resistenza meccanica. L'arretramento e poi la sparizione della lingua glaciale principale (qui il ghiacciaio Balteo si ritiene abbia raggiunto gli spessori maggiori, forse anche maggiori al km) ha di fatto contribuito al detensionamento delle spalle glaciali e le acque di fusione hanno contribuito alla formazione di canali periglaciali paralleli agli assi glaciali (principali e secondari). In questo contesto è chiaro che gli agenti gravitativi hanno avuto (ed hanno tutt'ora) buon gioco ad instabilizzare questi versanti con fenomenologie che vanno molto probabilmente dalle DGPV alle cadute massi, passando da scivolamenti, debris flow, crolli e ribaltamenti.

Nella sua complessità, è comunque riscontrabile una regolarità almeno delle principali lineazioni tettoniche: in Fig. 5 si può osservare come su un settore di qualche km^2 di ampiezza, la regolarità e ricorrenza delle strutture identificabili sia da foto aerea che sul terreno è chiaramente riconoscibile.

La Fig. 6 è una fotocomposizione ripresa dalla zona di coronamento dei crolli del 2013 verso il fianco sinistro (Nord) dell'ampio canalone da cui periodicamente si verificano episodi di caduta massi e debris flow. È abbastanza evidente che, oltre a problemi di singoli blocchi instabili per crollo, anche di grosse dimensioni (non di rado $>1000 m^3$), l'assetto delle discontinuità indica che cinematiche riconducibili a scivolamenti planari e ribaltamenti non sono da escludere.

4. DESCRIZIONE DEL FENOMENO

Il fenomeno del maggio 2012 che ha dato inizio agli studi di maggior dettaglio si è innescato a circa 850 m s.l.m. Si tratta di un crollo che si è originato da un accumulo di blocchi ciclopici per un totale di diverse migliaia di m^3 , con blocchi fino a $50 m^3$ che hanno raggiunto il fondovalle interessando l'autostrada e la frazione Chiappetti di Quincinetto.

Le principali scarpate presenti a monte del campo di blocchi sono costituite nella quasi totalità dei casi da pareti

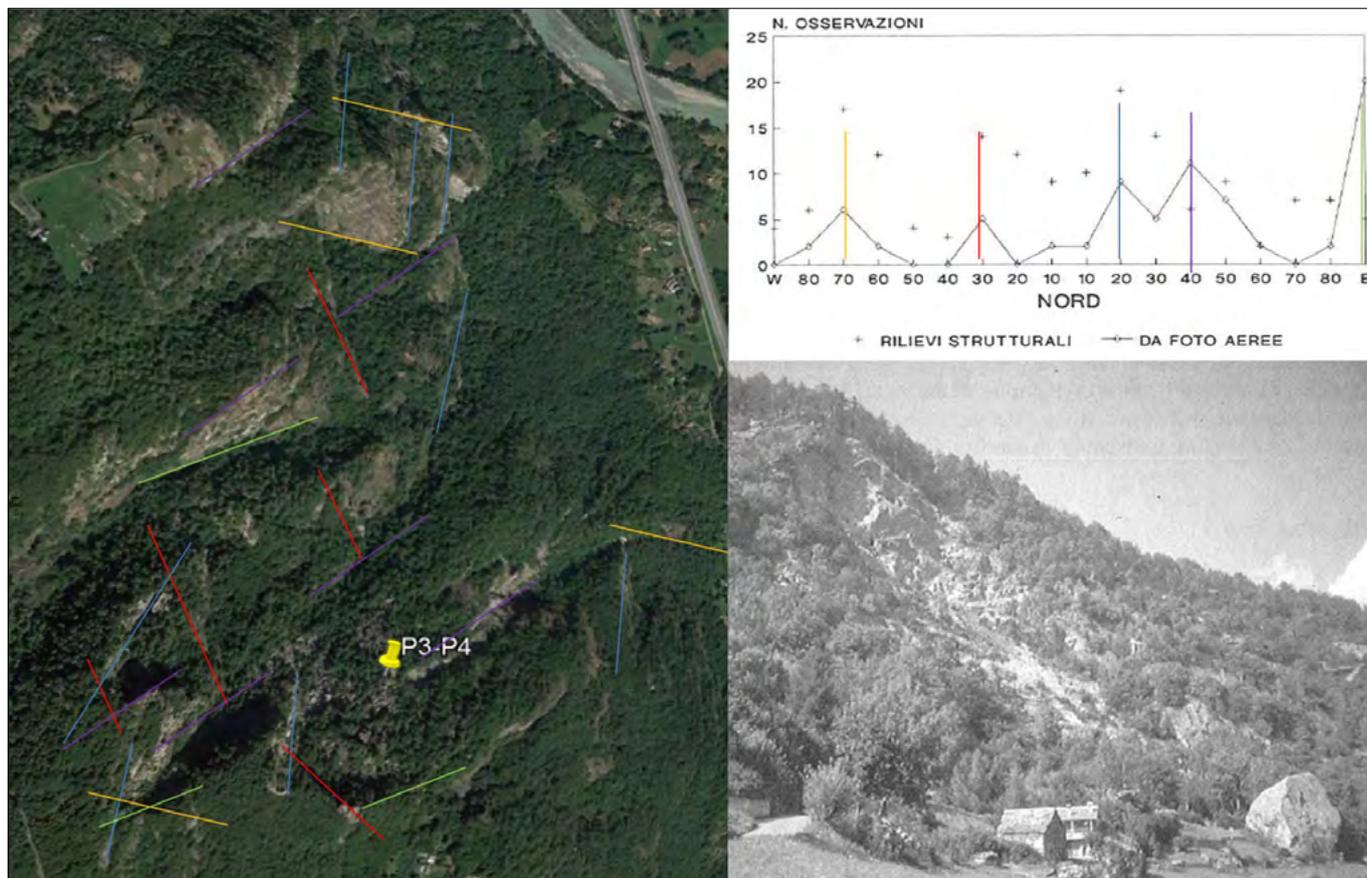


FIGURA 5. Lineazioni nell'area del distacco dei massi del 2013, confrontate con le osservazioni nella zona di Sapelle (poco a S) in cui in passato si era verificato un crollo di una grossa porzione rocciosa, tratte da Bottino & Mandrone (1991). I colori delle linee indicano le diverse famiglie di discontinuità, sia sull'ortofoto a sx, sia nel grafico a dx.



FIGURA 6. Fotocomposizione della parete ad N del canale oggetto della caduta massi: sono evidenziate almeno 3 famiglie di discontinuità a elevata persistenza con una orientazione reciproca congrua alla formazione di grossi prismi di roccia cinematicamente instabili.

di micascisti che mostrano fratture con apertura e persistenza anche pluridecimetrica e apertura decimetrica. Si segnala la presenza di affioramenti di potenza plurimetrica di marmi impuri nei micascisti e chiaramente individuabili per il colore biancastro a strie verticali nerastre rispetto alle tonalità sul rosso dei micascisti alterati.

Al piede delle scarpate sembrerebbe essere presente una zona depressa, anche piuttosto profonda, in cui si è impostato un deposito di blocchi ciclopici "trattenuti" da uno sperone di roccia affiorante situato più a valle. Queste depressioni potrebbero essere una rielaborazione di antichi

scaricatori laterali del ghiacciaio, in quanto tracce di rocce montonate e di strie sono estremamente comuni.

I primi studi dell'Arpa Piemonte eseguiti sul campo di blocchi hanno messo in luce movimenti nell'ordine di 2-4 cm/anno. A seguito di queste evidenze sono stati finanziati dal Ministero dell'Ambiente attraverso la Regione ed il comune ingenti risorse per lo studio, il monitoraggio e la messa in sicurezza dell'area.

Da par suo, anche la SITAV, l'ente gestore dell'autostrada TO-AO, ha provveduto ad eseguire studi ed interventi tesi alla riduzione del rischio connesso a chi percorre questa importante via di comunicazione. Il monitoraggio che ne è seguito è molto complesso ed articolato e non è questa la sede per una sua trattazione: ricordiamo solo che oltre a tecniche tradizionali sono stati messi a punto sistemi interferometrici satellitari e terrestri.

Al fine di comprendere l'evoluzione del fenomeno è stata realizzata una carta geomorfologica, Fig. 7.

4.1 Ricostruzione dei blocchi P3 e P4 con tecniche "structure from motion"

La fotogrammetria è una la tecnica di rilievo il grado di ricostruire forma e dimensioni di un oggetto attraverso l'acquisizione d'immagini riprese da posizioni distinte. In fotogrammetria classica determinando nello spazio oggetto la posizione del punto immagine e del centro di proiezione d'ogni punto oggetto ripreso in due o più fotogrammi, se ne ricavano le coordinate per intersezione delle rette proiettanti.

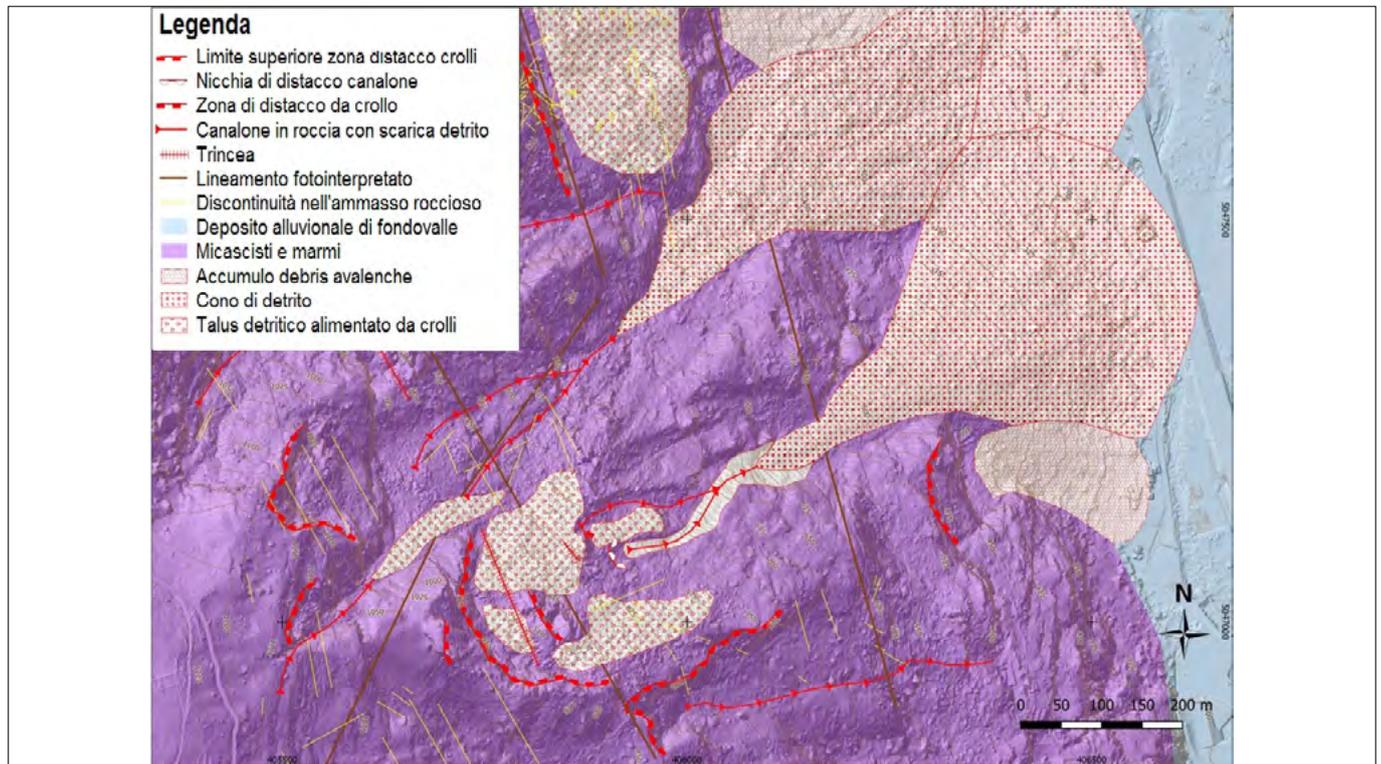


FIGURA 7. Carta geomorfologica dell'area.

Negli ultimi anni si sono sviluppati software di restituzione fotogrammetrica che consentono di processare simultaneamente una gran quantità di immagini e risolvere le equazioni di collinearità per un gran numero di punti, il tutto senza compromettere la precisione dei risultati. Questi applicativi si basano sulla correlazione (*matching*) automatica di immagini differenti, mediante il confronto dei toni radiometrici di pixel omologhi riconoscibili su due o più fotogrammi (*tie points*). Mediante tale processo le immagini sono correttamente orientate entro un sistema di riferimento relativo e una volta inserite le coordinate spaziali di punti noti (*Ground Control Point*, GCP), riconosciuti

manualmente su ogni fotogramma, è possibile giungere all'orientamento assoluto del blocco fotogrammetrico. Una volta noti i parametri di orientamento esterno è possibile eseguire quello che è il processo più importante: il *dense matching* che consente di ricavare nuvole di punti tridimensionali dalle immagini utilizzate.

L'accuratezza del modello finale dipende dalla precisione nella misura dei GCP, e dalla ridondanza dei parametri risolvibili, ottenibile con sovrapposizioni elevate tra immagini successive (80%-90%). Per immagini digitali di superfici naturali la precisione finale del processo fotogrammetrico (quantificata dagli scarti ottenuti sui punti

Tabella 1. Codifica, composizione e caratteristiche salienti dei dataset fotografici utilizzati.

Piattaforma	Dataset	N. immagini	Gcp	Altezza volo (M)
elicottero	eli_1	60	no	-
	eli_2	11	no	-
Uav	Fer_1	212	si	50
Integrato	Fer_2 (Uav)	212	si	50
	Uni_1 (Terra)	179	si	5.6

Tabella 2. Parametri di accuratezza e numero di punti costituenti le singole nuvole di punti prodotte.

Dataset	Errore di riproiezione (Pix)	Accuratezza (Pix)	Accuratezza (M)	Gsd (Cm/pix)	N. punti
eli_1	0.350	-	-	-	1.51E+06
eli_2	0.460	-	-	-	3.22E+06
Fer_1	0.782	1.100	0.037	1.120	1.79E+07
Fer_2 (Uav)	0.782	1.440	0.027	1.120	1.66E+06
Uni_1 (Terra)	0.870	3.350	0.013	0.065	7.83E+07

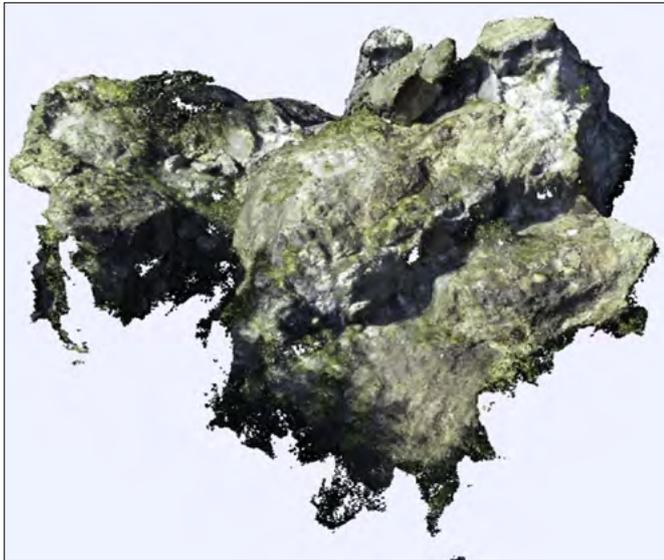
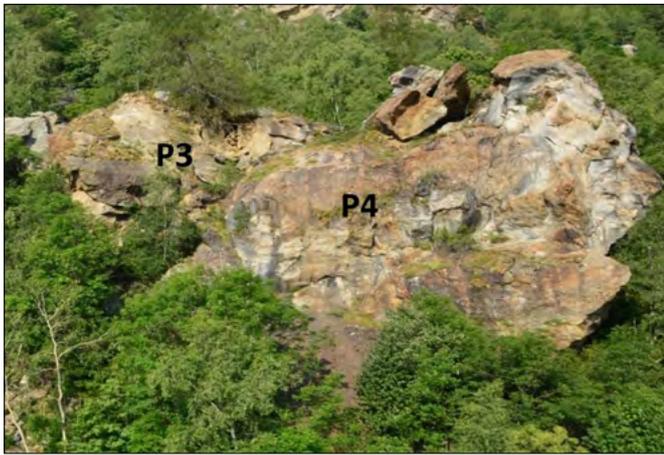


FIGURA 8. Dettaglio blocchi P3 e P4: in alto immagine ripresa da elicottero, in basso la *point cloud* da modello integrato.

di controllo, misurati in metri) corrisponde normalmente come ordine di grandezza alla dimensione del pixel sul terreno, o a una frazione di esso (0.2 - 1 pixel).

In questo caso sono stati utilizzati più dataset fotografici, acquisiti da elicottero (eli_1 e eli_2), UAV (Fer_1) e da terra (Uni_1) (i dettagli sono riportati nelle Tab. 1 e 2)

A partire da un video girato a bordo dell'elicottero sono stati estratti 60 fotogrammi per il dataset denominato Eli_1, mentre sono stati acquisiti 11 scatti fotografici ad opera dei tecnici del Soccorso Alpino che compongono il dataset denominato Eli_2. In questa fase non erano stati ancora materializzati sul terreno *Ground Control Points*, quindi non si possono stimare GSD e accuratezza di questi modelli. È stato poi processato il dataset acquisito dall'Arch. Ferraris per l'appoggio del quale sono stati materializzati 6 GCP. Infine, è stato ricostruito un modello integrato in cui sono stati rielaborati i fotogrammi acquisiti dall'Arch. Ferraris per migliorare contrasto ed esposizione delle immagini. Le immagini sono quindi state riallineate, e si è ricostruita la relativa *dense cloud*. Al dataset sono stati aggiunti 179 fotogrammi ripresi da terra a tergo del blocco P4, al fine di colmare una zona d'ombra riscontrata nel precedente modello e acquisiti durante l'attività di terreno eseguita da UniTo nel mese di ottobre 2019. Per vincolare queste immagini e per garantirne un coerente orientamento assoluto, sono state estratte dalla *dense cloud* le coordinate di 5 punti notevoli riconoscibili sullo sperone roccioso. Le immagini sono state così riallineate ed è stata prodotta la relativa nuvola densa correttamente georiferita. In ultima battuta l'allineamento delle due nuvole è stato incrementato tramite una procedura *point based*. Grazie a queste elaborazioni è stato possibile realizzare un modello tridimensionale di gran parte dell'area di studio.

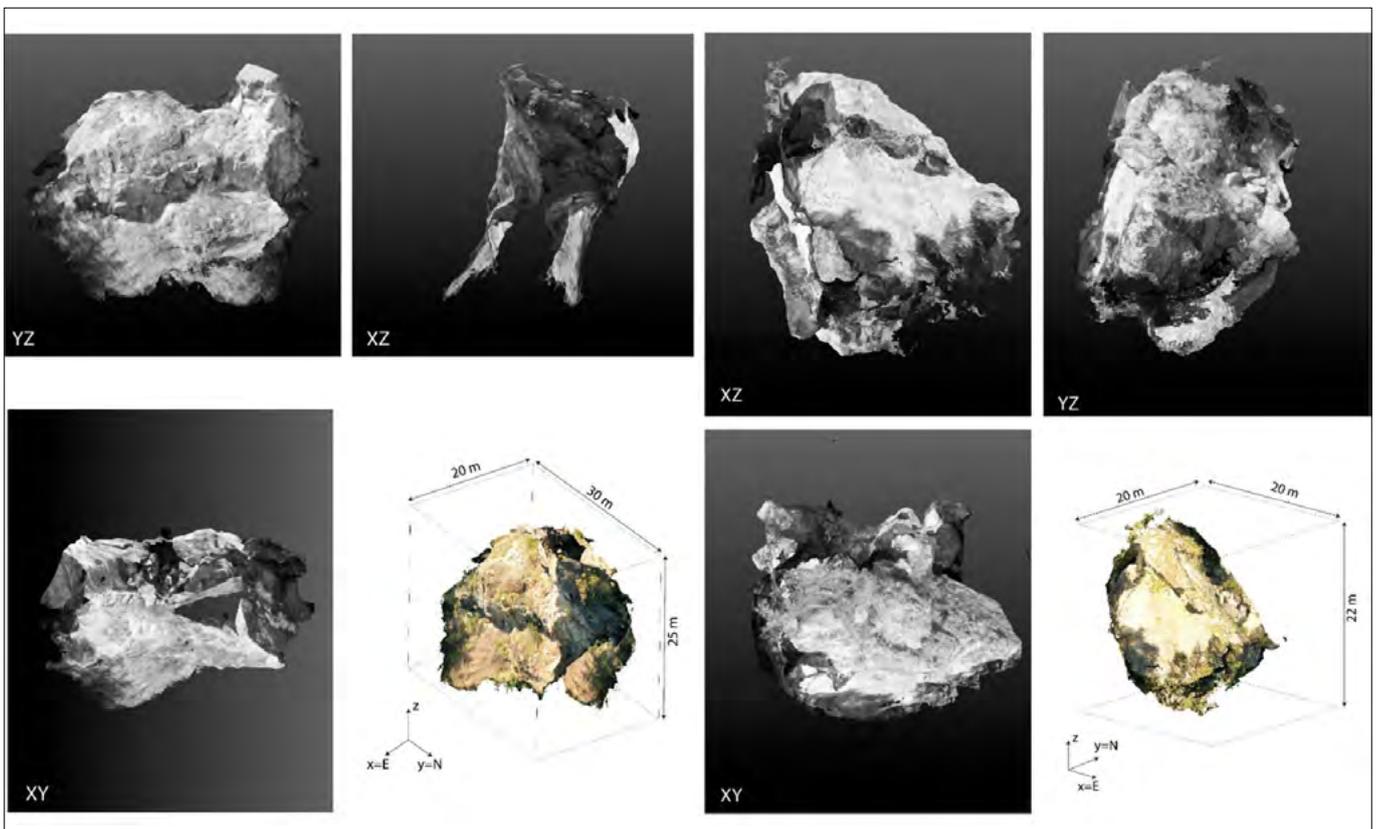


FIGURA 9. Ricostruzione in 3 dimensioni dei blocchi P3 e P4.

A titolo di esempio si riportano i risultati ottenuti per i due blocchi più pericolosi, codificati con le sigle P3 e P4 (Fig. 8). Va premesso che tutti i modelli consentono di apprezzare solo parzialmente l'estensione dei blocchi. La porzione ovest di tali oggetti risulta infatti coperta da altri blocchi, o immersa all'interno del versante. Quindi è possibile misurarne con ragionevole accuratezza solamente il volume minimo, ossia l'ingombro della superficie di inviluppo delle facce esposte, che ammonta per il blocco P4 a 3300 m³ ed a 1700 m³ per il blocco P3. Considerando che parte di essi sia coperta/non visibile, che non si estendano considerevolmente verso il basso, e presumendo una possibile forma dei blocchi in base ad osservazioni di campo, è ragionevole stimare il volume di P4 e P3 in 5000 m³ e 2000 m³ rispettivamente (Fig. 9).

Interrogando il modello prodotto è stato stimato il volume complessivo del campo blocchi posto a tergo del P3 e P4: considerando solo i blocchi visibili sulla superficie si raggiungono circa i 200 mila m³.

Di fatto il vero problema di questa frana è comprendere cosa si nasconde sotto il campo di blocchi. I principali dubbi sono: a) la natura del campo di blocchi, b) lo spessore del campo di blocchi, c) le condizioni del substrato su cui poggia, d) come agenti esterni (sisma, pioggia) influenzino i movimenti (considerando che una correlazione fra spostamenti e piogge è già stata evidenziata).

5. CONSIDERAZIONI PRELIMINARI

Sulla base dei dati preliminari è possibile effettuare le seguenti considerazioni:

- 1) il versante in studio è interessato da fenomeni di frana diffusi e di diversa tipologia e gli studi condotti finora non sono esaustivi al fine della comprensione della sua evoluzione;
- 2) il volume complessivo del campo blocchi posto a tergo dei blocchi P3 e P4, considerando solo i blocchi visibili sulla superficie, è di circa 200.000 m³;
- 3) tutti i modelli ottenuti consentono di apprezzare solo parzialmente l'estensione dei blocchi P3 e P4.

Permane però la possibilità che questi blocchi abbiano un volume ancora maggiore, o che rappresentino solamente la porzione sommitale, svincolata cinematicamente, non di un accumulo di crollo ma di materiale ribassato da scorrimento planare o di uno sperone roccioso in ribaltamento. In ogni caso analizzando il rapporto tra le dimensioni principali di tali blocchi è evidente come essi siano in una situazione geometricamente metastabile.

In conclusione, quello che inizialmente era stato classificato come un crollo di massi così come se ne registrano molti in zona si è dimostrato qualcosa di molto più complesso e di difficile schematizzazione. I crolli sono ben noti, ma innanzitutto essi non si sono verificati da una parete rocciosa ma bensì da un campo di blocchi in movimento che, quasi con un effetto tapis roulant, spinge i blocchi più avanzati verso il cambio di pendenza fino a quando questi perdono l'equilibrio e si muovono verso valle. L'alimentazione del campo di blocchi avviene per un progressivo processo di evoluzione delle falesie presenti a monte, essenzialmente a causa di

crolli e ribaltamenti. L'acqua, in tutte e due questi processi, gioca un ruolo chiave, sia predisponente che scatenante. Tutta l'area mostra una evoluzione gravitativa imponente e eterogenea tanto che ipotizzare che tutti i processi si possano inquadrare organicamente in una grossa deformazione di versante non è assolutamente da escludere.

Di fatto, trattare il caso semplicemente come una caduta massi potrebbe essere semplicistico e potrebbe portare ad una soluzione temporanea o parziale. A maggior ragione, la complessità dei fenomeni osservati consiglia di intervenire con estrema cautela valutando complessivamente l'effetto di eventuali opere messe in atto per la minimizzazione del rischio.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- BISTACCHI ANDREA, EVA ELENA, MASSIRONI MATTEO & SOLARINO STEFANO (2000). Miocene to Present kinematics of the NW-Alps: evidences from remote sensing, structural analysis, seismotectonics and thermochronology. *Journal of Geodynamics* 30 (2000) 205±228
- BISTACCHI A., DAL PIAZ G.V., MASSIRONI M., ZATTIN M. & BALESTRIERI M.L. (2001). The Aosta-Ranzola extensional fault system and Oligocene-Present evolution of the Austroalpine-Penninic wedge in the north-western Alps. *Int j earth Sciences (Geol Rundsch)* 90:654-667.
- BOTTINO G., MANDRONE G. (1991). "Studio delle condizioni di stabilità dei versanti rocciosi del comune di Quincinetto (V. Dora Baltea)". *Boll. Ass. Min. Sub., Torino. Anno XXVIII, v. 4, pp. 601-624.*
- CASAGLI N., INTRIERI E., CARLÀ T., DI TRAGLIA F., FRODELLA W., GIGLI G., LOMBARDI L., NOCENTINI M., RASPINI F., TOFANI V. (2021). *Monitoring and Early Warning Systems: Applications and Perspectives*. In: CASAGLI N., TOFANI V., SASSA K., BOBROWSKY P.T., TAKARA K. (eds), *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*. WLF 2020. ICL Contribution to Landslide Disaster Risk Reduction.
- FILIPPELLO A., MANDRONE G., BORNAZ L. (2015). *Structural data treatment to define rockfall susceptibility using long range laser scanner*. In: G. LOLLINO et al. (eds), *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 6*, 721-724.
- FORNO M.G., GIANOTTI F., RACCA G. (2010). *Significato paleoclimatico dei rapporti tra il glacialismo principale e quello tributario nella bassa Valle della Dora Baltea*. *Il Quaternario*, 23 (1), pp. 105-124.
- PIRULLI M., SCAVIA C., TARARBRA M. (2015). *On the Use of Numerical Models for Flow-like Landslide Simulation*. In: LOLLINO G. et al. (eds), *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2*. Springer, Cham.
- REGIS D., RUBATTO D., DARLING J., CENKI-TOK B., ZUCALI M., ENGI M. (2014). *Multiple Metamorphic Stages within an Eclogite-facies Terrane (Sesia Zone, Western Alps) Revealed by Th-U-Pb Petrochronology*. *Jour. of petrology*, 55, 1429-2556.
- REGIS D., VENTURINI G., ENGI M. (2016). *Geology of the Scalaro valley – Sesia Zone (Italian Western Alps)*, *Journal of Maps*, 12:4, 621-629.

Proposta per la mitigazione del rischio geo-idrologico nell'Alta Val Tanaro (provincia di Cuneo - Italia nord-occidentale)

Proposal for the geo-hydrological risk mitigation in the upper Tanaro Valley (province of Cuneo - northwestern Italy)

MAURO BONASERA¹, ANNALISA BOVE², ANNA MARIA FERRERO³, GIANDOMENICO FUBELLI³, MICHELE LICATA³, LUCIANO MASCIOCO⁴, BATTISTA TABONI³, GESSICA UMILI³

¹ Servizio Geologico d'Italia - ISPRA

² Geologo libero professionista, Consigliere Generale Fondazione CRC, socio SIGEA-APS

³ Dipartimento di Scienze della Terra – Università degli Studi di Torino

⁴ Dipartimento di Scienze della Terra – Università degli Studi di Torino, consigliere SIGEA-APS

E-mail: battista.taboni@unito.it

Parole chiave: rischio geo-idrologico, Fiume Tanaro, provincia di Cuneo, Italia nord-occidentale

Key words: geo-hydrological risk, Tanaro River, province of Cuneo, northwestern Italy

1. PREMESSA

I principali centri abitati dell'Alta Valle Tanaro hanno subito, nel 1994, 2016 e 2020, eventi alluvionali che hanno determinato in più punti esondazioni e notevoli danni.

In un precedente studio, si è messo in evidenza come la Città di Ceva, centro urbano collocato presso la porzione terminale del territorio oggetto del presente studio, sia costantemente a rischio alluvione da parte del F. Tanaro, in quanto la sezione fluviale in corrispondenza delle Scuole Materne (costruite purtroppo a pochi metri dall'alveo del corso d'acqua) è risultata insufficiente a contenere portate di progetto anche con tempi di ritorno molto bassi (Bonasera *et al.*, 2020).

Per contrastare gli effetti delle piogge che negli ultimi decenni hanno mostrato un aumento di intensità e frequenza, si propone la realizzazione di sbarramenti che, opportunamente posizionati sul territorio, potranno laminare le piene in occasione di eventi critici.

Un territorio particolarmente adatto per costruire tali sbarramenti, sia perché poco o punto antropizzato sia per la vastità di area drenata da ciascuna opera, appare la testata della Val Tanaro, laddove scorrono i due torrenti che, confluendo, danno luogo al F. Tanaro: il Torrente Negrone e il Torrente Tanarello.

Il presente articolo sintetizza i primi risultati di questo studio, finanziato dalla Fondazione Cassa di Risparmio di Cuneo, Ente da sempre attento alla tutela del proprio territorio.

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area in esame è situata nell'Italia nord-occidentale, tra il Piemonte sud-occidentale e la Regione Liguria, al confine con la Francia; in particolare, essa è rappresentata dalla parte alta del bacino idrografico del Fiume Tanaro, che si estende per una superficie di circa 400 km², con quote che vanno dai 2651 m s.l.m. del Monte Marguareis ai 386 m s.l.m. dell'abitato di Ceva (Fig. 1). L'area, essenzialmente montuosa, ricade amministrativamente all'interno delle provincie di Cuneo, Savona e Imperia, nei territori comu-

nali di Briga Alta (CN), Ormea (CN), Garessio (CN), Priola (CN), Bagnasco (CN), Battifollo (CN), Nucetto, Perlo (CN), Ceva (CN), Triora (IM), Mendatica (IM), Cosio di Arroscia (IM), Pornassio (IM), Armo (IM) e Massimino (SV). La popolazione risiede principalmente nei piccoli paesi del fondovalle, sebbene una piccola parte degli abitanti occupa invece le piccole frazioni dislocate sugli acclivi versanti che bordano la valle principale. Il comune con il maggior numero di cittadini è Ceva (5.774 abitanti), che si sviluppa per 42,96 km² su un territorio prevalentemente collinare; seguono Garessio con 3.150 abitanti e Ormea con 1.750 abitanti. La principale via di comunicazione è rappresentata dalla Strada Statale S.S. 28 che percorre il fondovalle dall'abitato di Ponte di Nava fino a Ceva. L'a-

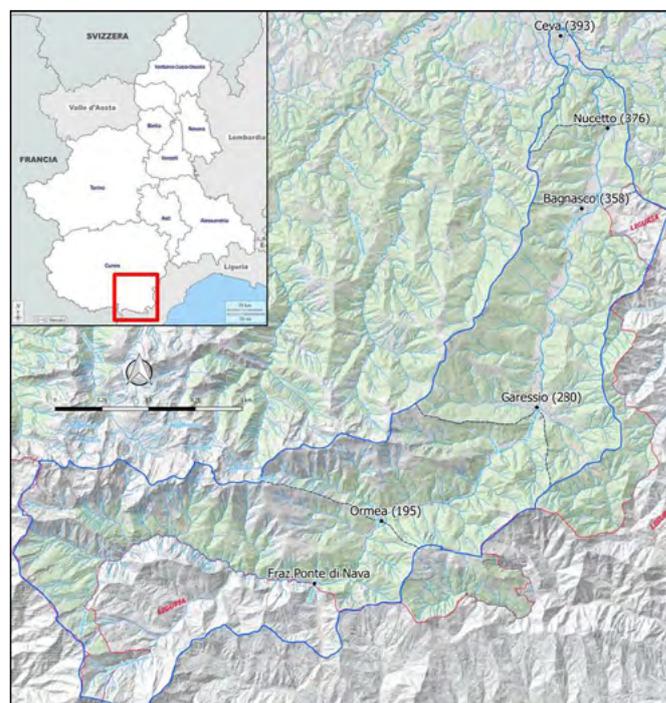


FIGURA 1. L'alta Val Tanaro e i suoi principali centri abitati (tra parentesi l'area in km² dei relativi bacini sottesi).

rea di studio è raggiungibile dalla Liguria dal Colle di Nava tramite la S.S. 28 e dal Piemonte tramite l'autostrada A6 imboccando lo svincolo per la SS 28 all'uscita di Ceva.

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Dal punto di vista *geologico strutturale* (Piana et al., 2017), il bacino del F. Tanaro con chiusura a Ceva è impostato (Fig. 2):

- nella *Zona Assiale della catena alpina* (*Dominio Pennidico*), corrispondente in parte al Paleomargine Continentale Europeo (qui affiorano soprattutto le *Unità Brianzonesi Interne* e, in minor misura, il *basamento polimetamorfico brianzonese*) e alle Unità Oceaniche Liguri-Piemontesi (in particolare nella testata della Val Tanaro, in destra idrografica, affiorano unità non metamorfiche quali le *Unità Liguri delle Alpi Marittime*);
- nella *Zona Esterna della catena alpina*, corrispondente al Paleomargine Continentale Europeo (dove in sinistra idrografica dell'alta Val Tanaro affiorano le *successioni Delfinense provenzale e Brianzonese esterna*);
- e nei *Bacini Sinorogenetici*, essenzialmente nel Bacino Terziario Ligure Piemontese.

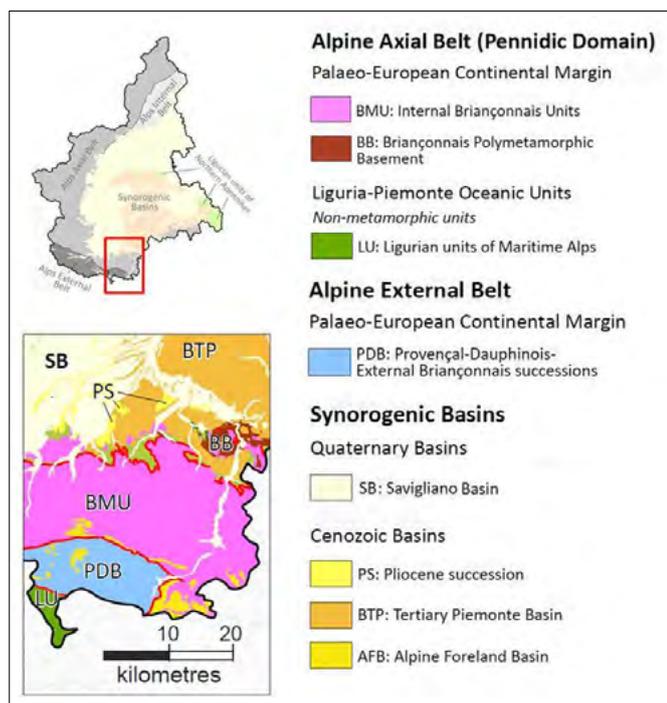


FIGURA 2. Inquadramento geologico strutturale. Modificato dalla Carta Geologica del Piemonte alla scala 1:250.000 (Piana et al., 2017).

Le *litologie* presenti nella porzione di bacino del F. Tanaro qui considerato sono rappresentate per il 77% da rocce silicatiche (gneiss, micascisti, quarziti, porfidi, conglomerati, Flysch, etc.) e per il 23% da rocce carbonatiche (calcari e dolomie).

4. CALCOLO DELLE PORTATE DI MASSIMA PIENA

Nel presente lavoro sono state valutate le portate di massima piena con diversi tempi di ritorno nelle sezioni fluviali del F. Tanaro a Ormea (ponte del centro storico), Garessio (ponte di Via Vittorio Emanuele II), Bagnasco (ponte della S.P.490), Nucetto (ponte di Via Caramelli) e Ceva (in corrispondenza della Scuola Materna).

La portata di massima piena è stata calcolata con il Metodo Razionale attraverso la seguente relazione:

$$Q_{max} = k \cdot C \cdot i \cdot A$$

dove:

- Q_{max} è la portata di massima piena del corso d'acqua espressa in m^3/s ;
- k è un fattore adimensionale che tiene conto della non uniformità delle unità di misura. Se A è espressa in km^2 ed i in mm/h , per ottenere la portata in m^3/s bisogna attribuire a k il valore $1/3,6 = 0,278$;
- C è il coefficiente di deflusso;
- i_c è l'intensità della precipitazione critica che provoca la piena (mm/ora);
- A è l'area del bacino a monte della sezione presa in esame (km^2).

Le precipitazioni considerate per valutare le intensità critiche (i_c) sono state estratte dal *GeoPortale ARPA Piemonte - Atlante piogge intense in Piemonte* (Rif. WEB n. 1), sul sito del quale il territorio regionale è suddiviso in celle di lato 250 metri, per ciascuna delle quali è possibile estrapolare i parametri delle precipitazioni intense (a e n) con assegnato tempo di ritorno. Mediando i dati relativi a un numero congruo di celle omogeneamente distribuite in ogni sottobacino del F. Tanaro considerato (corrispondenti a circa un decimo di ogni bacino), sono state ricavate le curve di probabilità pluviometrica rappresentative dei sottobacini ai fini della valutazione delle portate alle relative sezioni di chiusura. Per quantificare i tempi di corrivazione, è stata utilizzata la formula di Giandotti che viene comunemente usata in Italia per bacini con area maggiore di $20 km^2$ e quindi idonea per tutti i bacini considerati nello studio. Infine, i coefficienti di deflusso (C) sono stati mediati sui

Tabella 1. Valori del coefficiente di deflusso C in funzione del tipo di terreno, dell'uso del suolo e della pendenza (Benini, 1990).

Vegetazione e pendenza	Tipi di terreno ¹		
	leggero	medio	compatto
Boschi	<10%	0,13	0,18
	>10%	0,16	0,21
Pascoli	<10%	0,16	0,36
	>10%	0,22	0,42
Coltivi	<10%	0,40	0,60
	>10%	0,52	0,72

¹ Cioè terreni con permeabilità alta (t. leggero), media (t. medio) o bassa (t. compatto).

diversi bacini utilizzando la Tabella n. 1 (Benini, 1990). Nelle Tabelle 2, 3, 4, 5 e 6, vengono riportati i parametri utilizzati per la valutazione delle portate di massima piena

alle sezioni di Ormea (ponte del centro storico), Garessio (ponte di Via Vittorio Emanuele II), Bagnasco (ponte della SP490) e Nucetto (ponte di Via Caramelli).

Tabella 2. Valutazione delle portate di massima piena alla sezione di Ormea.

SEZIONE DI ORMEA									
k	C	i	A	a	n	Calcolo del tc (Giandotti)			Q max
		mm/ora	km ²						m ³ /s
0,278	0,47	22,02	195	44,384	0,5103	tc (ore)	4,17	Tr 20	561
0,278	0,47	25,98	195	52,386	0,5101	L (km)	26	Tr 50	662
0,278	0,47	28,96	195	58,367	0,5103	h _{media} (m)	1518	Tr 100	738
0,278	0,47	31,91	195	64,328	0,5102	h _{sez} (m)	715	Tr 200	813

Tabella 3. Valutazione delle portate di massima piena alla sezione di Garessio.

SEZIONE DI GARESSIO									
k	C	i	A	a	n	Calcolo del tc (Giandotti)			Q max
		mm/ora	km ²						m ³ /s
0,278	0,46	19,61	280	45,180	0,5079	tc (ore)	5,45	Tr 20	702
0,278	0,46	23,17	280	53,387	0,5078	L (km)	38	Tr 50	830
0,278	0,46	25,84	280	59,533	0,5078	h _{media} (m)	1380	Tr 100	925
0,278	0,46	28,50	280	65,646	0,5079	h _{sez} (m)	572	Tr 200	1.020

Tabella 4. Valutazione delle portate di massima piena alla sezione di Bagnasco.

SEZIONE DI BAGNASCO									
k	C	i	A	a	n	Calcolo del tc (Giandotti)			Q max
		mm/ora	km ²						m ³ /s
0,278	0,45	17,20	358	45,331	0,4970	tc (ore)	6,86	Tr 20	770
0,278	0,45	20,30	358	53,508	0,4970	L (km)	52	Tr 50	909
0,278	0,45	22,63	358	59,633	0,4970	h _{media} (m)	1253	Tr 100	1.013
0,278	0,45	24,95	358	65,727	0,4972	h _{sez} (m)	470	Tr 200	1.117

Tabella 5. Valutazione delle portate di massima piena alla sezione di Nucetto.

SEZIONE DI NUCETTO									
k	C	i	A	a	n	Calcolo del tc (Giandotti)			Q max
		mm/ora	km ²						m ³ /s
0,278	0,45	16,31	376	45,392	0,4830	tc (ore)	7,24	Tr 20	767
0,278	0,45	19,24	376	53,519	0,4831	L (km)	56	Tr 50	905
0,278	0,45	21,43	376	59,600	0,4832	h _{media} (m)	1224	Tr 100	1.008
0,278	0,45	23,61	376	65,658	0,4833	h _{sez} (m)	446	Tr 200	1.110

Tabella 6. Valutazione delle portate di massima piena alla sezione di Ceva.

SEZIONE DI CEVA									
k	C	i	A	a	n	Calcolo del tc (Giandotti)			Q max
		mm/ora	km ²						m ³ /s
0,278	0,45	15,413	393	45,114	0,4716	tc (ore)	7,66	Tr 20	758
0,278	0,45	18,157	393	53,125	0,4718	L (km)	64	Tr 50	893
0,278	0,45	20,212	393	59,124	0,4719	h _{media} (m)	1196	Tr 100	994
0,278	0,45	22,259	393	65,099	0,4720	h _{sez} (m)	372	Tr 200	1.094

Si ricorda che, dalla verifica idraulica effettuata in Bonasera *et al.* (2020), la sezione di Ceva è risultata insufficiente a contenere piene con tempi di ritorno anche di soli 20 anni.

Ormai ci sono troppe abitazioni esposte in zone pericolose sul fondovalle Tanaro, sia a Ceva sia negli abitati a monte. Si è pertanto pensato che, per ridurre il rischio di alluvione durante gli eventi meteorici estremi, si possa intercettare l'acqua di ruscellamento nella zona di testata, per poi rilasciarla gradatamente una volta passata la piena.

5. PROPOSTA PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO

A partire dai dati forniti dall'Inventario dei Fenomeni Franosi d'Italia (IFFI), dai dati pluviometrici forniti dall'Arpa Piemonte e dai dati geologici ricavati dalla cartografia prodotta da Vanossi (1972) e considerando quanto ottenuto dalle successive indagini sul terreno appositamente eseguite durante le fasi iniziali dello studio qui presentato, sono stati individuati due siti in cui collocare altrettanti potenziali sbarramenti per la mitigazione del rischio geo-idrologico nell'Alta Val Tanaro: il n. 1 sul Torrente Negrone e il n. 2 sul Torrente Tanarello (Fig. 3).

L'individuazione dei due siti ha tenuto conto dei seguenti criteri:

- *area di intercettazione* delle acque di ruscellamento;
- *visibilità* dai centri abitati o dalle vie di comunicazione;
- *accessibilità* del potenziale cantiere;
- *interferenza degli invasi al colmo* con edifici, vie di comunicazione o altre infrastrutture;

- *interferenza con fenomeni di instabilità* localizzati sui versanti (Fig. 4).

In riferimento a questi criteri, per quanto riguarda l'area di intercettazione delle acque di ruscellamento, lo sbarramento n. 1 chiuderebbe un bacino di 48,8 km² mentre lo sbarramento n. 2 intercetterebbe un bacino di 48,4 km² per un totale di 97,2 km², quindi pari a circa il 25 % del bacino complessivo con chiusura a Ceva. Per quanto concerne l'aspetto paesaggistico, lo sbarramento n. 1 risulterebbe invisibile sia dalle abitazioni di Viozene sia dai collegamenti con Upega (verso monte) e con Ormea (verso valle); lo sbarramento n. 2, essendo situato all'interno della Val Tanarello, la quale è disabitata nel settore medio-basso, non potrebbe essere notato neanche dalla SS 28, che corre oltre l'immissione di questa valle tributaria nel fondovalle principale. Il sito dello sbarramento 1 è accessibile tramite strada sterrata che permette di raggiungere l'alveo del torrente per poi proseguire lungo l'alveo sino a circa 100 m dal sito; il sito dello sbarramento 2 è accessibile tramite strada sterrata, benché sia presente un piccolo tratto da risistemare causa franamento della sede stradale. Infine, gli invasi al colmo, che potenzialmente si verrebbero a creare solo in occasione di eventi estremi, non interferirebbero con le infrastrutture neanche ipotizzando altezze esagerate per gli sbarramenti pari a 125 m (Figg. 4 e 5).

Infine, per quanto riguarda la franosità del territorio, ci si è tenuti il più possibile lontani dai fenomeni gravitativi più importanti della zona, come si può vedere dalle Figure 6 e 7, nelle quali le ubicazioni degli ipotetici sbarramenti

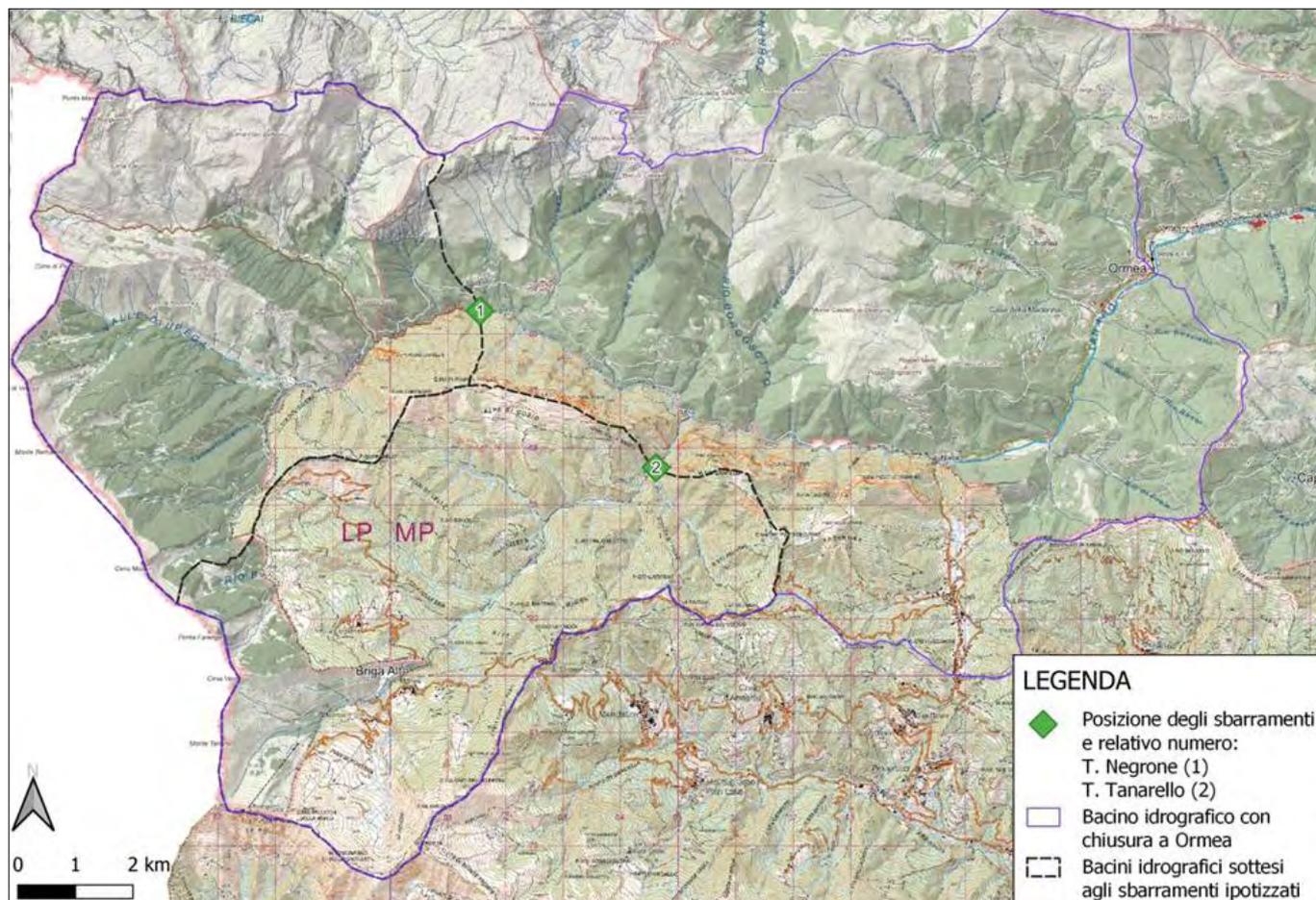


FIGURA 3. Ubicazione dei due potenziali sbarramenti per la mitigazione del rischio geo-idrologico nell'Alta Val Tanaro.

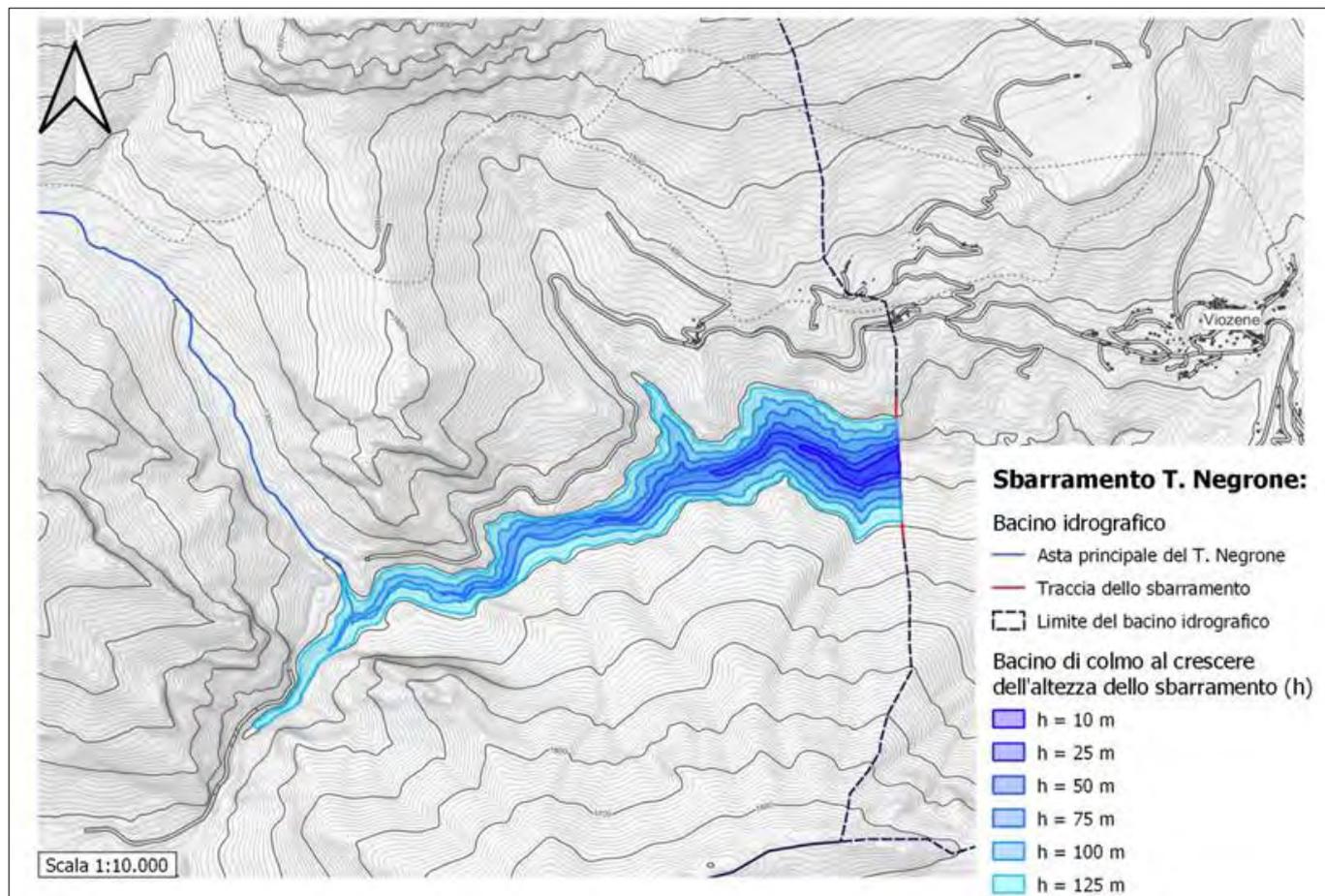


FIGURA 4. Rappresentazione dell'invaso al colmo con uno sbarramento di altezza (H) pari a 125 m sul T. Negrone, senza alcuna interferenza con la S.P. 154.

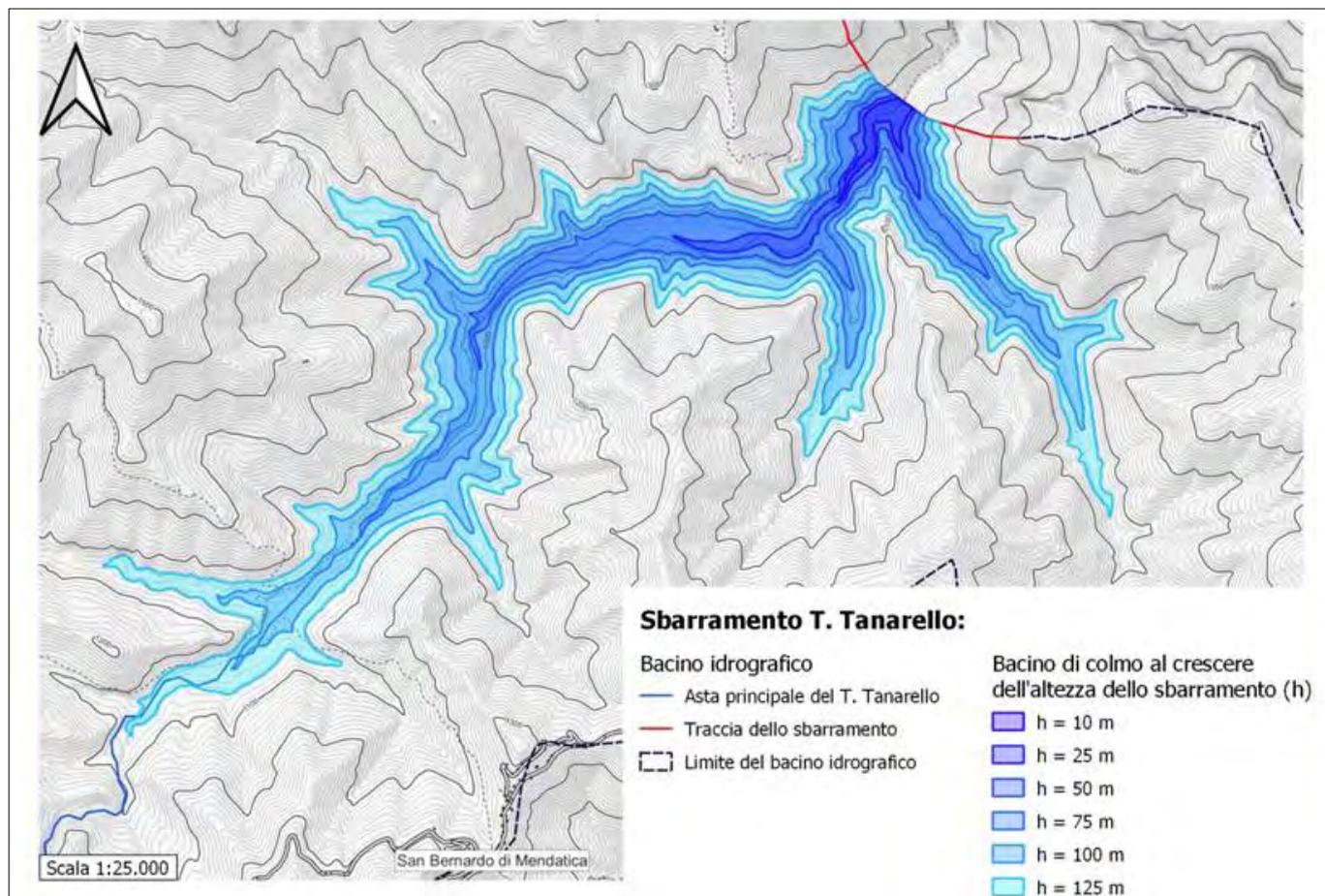


FIGURA 5. Rappresentazione dell'invaso al colmo con uno sbarramento di altezza (H) pari a 125 m sul T. Tanarello, senza alcuna interferenza con infrastrutture e/o strutture antropiche.

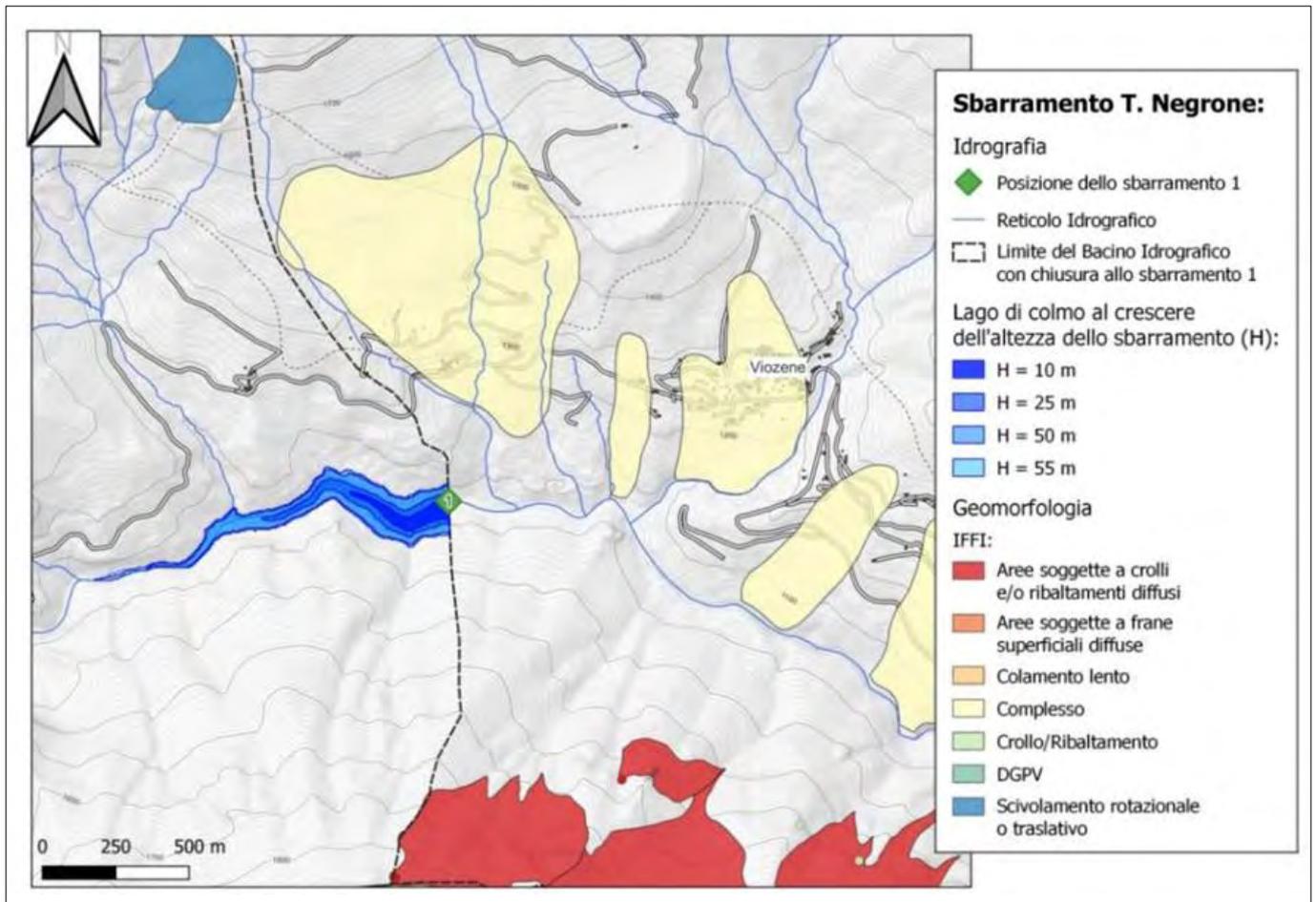


FIGURA 6. Ubicazione dello sbarramento 1 in relazione ai fenomeni gravitativi della zona.

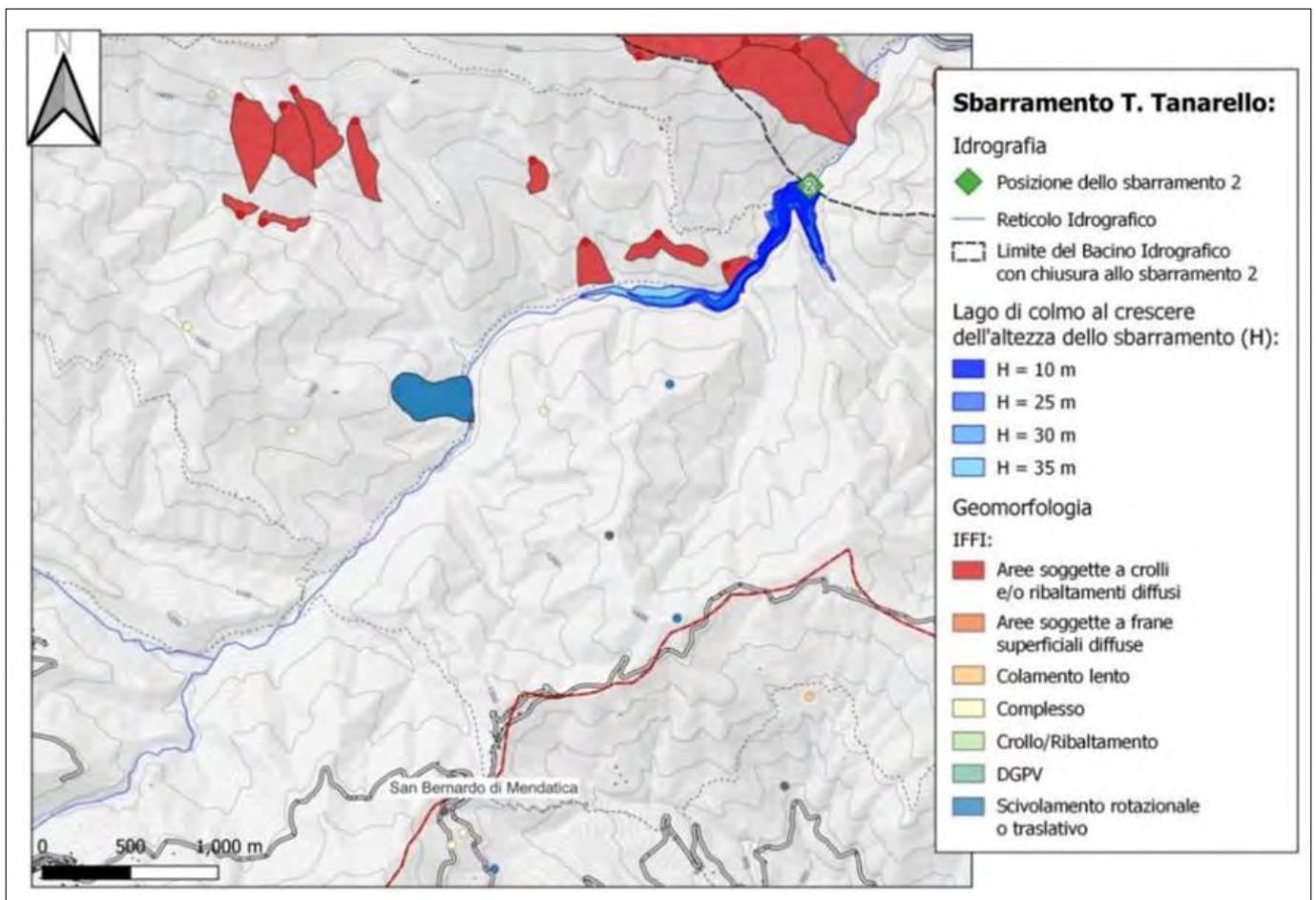


FIGURA 7. Ubicazione dello sbarramento 2 in relazione ai fenomeni gravitativi della zona.

1 e 2 sono riportate sulla cartografia dei fenomeni franosi censiti da ISPRA per le Regioni Piemonte e Liguria (Rif. WEB n. 2).

Note le precipitazioni caratteristiche per ciascun bacino sotteso alle sezioni di controllo citate in precedenza e localizzate presso gli abitati fra Ormea a monte e Ceva a valle, sono state ricavate le portate che tali precipitazioni producono presso i due sbarramenti e i corrispettivi volumi di piena: poiché il valore della portata e del volume crescono con il tempo di ritorno (T_r), si riportano solo i valori relativi al $T_r = 200$ anni in quanto corrispondenti alle condizioni peggiori (Tabb. 7 e 8).

di piena, si è incrementata l'altezza dello sbarramento; viceversa, nel caso in cui il volume dell'invaso fosse eccessivamente superiore, si è ridotta l'altezza. Questi calcoli sono stati svolti utilizzando il software QGIS: la superficie corrispondente al pelo libero del lago di sbarramento è stata ottenuta riclassificando manualmente il DTM regionale con risoluzione 5 m x 5 m in modo da identificare la fascia altimetrica compresa fra la quota minima del lago, corrispondente alla base dello sbarramento, e l'altezza di quest'ultimo. Una volta nota la superficie si è convertito il dato dal formato *raster* al formato vettoriale (*shapefile*), e ritagliato il DTM usando come maschera quest'ultimo file;

Tabella 7. Valutazione delle portate e dei volumi di massima piena allo sbarramento 1 sul T. Negrone.

	Sezione	tc	i	k	Q_{max}	V_{max}
T_r		ore	mm/ora		m^3/s	m^3
200 anni	Ormea	4,17	31,91	0,278	221	3312819
A	Garessio	5,44	28,50	0,278	197	3863562
48,8 km ²	Bagnasco	6,85	24,95	0,278	173	4262008
C	Nucetto	7,24	23,61	0,278	163	4260843
0,51	Ceva	7,66	22,26	0,278	154	4248220

Tabella 8. Valutazione delle portate e dei volumi di massima piena allo sbarramento 2 sul T. Tanarello.

	Sezione	tc	i	k	Q_{max}	V_{max}
T_r		ore	mm/ora		m^3/s	m^3
200 anni	Ormea	4,17	31,91	0,278	167	2511542
A	Garessio	5,44	28,50	0,278	150	2929076
48,4 km ²	Bagnasco	6,85	24,95	0,278	131	3231150
C	Nucetto	7,24	23,61	0,278	124	3230266
0,39	Ceva	7,66	22,26	0,278	117	3220697

Gli sbarramenti previsti sono pertanto stati dimensionati per esser in grado di gestire al meglio il volume di queste piene facendo riferimento alla condizione peggiore, rappresentata dal maggior volume di piena calcolato. In questo modo si ottiene la configurazione ottimale; sono state comunque valutati volumi d'invaso inferiori.

Per il dimensionamento degli sbarramenti si è eseguito un procedimento di tipo iterativo in cui, partendo da una stima iniziale dell'altezza (H) dell'opera, si è ricavato il volume corrispondente, quindi confrontato con il volume di piena di riferimento: nel caso in cui il volume corrispondente al colmo dello sbarramento fosse inferiore al volume

Quindi, applicando al ritaglio di DTM l'algoritmo *raster surface volume*, si sono ottenute la superficie (in m²) della griglia *raster* e il volume (in m³) ad essa sotteso, al di sopra di una certa quota di riferimento la quale nel nostro caso è posta pari alla quota della base dello sbarramento stesso.

I valori della capacità volumetrica degli invasi al crescere dell'altezza del rispettivo sbarramento sono riportati in Tabella 9.

In base ai volumi così ottenuti, la configurazione ottimale per lo sbarramento 1 sul T. Negrone corrisponde a un'altezza di 63 m, mentre per lo sbarramento 2 sul T. Tanarello è di altezza pari a 34 m.

Tabella 9. Diverse opzioni di dimensionamento dei due sbarramenti.

Sbarramento	h (m)	A (m ²)	A invaso colmo (m ²)	V invaso colmo (m ³)
n. 1	10	445	13.900	63.260
	30	2.300	46.700	756.140
	63	7.265	124.775	4.558.630
n. 2	10	280	33.800	207.305
	30	1.475	79.100	1.252.240
	34	2.505	147.175	3.382.060

Tabella 11. Effetto di mitigazione delle portate di massima piena considerando la configurazione ottimale dei due sbarramenti: H = 63 m sul T. Negrone e H = 34 m sul T. Tanarello; le portate in uscita considerate sono rispettivamente di 21 m³/s e 17 m³/s.

SEZIONE	Tr	Q _{max} senza sbarramenti	Q _{max} con sbarramenti	Mitigazione
	anni	m ³ /s	m ³ /s	%
ORMEA	200	813	458	44
GARESSIO	200	1020	709	30
BAGNASCO	200	1117	858	23
NUCETTO	200	1110	869	22
CEVA	200	1093	870	20

Tabella 12. Effetto di mitigazione delle portate di massima piena nel caso in cui si consideri solamente lo sbarramento con H = 34 m sul T. Tanarello; la portata in uscita è sempre di 17 m³/s.

SEZIONE	Tr	Q _{max} senza sbarramenti	Q _{max} con sbarramenti	Mitigazione
	anni	m ³ /s	m ³ /s	%
ORMEA	200	813	658	19
GARESSIO	200	1020	886	13
BAGNASCO	200	1117	1010	10
NUCETTO	200	1110	1011	9
CEVA	200	1093	1003	8

Tenuto conto di questi due aspetti, si è ricavato un valore della portata in uscita per i due sbarramenti in condizioni ottimali: per lo sbarramento n. 1, sul T. Negrone, la portata in uscita è pari a 21 m³/s, mentre per lo sbarramento n. 2, sul T. Tanarello, è pari a 17 m³/s. Questi valori sono assolutamente ammissibili presso la sezione alla confluenza oltre che decisamente superiori al valore di DMV_i e sono stati individuati in quanto corrispondenti a circa il 10% del valore massimo calcolato per la portata in ingresso ai due sbarramenti.

Nella Tabella 11 e nelle successive si riporta il confronto delle portate di massima piena attese alle sezioni di controllo, con e senza le opere di mitigazione: per semplicità rappresentativa si riporteranno solamente i valori corrispondenti a un evento con tempo di ritorno di 200 anni.

Questa prima simulazione mette in evidenza che, con i due sbarramenti in funzione, le portate di massima piena nelle sezioni prese in esame verrebbero ridotte di percentuali che variano tra circa il 44% alla sezione di Ormea a circa il 20% presso la sezione di controllo di Ceva, alla chiusura del bacino analizzato.

Dal momento che realizzare la configurazione ottimale comporta l'edificazione di due sbarramenti di notevoli dimensioni, pari a 63 m di altezza nel T. Negrone e 34 m nel T. Tanarello, si sono svolte anche altre simulazioni che tengano conto della realizzazione di un solo sbarramento o di due sbarramenti, ma con altezza (H) non superiori a 30-35 m.

La Tabella 12 riassume gli effetti della realizzazione del solo sbarramento da 34 m sul T. Tanarello.

Per il T. Negrone, al contrario, si ricade per forza nell'assunzione 2. In questo caso è richiesto il calcolo di una por-

tata in uscita (Q_{out}) ottimale. Nel caso delle vasche di laminazione, il coefficiente di laminazione (η) è pari al rapporto fra la portata in uscita e la portata in ingresso (Q_{in}), secondo la seguente relazione:

$$\eta = Q_{out} / Q_{in}$$

Dalla definizione si evince che l'effetto di laminazione è tanto più significativo e di conseguenza l'opera efficiente, tanto più piccolo è il valore di η . Per sbarramenti e dighe si può però correlare tale coefficiente con i volumi di piena (V_{piena}) e dell'invaso (V_{invaso}):

$$\eta = 1 - (V_{invaso} / V_{piena})$$

Le due definizioni sono dunque correlabili (MAJONE, 1995): pertanto, conoscendo la portata in ingresso, il volume di piena e il volume dell'invaso si può calcolare la portata in uscita che garantisca il minimo coefficiente di laminazione, cioè la massima efficienza. La portata in ingresso corrisponde alla portata di massima piena attesa allo sbarramento, la quale è già nota così come il tempo di corrivazione: è quindi possibile calcolare il volume della piena. Invertendo l'ultima relazione, si ricava quindi:

$$Q_{out} = \eta \cdot Q_{in} = [1 - (V_{invaso} / V_{piena})] \cdot Q_{in}$$

Con il volume dell'invaso noto, è calcolabile la portata in uscita. Siccome, facendo riferimento alle diverse sezioni di controllo, i volumi di piena cambiano, anche le portate in uscita necessarie a gestirle cambieranno: di conseguenza,

come per i volumi di piena durante la fase di dimensionamento degli sbarramenti ottimali, anche in questa fase si è scelto di considerare i valori massimi richiesti. Nelle tabelle 13, 14 e 15 si riassumono le simulazioni eseguite con il metodo appena descritto.

Per completezza si riportano infine (Tabella 16) gli effetti di un solo sbarramento di 63 m d'altezza, localizzato sul T. Negrone; in questo caso, vale l'assunzione 1, per cui non è necessario eseguire il calcolo dell'efficienza di laminazione della piena.

Tabella 13. Effetto di mitigazione delle portate di massima piena nel caso in cui si consideri solamente uno sbarramento con $H = 30$ m sul T. Negrone: portata in uscita $171 \text{ m}^3/\text{s}$.

SEZIONE	Tr	Q_{\max} <i>senza sbarramenti</i>	Q_{\max} <i>con sbarramenti</i>	Mitigazione
	anni	m^3/s	m^3/s	%
ORMEA	200	813	760	7
GARESSIO	200	1020	994	3
BAGNASCO	200	1117	1124	0
NUCETTO	200	1110	1110	0
CEVA	200	1093	1094	0

Tabella 14. Effetto di mitigazione delle portate di massima piena nel caso in cui si consideri solamente uno sbarramento con $H = 30$ m sul T. Tanarello: portata in uscita $37 \text{ m}^3/\text{s}$.

SEZIONE	Tr	Q_{\max} <i>senza sbarramenti</i>	Q_{\max} <i>con sbarramenti</i>	Mitigazione
	anni	m^3/s	m^3/s	%
ORMEA	200	813	677	17
GARESSIO	200	1020	905	11
BAGNASCO	200	1117	1030	8
NUCETTO	200	1110	1030	7
CEVA	200	1093	1023	7

Tabella 15. Effetto di mitigazione delle portate di massima piena nel caso in cui si considerino entrambi gli sbarramenti con $H = 30$ m.

SEZIONE	Tr	Q_{\max} <i>senza sbarramenti</i>	Q_{\max} <i>con sbarramenti</i>	Mitigazione
	anni	m^3/s	m^3/s	%
ORMEA	200	813	627	23
GARESSIO	200	1020	879	14
BAGNASCO	200	1117	1030	8
NUCETTO	200	1110	1030	7
CEVA	200	1093	1023	7

Tabella 16. Effetto di mitigazione delle portate di massima piena nel caso in cui si consideri un solo sbarramento sul T. Negrone con $H = 63$ m: portata in uscita pari a $21 \text{ m}^3/\text{s}$.

SEZIONE	Tr	Q_{\max} <i>senza sbarramenti</i>	Q_{\max} <i>con sbarramenti</i>	Mitigazione
	anni	m^3/s	m^3/s	%
ORMEA	200	813	610	25
GARESSIO	200	1020	844	17
BAGNASCO	200	1117	974	13
NUCETTO	200	1110	977	12
CEVA	200	1093	972	11

Confrontando i risultati riportati nelle precedenti tabelle si possono trarre le seguenti considerazioni conclusive.

In primo luogo, dei due bacini, è quello del T. Negrone che contribuisce in modo maggioritario: infatti isolandolo completamente con uno sbarramento da 63 m di altezza, si mitigano le portate di massima piena attese alle varie sezioni di controllo di un valore compreso fra il 25% e l'11%. Tuttavia la proibitiva altezza dello sbarramento impone serie difficoltà, anche e soprattutto dal punto di vista economico. Si noti però come la realizzazione di sbarramenti di dimensioni più ragionevoli sul T. Negrone abbia un effetto mitigatorio irrisorio, come testimoniato dall'esempio qui riportato di uno sbarramento alto 30 m, il quale riduce le portate di massima piena alle sezioni di controllo di valori compresi fra 7% e il 3%, ma solamente per le due sezioni più prossime allo sbarramento stesso (Ormea e Garessio), in merito al fatto che la portata in uscita dallo sbarramento per poter gestire le piene con durate maggiori facenti riferimento alle altre sezioni di controllo (Bagnasco, Nucetto e Ceva) dovrebbe esser pari alla portata in ingresso. Di fatto questo rende del tutto inutile una tale opera.

Ben più promettente è il bacino del T. Tanarello, il quale per altro appare meglio disposto dal punto di vista geografico a catturare le precipitazioni. Per questo secondo bacino le condizioni ottimali di dimensionamento dello sbarramento si raggiungono con altezze molto più ragionevoli, pari a 34 m: un tale sbarramento, isolando il bacino del T. Tanarello dal resto del bacino dell'Alta Val Tanaro, produrrebbe una mitigazione delle portate di piena del 19% alla sezione di controllo di Ormea, la più a monte, e del 8% alla sezione di Ceva, la più a valle. Anche considerando altezze inferiori, pari a 30 m, lo sbarramento produrrebbe una mitigazione significativa e variabile fra il 17% e il 7%.

Per questi motivi, la realizzazione di interventi nel bacino del T. Tanarello è da intendersi come prioritaria.

RICONOSCIMENTI

Questo lavoro riassume i risultati delle attività del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Torino, nell'ambito dello "Studio preliminare alla realizzazione di sbarramenti nella zona a monte di Ormea per la mitigazione del rischio geo-idrologico nell'Alta Val Tanaro". Tale progetto è stato finanziato dalla Fondazione Cassa di Risparmio di Cuneo con bando della Sessione Erogativa Generale 2021.

BIBLIOGRAFIA

GIUSEPPE BENINI (1990), *Sistemazioni Idraulico Forestali*. UTET Torino. Collana: Scienze Forestali e Ambientali. ISBN: 88-02-04340-X. EAN: 9788802043401. pp. XXIV-284.

MAURO BONASERA, ANNA MARIA FERRERO, GIANDOMENICO FUBELLI, LUCIANO MASCIOTTO, ADRIANO NOCERA, ELEONORA VIVIANI (2020), *Pericolosità idrologica della Città di Ceva (CN)*. In Atti del Seminario Nazionale "Analisi e attività di mitigazione dei processi geo-idrologici in Italia". Geologia dell'Ambiente, Periodico trimestrale della SIGEA - Società

Italiana di Geologia Ambientale, Supplemento al N. 1/2020, Anno XXVIII - gennaio-marzo 2020, 105-112, ISSN 1591-5352.

UGO MAIONE (1995), *Le piene fluviali*. La Goliardica Pavese. EAN: 9788878302198. ISBN: 8878302198. pp. 218.

FABRIZIO PIANA, GIANFRANCO FIORASO, ANDREA IRACE, PIETRO MOSCA, ANNA D'ATRI, LUCA BARALE, PAOLO FALLETTI, GIOVANNI MONEGATO, MICHELE MORELLI, SERGIO TALLONE, BARTOLOMEO VIGNA (2017), *Geology of Piemonte region (NW Italy, Alps-Apennines interference zone)*, Journal of Maps, 13:2, 395-405, DOI:10.1080/17445647.2017.1316218.

MARIO VANOSI (1972), *Rilevamento geologico ed analisi strutturale delle dorsali del M. Mongioie e del M. Cimone (Brianzonese Ligure)*. Atti dell'istituto geologico dell'Università di Pavia, 29-72.

REGIONE PIEMONTE (2021), Regolamento regionale n. 14 del 28/12/2021 - Disposizioni per l'implementazione del deflusso ecologico - Allegato B. B.U. 28 dicembre 2021, 5° suppl. al n. 51.

RIFERIMENTI WEB

Rif. WEB n. 1 - http://webgis.arpa.piemonte.it/atlante_pioggia_webapp/

Rif. WEB n. 2 - <https://idrogeo.isprambiente.it/app/iffi>

Rif. WEB n. 3 - <http://relazione.ambiente.piemonte.it/fif/webapp.php?id=290>

Metodi geofisici per la riduzione del rischio geologico nelle cave di gesso del Monferrato

Geophysical methods for the minimization of geological risk in Monferrato gypsum quarries

SABRINA BONETTO, CHIARA CASELLE, CESARE COMINA

Dipartimento di Scienze della Terra – Università degli Studi di Torino

E-mail: chiara.caselle@unito.it

Parole chiave: gesso, cave, carsismo, geoelettrica, georadar

Key words: gypsum, quarries, karst, geoelectrical, GPR

RIASSUNTO

L'elevata disponibilità di gesso in Piemonte, e più nello specifico nell'area del Monferrato, è legata alla precipitazione di rocce evaporitiche durante la Crisi di Salinità Messiniana (Miocene superiore). Nel corso dei decenni, si è sviluppata una diffusa attività estrattiva, attualmente ancora attiva in cinque siti di cava. Le rocce evaporitiche del Monferrato ospitano anche un'attiva circolazione di acque carsiche. In assenza di adeguato monitoraggio e prospezione geologica, l'interferenza tra l'attività estrattiva e la circolazione carsica possono portare a danni importanti sia per il sito di cava stesso sia per l'ambiente circostante, andando a generare fenomeni di subsidenza, *sinkholes*, sfornellamenti ed importanti variazioni nella disponibilità idrica dell'area. Accanto a metodi di prospezione geologica classica (rilevamento geologico, sondaggi), l'analisi e il monitoraggio dell'ammasso roccioso possono essere portati avanti con metodi geofisici, quali, ad esempio, indagini elettriche o con il georadar.

1. INTRODUZIONE

I settori pianeggianti e collinari del territorio piemontese sono per la maggior parte occupati da rocce sedimentarie di età eocenica – pliocenica che vengono raggruppati sotto il nome di Bacino Terziario Piemontese. All'interno di questo record sedimentario, è collocato l'intervallo temporale corrispondente alla Crisi di Salinità Messiniana (Miocene superiore), un evento paleo-ambientale che ha interessato gran parte dell'area mediterranea intorno a 6 milioni di anni fa. Durante la Crisi di Salinità sono precipitati grandi volumi (stimati in almeno 106 km³) di gessi, anidriti e sali sul fondo del bacino Mediterraneo e nei bacini sedimentari limitrofi, in Spagna, Cipro, Grecia, Sicilia, Italia Centrale e Piemonte.

Di conseguenza, il Piemonte, e in modo particolare l'area del Monferrato, presenta una grande disponibilità di gesso che è stata oggetto, nel corso dei decenni, di un'estrazione diffusa sul territorio. Il gesso, infatti, è ampiamente utilizzato come minerale industriale per la produzione di cemento e di altri materiali per l'edilizia (stucchi, pannelli di cartongesso,...), oltre che per altri scopi secondari legati,

ad esempio, all'agricoltura, all'industria farmaceutica e alla produzione di fertilizzanti e di vernici. Attualmente, l'attività estrattiva, regolamentata dalla legislazione regionale, è attiva in cinque siti di cava, presso i comuni di Moncucco, Cocconato, Moncalvo, Calliano e Murisengo, sviluppati sia a cielo aperto che in sotterraneo.

Al pari di altre realtà estrattive, le cave di gesso del Monferrato possono presentare numerose problematiche geologiche che mettano a rischio la sicurezza dello scavo, la sostenibilità ambientale e la valorizzazione della risorsa. Tali problematiche riguardano, in primo luogo, l'assetto geologico strutturale e le caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso. A questo riguardo, per esempio, discontinuità stratigrafiche o fratture possono causare il distacco di blocchi, generando collapsi o danneggiando strutture lasciate in posto, quali pilastri o diaframmi. Altre problematiche possono essere legate a fenomeni carsici e alla presenza di acqua in pressione all'interno di fratture o cavità. Violenti fenomeni di *inrush* legati al carsismo possono causare gravi conseguenze sia in campo ambientale che in quello della sicurezza (Bonetto *et al.*, 2008). La presenza di acqua può inoltre portare ad un ulteriore peggioramento delle caratteristiche meccaniche del gesso attraverso un'azione di dissoluzione localizzata all'interno di pori e microfessure (Ramon *et al.*, 2021).

Al fine di garantire la sicurezza durante lo scavo, salvaguardare l'ambiente circostante e, al tempo stesso, ottimizzare la produzione di materiale, risulta importante che i lavori di estrazione siano accompagnati da indagini per la prospezione geologica, sia in fase progettuale sia durante l'avanzamento della coltivazione. Tali indagini devono essere mirate, in modo particolare, ad individuare l'eventuale presenza di acqua e di sedimenti marnoso argillosi intercalati ai livelli di gesso, come riempimento di faglie, fratture o cavità oppure come matrice che ospita blocchi di gesso, nel caso di giacimenti caotici. In aggiunta al rilevamento geologico classico e alle indagini dirette tramite sondaggi, la caratterizzazione del giacimento può essere condotta con l'aiuto di tecniche indirette di tipo geofisico, quali l'utilizzo della geoelettrica e del georadar.

2. GIACIMENTI DI GESSO MESSINIANO IN PIEMONTE

Gli affioramenti di gesso del Piemonte, costituiti da evaporiti di età tardo-miocenica, sono localizzati in corrispondenza di due settori allungati in direzione EW ed ubicati rispettivamente a N e a S della città di Asti, al margine rispettivamente settentrionale e meridionale del cosiddetto Bacino Pliocenico Astigiano (Figura 1). Nella cartografia geologica, questi sedimenti sono descritti con il nome di "Formazione Gessoso-Solfifera" (Dela Pierre *et al.* 2003).

All'interno della Formazione Gessoso-Solfifera, i depositi evaporitici sono organizzati in cicli di deposizione costituiti dall'alternanza ritmica di livelli di gesso e livelli di marna. I livelli di gesso possono raggiungere fino a 15 m di spessore; tendenzialmente, i livelli più potenti (e che quindi possono diventare oggetto di estrazione) ricadono nella parte inferiore e media della formazione. A seconda dei livelli, il gesso può presentarsi con grossi cristalli di gesso selenitico (che possono raggiungere dimensioni anche di

decine di centimetri), oppure come una roccia a grana fine con cristalli di gesso di dimensioni da pochi millimetri a qualche centimetro e una matrice marnosa che può rappresentare fino al 20% della roccia. Gli strati di marna, invece, hanno in genere spessori compresi tra pochi decimetri e 2-3 metri (Dela Pierre *et al.*, 2016). Nelle aree più occidentali del Monferrato, però, i volumi rocciosi contenenti gesso si presentano come un deposito caotico che contiene blocchi di diversa natura inglobati in una matrice marnoso-argillosa che viene interpretato come il risultato di processi gravitativi complessi a larga scala. In questi contesti, i giacimenti situati nelle zone più prossimali dell'evento gravitativo, mostrano blocchi di grandi dimensioni (anche plurichilometrici) contenenti la successione evaporitica originaria.

All'interno di questo contesto geologico, il dominio del Monferrato ospita una delle principali aree estrattive di gesso del Nord Italia, con cave sviluppate sia a cielo aperto che in sotterraneo. Nel primo caso, in genere, lo sfruttamento avviene procedendo dall'esterno verso l'interno del giaci-

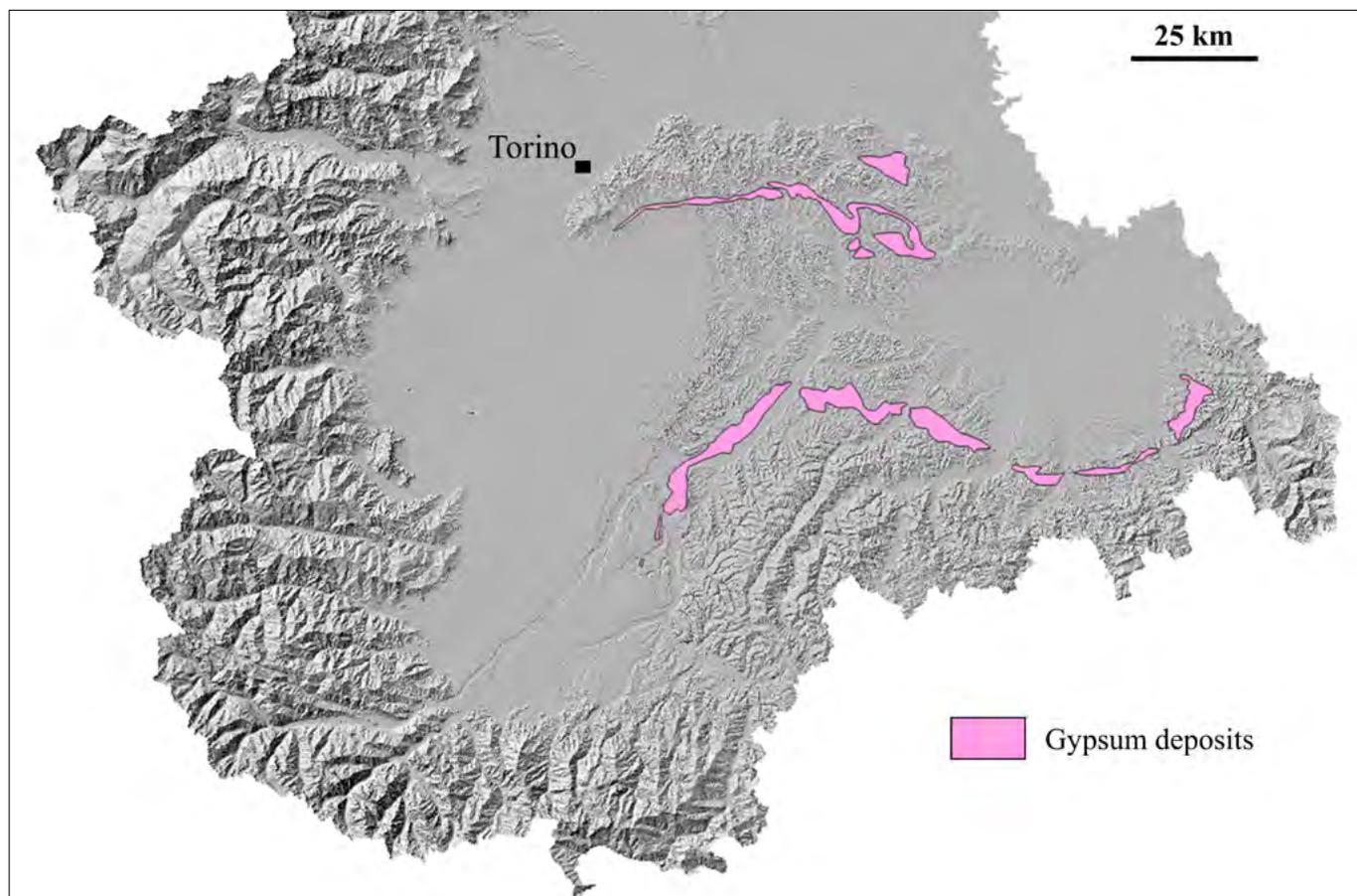


FIGURA 1. Localizzazione dei sedimenti evaporitici messiniani del Bacino Terziario Piemontese (in rosa) nel territorio piemontese.

Tabella 1. Siti di cava attualmente attivi in Piemonte

Comune	Tipo di cava	Metodo di coltivazione	Tecniche di scavo
Moncucco	Cava a cielo aperto	Fette orizzontali discendenti	Martello demolitore, esplosivo
Cocconato - Montiglio	Cava a cielo aperto con scopertura di vecchie coltivazioni in sotterraneo	Fette orizzontali discendenti	Fresa stradale
Moncalvo	Cava in sotterraneo	Camere e diaframmi	Fresa meccanica
Calliano	Cava in sotterraneo	Camere e diaframmi	Fresa meccanica
Murisengo	Cava in sotterraneo	Camere e pilastri	Esplosivo

mento con coltivazione a gradoni. In alcuni casi, le cave a cielo aperto possono essere ricavate dalla scoperta di preesistenti cave in sotterraneo (Figura 2). In caso di coltivazione in sotterraneo, invece, generalmente si procede secondo schemi di coltivazione per camere e pilastri o per camere e diaframmi, in cui la stessa rimozione del materiale porta a creare i pilastri (o i diaframmi) a cui è affidata la funzione di sostegno del vuoto. Dal momento che il gesso è un minerale tenero, le attrezzature generalmente utilizzate per la coltivazione sono mezzi meccanici quali martelli demolitori, frese ad attacco puntuale o frese stradali oppure esplosivo (Figure 2 e 3). Le tipologie di cava, i metodi di coltivazione e le tecniche di scavo attualmente in uso nei siti di cava attivi in Monferrato sono riportate in Tabella 1.



FIGURA 2. Cava di gesso di Cocconato. La coltivazione a cielo aperto è sviluppata in corrispondenza di una preesistente cava in sotterraneo.



FIGURA 3. Gallerie della cava di gesso di Murisengo, scavata con esplosivo.

3. CARSISMO NEI GESSI DEL MONFERRATO E RISCHI CONNESSI

La successione evaporitica del Monferrato risulta spesso attraversata da circolazione di acque carsiche. Evidenze di carsismo, sia relitto che attivo, sono state riconosciute in molti affioramenti di gesso dell'area e, in particolare, in corrispondenza delle cave sia a cielo aperto che in sotterraneo, dove le operazioni di scavo offrono un osservatorio geologico privilegiato (Figure 4 e 5).

A causa della bassa permeabilità primaria del gesso, la circolazione di acqua nell'ammasso roccioso è intera-



FIGURA 4. Morfologia attribuibile ad un fenomeno di carsismo relitto (linea rossa) all'interno del volume di gesso.



FIGURA 5. Cavità carsica nel gesso del Monferrato (Vigna *et al.* 2017).

mente affidata ad una permeabilità secondaria dovuta alla presenza di superfici di discontinuità e fratture, condotti e cavità carsiche esistenti che ne condizionano l'omogeneità o l'anisotropia in termini di permeabilità, trasmissività e conducibilità idraulica.

La presenza di eventuali superfici di discontinuità all'interno dell'ammasso roccioso costituisce un potenziale punto di avvio di sistemi di circolazione carsica, come illustrato nello schema in Figura 6. Le acque sotterranee che scorrono inizialmente lungo le discontinuità esistenti possono gradualmente operare una azione di progressiva dissoluzione nei confronti del gesso (che costituisce le pareti delle discontinuità stesse) portando alla formazione di condotti e cavità carsiche.

La presenza di circuiti carsici, attivi o fossili, richiede, in presenza di una realtà estrattiva, particolari attenzioni per garantire la stabilità degli scavi, in particolare se sviluppato in sotterraneo, oltre che per evitare eventuali ripercussioni sull'ambiente circostante. Il carsismo, infatti, esercita una considerevole influenza sulle attività di cava, così come l'attività di cava può produrre un forte impatto sulla circolazione idrica sotterranea, (Bonetto *et al.*, 2008b).

Per evitare lo sviluppo di fenomeni quali ad esempio violenti *inrush* di acqua nelle gallerie, impoverimento delle caratteristiche geomeccaniche del gesso, abbassamento del livello statico degli acquiferi superficiali o innescamento di fenomeni di subsidenza in superficie, è necessario un costante monitoraggio geologico e un'attenta gestione della cava.

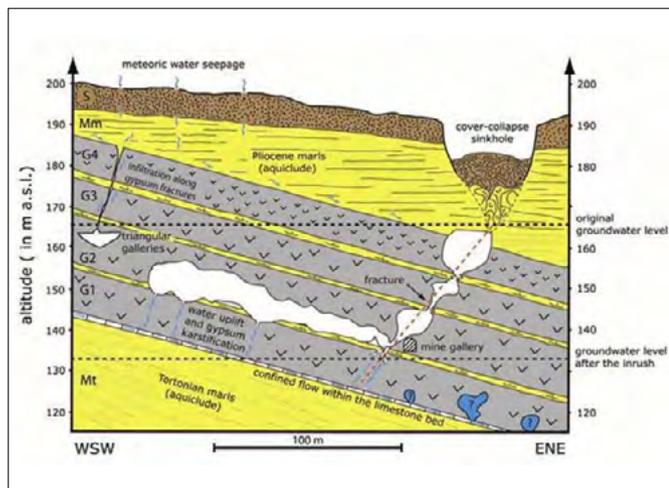


FIGURA 6. Modello di formazione di circuiti carsici in gesso (Bonetto *et al.*, 2008a).

4. INDAGINI GEOFISICHE

Al fine di ricostruire in maniera completa e corretta le caratteristiche geometriche, strutturali e idrogeologiche dei giacimenti di gesso, le tecniche di rilievo geologico tradizionale possono essere accompagnate da rilievi di ti-

po geofisico. In particolare, tecniche di tipo geoelettrico e georadar hanno dato buoni risultati in relazione a contesti estrattivi in gesso.

4.1 Indagini geoelettriche

I metodi di indagine geoelettrica si basano sulla misura della resistività elettrica, ovvero della proprietà che definisce la propensione di un materiale ad essere attraversato dalla corrente elettrica. Nei materiali geologici, la resistività elettrica può dipendere da parametri intrinseci, quali la composizione mineralogica, la porosità e il contenuto di argilla, e da variabili di stato, quali ad esempio la saturazione e le proprietà dei fluidi interstiziali.

La resistività elettrica del gesso è significativamente più alta rispetto a quella dei sedimenti marnosi e argillosi che circondano il giacimento nella maggior parte dei contesti geologici; di conseguenza, l'applicazione di metodi geoelettrici per l'identificazione e la descrizione di questi giacimenti consente generalmente di ottenere buoni risultati (Guinea *et al.*, 2012, 2010 - Figura 7).

Le formazioni che possono rappresentare giacimenti di gesso presentano però un'elevata variabilità geologica:

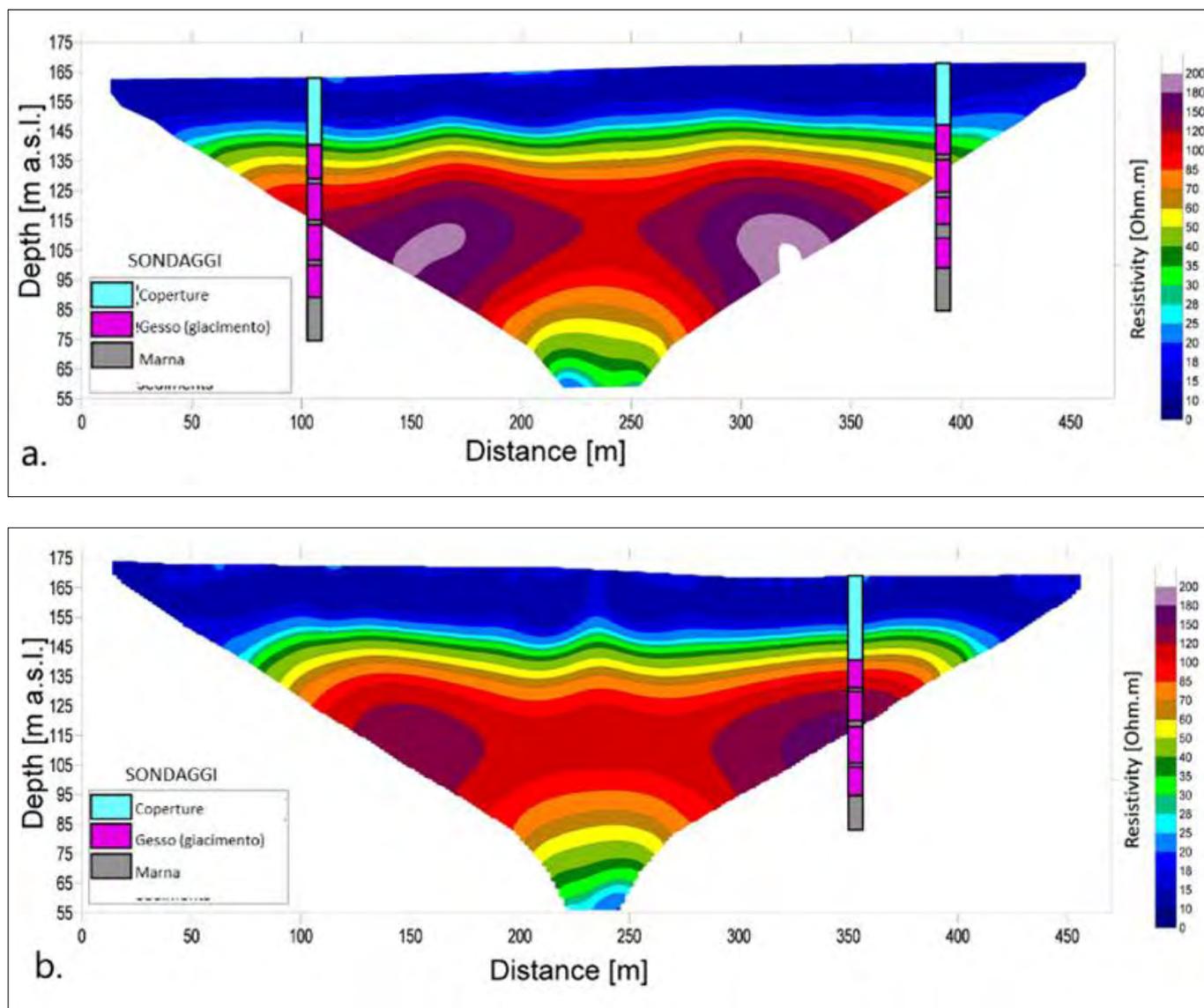


FIGURA 7. Tomografie elettriche su giacimenti di gesso i cui risultati mostrano una buona corrispondenza con i sondaggi eseguiti in posizione corrispondente (Caselle *et al.* 2019).

il gesso può presentarsi sotto forma di innumerevoli facies, sia primarie sia risedimentate, con notevoli differenze nella dimensione dei cristalli, nella porosità, nella percentuale di argilla e nel contenuto d'acqua. La maggior parte di questi parametri può influenzare anche notevolmente le misure di resistività elettrica sul gesso, portando ad una grande variabilità nei risultati. Le misure di resistività su gesso, infatti, variano tra 10 e 1200 Ωm , con valori più bassi associati a sedimenti di gesso poco consolidati con elevate percentuali di marne e argille e valori più alti in presenza di anidrite all'interno della formazione gessosa. È quindi necessario conoscere a priori alcune informazioni relative al contesto geologico in cui si lavora per poter interpretare correttamente i risultati dell'indagine geoelettrica e ottenere dati utili per la ricostruzione tridimensionale del volume di gesso e la definizione del grado di saturazione e contenuto d'acqua Caselle *et al.*, 2019.

4.2 Georadar

Il georadar (o *Ground Penetrating Radar* – GPR) è una tecnica elettromagnetica finalizzata alla localizzazione di oggetti al di sotto della superficie del suolo. L'applicazione di questa tecnica è basata sulla propagazione e riflessione di un segnale elettromagnetico ad alta frequenza (10 MHz – 2.5 GHz). Tra le varie applicazioni di questa tecnica, una

delle principali riguarda l'individuazione della presenza di acqua. Un impiego abbastanza diffuso, inoltre, riguarda l'individuazione di morfologie legate al carsismo, quali cavità o sinkhole sepolti (e.g. Afshar *et al.*, 2015; Pueyo Anchuela *et al.*, 2015; Pueyo-Anchuela *et al.*, 2009; Sevil *et al.*, 2017).

Nell'ambito delle cave di gesso, è stata proposta da Caselle *et al.*, 2020 un'applicazione delle tecniche georadar per prevedere la presenza di morfologie carsiche e discriminare il contenuto (aria, acqua o argilla) in cave di gesso in sotterraneo. A seconda delle condizioni idrogeologiche e del contesto carsico all'interno del giacimento, il georadar è stato utilizzato per individuare i seguenti elementi:

- Condotti carsici: nonostante il diametro limitato, sono gli elementi strutturali responsabili dell'alimentazione del circuito carsico e della connessione tra le differenti parti della rete carsica e possono potenzialmente contenere acqua in pressione;
- Cavità carsiche, con dimensioni variabili da 1 a parecchi metri cubi: il loro potenziale riempimento di argilla o di acqua costituisce una delle principali cause di rischio geologico per gli scavi, soprattutto se in sotterraneo;
- Fratture aperte: costituiscono vie preferenziali di accesso per l'acqua, oltre a rappresentare elementi di debolezza strutturale per la stabilità dell'ammasso roccioso.

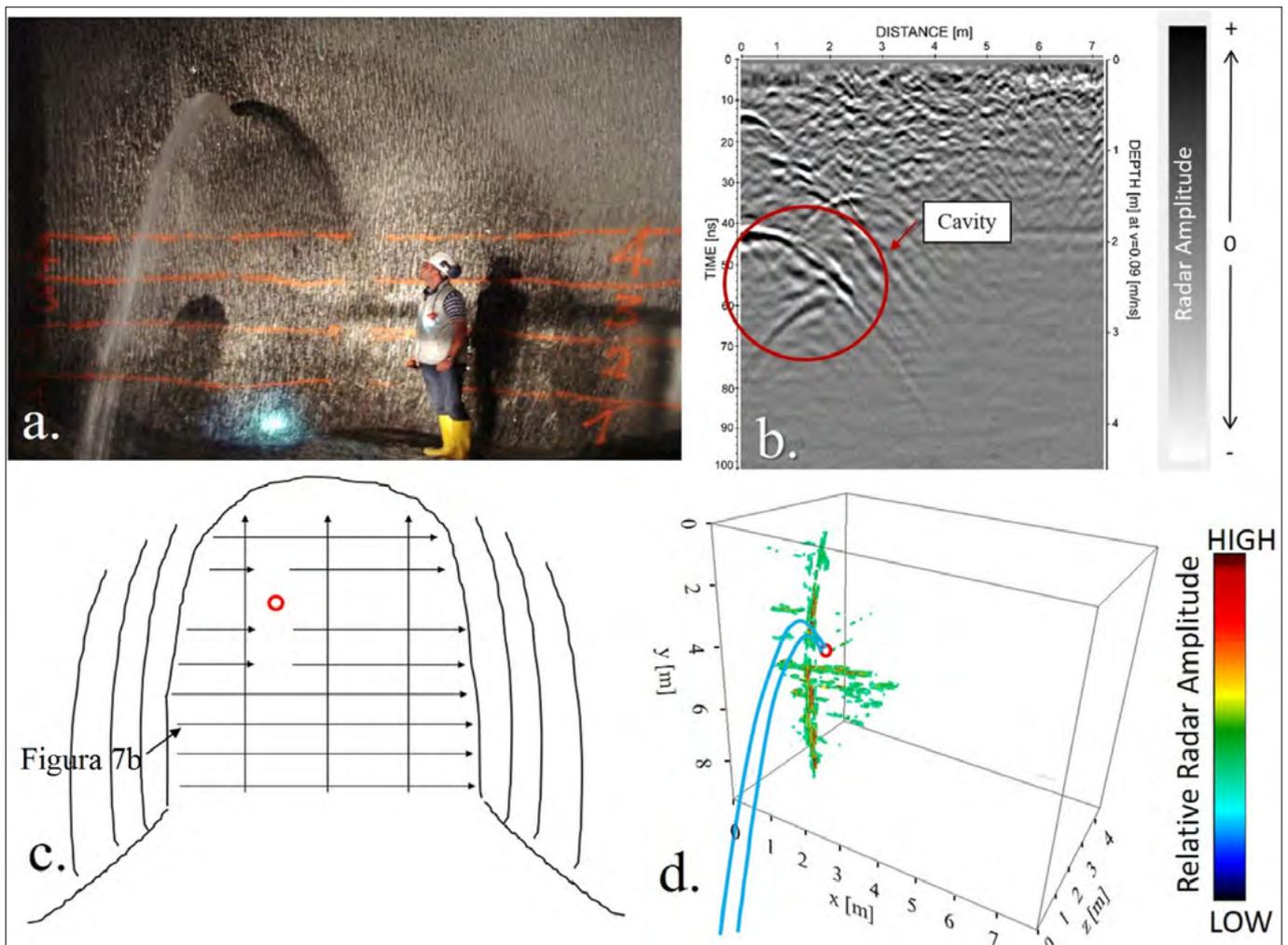


FIGURA 8. Utilizzo del georadar al fine del rilevamento di una cavità carsica riempita d'acqua in una cava di gesso in sotterraneo del Monferrato. a) Immagine fotografica del fronte di scavo con una venuta d'acqua. b) Profilo georadar con segnale corrispondente alla cavità. c) Schema di acquisizione utilizzato sul fronte. d) Ricostruzione tridimensionale della cavità (Caselle *et al.* 2020).

I risultati hanno mostrato una buona applicabilità del metodo, come dimostrato dall'esempio riportato in Figura 8, relativo all'identificazione di una cavità carsica riempita di acqua.

5. CONCLUSIONI

Il Piemonte, e più nello specifico l'area del Monferrato, presenta un'elevata disponibilità di gesso, legata alla precipitazione di rocce evaporitiche durante la Crisi di Salinità Messiniana (Miocene superiore). A seguito dei molteplici utilizzi di questo materiale in vari tipi di industria, il Monferrato ospita diversi siti estrattivi, sia a cielo aperto che in sotterraneo. Al fine di minimizzare i potenziali rischi e le interferenze connessi all'attività estrattiva, i principali dei quali legati all'interferenza con sistemi di circolazione idrica sotterranea, è necessario effettuare un'attenta opera di prospezione geologica sia nelle fasi progettuali, sia durante il monitoraggio dell'avanzamento dello scavo. A tal riguardo, accanto a metodi di prospezione geologica classica (rilevamento geologico, sondaggi), l'analisi e il monitoraggio dell'ammasso roccioso possono essere utilmente condotti con metodi geofisici, quali, ad esempio, indagini elettriche o georadar, la cui applicazione può fornire interessanti informazioni relativamente a geometrie, assetto geologico-strutturale, permeabilità e grado di saturazione del giacimento.

BIBLIOGRAFIA

- AFSHAR, A., ABEDI, M., NOROUZI, G.-H., RIAHI, M.-A. (2015), *Geophysical investigation of underground water content zones using electrical resistivity tomography and ground penetrating radar: A case study in Hesarak-Karaj, Iran*. *Engineering Geology* 196, 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.07.022>
- BANZATO, C., VIGNA, B., FIORUCCI, A., DE WAELE, J. (2017), *Hypogene Gypsum Caves in Piedmont (N-Italy)*, in: KLIMCHOUK, A., N. PALMER, A., DE WAELE, J., S. AULER, A., AUDRA, P. (Eds.), *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. Springer International Publishing, Cham, pp. 211–224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53348-3_13
- BONETTO, S., FIORUCCI, A., FORNARO, M., VIGNA, B. (2008), *Subsidence hazards connected to quarrying activities in a karst area: the case of the Moncalvo sinkhole event (Piedmont, NW Italy)*. *Estonian Journal of Earth Sciences* 57, 125. <https://doi.org/10.3176/earth.2008.3.01>
- BONETTO, SABRINA, FORNARO, M., GIULIANI, A., LASAGNA, M. (2008), *Underground Quarrying and Water Control: Some Cases from Northern Italy*, *Mine Water and the Environment*, Proceedings. Vsb-Tech Univ Ostrava, Ostrava.
- CASELLE, C., BONETTO, S., COMINA, C. (2019), *Comparison of laboratory and field electrical resistivity measurements of a gypsum rock for mining prospection applications*. *International Journal of Mining Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.09.002>
- CASELLE, C., BONETTO, S., COMINA, C., STOCCO, S. (2020), *GPR surveys for the prevention of karst risk in underground gypsum quarries*. *Tunnelling and Underground Space Technology* 95, 103137. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103137>
- DELA PIERRE, F., NATALICCHIO, M., LOZAR, F., BONETTO, S., CARNEVALE, G., CAVAGNA, S., COLOMBERO, S., SABINO, M., VIOLANTI, D. (2016), *The northernmost record of the Messinian salinity crisis (Piedmont basin, Italy)*. *Regional Committee on Mediterranean Neogene Stratigraphy Interim Colloquium - Torino, 25-28 September 2014*. *Geol. Field Trips* 8, 2–58. <https://doi.org/10.3301/GFT.2016.03>
- GUINEA, A., PLAYÀ, E., RIVERO, L., HIMI, M., BOSCH, R. (2010), *Geoelectrical Classification of Gypsum Rocks*. *Surveys in Geophysics* 31, 557–580. <https://doi.org/10.1007/s10712-010-9107-x>
- GUINEA, A., PLAYÀ, E., RIVERO, L., LEDO, J.J., QUERALT, P. (2012), *The electrical properties of calcium sulfate rocks from decametric to micrometric scale*. *Journal of Applied Geophysics* 85, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.07.003>
- PUEYO ANCHUELA, Ó., LÓPEZ JULIÁN, P., CASAS SAINZ, A.M., LIESA, C.L., POCOVÍ JUAN, A., RAMAJO CORDERO, J., PÉREZ BENEDICTO, J.A. (2015), *Three dimensional characterization of complex mantled karst structures. Decision making and engineering solutions applied to a road overlying evaporite rocks in the Ebro Basin (Spain)*. *Engineering Geology* 193, 158–172. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.022>
- PUEYO-ANCHUELA, Ó., SORIANO, A.P.J., M.A., CASAS-SAINZ, A.M. (2009), *Characterization of karst hazards from the perspective of the doline triangle using GPR - Examples from Central Ebro Basin (Spain)*. *Engineering Geology* 108, 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.06.022>
- RAMON, A., CASELLE, C., BONETTO, S.M.R., COSTANZO, D., ALONSO, E.E. (2021), *Effect of Microstructure and Relative Humidity on Strength and Creep of Gypsum*. *Rock Mech Rock Eng.* <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02510-2>
- SEVIL, J., GUTIÉRREZ, F., ZARROCA, M., DESIR, G., CARBONEL, D., GUERRERO, J., LINARES, R., ROQUÉ, C., FABREGAT, I. (2017), *Sinkhole investigation in an urban area by trenching in combination with GPR, ERT and high-precision leveling. Mantled evaporite karst of Zaragoza city, NE Spain*. *Engineering Geology* 231, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.10.009>
- VIGNA, B., D'ANGELI, I., FIORUCCI, A., WAELE, J.D. (2017), *Hydrogeological flow in gypsum karst areas: some examples from northern Italy and main circulation models*. *International Journal of Speleology* 46. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.46.2.2095>

Pericolosità idrologica dell'alto bacino del Torrente Borbore (Provincia di Cuneo – Italia nordoccidentale)

Hydrological hazard in the upper basin of the Borbore stream
(Province of Cuneo – northwestern Italy)

ANNALISA BOVE

Geologo, Libero Professionista – Socio SIGEA-APS

E-mail: annalisa.bove@geologiapiemonte.it

LUCIANO MASCIOTTO

Università degli Studi di Torino – Consigliere SIGEA-APS

E-mail: luciano.masciotto@unito.it

Parole chiave: pericolosità idrologica, rischio di alluvione, provincia di Cuneo, Italia nordoccidentale

Key words: hydrological hazard, flood risk, province of Cuneo, northwestern Italy

1. INTRODUZIONE

L'alto bacino del T. Borbore è situato nel Roero, regione collinare piemontese a vocazione vitivinicola, posta in sinistra idrografica del F. Tanaro, nel bordo nordocciden-

tale della provincia di Cuneo (Fig. 1). Il suo territorio si estende per circa 60 km² nei comuni di Canale, Castagnito, Castellinaldo, Corneliano, Guarene, Montà, Montaldo Roero, Monteu Roero, Santo Stefano Roero e Vezza d'Al-

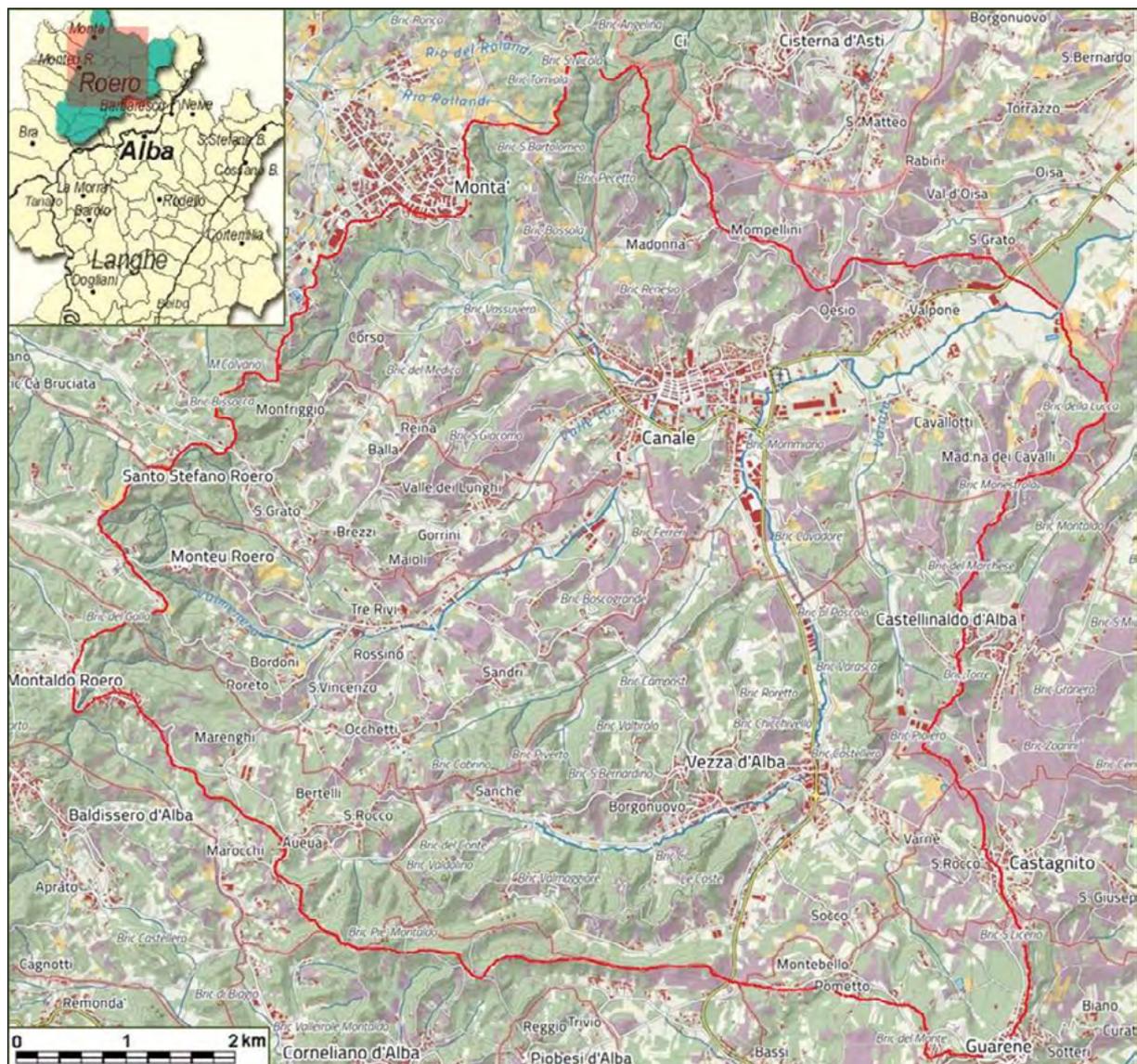


FIGURA 1. Inquadramento geografico. La linea rossa delimita l'alto bacino del T. Borbore.



FIGURA 2. Monteu Roero come altri borghi di questa caratteristica regione vitivinicola è sorta sulla sommità e sulle pendici delle colline (Rif. WEB n. 1).

ba. Gli antichi borghi sono sorti in località sicure dal punto di vista idrologico, solitamente sulle sommità dei colli che caratterizzano il paesaggio del Roero (Fig. 2).

Malgrado la crescita demografica registrata nel nostro Paese (da circa 30 milioni di abitanti all'inizio del secolo scorso a circa 60 milioni di abitanti oggi), l'occupazione del territorio in esame è rimasta modesta.

In Tabella 1, si riportano i dati demografici relativi ai comuni che comprendono l'alto bacino del T. Bore: la densità abitativa di 172,20 abitanti/km² risulta medio-bassa se confrontata a quella massima in Italia della Città Metropolitana di Napoli (purtroppo una delle aree a più

alto rischio vulcanico al mondo), pari a 2.615 abitanti/km², e a quella minima della provincia di Nuoro, pari a 37 abitanti/km².

A dispetto di tale situazione, favorevole ad una pianificazione territoriale armoniosa e attenta ai pericoli geomorfologici, si segnalano delle situazioni di rischio idrologico che, come purtroppo ovunque nel nostro Paese, sono causate dall'edificazione delle aree di competenza dei corsi d'acqua (a volte ricoperti interamente), ignorando completamente la dinamica e l'evoluzione naturale degli stessi. Dopo un breve inquadramento territoriale, lo studio mette in evidenza alcuni casi di pericolosità idrologica e di conse-

Tabella 1. Dati demografici del territorio.

Comune	Abitanti	Superficie (km ²)	Densità (abitanti/km ²)
Canale	5.686	18,00	315,89
Castagnito	2.163	7,10	304,65
Castellinaldo d'Alba	935	7,80	119,87
Corneliano d'Alba	2.106	10,09	208,72
Guarene	3.567	13,45	265,20
Montà	4.701	26,82	175,28
Montaldo Roero	859	11,84	72,55
Monteu Roero	1.627	24,7	65,87
Santo Stefano Roero	1.380	13,11	105,26
Veza d'Alba	2.286	14,07	162,47
Insieme dei comuni	25.310	146,98	172,20

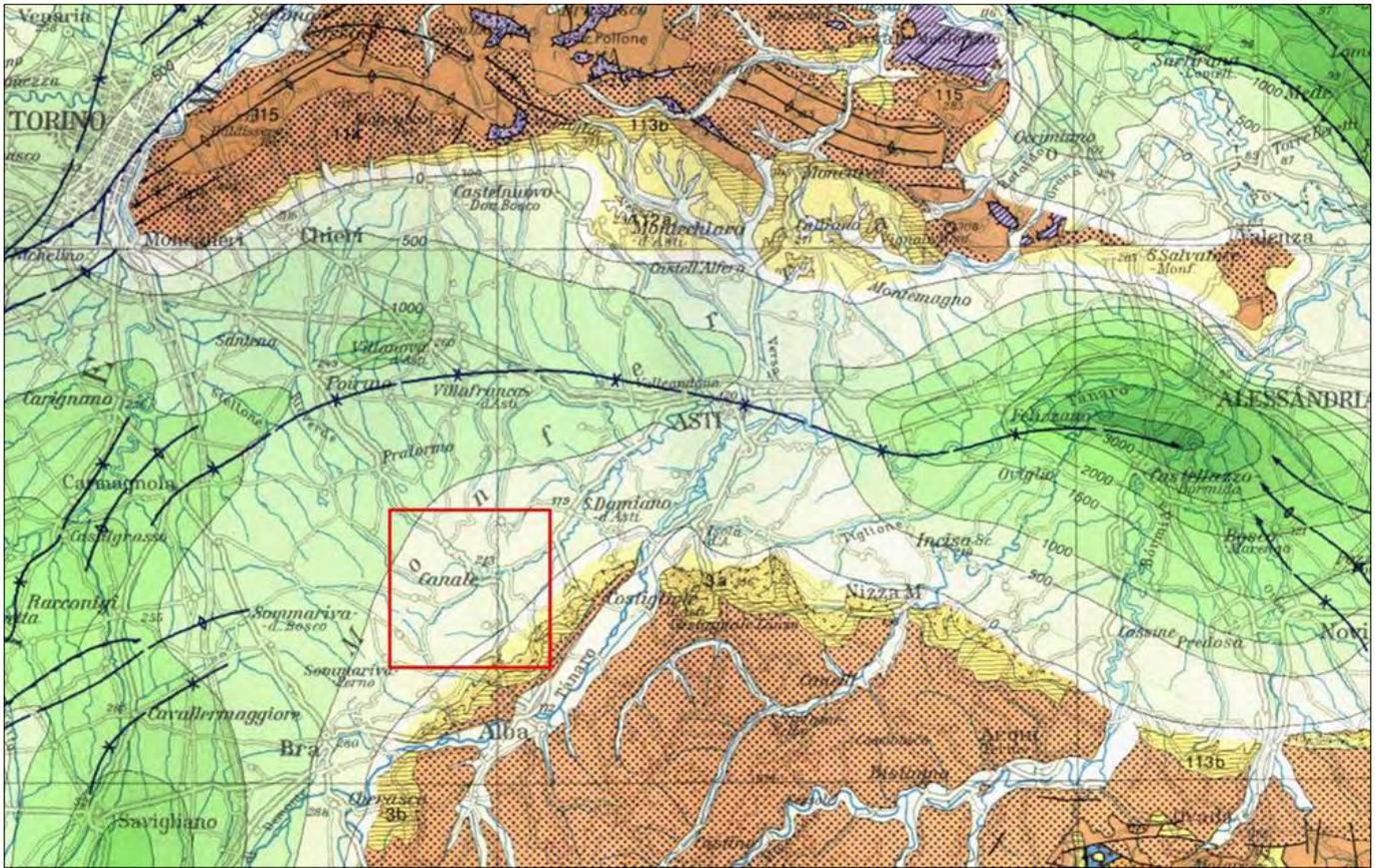


FIGURA 3. Inquadramento geologico strutturale: il quadrato rosso indica l'area di studio (da BIGI *et al.*, 1990).

guente rischio per le abitazioni limitrofe alle sezioni prese in considerazione, con la speranza che le amministrazioni competenti compiano le necessarie azioni per la mitigazione del rischio e per una corretta pianificazione territoriale.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Dal punto di vista geologico strutturale, la regione del Roero è situata sul fianco meridionale della Sinclinale Astigiana.

Tale struttura, il cui asse risulta orientato est – ovest, presenta una zona di alto strutturale in corrispondenza all'abitato di Asti, compresa fra due bacini subsidenti: a occidente quello di Savigliano, in corrispondenza del quale la base del Pliocene supera in profondità l'isobata di 2000 m, e a oriente quello di Alessandria, più accentuato, in cui la base del Pliocene supera l'isobata 3500 (Fig. 3; Bigi *et al.*, 1990; Irace *et al.*, 2009).

Poiché l'area di studio è collocata nel settore occidentale del fianco meridionale della Sinclinale Astigiana, i sedimenti del Bacino Terziario Piemontese (in tonalità marrone) nonché quelli sovrastanti del Bacino Pliocenico (in tonalità gialle) che caratterizzano litologicamente la zona, si sono qui strutturati secondo una monoclinale con direzione SW-NE ed immersione verso NW.

Dal punto di vista litologico, facendo riferimento ai Fogli 68, Carmagnola (Malaroda *et al.*, 1969), e 69, Asti (Boni *et al.*, 1970), della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000, e alle rispettive note illustrative (Carraro *et al.*, 1969; Boni & Casnedi, 1970), nell'alto bacino del T. Talloria, dal basso verso l'alto della monoclinale, affiorano le seguenti formazioni (Fig. 4):

- *Formazione gessoso-solfifera* (M⁵) – marne argillose per lo più gessifere, con lenti di gesso (g) (Messiniano). Affiora solo in corrispondenza della rocca di Guarene, all'estremità meridionale dell'area di studio;
- *Conglomerati di Cassano Spinola* (P¹M⁵) – Conglomerati e arenarie in grosse bancate intercalati a marne sabbiose (Pliocene inferiore - Messiniano). Sormontano stratigraficamente i gessi, affiorando appena valle di Guarene, verso NW;

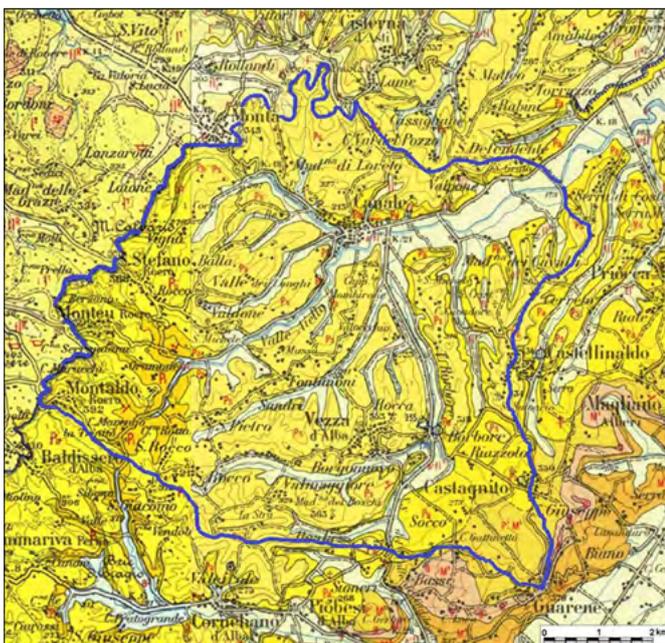


FIGURA 4. Inquadramento geologico. Stralcio dai Fogli 68, Carmagnola (MALARODA *et al.*, 1969), e 69, Asti (BONI *et al.*, 1970), della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000. In blu, il limite del bacino in esame.

- *Argille di Lugagnano* (P_a) – Marne sabbiose e argille marno-sabbiose con intercalazioni, verso l'alto di banchi di sabbie analoghe alle Sabbie di Asti. Costituiscono la formazione più diffusa nell'area;
- *Sabbie di Asti* (P_s) – Sabbie gialle più o meno stratificate, con livelli ghiaiosi e intercalazioni marnose, calcareniti e calciruditi (*Pliocene*);
- *Depositi Alluvionali* (a^{1ff3}) – Depositi alluvionali prevalentemente argillosi. Affiorano nel fondovalle del Borbore e dei suoi principali tributari.

3. VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ IDROLOGICA

La valutazione della pericolosità idrologica ha comportato la verifica idraulica su cinque sezioni fluviali che sembravano mostrare alcune criticità; la loro ubicazione, insieme alla delimitazione dei relativi bacini sottesi, è visualizzata in Figura 5.

La *sezione 1* è ubicata nel comune di Vezza d'Alba e sottende il bacino del Rio di Valle Sanche per un'estensione di 5,22 km²; in questo punto, il rio è stato tombinato sotto Piazza S. Carlo, a poche decine di metri dalle scuole medie e dalla scuola materna, entrambe di nuova costruzione (Fig. 6).

Anche la *sezione 2* è ubicata nel comune di Vezza d'Alba: tra Piazza S. Pancrazio e Via Castellero in corrispondenza della confluenza del Rio di Valle Sanche (che proviene da ovest e anche in quest'ultimo tratto scorre intubato sotto Piazza S. Pancrazio) e dal Rio Gavel (che proviene dalla rocca di Guarene, estrema propaggine meridionale dell'area, anch'esso nell'ultimo tratto quasi cancellato

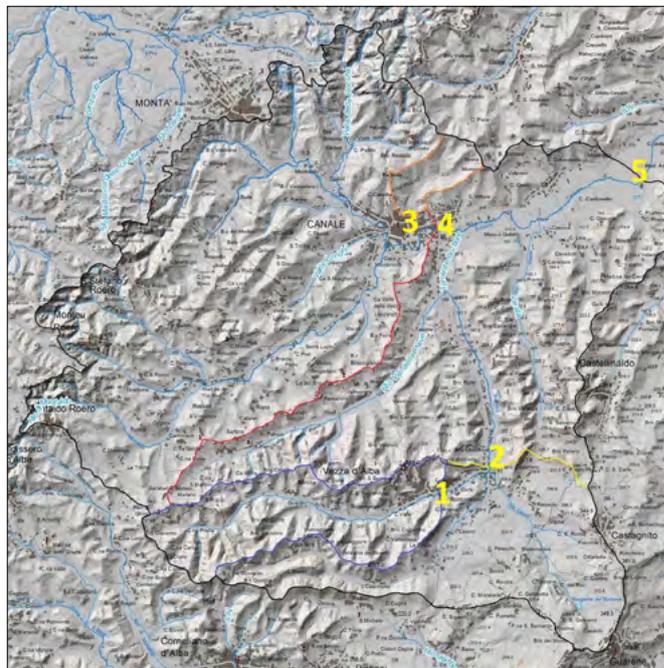


FIGURA 5. Ubicazione delle 5 sezioni e delimitazione dei bacini loro sottesi.

dall'antropizzazione): qui i due rii si uniscono a formare il T. Borbore (Fig. 7) la cui sezione sottende un bacino di 13,3 km².

Le sezioni 3, 4 e 5 sono ubicate nel Comune di Canale.

La *sezione 3* è situata all'incrocio tra Via Ciriagno e Via alle Fornaci, in cui tutta l'acqua proveniente dal bacino posto immediatamente a nord del paese (esteso per circa 0,92 km²) si intuba nei due punti indicati dalle frecce (Fig. 8), cosicché, nei calcoli di verifica, la sezione 3 è stata sdoppiata



FIGURA 6. Sezione 1 - Vezza d'Alba: tutta l'acqua che ruscella sul bacino di 5,22 km², è costretta a scorrere sotto Piazza S. Carlo, a poche decine di metri dalle scuole medie e dalla scuola materna.



FIGURA 7. Sezione 2 - Veza d'Alba: tra Piazza S. Pancrazio e Via Castellero il Rio di Valle Sanche (che proviene da ovest e che in quest'ultimo tratto scorre intubato sotto Piazza S. Pancrazio) e il Rio Gavel (che proviene dalla rocca di Guarene, estrema propaggine meridionale dell'area, anch'esso nell'ultimo tratto quasi cancellato dall'antropizzazione) confluiscono a formare il T. Borbore la cui sezione (in giallo) sottende un bacino di 13,3 km².



FIGURA 8. Sezione 3 – Canale: all'incrocio tra Via Ciriagno e Via alle Fornaci, tutta l'acqua proveniente dal bacino posto immediatamente a nord del paese (0,92 km²) si intuba nei punti indicati dalle frecce per almeno 280 m sotto l'abitato prima di raggiungere il T. Borbore.

in due sezioni grossomodo equivalenti (3a e 3b): da quei punti, l'acqua viaggia per almeno 280 m intubato, attraversando l'abitato prima di raggiungere il T. Borbore.

La *sezione 4* è stata collocata in corrispondenza del ponte di Via Milano, in una zona in cui le abitazioni sono state costruite a ridosso del T. Borbore (Fig. 9).

La *sezione 5* è stata scelta come chiusura dell'alto bacino del T. Borbore, esteso in totale per 6,59 km²; è ubicata in corrispondenza del ponticello della SP 234 sul T. Borbore quasi al confine con la provincia di Asti, tra la frazione Valpone in sinistra idrografica e la frazione Cavallotti in destra; in questo caso le abitazioni sorgono a più di 50 m dal torrente (Fig. 10).



FIGURA 9. Sezione 4 – Canale: in corrispondenza del ponte di Via Milano, le abitazioni sono state costruite a ridosso del T. Borbore. La sezione (linea gialla) sottende un bacino di 26 km².

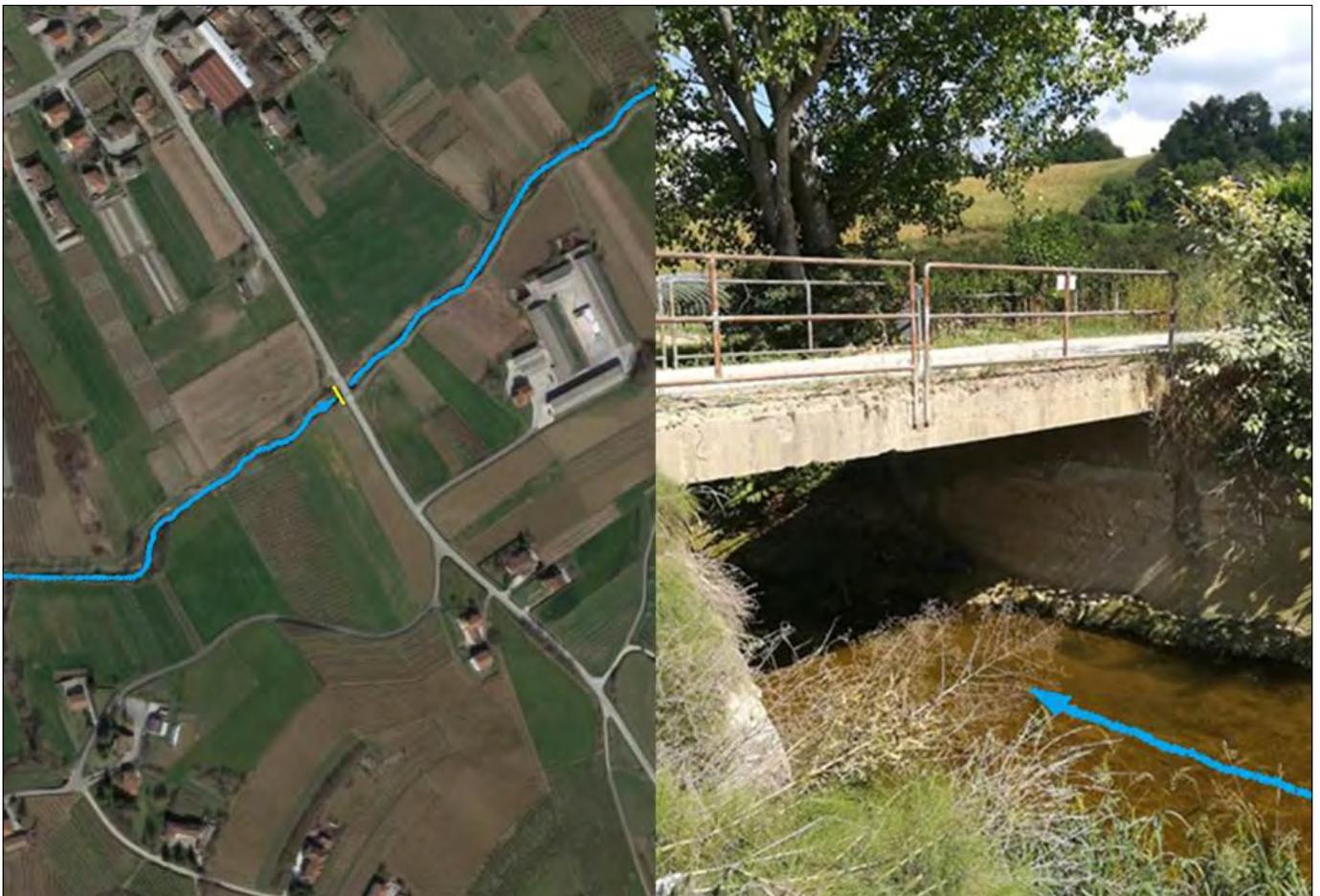


FIGURA 10. Sezione 5 – Chiusura dell'alto bacino del T. Borbore: la sezione (linea gialla), posta in corrispondenza del ponticello della SP 234 sul T. Borbore, sottende un bacino di 58,4 km². In questo caso le abitazioni sorgono a più di 50 m dal torrente.

3.1. Analisi pluviometrica

I dati delle piogge intense riferiti all'alto bacino del T. Borbore sono stati ricavati dalle registrazioni della stazione meteorologiche di Baldissero per il periodo 1997-2016, Castellinaldo per il periodo 1996-2016, Pralormo per il periodo 1988-2016 e San Damiano per il periodo 1996-2016 (Arpa Piemonte, Rif. WEB n. 2). Si tratta di stazioni pluviografiche presenti nell'intorno areale del bacino preso in esame, non essendocene nessuna al suo interno. Per ciascuna stazione sono state ricavate le curve di probabilità pluviometrica con tempi di ritorno di 10, 20, 50, 100, 200 e 500 anni, ed i valori dei coefficienti a e n sono stati successivamente mediati al fine ottenere le curve rappresentative del bacino in esame (Tab. 2, Fig. 11).

3.2. Calcolo delle portate di massima piena

Per il calcolo delle portate di massima piena, è stato utilizzato il Metodo Razionale, che utilizza la seguente relazione:

$$Q = k \cdot i \cdot C \cdot A$$

dove:

- Q è la portata di massima piena in m^3/s ;
- k è un fattore adimensionale che tiene conto della non uniformità delle unità di misura. Se A è espressa in km^2

ed i in mm/h per ottenere la portata in m^3/s , k vale 0,278;

- C è il coefficiente di deflusso;
- i è l'intensità della precipitazione critica;
- A è l'area del bacino a monte della sezione presa in esame.

Il modello prevede che la pioggia di progetto cada con intensità costante e in modo uniforme sul bacino. Le precipitazioni considerate sono quelle descritte dalle curve di probabilità pluviometrica riportate in figura 5.

L'intensità critica i è stata ricavata attraverso la valutazione dei tempi di corrvazione.

Per i bacini 4 e 5, con area maggiore di $20 km^2$, è stata utilizzata la formula di Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{h_{mr}}}$$

dove:

- t_c è il tempo di corrvazione espresso in ore;
- A è l'area del bacino preso in considerazione in km^2 ;
- L è la lunghezza dell'asta fluviale principale fino al punto di misura;
- h_{mr} è l'altezza media del bacino rispetto alla sezione di chiusura.

Tabella 2. Curve di probabilità pluviometrica ricavate dalle registrazioni della stazione meteorologiche di Baldissero, Castellinaldo, Pralormo e San Damiano nel periodo 1997-2018 (Arpa Piemonte, Rif. WEB n. 2).

	Baldissero	Castellinaldo	Pralormo	San Damiano	Valori medi
Tr=10	$h = 37,498 \cdot t^{0,2476}$	$h = 43,221 \cdot t^{0,2031}$	$h = 46,746 \cdot t^{0,2505}$	$h = 44,324 \cdot t^{0,1986}$	$h = 42,947 \cdot t^{0,2250}$
Tr=20	$h = 42,740 \cdot t^{0,2391}$	$h = 48,781 \cdot t^{0,1977}$	$h = 54,095 \cdot t^{0,2484}$	$h = 50,845 \cdot t^{0,1925}$	$h = 49,115 \cdot t^{0,2194}$
Tr=50	$h = 49,519 \cdot t^{0,2306}$	$h = 55,965 \cdot t^{0,1924}$	$h = 63,603 \cdot t^{0,2464}$	$h = 59,289 \cdot t^{0,1864}$	$h = 57,094 \cdot t^{0,2140}$
Tr=100	$h = 54,597 \cdot t^{0,2255}$	$h = 61,343 \cdot t^{0,1893}$	$h = 70,727 \cdot t^{0,2453}$	$h = 65,617 \cdot t^{0,1828}$	$h = 63,071 \cdot t^{0,2107}$
Tr=200	$h = 59,654 \cdot t^{0,2213}$	$h = 66,697 \cdot t^{0,1866}$	$h = 77,823 \cdot t^{0,2443}$	$h = 71,923 \cdot t^{0,1798}$	$h = 69,024 \cdot t^{0,2080}$
Tr=500	$h = 66,325 \cdot t^{0,2166}$	$h = 73,756 \cdot t^{0,1837}$	$h = 87,185 \cdot t^{0,2433}$	$h = 80,243 \cdot t^{0,1766}$	$h = 76,877 \cdot t^{0,2051}$
Tr=1000	$h = 71,366 \cdot t^{0,2136}$	$h = 79,088 \cdot t^{0,1818}$	$h = 94,259 \cdot t^{0,2427}$	$h = 86,531 \cdot t^{0,1745}$	$h = 82,811 \cdot t^{0,2032}$

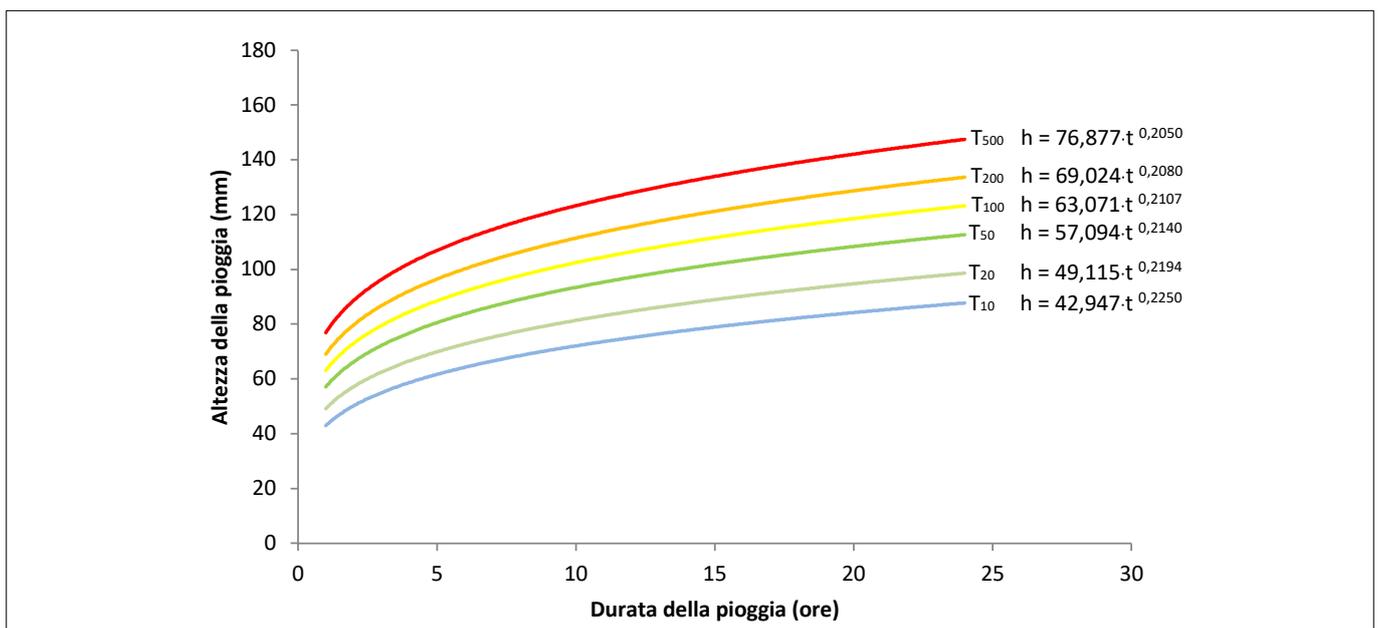


FIGURA 11. Curve di probabilità pluviometrica medie con tempi di ritorno di 10, 20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni adottate per il bacino oggetto di studio.

Invece, per i bacini 1, 2 e 3, con aree inferiori a 20 km², è stata utilizzata la formula di Kirpich:

$$t_c = 0,000325 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0,77}$$

dove:

- t_c è il tempo di corrivazione espresso in ore;
- L = lunghezza dell'asta principale del corso d'acqua estesa fino allo spartiacque (m)
- S = pendenza dell'asta principale (m/m).

In Tabella 3 vengono riportati i tempi di corrivazione dei cinque bacini, insieme ai parametri fisiografici utilizzati, ricavati tramite software Quantum Gis.

A questo punto, l'intensità critica i_c sarà data dal rapporto tra l'altezza della pioggia di durata pari al tempo di corrivazione h_c (per calcolare la quale basta sostituire t_c nella durata t delle equazioni delle curve di probabilità pluviometrica) e il tempo di corrivazione t_c stesso, riferita quindi a un determinato tempo di ritorno:

$$i_c = \frac{h_c}{t_c}$$

I dati di pioggia e intensità critica ottenuti per i cinque bacini e per i diversi tempi di ritorno sono riportati in Tabella 4.

Un altro parametro nel calcolo della portata di massima piena è rappresentato dal coefficiente di deflusso C che

Tabella 3. Dati fisiografici e tempi di corrivazione dei cinque bacini in esame.

	Area [km ²]	L[km]	h_m [m]	H_{sez} [m]	h_{mr} [m]	t_c [ore]
Bacino 1	5,22	5,20	*	*	*	1,26
Bacino 2	13,3	6,10	*	*	*	1,60
Bacino 3	0,92	1,54	*	*	*	0,29
Bacino 4	26,0	9,27	266,5	180	86,5	4,60
Bacino 5	58,4	13,51	258	165	93	6,59

* dato non necessario nella formula di Kirpich

Tabella 4. Piogge e intensità critiche ottenute per i 5 bacini e per i diversi tempi di ritorno.

	h_c [mm]	t_c [ore]	i_c [mm/ora]
Bacino sezione 1 (Tr = 10 anni)	45,24	1,26	35,90
Bacino sezione 1 (Tr = 20 anni)	51,67	1,26	41,01
Bacino sezione 1 (Tr = 50 anni)	59,99	1,26	47,61
Bacino sezione 1 (Tr = 100 anni)	66,22	1,26	52,55
Bacino sezione 1 (Tr = 200 anni)	72,42	1,26	57,48
Bacino sezione 1 (Tr = 500 anni)	80,61	1,26	63,98
Bacino sezione 2 (Tr = 10 anni)	47,74	1,60	29,84
Bacino sezione 2 (Tr = 20 anni)	54,45	1,60	34,03
Bacino sezione 2 (Tr = 50 anni)	63,14	1,60	39,46
Bacino sezione 2 (Tr = 100 anni)	69,64	1,60	43,52
Bacino sezione 2 (Tr = 200 anni)	76,11	1,60	47,57
Bacino sezione 2 (Tr = 500 anni)	84,66	1,60	52,91
Bacino sezione 3 (Tr = 10 anni)	32,51	0,29	112,09
Bacino sezione 3 (Tr = 20 anni)	37,43	0,29	129,08
Bacino sezione 3 (Tr = 50 anni)	43,81	0,29	151,06
Bacino sezione 3 (Tr = 100 anni)	48,59	0,29	167,56
Bacino sezione 3 (Tr = 200 anni)	53,36	0,29	183,98
Bacino sezione 3 (Tr = 500 anni)	59,64	0,29	205,65
Bacino sezione 4 (Tr = 10 anni)	60,54	4,60	13,16
Bacino sezione 4 (Tr = 20 anni)	68,65	4,60	14,92
Bacino sezione 4 (Tr = 50 anni)	79,14	4,60	17,21
Bacino sezione 4 (Tr = 100 anni)	86,99	4,60	18,91
Bacino sezione 4 (Tr = 200 anni)	94,81	4,60	20,61
Bacino sezione 4 (Tr = 500 anni)	105,13	4,60	22,85
Bacino sezione 5 (Tr = 10 anni)	65,64	6,59	9,96
Bacino sezione 5 (Tr = 20 anni)	74,28	6,59	11,27
Bacino sezione 5 (Tr = 50 anni)	85,47	6,59	12,97
Bacino sezione 5 (Tr = 100 anni)	93,84	6,59	14,24
Bacino sezione 5 (Tr = 200 anni)	102,17	6,59	15,50
Bacino sezione 5 (Tr = 500 anni)	113,17	6,59	17,17

Tabella 5. Valori per il coefficiente C in funzione del tipo di terreno, dell'uso del suolo e della pendenza (Benini, 1990).

Vegetazione e pendenza		Tipi di terreno*		
		leggero	medio	compatto
Boschi	<10%	0,13	0,18	0,25
	>10%	0,16	0,21	0,36
Pascoli	<10%	0,16	0,36	0,56
	>10%	0,22	0,42	0,62
Coltivi	<10%	0,40	0,60	0,70
	>10%	0,52	0,72	0,82

*Cioè terreni con permeabilità alta (t. leggero), media (t. medio) o bassa (t. compatto).

Tabella 6. Valori del Coefficiente di deflusso C assegnato alle superfici omogenee per uso del suolo e pendenza ottenute dalle analisi cartografiche tramite software Quantum GIS.

Uso del suolo	Pendenza	Aree Bacino 1 (km ²)	Aree Bacino 2 (km ²)	Aree Bacino 3 (km ²)	Aree Bacino 4 (km ²)	Aree Bacino 5 (km ²)	Coefficiente di deflusso C (mm/mm)
Bosco	<10%	0,55	0,82	0,00	1,60	3,32	0,25
Bosco	>10%	2,20	3,27	0,02	6,24	13,30	0,36
Colture agrarie	<10%	0,59	5,12	0,21	4,77	9,13	0,70
Colture agrarie	>10%	1,38	2,75	0,60	11,13	27,41	0,82
Aree antropizzate	---	0,50	1,34	0,09	2,26	5,24	0,90
Area totale		5,22	13,3	0,92	26,0	58,4	

Tabella 7. Valori medi dei coefficienti di deflusso per i cinque bacini in esame.

	Coefficiente di deflusso C
Bacino sotteso dalla sezione 1	0,56
Bacino sotteso dalla sezione 2	0,63
Bacino sotteso dalla sezione 3	0,79
Bacino sotteso dalla sezione 4	0,66
Bacino sotteso dalla sezione 5	0,67

tiene conto della natura dei terreni, del tipo di copertura vegetale e, seppure non venga mai preso in considerazione, dal grado di saturazione del terreno al momento dell'infiltrazione.

Per determinarlo si fa riferimento a valori di letteratura come ad esempio quelli di Tabella 5, proposti da Benini (1990).

Come si può notare dai valori riportati in tabella, la copertura vegetale influenza notevolmente la capacità di assorbimento. I boschi tendono a trattenere maggiormente le precipitazioni e pertanto i valori di C sono minori per i boschi rispetto alle aree a pascolo e a colture agrarie.

Il bacino di interesse è stato suddiviso in aree boschive e in aree adibite a colture agrarie, essenzialmente vigneti e nocioleti, nonché in aree con pendenze maggiori e minori del 10%. Data la natura dei suoli presenti nel bacino, poco

o punto permeabili, si è fatto sempre riferimento ai valori del terreno compatto. Alle aree antropizzate, fortemente impermeabilizzate, è stato assegnato un coefficiente C pari a 0,90.

Tramite il software *Quantum Gis*, sono state ricavate 4 categorie omogenee per pendenza e uso del suolo a cui è stato assegnato un coefficiente C, facendo riferimento ai valori sopra citati, mentre alle aree antropizzate è stato attribuito un coefficiente C pari a 0,90 (Tab. 6).

Pesando i coefficienti di deflusso per le aree omogenee a cui sono riferiti, sono state calcolate le medie ponderali dei coefficienti C da attribuire ai cinque bacini in esame (Tab. 7).

Utilizzando i dati ricavati sono state infine calcolate le portate di massima piena in corrispondenza delle cinque sezioni oggetto di studio, per i diversi tempi di ritorno presi in considerazione (Tab. 8).

Tabella 8. Portate di massima piena attese alle sezioni di misura per i relativi tempi di ritorno.

	k	i_c [mm/ora]	C	A [km²]	Portata [m³/s]
Sezione 1 (Tr = 10 anni)	0,278	35,90	0,56	5,22	29,17
Sezione 1 (Tr = 20 anni)	0,278	41,01	0,56	5,22	33,33
Sezione 1 (Tr = 50 anni)	0,278	47,61	0,56	5,22	38,69
Sezione 1 (Tr = 100 anni)	0,278	52,55	0,56	5,22	42,70
Sezione 1 (Tr = 200 anni)	0,278	57,48	0,56	5,22	46,71
Sezione 1 (Tr = 500 anni)	0,278	63,98	0,56	5,22	51,99
Sezione 2 (Tr = 10 anni)	0,278	29,84	0,63	13,3	69,51
Sezione 2 (Tr = 20 anni)	0,278	34,03	0,63	13,3	79,27
Sezione 2 (Tr = 50 anni)	0,278	39,46	0,63	13,3	91,92
Sezione 2 (Tr = 100 anni)	0,278	43,52	0,63	13,3	101,37
Sezione 2 (Tr = 200 anni)	0,278	47,57	0,63	13,3	110,81
Sezione 2 (Tr = 500 anni)	0,278	52,91	0,63	13,3	123,25
Sezione 3 (Tr = 10 anni)	0,278	112,09	0,79	0,92	22,65
Sezione 3 (Tr = 20 anni)	0,278	129,08	0,79	0,92	26,08
Sezione 3 (Tr = 50 anni)	0,278	151,06	0,79	0,92	30,52
Sezione 3 (Tr = 100 anni)	0,278	167,56	0,79	0,92	33,86
Sezione 3 (Tr = 200 anni)	0,278	183,98	0,79	0,92	37,17
Sezione 3 (Tr = 500 anni)	0,278	205,65	0,79	0,92	41,55
Sezione 4 (Tr = 10 anni)	0,278	13,16	0,66	26,0	62,78
Sezione 4 (Tr = 20 anni)	0,278	14,92	0,66	26,0	71,18
Sezione 4 (Tr = 50 anni)	0,278	17,21	0,66	26,0	82,10
Sezione 4 (Tr = 100 anni)	0,278	18,91	0,66	26,0	90,21
Sezione 4 (Tr = 200 anni)	0,278	20,61	0,66	26,0	98,32
Sezione 4 (Tr = 500 anni)	0,278	22,85	0,66	26,0	109,01
Sezione 5 (Tr = 10 anni)	0,278	9,96	0,67	58,4	108,34
Sezione 5 (Tr = 20 anni)	0,278	11,27	0,67	58,4	122,59
Sezione 5 (Tr = 50 anni)	0,278	12,97	0,67	58,4	141,08
Sezione 5 (Tr = 100 anni)	0,278	14,24	0,67	58,4	154,90
Sezione 5 (Tr = 200 anni)	0,278	15,50	0,67	58,4	168,60
Sezione 5 (Tr = 500 anni)	0,278	17,17	0,67	58,4	186,77

3.3. Verifiche idrauliche

Al fine di verificare se le portate di progetto appena calcolate sarebbero defluite normalmente nelle sezioni o se in qualche occasione il fiume avrebbe esondato, inondando le zone abitate circostanti, è stato necessario fare un confronto con la *portata massima ammissibile* da ciascuna sezione, pari al prodotto dell'area A della sezione e la velocità del flusso idrico V :

$$Q = A \cdot V$$

Le aree A sono state ricavate da misure in situ delle lunghezze con telemetro e delle quote con battute topografiche. Come quota massima delle sezioni è stato preso il livello base delle abitazioni.

La velocità del flusso idrico V delle sezioni è stata valutata utilizzando la formula di Chézy:

$$V = \chi \cdot \sqrt{R \cdot i}$$

dove:

- V è la velocità media in m/s;
- χ è il coefficiente di Chézy che dipende dalla scabrezza dell'alveo e dal raggio idraulico;
- R è il raggio idraulico in m^{1/2}/s;
- i è la pendenza del fondo espressa in %.

Per raggio idraulico si intende il rapporto tra l'area della sezione e il perimetro bagnato e per perimetro bagnato la somma tra la lunghezza del fondo dell'alveo e delle sponde:

$$R = \frac{A}{p_b}$$

Con i dati ricavati dalle misure *sono stati ottenuti, quindi, i raggi idraulici* delle cinque sezioni (Tab. 9).

Tabella 9. Valori dell'area, del perimetro bagnato e del raggio idraulico delle cinque sezioni misurate.

	Area sezione [m ²]	pb [m]	R [m]
Sezione 1	9,47	12,94	0,73
Sezione 2	57,60	24,40	2,36
Sezione 3a	0,64	2,40	0,27
Sezione 3b	0,64	2,40	0,27
Sezione 4	42,50	18,50	2,30
Sezione 5	21,78	13,20	1,65

Le pendenze del fondo sono state ricavate, per ciascun bacino, suddividendo il profilo longitudinale dell'asta in diversi tronchi e calcolando la media ponderata con la formula di Taylor-Schwartz (Tab. 10):

Tabella 10. Pendenze medie del fondo calcolate con la formula di Taylor-Schwartz.

Tronchi asta sezione 1	δL (m)	i (m/m)	Tronchi asta sezione 2	δL (m)	i (m/m)
315-260	537,0	0,102	315-260	537,0	0,102
260-250	548,0	0,018	260-250	548,0	0,018
250-240	838,2	0,012	250-240	838,2	0,012
240-230	856,5	0,012	240-230	856,5	0,012
230-220	806,3	0,012	230-220	806,3	0,012
220-210	1271,0	0,008	220-210	1271,0	0,008
210-205	343,0	0,015	210-205	1243,0	0,004
pendenza media i_m		0,0129	pendenza media i_m		0,0095
Tronchi asta sezione 3	δL (m)	i (m/m)	Tronchi asta sezione 4	δL (m)	i (m/m)
320-250	250,4	0,280	350-270	1069,6	0,075
250-230	218,0	0,092	270-250	848,5	0,024
230-210	279,5	0,072	250-230	1224,0	0,016
210-200	393,3	0,025	230-220	873,5	0,011
200-185	399,8	0,038	220-210	1164,0	0,009
			210-200	1321,0	0,008
			200-190	1312,0	0,008
			190-180	1458,0	0,007
pendenza media i_m		0,0518	pendenza media i_m		0,0112
Tronchi asta sezione 5	δL (m)	i (m/m)	Tronchi asta sezione 5	δL (m)	i (m/m)
300-260	484,52	0,083	210-200	1189,08	0,008
260-250	478,38	0,021	200-190	1968,46	0,005
250-240	885,58	0,011	190-180	1778,58	0,006
240-230	898,49	0,011	180-170	1962,52	0,005
230-220	848,58	0,012	170-165	1681,5	0,003
220-210	1334,31	0,007	pendenza media i_m		0,0065

$$\frac{L}{\sqrt{i_m}} = \sum_{j=1}^{n^{\circ}\text{tronchi}} \frac{L_j}{\sqrt{i_j}}$$

dove:

- i_m = pendenza media dell'asta principale;
- i_j = pendenze dei singoli tronchi;
- L = lunghezza dell'asta;
- L_j = lunghezze dei singoli tronchi.

Al fine di determinare il coefficiente di scabrezza, necessario per il calcolo della velocità del flusso idrico, è stata utilizzata l'equazione di Manning:

$$\chi = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}}$$

dove:

- n è il coefficiente di Manning
- R è il raggio idraulico

La formula di Chézy quindi diventa:

$$V = \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * i^{\frac{1}{2}}$$

Il coefficiente n di Manning è stato calcolato dalla formula seguente (Chow, 1959), rifacendosi ai coefficienti parziali della Tabella 11:

Tabella 11. Valori da utilizzare per calcolare il coefficiente n di Manning (Chow, 1959).

Materiale costituente l'alveo	Terra		0,020
	Roccia		0,025
	Alluvione grossolana	n_0	0,028
	Alluvione fine		0,024
Irregolarità della superficie della sezione	Trascurabile		0,000
	Bassa	n_1	0,005
	Moderata		0,010
	Elevata		0,020
Variazione di forma e dimensione della sezione trasversale	Graduale		0,000
	Occasionale	n_2	0,005
	Frequente		0,010-0,015
Effetto relativo di ostruzioni	Trascurabile		0,000
	Modesto	n_3	0,010-0,015
	Apprezzabile		0,020-0,030
	Elevato		0,040-0,060
Effetto della vegetazione	Basso		0,005-0,010
	Medio	n_4	0,010-0,025
	Alto		0,025-0,050
	Molto alto		0,050-0,100
Grado di sinuosità dell'alveo	Modesto		1,000
	Apprezzabile	m_5	1,150
	Elevato		1,300

I coefficienti parziali utilizzati e i coefficienti n di Manning ricavati nella formula di Chow (1959) sono riportati in Tabella 12.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

Tabella 12. Valori dei coefficienti parziali utilizzati e relativi coefficienti n di Manning.

	Bacino 1	Bacino 2	Bacino 3	Bacino 4	Bacino 5
n_0	0,024	0,024	0,020	0,024	0,024
n_1	0,010	0,010	0,000	0,010	0,010
n_2	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
n_3	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
n_4	0,050	0,007	0,007	0,050	0,050
m_5	1,000	1,150	1,000	1,150	1,150
n	0,139	0,110	0,082	0,160	0,160

Avendo quindi a disposizione tutti i dati necessari, si sono calcolate le velocità di deflusso V tramite la formula di Chézy (Tab. 13).

Tabella 13. Valori delle velocità di deflusso.

	n	R	i	Velocità [m/s]
Sezione 1	0,139	0,73	0,0129	0,66
Sezione 2	0,110	2,36	0,0095	1,57
Sezione 3a	0,082	0,27	0,0518	1,16
Sezione 3b	0,082	0,27	0,0518	1,16
Sezione 4	0,160	2,30	0,0112	1,15
Sezione 5	0,160	1,65	0,0065	0,70

Infine, moltiplicando le aree delle sezioni per le rispettive velocità di deflusso, sono state ricavate le portate massime ammissibili per le cinque sezioni analizzate (Tab. 14).

Tabella 14. Portate massime ammissibili nelle due sezioni.

	Area sezione [m²]	Velocità [m/s]	Portata ammissibile [m³/s]
Sezione 1	9,47	0,66	6,25
Sezione 2	57,60	1,57	90,43
Sezione 3a	0,64	1,16	0,74
Sezione 3b	0,64	1,16	0,74
Sezione 4	42,50	1,15	48,88
Sezione 5	21,78	0,70	15,25

4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Dal confronto tra le portate massime ammissibili delle due sezioni e le portate di progetto calcolate con il Metodo Razionale (Tab. 15) si rileva che, nelle sezioni 1,3,4 e 5, le portate attese per tempi di ritorno anche solo di 10 anni sono maggiori della portata massima ammissibile con prevedibili allagamenti delle zone edificate circostanti. La sezione 2 potrebbe contenere solo una portata di piena con tempo di ritorno di 20 anni, ma già quella con tempo di ritorno 50 anni supererebbe la portata ammissibile.

Si spera che le amministrazioni pubbliche competenti da un lato intervengano con misure a monte per mitigare il rischio idrologico, dall'altro informino efficacemente la popolazione sulla pericolosità idrologica del proprio territorio.

Tabella 15. Verifica idraulica delle cinque sezioni prese in esame: nelle sezioni 1,3,4 e 5, le portate attese per tempi di ritorno anche solo di 10 anni sono maggiori della portata massima ammissibile con prevedibili allagamenti delle zone edificate circostanti. La sezione 2 resisterebbe alla piena con $Tr = 20$ anni ma non reggerebbe già quella con $Tr = 50$ anni.

	Portata di massima piena [m ³ /s]	Portata ammissibile [m ³ /s]
Sezione 1 (Tr = 10 anni)	29,17	6,25
Sezione 1 (Tr = 20 anni)	33,33	6,25
Sezione 1 (Tr = 50 anni)	38,69	6,25
Sezione 1 (Tr = 100 anni)	42,70	6,25
Sezione 1 (Tr = 200 anni)	46,71	6,25
Sezione 1 (Tr = 500 anni)	51,99	6,25
Sezione 2 (Tr = 10 anni)	69,51	90,43
Sezione 2 (Tr = 20 anni)	79,27	90,43
Sezione 2 (Tr = 50 anni)	91,92	90,43
Sezione 2 (Tr = 100 anni)	101,37	90,43
Sezione 2 (Tr = 200 anni)	110,81	90,43
Sezione 2 (Tr = 500 anni)	123,25	90,43
Sezione 3 (Tr = 10 anni)	22,65	1,48
Sezione 3 (Tr = 20 anni)	26,08	1,48
Sezione 3 (Tr = 50 anni)	30,52	1,48
Sezione 3 (Tr = 100 anni)	33,86	1,48
Sezione 3 (Tr = 200 anni)	37,17	1,48
Sezione 3 (Tr = 500 anni)	41,55	1,48
Sezione 4 (Tr = 10 anni)	62,78	48,88
Sezione 4 (Tr = 20 anni)	71,18	48,88
Sezione 4 (Tr = 50 anni)	82,10	48,88
Sezione 4 (Tr = 100 anni)	90,21	48,88
Sezione 4 (Tr = 200 anni)	98,32	48,88
Sezione 4 (Tr = 500 anni)	109,01	48,88
Sezione 5 (Tr = 10 anni)	108,34	15,25
Sezione 5 (Tr = 20 anni)	122,59	15,25
Sezione 5 (Tr = 50 anni)	141,08	15,25
Sezione 5 (Tr = 100 anni)	154,90	15,25
Sezione 5 (Tr = 200 anni)	168,60	15,25
Sezione 5 (Tr = 500 anni)	186,77	15,25

BIBLIOGRAFIA

- BENINI G. (1990), *Sistemazioni idraulico forestali*. Collana Scienze forestali e ambientali. UTET, Torino, 308 pp., ISBN-10: 880204340X, ISBN-13: 978-8802043401
- BIGI G., CASTELLARIN A., COLI M., DAL PIAZ G.V., SARTORI R., SCANDONE P., VAI G.B. (1990), *Structural Model of Italy scale 1:500.000, sheet 1*. C.N.R., Progetto Finalizzato Geodinamica, SELCA Firenze.
- BONI A., CASNEDI R. (1970), *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000 – Fogli 69 e 70 Asti – Alessandria*. Servizio Geologico d'Italia, Poligrafica & Cartevalori, Ercolano (NA), 64 pp.
- BONI A., DAL PIAZ G.B., BRAGA G., BRUNO G., CASNEDI R., CORSI M., GATTO G.O., GATTO P., MOTTA E., PEROTTO G., RAMPOLDI R., MOSNA S. (1970), *Foglio 69 "Asti" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000*. Servizio Geologico d'Italia, II edizione.
- CARRARO F., PETRUCCI F., TAGLIAVINI S. (1969), *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000 – Foglio 69 "Carmagnola"*. Servizio Geologico d'Italia, Poligrafica & Cartevalori, Ercolano (NA), 40 pp.
- CHOW V.T. (1959), *Open Channel Hydraulics*. Mc Graw Hill Company, 680 pp.
- MALARODA R., VENZO S., BORTOLAMI G., CARRARO F., CREMA G., PETRUCCI F., SACCHI R., STURANI C., TAGLIAVINI S. (1969), *Foglio 68 "Carmagnola" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000*. Servizio Geologico d'Italia, II edizione.

RIFERIMENTI WEB

- 1 - <https://www.cittadelmiele.it/wp-content/uploads/2018/06/citta-del-miele-monteu-roero.jpg>
- 2 - https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/acceso-ai-dati/annali_meteoidrologici/

TOMAPS: Un progetto per la mappatura da satellite dell'inquinamento atmosferico in Piemonte

TOMAPS: A project for mapping the Piedmont atmospheric air pollution from satellite

ADELE CAMPUS^{*1}, MARCO LAIOLO^{1,2}, FIORELLA ACQUAOTTA^{1,2}, DIEGO COPPOLA^{1,2}

¹ Dipartimento di Scienze della Terra di Torino

² Centro Interdipartimentale sui Rischi Naturali in Ambiente Montano e Collinare – NatRisk

* Corresponding author

E-mail: adele.campus@unito.it (A. Campus), marco.laiolo@unito.it (M. Laiolo), fiorella.acquaotta@unito.it (F. Acquotta), diego.coppola@unito.it (D. Coppola)

Parole chiave: inquinamento atmosferico, telerilevamento, TROPOMI, Sentinel-5P, mappa

Key words: atmospheric air pollution, remote sensing, TROPOMI, Sentinel-5P, map

1. INTRODUZIONE

L'inquinamento atmosferico rappresenta, su scala globale, il rischio naturale che quotidianamente ha un impatto maggiore sulla salute umana, in quanto il 91% della popolazione vive in luoghi in cui le concentrazioni di inquinanti superano i limiti imposti dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS; World Health Organization, 2016). In particolare, risulta come ca. il 9% annuo dei decessi, pari a 4,2 milioni (World Health Organization, 2018), sia legato a morti premature connesse a patologie respiratorie e cardiovascolari il cui insorgere o aggravamento risulta connesso con l'inquinamento atmosferico. Tra queste l'OMS e il *Global Burden of Diseases* pubblicato dalla rivista *The Lancet* riconoscono ictus, ischemie, broncopneumopatia cronica, alcune forme di tubercolosi, cancro ai polmoni (Prüss-Ustün *et al.*, 2016; WHO, 2016; GBD 2019 Risk

Factors Collaborators, 2020). Inoltre, tale fenomeno risulta essere tra i fattori scatenanti di criticità ambientali e climatiche quali il buco dell'ozono, l'aumento dell'effetto serra, il fenomeno delle piogge acide, oltre ad avere un impatto diretto sulla qualità delle acque e dei suoli (Seinfeld and Pandis, 2016; EEA, 2020).

In ambito europeo, nell'ultimo report redatto dall'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA) emerge come l'Italia presenti situazioni critiche considerando le concentrazioni medie annuali di particolato atmosferico (PM_{2,5} e PM₁₀) e gas inquinanti (O₃ e NO₂; Fig. 1), dove, nel primo caso, il nostro paese presenta concentrazioni inferiori ai limiti imposti dalla normativa Europea, ma superiori a quelli tracciati dall'OMS (EEA, 2020).

L'impatto di questa situazione sulla salute umana risulta importante considerando come nel nostro paese nel

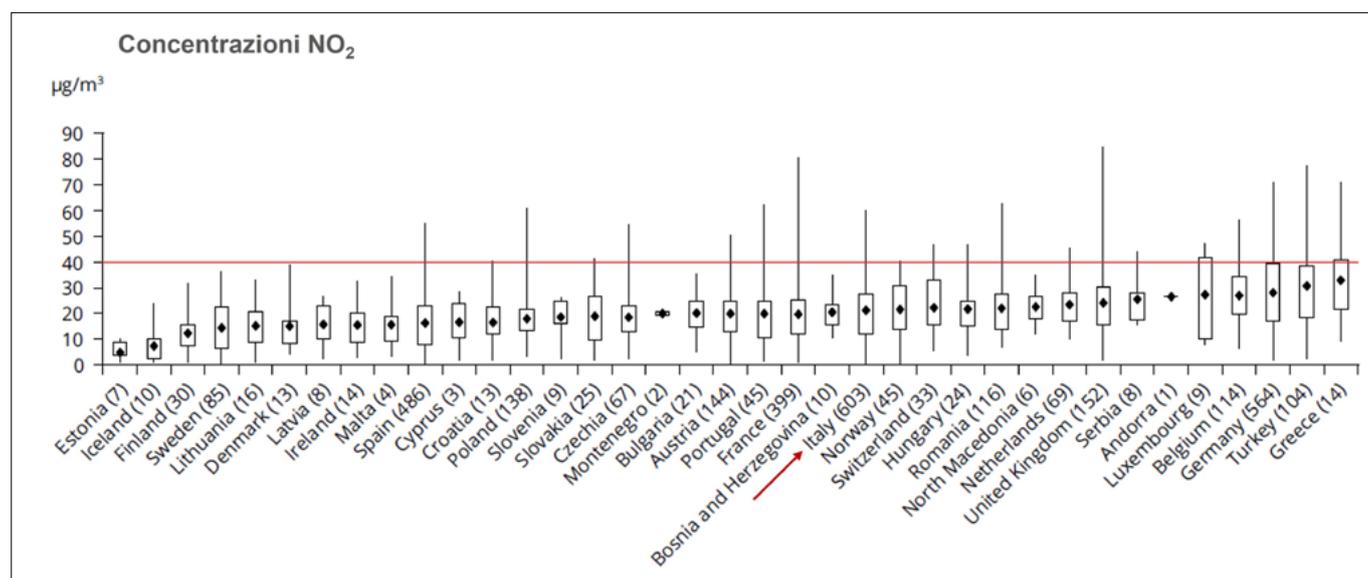


FIGURA 1. Concentrazioni annuali di biossido di azoto (NO₂) relative all'anno 2018 di 37 paesi. La linea rossa continua identifica il limite di concentrazione media annuale imposto dall'Unione Europea, coincidente con quello consigliato dall'OMS. L'Italia è evidenziata dalla freccia rossa. Nelle parentesi è indicato il numero di stazioni considerate per il calcolo della media annuale e per ogni paese sono indicati (linee nere) i valori massimi e minimi misurati dalle stazioni (EEA, 2020 mod.).

2018 si stimano ca. 52.300 decessi prematuri connessi all'esposizione all'inquinamento atmosferico (PM_{2,5}, NO₂ e O₃), pari a ca. l'8% dei decessi di tutto l'anno. Tale dato è il secondo più alto in Europa, e si traduce inoltre in una perdita economica di diversi miliardi di euro, che nel 2015 rappresenta il 5.3% del PIL nazionale (EEA, 2020; Health Effects Institute, 2020; Roy e Braathen, 2017; Istat, 2021).

In questo quadro, nel 2020 la Città Metropolitana di Torino, risulta essere al primo posto in Italia per numero di superamenti dei valori limite imposti dalla normativa nazionale (Minutolo *et al.*, 2021). Nell'intero Piemonte, a causa dell'esposizione ai soli PM_{2,5} si stima una riduzione nell'aspettativa di vita di ca. 9.8 mesi, con punte di 1 anno e 5 mesi considerando i soli residenti nei centri urbani (Regione Piemonte, 2018).

I processi antropici che portano alla formazione degli inquinanti che intaccano maggiormente la salute sono molteplici (traffico veicolare, riscaldamento, produzione di energia, industria, attività agricola etc.; EEA, 2020). Per ridurre le concentrazioni di inquinanti è fondamentale la messa in opera di strategie atte a limitarne la formazione e diffusione ed a mitigarne gli effetti. Ai fini di ridurre il loro impatto sulla salute umana e sul numero di decessi, è stato recentemente suggerito l'adeguamento dell'attuale normativa sull'esposizione a gas e agenti inquinanti ai limiti imposti dall'Unione Europea (Regione Piemonte, 2019). Questi aspetti rappresentano una sfida complessa che coinvolge e coinvolgerà molteplici ambiti di ricerca, nonché le principali istituzioni su più livelli (da locale ad europeo).

Il monitoraggio della qualità dell'aria è quindi un requisito fondamentale e necessario per valutare gli effetti dell'inquinamento antropico (e non) ed effettuare previsioni nel breve e lungo periodo. Le tradizionali tecniche di monitoraggio dell'aria da terreno consistono in analisi chimiche e microbiologiche che consentono di identificare i livelli di sostanze inquinanti nell'atmosfera; tuttavia, essendo basate su misure puntuali, per restituire una mappatura richiedono l'estrapolazione dei dati (tramite modelli) in zone non coperte dalla rete di stazioni a terra.

I dati satellitari rappresentano una tecnologia in rapido sviluppo, che grazie all'omogeneità temporale e spaziale su scala globale caratteristica dei dati acquisiti, sono e saranno sempre più in grado di fornire stime affidabili sui principali parametri ambientali, inclusi alcuni inquinanti atmosferici (Borsdorff *et al.*, 2018). Inoltre, analizzare e validare questi dati spaziali per renderli compatibili con le misure di terreno avrebbe evidenti ricadute positive sulle metodologie e le conoscenze utilizzabili per futuri progetti aventi come oggetto la mitigazione delle emissioni dei principali agenti dell'inquinamento atmosferico.

Con queste premesse è stato pensato il progetto TOMAPS (Tecniche innovative per la MAPPatura dell'inquinamento dallo Spazio), supportato dalla Fondazione CRT e patrocinato da Regione Piemonte e Città Metropolitana di Torino.

Il progetto, avviato a giugno 2021, ha la finalità principale di analizzare i dati acquisiti dal Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI), un sensore montato a

bordo del satellite Sentinel-5P dedicato al monitoraggio degli inquinanti atmosferici su scala globale (Veeffkind *et al.*, 2012). L'analisi è focalizzata al territorio della Regione Piemonte nel periodo 2018-2021, al fine di mappare alcuni gas inquinanti (in particolare NO₂, O₃, SO₂) e definirne l'evoluzione nel tempo. A questo proposito si intende processare e confrontare i dati acquisiti da satellite con quelli acquisiti da stazioni di terra per produrre mappe di concentrazione su diverse finestre temporali (giornaliere, settimanali e mensili) da accoppiare a serie temporali a lungo termine che permettano di analizzare l'andamento della concentrazione dei parametri acquisiti su scala pluri-annuale. La comparazione dei dati ottenuti con quelli acquisiti dalle reti territoriali sarà fondamentale nel determinare l'efficacia, la robustezza e le potenzialità dell'utilizzo dei dati satellitari per il monitoraggio dell'inquinamento atmosferico ed i possibili contributi innovativi che questi ultimi possono apportare (Lorente *et al.*, 2020). Tale analisi risulta dunque essere il risultato basilare che si intende raggiungere mediante tale progetto.

Tra gli obiettivi raggiungibili nel corso del progetto, figura anche quello di valutare come le restrizioni ed i limiti agli spostamenti imposti a causa della recente pandemia di COVID-19 possano aver influito sulle concentrazioni di inquinanti in atmosfera. Infine, è prevista la possibilità di rendere accessibili e consultabili gran parte dei risultati di questo studio con la creazione di un sito web esplicativo del progetto e dedicato alla rappresentazione dei dati elaborati e dei risultati acquisiti (e.g. mappe di concentrazione e serie temporali aggiornate).

In questo lavoro vengono presentate le principali caratteristiche del sensore TROPOMI e le metodologie che si intendono applicare per una efficace analisi dei dati a disposizione. Inoltre, saranno esposti alcuni risultati preliminari (e.g. mappe) come premessa ai principali obiettivi che si intendono raggiungere con lo sviluppo del progetto.

2. METODOLOGIA E DATASET TROPOMI

Il TROPOMI è l'unico strumento montato a bordo del satellite Copernicus Sentinel-5 Precursor, lanciato in orbita il 13 ottobre 2017 dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA). Questo, rappresenta la prima delle missioni Sentinel dell'ESA espressamente dedicata allo studio dell'atmosfera e tra gli obiettivi rientrano tematiche ambientali come l'analisi dei fattori che veicolano il cambiamento climatico, la qualità dell'aria, la protezione del livello di Ozono e la radiazione UV superficiale (Veeffkind *et al.*, 2012). Questa missione prevede di fornire rilevazioni complete a lungo termine di gas presenti in traccia nell'atmosfera per i prossimi 7-10 anni ed è un "precursore" di future missioni del programma dedicate all'osservazione dell'atmosfera (ESA, <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/comissions/copernicus-sentinel-5>).

Il TROPOMI è costituito da una serie di sensori iperspettrali che acquisiscono dati nelle bande spettrali dell'ultravioletto (UV), del visibile (VIS), del vicino infrarosso (NIR) e dell'infrarosso ad onde corte (SWIR), con risoluzione spaziale nominale al suolo variabile a seconda delle

Tabella 1. Caratteristiche dei 7 sensori iperspettrali montati sul TROPOMI (Veefkind *et al.*, 2012, mod.; Eskes *et al.*, 2020).

Banda	UV		VIS		NIR		SWIR
	1	2	3	4	5	6	7
Intervallo spettrale (nm)	270-300	300-320	310-405	405-500	675-725	725-775	2305-2385
Risoluzione spettrale (nm)	1.0	0.5	0.55	0.55	0.5	0.5	0.25
Intervallo di campionamento spettrale (nm)	0.065	0.065	0.2	0.2	0.1	0.1	<0.1
Risoluzione spaziale (Km ²)	21x28	7x3.5	7x3.5	7x3.5	7x3.5	7x3.5 (1.8)	7x7

bande da 21 km x 28 km a 7 km x 3.5 km (5.5 km x 3.5 km dal 2019), con una banda (banda 6) nel NIR che può modificare la sua risoluzione (Tab.1; Veefkind *et al.*, 2012; Eskes *et al.*, 2020).

Queste caratteristiche, unite all'orbita di tipo polare che caratterizza il Sentinel-5P, permettono l'acquisizione quotidiana (tempo di rivisita di 1 giorno), su scala globale, di diversi parametri atmosferici incluse le concentrazioni dei seguenti gas in traccia: biossido di azoto (NO₂), monossido di carbonio (CO), metano (CH₄), biossido di zolfo (SO₂), ozono (O₃), formaldeide (HCHO) (ESA, Veefkind *et al.*, 2012).

Questo studio intende utilizzare i dati forniti dall'ESA, sotto forma di prodotti di "Livello 2". Tali prodotti risultano derivati dall'elaborazione di prodotti di "Livello 1b", composti da parametri quali: i) radianza della Terra e ii) irradianza solare, direttamente acquisiti nelle diverse bande spettrali che caratterizzano il sensore e geolocalizzati. Il risultato sono dei *file* costituiti da numerosi parametri associati a ciascuno dei pixels in cui viene suddivisa l'immagine in fase di acquisizione. I prodotti di "Livello 2" sono liberamente scaricabili (<https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home>) come file con formato *.nc* delle dimensioni di circa 300 MB l'uno.

I prodotti di Livello 2 sono molteplici e specifici per le specie chimiche (NO₂, CO, CH₄, SO₂ ed O₃) indagabili in relazione al campo spettrale del sensore. Oltre ai valori di concentrazione di queste, contengono indici specifici (es. indice di qualità) e numerose misure aggiuntive e di appoggio utili a valutare la qualità del dato dal punto di vista dell'acquisizione satellitare (es. angolo di vista) e delle condizioni atmosferiche (es. copertura nuvolosa).

Lo scopo primario del progetto è quello di creare delle mappe georeferenziate che rappresentino la distribuzione spaziale dei dati acquisiti. In particolare, delle tre tipologie di prodotti di secondo livello (*Near Real Time*, NRTI, *Offline*, OFFL e *Reprocessing*, RPRO) distribuiti dall'ESA e distinti per il *processing* a cui sono sottoposti prima della distribuzione, saranno utilizzati, in funzione della disponibilità, gli *Offline* (OFFL) fruibili con un ritardo di qualche giorno rispetto a quello di acquisizione, e i *Reprocessing* (RPRO), file i cui dati sono sottoposti a riprocessamento in funzione dell'aggiornamento degli algoritmi dedicati (TROPOMI, <http://www.tropomi.eu/data-products/level-2-products>).

Le immagini originali (OFFL e RPRO) relative, ad esempio, al prodotto NO₂ (misurato in mol/m²) acquisite

dal sensore si presentano come delle porzioni di superficie terrestre di ca. 3150 km x 14605.5 km; in Fig. 2 se ne riporta un ritaglio comprendente parte dell'Europa. Nell'immagine si riconoscono delle aree con concentrazione più elevata di biossido di azoto, anche nell'area della Pianura Padana.

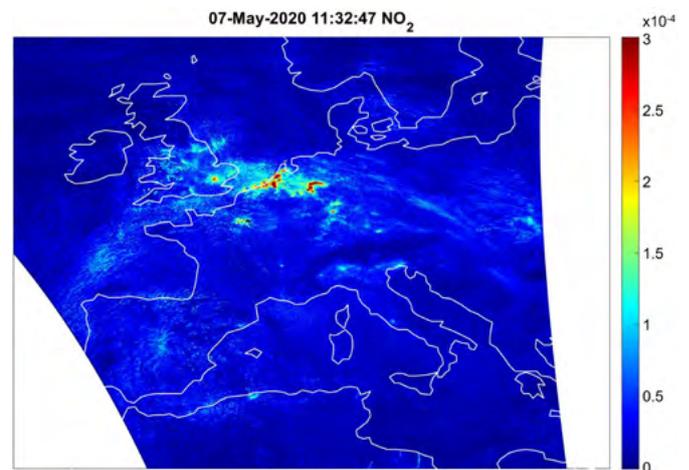


FIGURA 2. Porzione dell'immagine originale di Livello 2 specifico per la rilevazione e misura del biossido di azoto (mol/m²) acquisita dal TROPOMI il 7 maggio 2020 nell'area dell'Europa. Il dato di concentrazione relativo all'immagine può non essere rappresentativo in quanto influenzato da condizioni atmosferiche avverse (es. copertura nuvolosa, perturbazioni; cf. testo per dettagli).

3. MAPPE DI CONCENTRAZIONE E SERIE TEMPORALI

Il progetto nelle sue fasi preliminari prevede di scaricare i prodotti di Livello 2 relativi ai gas di interesse, e inizialmente ci si concentrerà sul biossido di azoto. Si intende dunque effettuare un ritaglio dell'area selezionata da analizzare (alla scala regionale e/o locale) ed un ricampionamento in una griglia UTM omogenea di 5 km x 5 km (Fig. 3) affiancato all'estrazione delle grandezze utili a perseguire le finalità del progetto. Analisi e considerazioni appropriate sui dati non potranno prescindere dal considerare i principali fattori in grado di influenzare i parametri oggetto di questo studio. Tra questi, i più rilevanti sono: i) la copertura nuvolosa, in grado di attenuare parzialmente o completamente, il segnale elettro-magnetico rilevato dal sensore e ii) l'angolo di vista, variabile in seguito all'orbita polare che, se elevato, porta ad una distorsione delle dimensioni dei pixels al suolo che introduce errori, solo parzialmente mitigati dalle configurazioni del sensore. La costruzione di una banca dati che escluda immagini acquisite in

condizioni geometriche ed atmosferiche sfavorevoli, sarà una condizione necessaria per qualsiasi tipo di valutazione sulla distribuzione e l'andamento dei parametri oggetto di studio. I parametri qualitativi citati nel paragrafo precedente, uniti ai fattori relativi alle condizioni geometriche e/o atmosferiche permetteranno di escludere i dati e le immagini i cui valori di qualità possano ritenersi compromessi, effettuando dunque una prima operazione di filtraggio sull'intero dataset a disposizione.

I dati filtrati costituiranno la base per la produzione di mappe giornaliere relative alla concentrazione delle diverse specie gassose di interesse. Primariamente, questi prodotti permetteranno di valutare una serie di parametri: i) la distribuzione areale dei singoli gas; ii) la presenza e l'estensione areale delle zone ad elevata concentrazione; iii) la persistenza di valori anomali su determinati settori del territorio. Lo stesso dataset sarà utilizzato inoltre per la realizzazione di serie temporali (*timeseries*) relative ai gas monitorati per

investigarne l'andamento nel tempo e le loro variazioni nel breve e lungo periodo. In particolare, la creazione e lo studio delle *timeseries* su alcuni settori chiave permetterà di: i) ricostruire le variazioni stagionali dei singoli gas in diversi settori del territorio; ii) valutare e definire i *trend* (stabilità, aumento, diminuzione) e gli eventuali pattern, nel corso di settimane, mesi ed in prospettiva nei prossimi anni; iii) valutare l'impatto sulle concentrazioni delle specie studiate di eventi atmosferici anche estremi (vento forte, fenomeni temporaleschi, incendi) o di progetti e opere volti alla conversione ecologica di siti produttivi.

In questo ambito, è stato osservato come lo studio di mappe e di serie temporali anche settimanali e mensili abbia fornito informazioni chiave per la valutazione dell'impatto che le misure adottate nel corso della pandemia di COVID-19 hanno avuto sulle concentrazioni dei gas in traccia. In particolare, i dati TROPOMI, validati con strumentazione di terreno, si sono rivelati molto validi e

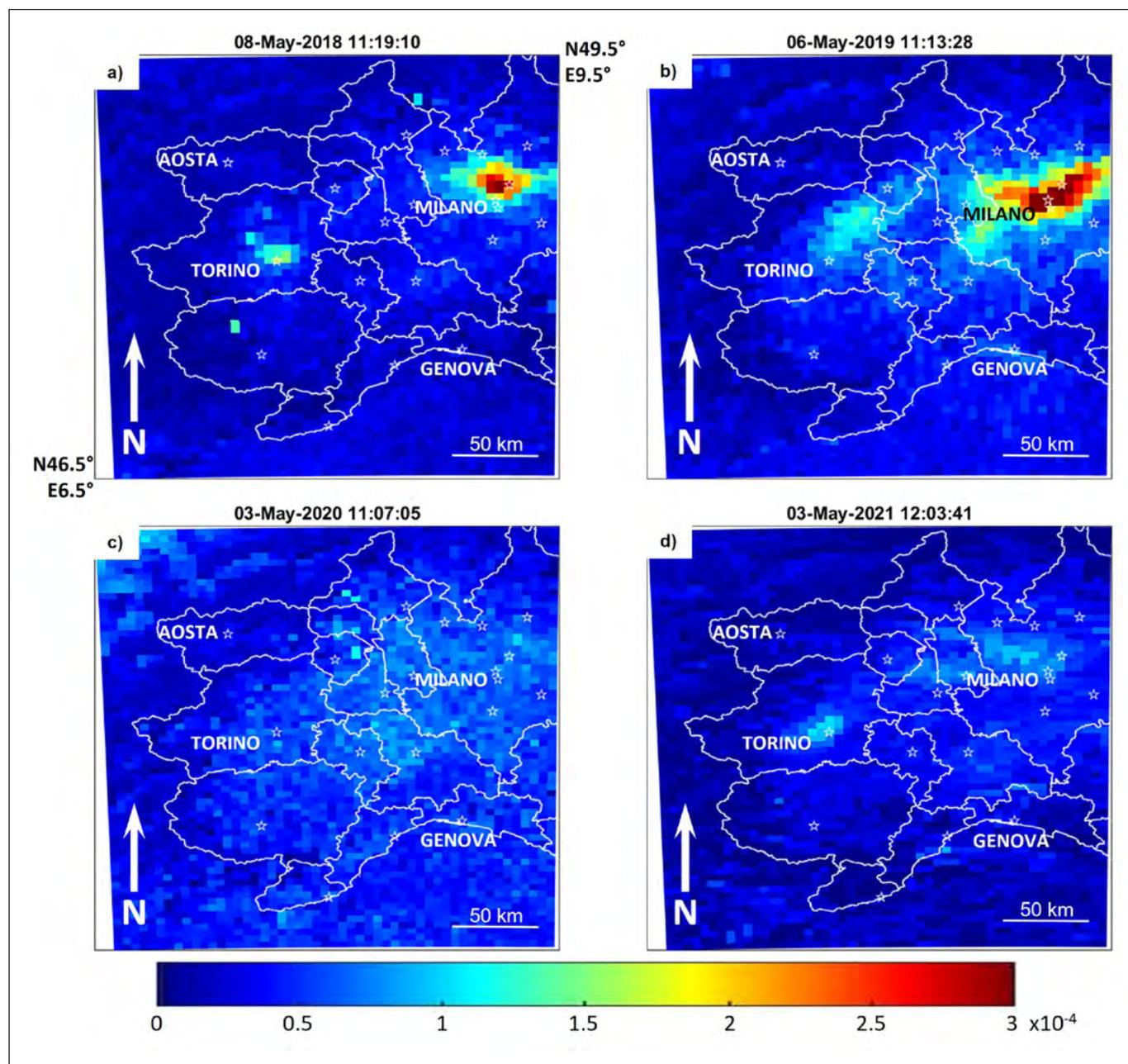


FIGURA 3. Mappe preliminari della porzione più occidentale della Pianura Padana, comprendenti Piemonte, Valle d'Aosta e parte di Liguria e Lombardia ed acquisite, rispettivamente, l'8/5/2018 (a), il 6/5/2019 (b), il 3/5/2020 (c) ed il 3/5/2021 (d).

attendibili per lo studio delle porzioni più basse della troposfera. (Cersosimo *et al.*, 2020; Ding *et al.*, 2020; Lorente *et al.*, 2020).

Su tali premesse, sono state elaborate alcune immagini relative al prodotto (di Livello 2) delle concentrazioni di biossido di azoto (misurata in mol/m²) acquisite dal TROPOMI dal 2018 al 2021 (Fig. 3), le cui mappe sono centrate su Piemonte, Liguria e Valle d'Aosta (inclusa la porzione occidentale della Lombardia). Le immagini raffigurate sono state scelte in quanto acquisite in condizioni geometriche ed atmosferiche favorevoli a circa un anno di distanza l'una dall'altra per i quattro anni investigati. Da queste immagini è evidente come le zone urbane maggiormente antropizzate (es. Torino e Milano) risultino come aree ad elevata concentrazione (ca 3x10⁻⁴ mol/m²), in chiara anomalia rispetto alle zone limitrofe (ca. 1x10⁻⁴ mol/m²). Inoltre, emerge come la concentrazione nel maggio 2020, risulti minore rispetto a quella degli altri anni presi in considerazione, in apparente coerenza con l'attuazione delle misure anti-contagio adottate fino a metà maggio dello stesso anno. Tale risultato preliminare necessita tuttavia di un miglioramento dei metodi di elaborazione e di un'analisi statistica accurata del dataset completo a nostra disposizione (dal 2018 al 2021) con un approccio che, una volta definito nelle sue diverse fasi, potrà essere applicato anche ad altre specie chimiche inquinanti e dannose per la salute (e.g. O₃, SO₂).

4. TOMAPS: SVILUPPI ED ASPETTATIVE

Con lo sviluppo di questo progetto si intende valutare il potenziale utilizzo dei dati satellitari (missione ESA Sentinel-5 Precursor) per lo studio della variabilità spazio-temporale di inquinanti atmosferici (in particolare biossido di azoto) che incidono sulla qualità dell'aria e sul clima delle Regioni Piemonte e Valle d'Aosta. La fase di confronto delle serie temporali ottenute con i dati delle stazioni di terreno, appositamente elaborati e corretti, risulterà essenziale e utile a mettere in luce le differenze e le analogie tra i due metodi di rilevamento della concentrazione dei gas. Con tale confronto si andranno a ricavare indici di correzione da applicare al dato satellitare per calibrarlo e renderlo quanto più confrontabile con le misure da terreno in modo da essere utilizzato in maniera complementare a queste ultime. Inoltre l'utilizzo di immagini satellitari che coprono ampie aree di territorio permetterà: i) di migliorare la stima delle tendenze a lungo termine nella troposfera relative alla qualità dell'aria e alle relazioni con gli elementi climatici su scala locale e regionale; ii) di implementare i processi della modellizzazione della qualità dell'aria tramite l'assimilazione dei dati a supporto dei servizi operativi, inclusi il monitoraggio e la previsione della qualità dell'aria.

Con la metodologia precedentemente descritta si intende sviluppare e consolidare un approccio locale e puntualizzato all'utilizzo dei dati satellitari a fini ambientali con lo scopo di creare dataset pluriannuali e, eventualmente, estenderlo mediante opportune analisi statistiche e l'utilizzo di dati provenienti da un più largo numero stazioni di acquisizione per una futura mappatura più a larga scala.

Come specificato nell'introduzione, il Sentinel-5P rappresenta un "precursore" di una missione a lungo termine che vedrà l'ESA protagonista dell'osservazione della Terra nei prossimi decenni. I futuri satelliti e sensori focalizzati al monitoraggio degli inquinanti atmosferici saranno oggetto di un rapido sviluppo tecnologico che permetterà verosimilmente di affinare le tecniche di misura sulle basse concentrazioni nonché di migliorare le risoluzioni spaziali e temporali dei dati acquisiti. In questo contesto il progetto TOMAPS si configura come un punto di partenza per lo sviluppo di un sistema di osservazione della qualità dell'aria dallo spazio sul nostro territorio che sia innovativo, affidabile e di lungo respiro.

RINGRAZIAMENTI

Il progetto TOMAPS è finanziato dalla Fondazione Cassa di Risparmio di Torino (Erogazioni Ordinarie 2020). Si ringraziano Francesco Matera (Regione Piemonte) e Simone Mangili (Città Metropolitana di Torino), per le discussioni preliminari sui contenuti del progetto e per il supporto fornito. Si ringrazia il Centro NatRisk per il sostegno e la promozione del progetto nelle fasi di ideazione e presentazione.

Si ringrazia il/la revisore per i commenti e le osservazioni che hanno contribuito a migliorare la qualità dell'articolo così come a renderne maggiormente fruibili i contenuti presentati.

BIBLIOGRAFIA

- BORSODORFF T., AAN DE BRUGH J., HU H., HASEKAMP O., SUSSMANN R., RETTINGER M., HASE F., GROSS J., SCHNEIDER M., GARCIA O., STREMMER W., GRUTTER M., FEIST D. G., ARNOLD S. G., DE MAZIÈRE M., KUMAR SHA M., POLLARD D. F., KIEL M., ROEHL C., WENBERG P. O., TOON G. C. AND LANDGRAF J. (2018), *Mapping carbon monoxide pollution from space down to city scales with daily global coverage*, Atmos. Meas. Tech., 11, 5507–5518, <https://doi.org/10.5194/amt-11-5507-2018>
- CERSOSIMO A., SERIO C., MASIELLO G. (2020), *TROPOMI NO₂ Tropospheric Column Data: Regridding to 1 km Grid-Resolution and Assessment of their Consistency with In Situ Surface Observations*, Remote Sensing 2020, 12, 2212; doi:10.3390/rs12142212
- DING J., VAN DER A R. J., ESKES H. J., MIJLING B., STAVRAKOU T., VAN GEFFEN J. H. G. M., VEEFKIND J. P. (2020), *NO_x Emissions Reduction and Rebound in China Due to the COVID-19 Crisis*, Geophysical Research Letters, 46, e2020GL089912. <https://doi.org/10.1029/2020GL089912>
- EEA (2020), *Air quality in Europe – 2020 report*, EEA Report, No09/2020, Publications Office of the European Union, Luxembourg, <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/36559.pdf>
- ESKES H., VAN GEFFEN J., BOERSMA F., EICHMANN K. U., APITULEY A., PERDEGNANA M., SNEEP M., VEEFKIND J. P., LOYOLA D. (2020), *Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Nitrogen-*

- dioxide*, Royal Netherlands Meteorological Institute, Ministry of Infrastructure and Water Management, issue 4.0.0, 2020-12-01, S5P-KNMI-L2-0021-MA
- GBD 2019 RISK FACTORS COLLABORATORS (2020), *Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019*, The Lancet, Volume 396, Issue 10258, 17–23 October 2020, Pages 1223-1249, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2)
- HEALTH EFFECTS INSTITUTE (2020), *State of Global Air 2020*, Data source: Global Burden of Disease Study 2019. IHME, 2020.
- MINUTOLO A., LAURENTI M., POGGIO A. (2021), *Mal'Aria di città 2021*, Legambiente, Gennaio 2021
- LORENTE A., BOERSMA K. F., ESKES H. J., VEEFKIND J. P., VAN GEFFEN J. H. G. M., DE ZEEUW M. B., DENIER VAN DER GON H. A. C., BEIRLE S., KROL M. C. (2020), *Quantification of nitrogen oxides emissions from build-up of pollution over Paris with TROPOMI*, Scientific Reports, (2019) 9:20033, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56428-5>
- PRÜSS-USTÜN A., WOLF J., CORVALÁN C., BOS R. AND NEIRA M. (2016), *Preventing disease through healthy environments. A global assessment of the burden of disease from environmental risks*, World Health Organization, Geneva 2016,
- REGIONE PIEMONTE (2018) *Piano Regionale di Qualità dell'Aria*, <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/ambiente/aria/piano-regionale-qualita-dellaria-prqa>
- REGIONE PIEMONTE (2019), *Piano Regionale di Qualità dell'Aria*, <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/ambiente/aria/piano-regionale-qualita-dellaria-prqa>
- ROY R., BRAATHEN N. (2017), *The Rising Cost of Ambient Air Pollution thus far in the 21st Century: Results from the BRIICS and the OECD Countries*, OECD Environment Working Papers, No. 124, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/d1b2b844-en>.
- SEINFELD J. H., PANDIS S. N. (2016), *Atmospheric Chemistry and Physics. From air Pollution to Climate Change. Third Edition*, Wiley, pp.1152
- VEEFKIND J.P., ABEN I., McMULLAN K., DE VRIES J., OTTER G., CLAAS J., ESKES H.J., DE HAAN J.F., KLEIPOOL Q., VAN WEELE M., HASEKAMP O., HOOGEVEEN R., LANDGRAF J., SNEL R., TOL P., INGMANN P., VOORS R., KRUIZINGA B., VINK R., VISSER H. AND LEVELT P.F. (2012), *TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications*, Remote Sensing of Environment 120 (2012) 70–83
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (2016), *Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease*, WHO Library Cataloguing-in-Publication Data.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (2018), *Ambient (Outdoor) Air Quality and Health*. [https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

SITOGRAFIA

- ESA Copernicus: Sentinel-5P (*Precursor - Atmospheric Monitoring Mission*): <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-5p>
- ESA, <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- ESA, <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-5>
- Istat (2021), *Database I.Stat*: <http://dati.istat.it/index.aspx?queryid=19670#>
- TROPOMI *Level 2 Product*, <http://www.tropomi.eu/data-products/level-2-products>

Considerazioni preliminari sul fondo naturale dei metalli nei suoli in Valle d'Aosta

Preliminary evaluations about the natural background values of metals in soils in the Aosta Valley (North-Western Italy)

PIETRO CAPODAGLIO¹, FULVIO SIMONETTO²

¹ ARPA Valle d'Aosta
E-mail: p.capodaglio@arpa.vda.it

² ARPA Valle d'Aosta
E-mail: f.simonetto@arpa.vda.it

Parole chiave: valori di fondo naturale, suoli, acque sotterranee
Key words: natural background values, soil, groundwater

Si illustrano alcune considerazioni preliminari sulle concentrazioni di fondo naturale dei metalli superiori ai limiti normativi, correlati alla loro origine geologica, che emergono dai dati chimici relativi ai suoli in possesso di ARPA VdA, evidenziandone le correlazioni con il chimismo delle acque sotterranee.

1. PREMESSA

Come noto la geologia della Valle d'Aosta è particolarmente complicata, rappresentando il settore alpino soggetto alle massime deformazioni orogenetiche. Tale complessità riguarda, oltre gli aspetti tettonici e strutturali, anche il chimismo delle rocce, il quale ovviamente a sua volta influenza quello dei suoli che da esse si originano. In Fig. 1 è illustrata una carta nella quale sono stati distinti, a titolo di estrema semplificazione, quattro gruppi litologici:

- rocce granitiche (in rosso), non o poco metamorfosate, di cui fanno parte il massiccio del M. Bianco (appartenente geologicamente al Sistema Elvetico) all'estremità occidentale del territorio, oltre ad altre unità geologiche meno estese;
- rocce metasedimentarie (in giallo), affioranti in Valdigne (ovvero nel settore occidentale della regione) e riconducibili geologicamente alle coperture del sistema del Gran San Bernardo. Esse includono la Zona permocarbonifera assiale - costituita da sequenze derivanti dal metamorfismo di antichi sedimenti fluviali e palustri, frequentemente inglobanti resti vegetali (lenti di antracite) – ed i calcescisti marmorei della zona delle Brece di Tarantasia;
- l'unità geologica della Zona Piemontese (in verde), di origine oceanica, affiorante estesamente nella media valle centrale, nella Valtourna e nella Val d'Ayas. Dal punto di vista litologico essa include calcescisti (derivanti dal metamorfismo di sedimenti marnosi) e rocce mafiche denominate nel loro complesso Pietre verdi (prasiniti, anfiboliti e serpentiniti derivanti da originarie rocce basiche ed ultrabasiche). Queste rocce

mafiche, come si vedrà di seguito, influenzano marcatamente il chimismo dei suoli;

- altre rocce metamorfiche (in rosa), che incorporano diverse unità strutturali: i massicci del M. Rosa e del Gran Paradiso (appartenenti geologicamente al Sistema Pennidico, con litologie prevalentemente gneissiche), la Valgrisenche (basamento del sistema del Gran San Bernardo, con prevalenti gneiss e micascisti), le valli di Gressoney e di Valpelline (Sistema Austroalpino, rispettivamente caratterizzate prevalentemente da micascisti eclogitici e granuliti).

Sono inoltre indicati i ghiacciai e, in celeste, i principali corpi alluvionali sul fondovalle che ospitano potenti acquiferi.

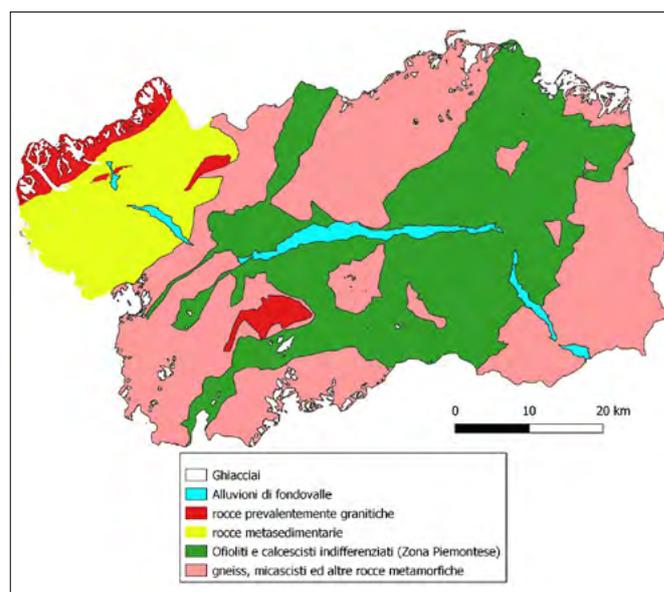


FIGURA 1. Carta geologica semplificata

La suddetta classificazione, sebbene di larga massima, può essere utilizzata come chiave di lettura per inquadrare le principali caratteristiche chimiche dei suoli e delle acque di seguito illustrati.

2. FONDO NATURALE DEI SUOLI

2.1 Dati disponibili

ARPA VdA gestisce una banca dati relativa ad analisi chimiche di suoli superficiali derivanti in massima parte dalle dichiarazioni trasmesse, a partire dal Gennaio 2018, da parti di privati nell'ambito del DPR 120/2017 sulle terre e rocce da scavo, alle quali si aggiungono informazioni derivanti da altri procedimenti (caratterizzazione di siti potenzialmente contaminati, indagini relative agli adempimenti normativi anteriori al suddetto DPR) o analisi effettuate da ARPA stessa per specifiche indagini.

I dati ai quali si fa qui riferimento sono aggiornati alle comunicazioni pervenute all'Ottobre 2020 e constano di circa 680 campioni di terreni. La Fig. 2 visualizza la loro distribuzione rispetto ai territori comunali: emerge che mentre l'asse del fondovalle principale risulta sufficientemente caratterizzato, altre aree montane e vallate laterali sono ancora prive di dati. A tale proposito è intenzione di ARPA di implementare prossimamente uno studio che preveda il campionamento anche su tali aree.

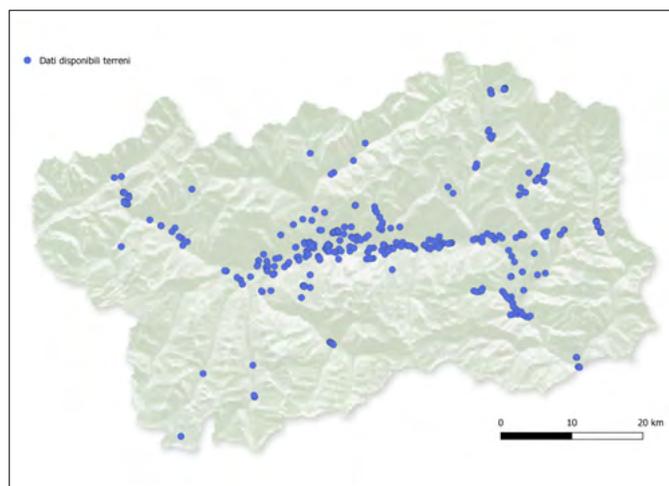


FIGURA 2. Punti di prelievo dei suoli sul territorio regionale

2.2 Superamenti dei limiti normativi

In Tabella 1 è illustrato il set analitico minimo previsto dal DPR 120/2017 ed il numero di superamenti dei limiti normativi (CSC: Concentrazione Soglia di Contaminazione) relativi alla normativa sui siti contaminati previsti dal citato DPR (D.Lgs.152/06 Titolo V parte quarta) riscontrati per ciascun metallo. Si evince che sono stati evidenziati casi di superamento delle CSC relativi solo ad alcuni tra i dieci metalli ricercati: Cromo, Cobalto e Nichel (perlopiù associati tra loro tre), e secondariamente Arsenico e Rame (i n. 3 superamenti di Zinco sono considerabili come outliers, statisticamente non significativi). Si tratta sicuramente di superamenti ascrivibili solo a fattori geologici naturali, considerati sia le litologie in cui si sono osservati, sia il fatto che i campionamenti riguardano generalmente contesti non o poco antropizzati. Di seguito si fanno alcune considerazioni riguardo a tali superamenti di origine naturale, visualizzando su carta i campioni che hanno presentato superamenti delle CSC ad uso residenziale.

2.2.1 Cromo, Cobalto e Nichel

Tali metalli presentano superamenti sovente tra loro associati – come chiaramente visualizzato dal confronto tra le tre carte di Fig. 3, 4 e 5, che presentano una distribuzione areale molto simile - e pressoché sistematici delle CSC normative (normalmente solo per l'uso residenziale). La loro abbondanza nelle litologie appartenenti alla Zona Piemontese (in verde in Fig. 1) - composta come detto da rocce mafiche - è ben nota e riconosciuta in letteratura; la loro concentrazione è di origine idrotermale, con processi di lisciviazione (dilavamento), trasporto e deposizione frazionata ad opera di fluidi alimentati da circuiti profondi all'interno della crosta oceanica. In accordo con l'areale di affioramento della Zona Piemontese, i superamenti risultano distribuiti su tutta la media valle centrale, la Valtournenche e la Val d'Ayas, mentre sono del tutto assenti nella parte occidentale della regione ove come detto predominano rocce granitiche e metasedimentarie.

Tabella 1. Set analitico (Tabella 4.1 – D.P.R. 120/2017) e numero di superamenti delle CSC ex D.Lgs.152/06 riscontrati per uso residenziale e per uso commerciale.

	CSC (mg/kg)		Nr. campioni con superamenti	
	Uso residenziale	Uso industriale	Uso residenziale	Uso industriale
Arsenico	20	50	26	4
Cadmio	2	15	0	0
Cobalto	20	250	67	0
Nichel	120	500	130	6
Piombo	100	1000	0	0
Rame	120	600	18	1
Zinco	150	1500	3	0
Mercurio	1	5	0	0
CromoVI	2	15	0	0
Cromo totale	150	800	94	0

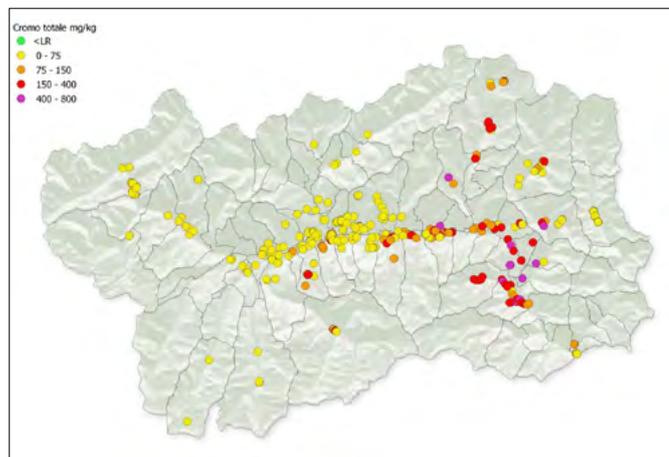


FIGURA 3. CROMO – carta delle concentrazioni rilevate nei terreni (CSC residenziale 150 ppb).

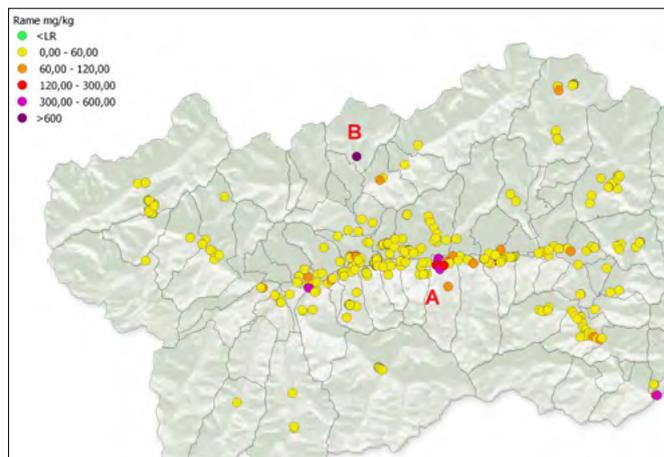


FIGURA 6. RAME – carta delle concentrazioni rilevate nei terreni (CSC residenziale 120 ppb).

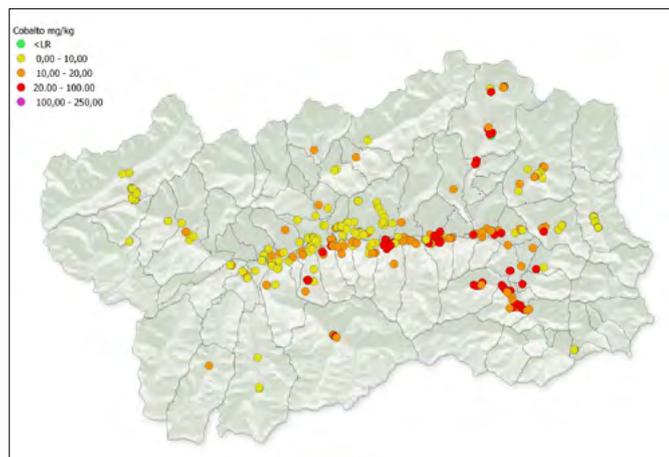


FIGURA 4. COBALTO - carta delle concentrazioni rilevate nei terreni (CSC residenziale 20 ppb).

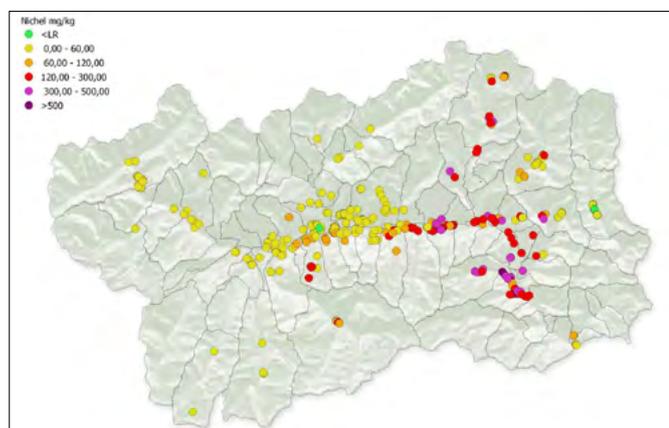


FIGURA 5. NICHEL – carta delle concentrazioni rilevate nei terreni (CSC residenziale 120 ppb).

2.2.2 Rame

Anche in questo caso i superamenti delle CSC sono sempre osservati nell'ambito geologico della Zona Piemontese, essendo il Rame concentrato soprattutto nelle rocce mafiche quali metagabbri e prasiniti. I superamenti riguardano tra l'altro anche due aree poste entrambe a valle di siti minerari per l'estrazione della calcopirite (solfuro di ferro e rame di origine idrotermale) di nota importanza storica, sfruttati sin dall'antichità, ubicati nel vallone di Saint Marcel (versante nord della media valle, A in Fig. 6) e nel comune di Ollomont (in Valpelline, B in Fig.6).

Va detto che, solo nel caso del Rame, si osserva la presenza di alcuni superamenti del parametro rame riconducibili non a fattori geologici naturali bensì a pratiche agricole.

2.2.3 Arsenico

I superamenti dei suoli appaiono concentrati nel comune di Saint Christophe (A in Fig. 7), in una zona a prevalenti ortogneiss e parascisti appartenenti al Dominio Austroalpino, e in Valdigne (B in Fig. 7), in corrispondenza della Zona permocarbonifera assiale. Si registra un superamento dell'Arsenico anche nell'ambito degli gneiss della Falda del Gran Paradiso (C). A tutte le suddette litologie si associano importanti mineralizzazioni a solfuri, tra cui anche pirite ed arsenopirite, notoriamente ricche di arsenico.

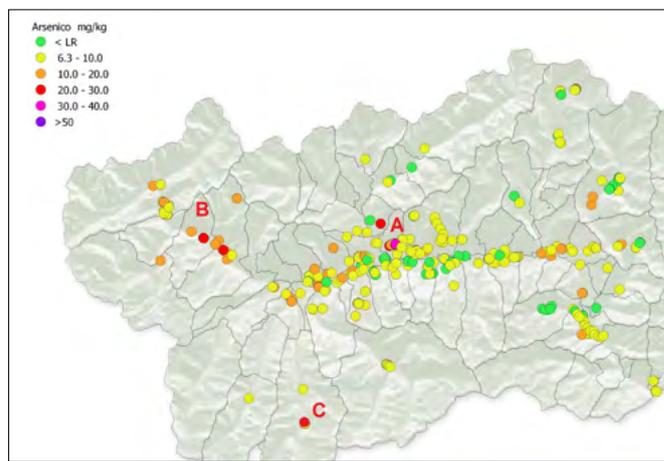


FIGURA 7. ARSENICO – carta delle concentrazioni rilevate nei terreni (CSC residenziale 20 ppb).

3. CORRELAZIONI CON IL CHIMISMO DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Per le acque sotterranee si dispone, a differenza dei suoli, di dati storici continui pluriennali derivanti dal monitoraggio sui corpi idrici sotterranei ospitati nei sedimenti alluvionali del fondovalle principale, monitorati da ARPA ai fini della definizione della qualità ambientale ai sensi del D.Lgs.30/09 e della Direttiva Europea 2000/60.

I limiti normativi per le acque potabili per i metalli coincidono nella totalità dei casi con le CSC per la falda previste dal D.Lgs.152/06 (Tab.2).

Tabella 2. Metalli ricercati sulle acque sotterranee, e relativi limiti normativi.

	Limiti normativi (ppb)
Arsenico	10
Cadmio	5
Nichel	20
Piombo	10
Rame	1000
Cromo tot	50
Ferro	200
Manganese	50
Vanadio	
Zinco	3000

Si evince che i cinque metalli che come visto al par. 2 hanno evidenziato un valore di fondo superiore ai limiti normativi per i suoli (Arsenico, Rame, Nichel, Cromo e Cobalto) sono ricercati anche nelle acque, con l'eccezione del Cobalto.

La rete di monitoraggio è costituita attualmente da un totale di n. 52 piezometri, distribuiti su n. 6 corpi idrici sotterranei monitorati e campionati con frequenza da annuale a trimestrale (Fig. 8).

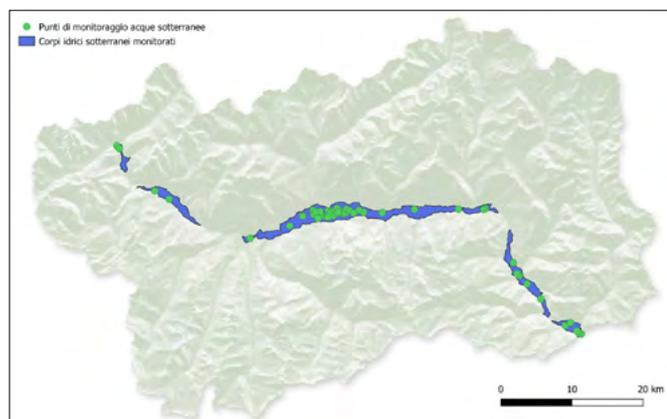


FIGURA 8. Monitoraggio delle acque sotterranee.

Si dispone di dati relativi ai metalli indicati in tab. 2 a partire dal 2003 sino ad oggi, per un totale di circa 3000 analisi eseguite.

Stante la grande diffusione sul territorio delle litologie affini alle Pietre verdi, queste si ritrovano ampiamente presenti anche in tutto il materasso alluvionale del fondovalle principale (salvo nel settore più occidentale della regione). Tuttavia, dall'esame dei dati pluriennali di monitoraggio emerge che i valori del fondo naturale dei suddetti metalli, contrariamente a quanto sopra illustrato sopra relativamente ai suoli, risultano inferiori ai limiti normativi; ciò in quanto le acque sotterranee ospitate nel materasso alluvionale del fondovalle (mediamente potente anche più di 200 metri) sono soggette a forti fenomeni di diluizione, soprattutto a seguito della fusione estiva del manto nevoso. Inoltre l'elevata permeabilità dei sedimenti ghiaioso-sabbiosi favorisce l'ossigenazione delle acque, prevenendo la

solubilizzazione dei metalli: è infatti noto come condizioni tendenzialmente anossiche delle acque sotterranee favoriscano la solubilizzazione di alcuni metalli (ad esempio Ferro, Manganese, Nichel, Arsenico ed Alluminio). Solo localmente questi ultimi possono presentare superamenti del limite normativo in corrispondenza di settori più stretti del fondovalle, meno soggetti alla diluizione e in cui è possibile un'influenza più diretta da parte delle acque ruscellanti dai versanti, e caratterizzati inoltre da una minore permeabilità dei sedimenti. Tali condizioni sono presenti ad esempio all'estremità orientale del corpo idrico sotterraneo della piana di Aosta, dove appunto si rilevano concentrazioni di origine naturale relativamente elevate, spesso superiori ai limiti normativi, per Nichel e Arsenico (oltre che per Ferro e Manganese, non ricercati nei suoli). A tale proposito va inoltre segnalato che in due casi di procedimenti per siti contaminati sul territorio regionale è emersa una contaminazione secondaria in falda da metalli - nello specifico Arsenico in un caso, Ferro e Manganese nell'altro - causata da elevate concentrazioni naturali nei suoli di tali metalli concomitanti a un inquinamento antropico da Idrocarburi, tale da indurre nella falda condizioni riducenti.

4. CONCLUSIONI

Sono stati esaminati i risultati analitici al momento disponibili per i suoli superficiali sul territorio regionale valdostano. Premesso che si tratta di dati ancora parziali, che necessitano di indagini integrative sulle aree del territorio regionale ad ora prive di informazioni, si evidenziano superamenti - per cause geologiche naturali - dei limiti normativi (relativi alla normativa per i siti contaminati) per i seguenti metalli:

- Cromo, Cobalto e Nichel, sempre associati tra loro
- Rame
- Arsenico

I casi a) e b) ricadono tutti nell'ambito geologico delle Pietre verdi della Zona Piemontese, mentre i valori elevati di Arsenico sono associati anche a gneiss e metasedimenti, in cui possono essere frequenti mineralizzazioni a solfuri con presenza di pirite e arsenopirite.

Le acque sotterranee degli acquiferi di fondovalle, soggette generalmente a marcata diluizione ed ospitate in sedimenti ad alta permeabilità, non presentano invece concentrazioni in metalli elevate, salvo localmente laddove tali condizioni naturali non si verificano oppure, come contaminazione secondaria, in presenza di inquinamento da idrocarburi tale da indurre condizioni anossiche nella falda.

BIBLIOGRAFIA

- CASATI M., *Analisi dei metalli nel suolo della piana di Aosta per la determinazione dei valori di fondo* - Tesi inedita, Università degli studi di Milano-Bicocca - A.A. 2015-16.
- FRIGERIO M., *Determinazione dei valori di fondo naturale di specie chimiche potenzialmente contaminanti delle acque sotterranee nel fondovalle valdostano* - Tesi inedita, Università degli studi di Milano-Bicocca - A.A. 2012-13.
- ISPRA, Manuali e Linee Guida 174/2018: *Linee guida per la determinazione dei valori di fondo per i suoli e per le acque sotterranee.*

Analisi degli elementi di pericolosità nel bacino idrografico del Rio Maggiore di Castiglione Torinese (TO)

Hazard elements analysis in the catchment of Rio Maggiore di Castiglione Torinese (TO)

NICOLÒ CAPURSO¹, MAURO BONASERA², GIANDOMENICO FUBELLI¹

¹ Dipartimento di Scienze della Terra – Università degli Studi di Torino

² Servizio Geologico d'Italia - ISPRA

E-mail: mauro.bonasera@isprambiente.it

Parole chiave: Pericolosità geo-idrologica, frane, tempo di corrivazione, massima portata di deflusso, Collina di Torino

Key words: Geo-hydrological hazard, landslides, time of concentration, outflow rate, Turin Hill

INTRODUZIONE

Il bacino del Rio Maggiore è situato in Piemonte e si estende tra i comuni di Castiglione Torinese, ad est, e Gassino Torinese, ad ovest. Il suo territorio è caratterizzato da rilievi collinari; una serie di pendii e dorsali caratterizzano, pertanto, la geomorfologia dell'area. La loro continuità laterale è interrotta da fasce di fondovalle più o meno ampie, percorse da corsi d'acqua a differente orientazione e portata (Fig. 1).

Il collettore di drenaggio principale del bacino è il Rio Maggiore, corso d'acqua che dopo aver "raccolto" le acque del Rio Cordova e del Rio Crivella, drena verso Nord per

confluire in destra orografica del Fiume Po ad una quota di circa 190 m s.l.m. La quota più alta del suo spartiacque è 593 m s.l.m. nei pressi di Tetti Pietra Forata, frazione di Baldissero Torinese. Il Rio Maggiore, come la totalità dei corsi d'acqua che drenano le valli della Collina di Torino, presenta un regime torrentizio, caratterizzato da una notevole variabilità dei deflussi, con portate ridotte alternate a piene violente.

Il bacino idrografico, a cui fa capo tale corso d'acqua, fino agli anni '80 presentava un uso del suolo e un'antropizzazione diversa dall'attuale, un'economia locale basata principalmente su agricoltura e allevamento ma, soprattutto, un diverso grado di sviluppo edilizio e viario. Già all'epoca, seppur in maniera empirica, erano note le fragilità e le problematiche geo-idrologiche che caratterizzano tuttora questo territorio, il quale si presenta apparentemente statico ed immutabile ma che viceversa risulta essere frutto di processi in continua evoluzione. L'espansione urbanistica, la riduzione della sezione di deflusso dei corsi d'acqua, accompagnata dall'abbandono agricolo e delle aree boschive, ha contribuito a modificare gli equilibri idrologici e a peggiorare le condizioni di stabilità dei versanti, già non sempre ottimali.



FIGURA 1. Bacino imbrifero del Rio Maggiore di Gassino e sua ubicazione all'interno del territorio regionale (mod. da Google Earth).

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il bacino idrografico rientra nel settore settentrionale del dominio tettono-stratigrafico del Bacino Terziario Piemontese, noto come Collina di Torino (Fig. 2). La successione eocenico superiore-miocenica della Collina, costituita da rocce sedimentarie prevalentemente terrigeno-carbonatiche, relativamente poco deformate, poggia in discordanza su unità intensamente tettonizzate di pertinenza appenninica (unità ofiolitiche non metamorfiche – Unità Liguri interne).

Si tratta quindi di una successione marina che a partire dal Pliocene è stata sollevata e progressivamente esumata provocando una progressiva crescita delle quote del rilievo collinare, accompagnata da sempre più estesi fenomeni erosivi nelle aree coinvolte dal sollevamento. L'erosione e gli sporadici fenomeni di sedimentazione fluviale associati sono da ricollegare ad un reticolo idrografico diverso da quello attuale ed in continua evoluzione.

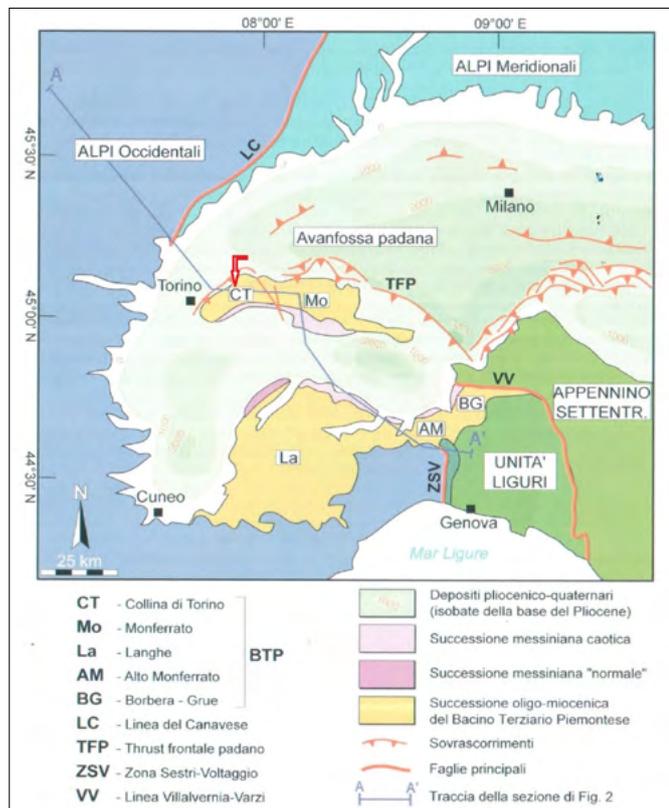


FIGURA 2. Schema strutturale da Foglio 156 CARG (Festa *et al.*, 2009). La freccia rossa indica la posizione del bacino idrografico nel settore della Collina di Torino.

Durante il Pleistocene medio-superiore il proseguire dell'esumazione determina un progressivo ampliamento dei rilievi collinari accompagnato da sempre più estesi fenomeni erosivi nelle aree coinvolte dal sollevamento (Festa *et al.*, 2009).

ANALISI GEOMORFOLOGICA

L'analisi degli elementi geomorfologici insistenti nel bacino del Rio Maggiore ha portato all'individuazione e alla determinazione di specifiche dinamiche di pericolosità che coinvolgono quasi il 95% del territorio indagato. L'aspetto del territorio collinare e la sua stabilità geomorfologica sono in stretto rapporto con i caratteri litologici-strutturali e con le condizioni climatiche. Per questa porzione di territorio collinare i fattori che maggiormente influenzano la franosità sono rappresentati dalla presenza di depositi di copertura eluvio-colluviale (distribuiti in maniera ubiquitaria su quasi tutta l'area collinare), l'acclività dei versanti, le precipitazioni piovose e l'uso del suolo. In assoluto, il fattore che più influenza l'innescò di fenomeni gravitativi è la presenza di spessori variabili di depositi eluvio-colluviali, di età quaternaria, a tessitura sabbioso-limoso dotati di una maggior capacità di ritenzione idrica rispetto al substrato e di bassi valori di resistenza al taglio.

Si tratta di fenomeni di colamento che caratterizzano generalmente aree ad acclività medio-bassa, e possono essere definite "rapid earth flow", caratterizzati nell'area di corona da scorrimenti roto-traslativi che evolvono in una colata con una cinematica estremamente rapida (Fig. 3). Queste frane sono caratterizzate da un breve stato di inattività residua connessa a possibili riattivazioni dell'intero

corpo di frana o, più frequentemente, di parti di questa, in funzione delle variazioni dei parametri fisico-climatici che ne controllano l'evoluzione. Di norma sono processi di ridotte dimensioni con poca o nulla incidenza sulle forme del rilievo che si innescano durante eventi di pioggia di forte intensità, per saturazione e successiva fluidificazione dei materiali sciolti costituenti la coltre di copertura. Oltre alle caratteristiche litologiche e geotecniche della coltre eluvio-colluviale e alla presenza di livelli a differente permeabili-



FIGURA 3. Frane per colamento rapido in terra: a) Nicchia di distacco e accumulo di frana vicino a Tetti Francesi; b) Nicchia di distacco lungo il versante della valle del Rio Crivella; c) Accumulo di frana a Rivodora.



FIGURA 4. Scorrimento rotazionale avvenuto al km 2 della SP177, località Tetti Francesi, in data 24/11/2019: a) Scarpata principale e terrazzo di frana; b) Fenomeni di creep nel corpo di accumulo.

tà relativa all'interno della coltre, le cause predisponenti sono riconducibili a fattori morfologici quali l'acclività dei versanti (25°-35° gradi), condizionata dalla giacitura del substrato, e la presenza di ondulazioni della superficie topografica, in grado di causare ristagni d'acqua. Le cause scatenanti, come nella maggior parte dei casi, vanno generalmente individuate negli eventi meteorici di lunga durata ed intensità, in grado saturare i terreni, aumentare la forza peso di essi e ridurre le qualità geotecniche.

Oltre a tali fenomeni si osservano frane per scorrimento rotazionale e crollo che si concentrano in corrispondenza

di alternanze marnoso-arenacee e/o dove i litotipi sono più fratturati.

Gli scorrimenti presentano un cinematiso rotazionale classico nella zona di corona. Nel corpo di frana si manifestano depressioni, gibbosità, fenditure e presenza di terreni umidi per saturazione, rappresentanti l'espressione superficiale delle deformazioni connesse al movimento di massa. La zona d'accumulo talvolta può evolvere in colamenti in funzione della quantità d'acqua presente e delle caratteristiche mineralogiche della massa scivolante (Fig. 4). La litologia del substrato e le sue caratteristiche geotecniche rappresentano i principali fattori predisponenti. Si è notato che la maggior parte degli scorrimenti rotazionali si è sviluppato in corrispondenza di settori caratterizzati dal substrato eo-miocenico marnoso (es., Marne di Monte Piano, Formazione di Baldissero) o marnoso-arenaceo (es., Formazione di Cardona, Formazione di Antognola). Talvolta, coinvolgono porzioni di versanti coincidenti con presenza di faglie o zone intensamente fratturate, confermando la già nota connessione tra caratteristiche strutturali del substrato e propensione al dissesto, data la notevole riduzione della qualità dell'ammasso roccioso ed il considerevole aumento dell'infiltrazione efficace (Fig. 5). L'imbibizione dei terreni è determinata dalla precipitazione cumulata, ovvero la quantità di pioggia settimanale o mensile progressivamente infiltratasi nel sottosuolo. In ogni caso per l'area di indagine, il fattore scatenante è da ricercare nell'evento piovoso intenso, ma di breve durata, che porta l'ammasso roccioso alla saturazione e alla conseguente perdita di resistenza al taglio.

I crolli sono invece fenomeni estremamente localizzati che, nella maggior parte dei casi, coinvolgono i litotipi conglomeratici ed arenacei cementati e fratturati della Formazione di Cardona. Si generano perlopiù senza indizi premonitori e sono caratterizzati da distacchi da pareti subverticali o comunque da pendii ad elevata inclinazione di volumi rocciosi, successivamente depositati al piede dei versanti (Fig. 6). Le condizioni di innesco sono direttamente connesse al grado di fratturazione della roccia ed alla disposizione geometrica e l'intersezione delle principali discontinuità che insistono all'interno dell'ammasso roccio-



FIGURA 5. Frane per scorrimento rotazionale in Valle Massa: a) Scarpata principale in litotipo marnoso-arenaceo; b) Settore di corona riprofilato dal dilavamento superficiale.

so. Le principali cause di innesco delle frane da crollo sono riconducibili all'azione erosiva delle acque ruscellamento superficiale e di infiltrazione, soprattutto per tratti di versante privi di vegetazione: le acque defluiscono lungo le scarpate erodendo ed asportando la frazione fine, isolando porzioni di materiale in precarie condizioni di equilibrio a causa dello stato di fratturazione e alterazione dell'ammasso roccioso. In occasione di precipitazioni intense l'aumento delle pressioni interstiziali nelle fratture diminuisce la resistenza del materiale, aumentando gli sforzi di taglio e la propensione al dissesto.



FIGURA 6. Frana da crollo localizzata lungo un versante ripido in località San Rocco sulla strada per Castiglione Alto.

ANALISI PLUVIOMETRICA

Ai fini della determinazione delle principali caratteristiche meteo-climatiche del bacino, si è fatto riferimento ai dati storici relativi agli archivi del comune di Gassino Torinese, riferiti al periodo di osservazione compreso tra il 1926 ed il 1970. Dalle carte climatiche da essi ricavate, si rileva che la zona in oggetto è compresa all'interno dell'isoterma 13°C, con un massimo nel periodo estivo di 24°C relativo al mese di luglio ed un minimo invernale di 1°C relativo al mese di gennaio. Secondo la classificazione di Koppen (1936), l'area presenta un clima di tipo temperato sub-continentale (*Cfa*).

Il regime pluviometrico si può pertanto ricondurre ad un tipo continentale-prealpino, caratterizzato da due massimi, uno principale corrispondente al periodo primaverile (107,9 mm) e un secondo corrispondente al periodo autunnale (84,5 mm), e da un minimo principale corrispondente al periodo invernale (32,9 mm); per un totale annuo delle precipitazioni pari a 810,5 millimetri.

In riferimento alle precipitazioni intense di breve durata, è possibile fare riferimento ai dati delle precipitazioni di massima intensità e durata 1, 3, 6, 12 e 24 ore, relativi alla Stazione meteorologica dell'Osservatorio di Pino Torinese per l'intervallo temporale compreso tra il 1938 ed il 2017, con una lacuna dal 1982 al 1990. Per questa serie di dati è stata eseguita un'opportuna regolazione di tipo statistico mediante il metodo di Gumbel (1941), per cui l'entità di

un certo evento estremo (nel nostro caso altezza di pioggia h) è legato alla probabilità (P) che tale evento non venga eguagliato o superato tramite la seguente relazione:

$$P(h) = e^{-e^{-\alpha(h-u)}}$$

$$Tr = \frac{1}{(1-P)}$$

dove:

e = numero di Nepero (base dei logaritmi naturali);

α = intensità di funzione;

u = estremo atteso.

I due parametri statistici α e u sono legati alla media e allo scarto della popolazione della variabile h .

Lo scopo di tale analisi è quello di ricavare le curve segnalatrici di probabilità pluviometrica a differenti tempi di ritorno (Tr), e successivamente confrontarle con quelle ottenute dai dati forniti dall'Autorità di Bacino del Fiume Po (AIPO) al fine di poter considerare lo scenario di maggior pericolosità, cautelativo ma razionale (Fig. 7 e 8).

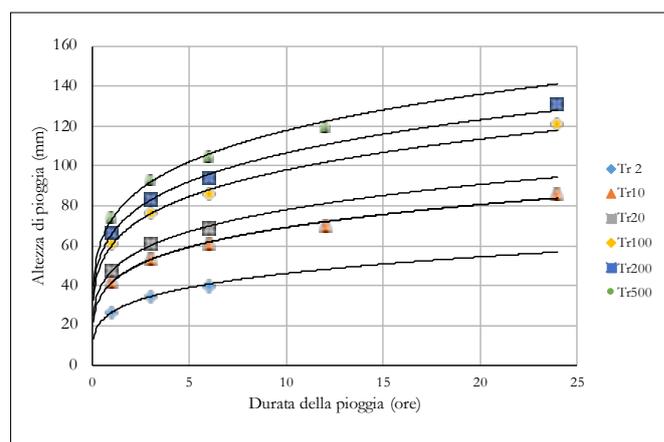


FIGURA 7. Tabella riassuntiva delle altezze di pioggia secondo Gumbel (1941) e curve di probabilità pluviometrica per eventi di durata 1, 3, 6, 12, 24 ore e tempo di ritorno di 2, 10, 20, 100, 200 e 500 anni. Dati Stazione Meteorologica dell'Osservatorio di Pino Torinese.

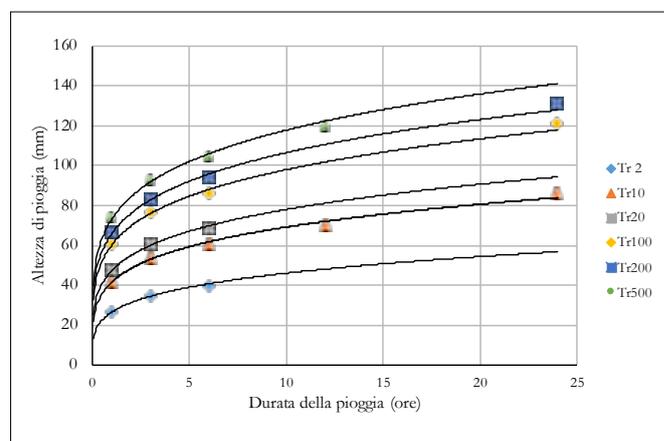


FIGURA 8. Tabella riassuntiva delle altezze di pioggia secondo Gumbel (1941) e curve di probabilità pluviometrica per eventi di durata 1, 3, 6, 12, 24 ore e tempo di ritorno di 2, 10, 20, 100, 200 e 500 anni. Dati Autorità di Bacino del Fiume Po (AIPO).

Nel caso dell'area di studio, il confronto tra le equazioni ricavate dalle due fonti non è risultato correlabile, in quanto i dati di ciascuna fonte sono rappresentativi di due aree geografiche vicine ma con diverse caratteristiche morfologiche e di conseguenza il regime pluviometrico subirà delle ovvie variazioni.

ANALISI IDROLOGICA

L'analisi idrologica finalizzata alla definizione delle portate al colmo di piena del Rio Maggiore di Castiglione Torinese si avvale di diversi aspetti. Definita la sezione di riferimento, o di chiusura, sottesa al bacino idrografico preso in esame, che in questo caso è rappresentata dal sottopasso del Rio Maggiore al di sotto del Canale Cimena dell'E-NEL, sono state definite le caratteristiche morfometriche del bacino imbrifero. Una volta noti i parametri a ed n delle curve di probabilità pluviometrica ricavati dall'AIPO, e le caratteristiche morfometriche del bacino (Tab. 1), si è proceduto alla stima del tempo di corrivazione mediante l'utilizzo di differenti formule note in bibliografia.

Viste le discrepanze tra i valori calcolati (Tab. 2), la definizione del valore del tempo di corrivazione si è basata sull'analisi dei campi di applicabilità di ciascuna delle relazioni utilizzate.

Il tempo di corrivazione può essere definito attraverso vari metodi: per bacini di dimensioni superiori a 100 km² (Giandotti, 1934); per bacini montani di dimensioni inferiori a 20 km² (Pezzoli, 1970); per bacini di pochi km² (Chow, 1964; Kirpich, 1940); per bacini di dimensioni medie anche fino a 40 km² (Ventura, 1905; Pasini, 1910). Date le dimensioni e le caratteristiche del bacino in esame si

è ritenuto di utilizzare la media dei valori calcolati con le relazioni di Ventura, (1905), Pasini, (1910) e Pezzoli (1970), escludendo i valori calcolati con la relazione di Giandotti (1934), Chow (1964) e Kirpich (1940). Il valore del tempo di corrivazione (t_c) così ottenuto è pari a 1,73, corrispondente a circa 1 ora e 40 minuti.

Per il calcolo delle portate al colmo di piena di assegnato tempo di ritorno (Tr), si è proceduto operando la trasformazione afflussi-deflussi mediante l'applicazione del Metodo cinematico (Tab. 3):

$$Q(Tr) = k C i(Tr) A$$

in cui:

- Q indica la portata al colmo di piena di tempo di ritorno Tr (m³/s);
- k indica il fattore che tiene conto della non uniformità delle unità di misura (0,278);
- C indica il coefficiente adimensionale che tiene conto della riduzione della portata meteorica per effetto dell'infiltrazione;
- h indica l'altezza di pioggia secondo le curve di Gumbel (1941) alla durata di precipitazione t ;
- i indica l'intensità della pioggia critica, rapporto tra altezza di pioggia (h) e t_c (mm/ora);
- A indica l'area del bacino (km²).

Il valore del coefficiente di deflusso C utilizzato è il risultato di una media pesata tra i coefficienti di deflusso (Ferro, 2002) delle aree occupate da boschi (56%), terreni agricoli (31%) ed aree urbanizzate. Proiettando su un grafico, le

Tabella 1. Grandezze morfometriche caratteristiche del bacino: superficie (S); lunghezza dell'asta principale (L); altitudine massima (H max); altitudine della sezione di chiusura (H sez); altitudine media (H med); pendenza dell'asta principale (i).

S (km ²)	L asta (km)	H max (m s.l.m)	H sez (m s.l.m)	H med (m s.l.m)	i (m/m)
10,64	6,793	593,30	196,00	394,70	0,06

Tabella 2. Tempi di corrivazione calcolati con l'utilizzo di differenti relazioni.

	Giandotti	Pasini	Pezzoli	Ventura	Chow	Kirpich
t_c (ore)	2,1	1,88	1,56	1,74	0,82	0,87

Tabella 3. Valori di portata al colmo di piena in funzione del tempo di ritorno (Tr).

	Tr500	Tr200	Tr100	Tr20
	$h = 71,13t^{0,260}$	$h = 63,92t^{0,263}$	$h = 58,40t^{0,265}$	$h = 45,64t^{0,273}$
t_c (ore)	1,73			
$h(t_c)$ (mm)	82,025	73,913	67,530	53,007
i (mm/ora)	47,141	42,479	38,810	30,464
k	0,278			
C	0,6			
A (km ²)	10,6			
	Q500	Q200	Q100	Q20
Q (m ³ /s)	83,66	75,39	68,88	54,07

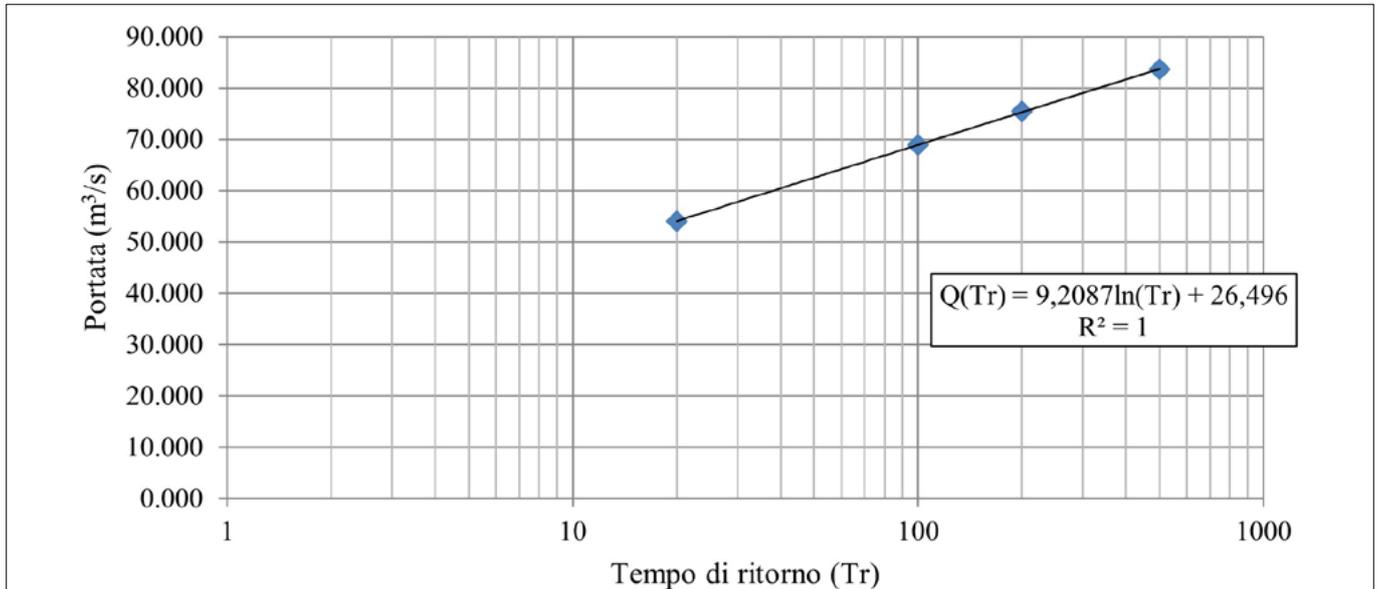


FIGURA 9. Relazione tra portata di piena e tempo di ritorno per l'area di studio.

portate di colmo ed il tempo di ritorno (Fig. 9) è possibile ricavare l'equazione che definisce la relazione, in questo caso logaritmica, tra questi due parametri. Ciò permette di stimare quindi la portata al colmo di piena riferita a qualsiasi tempo di ritorno.

Per completare l'analisi idrologica, si è effettuata una verifica idraulica in corrispondenza della sezione di chiusura (o di riferimento), ubicata in corrispondenza del sottopasso del Rio Maggiore al di sotto del Canale Cimena dell'Enel (Fig. 10).

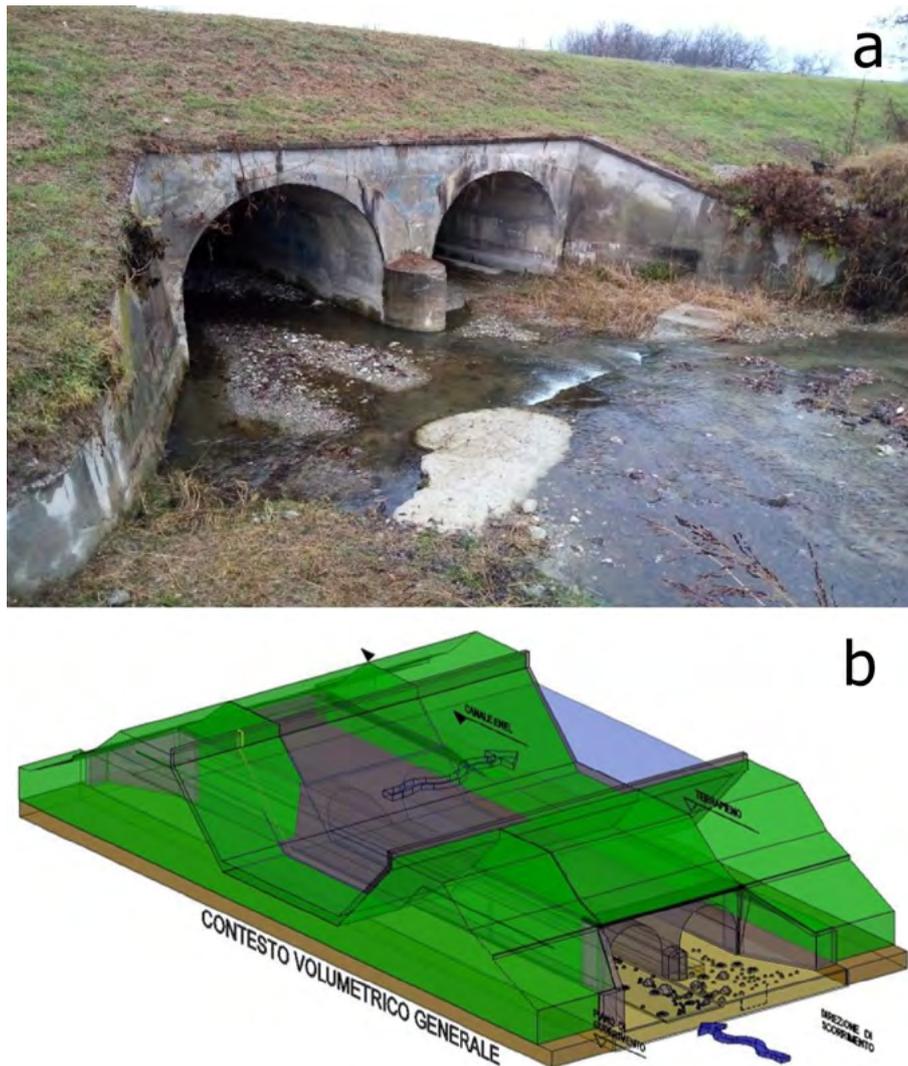


FIGURA 10. a) Attraversamento del Rio Maggiore al di sotto del Canale Cimena visto da monte; b) Contesto volumetrico generale dell'attraversamento.

Si è quindi calcolata la portata massima ammissibile con l'obiettivo di verificarne l'efficienza e l'eventuale livello di pericolosità. Tale manufatto è caratterizzato da due luci di passaggio dell'acqua corrente del Rio Maggiore, le quali presentano delle eterogeneità lungo la loro lunghezza. L'area che consentirebbe lo smaltimento delle acque del Rio Maggiore al di sotto del Canale Cimena si riduce in presenza dello stesso; l'incavo presente nell'attraversamento è occupato dalla struttura del Canale, la quale comporta una notevole riduzione della portata massima di esercizio. In relazione a ciò, si è preso come riferimento lo spessore del battente d'acqua fino alla quota di riferimento rappresentata della base della struttura in cemento che costituisce l'alveo di scorrimento del Canale Cimena. Immediatamente a monte dell'attraversamento, lungo la sponda sinistra del Rio Maggiore, è presente un canale sfioratore, il quale interrompendo la continuità dell'argine artificiale sinistro del Rio Maggiore, consente il defluire delle portate di piena verso aree di pianura situate a E-SE.

Definite le caratteristiche dell'opera, se di un corso d'acqua si conoscono caratteristiche geometriche, sezione trasversale, pendenza del fondo i , la velocità V , è quindi possibile ricavare la portata applicando la formula di Chézy a moto uniforme nei canali a superficie libera (Tab. 4 e 5).

$$v = \chi \sqrt{R i}$$

in cui:

- v è la velocità media del fluido [m/s]
- χ è il parametro di Chézy [m^{1/2}/s]
- R è il raggio idraulico [m]
- i è la pendenza del fondo alveo [m/m]

$$\chi = k_s R^{1/6}$$

dove:

k_s = coefficiente di scabrezza di Gauckler-Strickler [m^{1/3}/s]

Tabella 4. Valori del coefficiente di scabrezza di Gauckler-Strickler (k_s) per i canali.

TIPO DI CANALE	k_s (m ^{1/3} /s)	
	Minimo	Massimo
Pareti di cemento perfettamente lisce. Pareti in legno piallato. Pareti metalliche, senza risalti nei giunti.	90	100
Pareti di cemento perfettamente lisce. Pareti di legno piallato. Pareti metalliche, senza risalti nei giunti – con curve.	85	90
Pareti di cemento non perfettamente lisciate. Muratura di mattoni molto regolare. Pareti metalliche con chiodatura ordinaria.	75	85
Pareti di cemento non in perfette condizioni. Muratura ordinaria più o meno accurata. Pareti di legno grezzo, eventualmente con fessure.	65	70
Pareti di cemento solo in parte intonacate; qualche deposito sul fondo. Muratura irregolare di pietrame. Terra regolarissima senza vegetazione		60

Tabella 5. Parametri utilizzati nella formula di Chézy.

	PASSAGGIO 1	PASSAGGIO 2	
k_s (m ^{1/3} /s)	75	90	
R (m)	0,83	0,58	0,61
χ (m ^{1/2} /s)	73	82	83
i (m/m)		0,007	
v (m/s)	5,56	5,22	5,42
A (m ²)	5,58	3,27	3,04
Q (m ³ /s)	31,40	17,20	16,50
$Q_{TOT} = 65 \text{ m}^3/\text{s}$			

Tabella 6. Portate al colmo di piena a differente tempo di ritorno e valore di portata massima ammissibile a confronto.

Q2 (m ³ /s)	Q10 (m ³ /s)	Q20 (m ³ /s)	Q50 (m ³ /s)	Q100 (m ³ /s)	Q200 (m ³ /s)	Q500 (m ³ /s)	Q _{MAX} (m ³ /s)
32,88	47,7	54,07	62,52	68,88	75,39	83,66	65

Tale condizione, nel contesto di verifica, è soddisfatta fino a quando il battente d'acqua raggiunge la quota di riferimento, al di sopra del quale la condotta è in pressione a causa della presenza della base della struttura in cemento che costituisce il fondo di scorrimento del Canale Cime-na. Infine, la portata massima ammissibile sarà uguale al prodotto tra la velocità stimata dalla relazione di Chézy e l'area della sezione, che in questo caso fornirà un valore di 65 m³/s in corrispondenza della sezione di riferimento (Tab. 6).

Confrontando tale valore di portata con quelli ricavati mediante l'applicazione del Metodo cinematico utilizzato per la stima della portata al colmo di piena di assegnato tempo di ritorno T_r , è possibile valutare la funzionalità dell'opera sottoposta a pieno esercizio durante gli eventi di piena a differente tempo di ritorno. Come si può notare, l'efficacia dell'opera, in condizioni di moto uniforme e pelo libero dell'acqua, è garantita per eventi di piena con tempi di ritorno inferiori ai 50 anni.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

L'analisi del bacino ha portato all'identificazione e descrizione delle principali criticità che caratterizzano l'area indagata. Il settore collinare è caratterizzato dall'innesco di processi gravitativi perlopiù superficiali che nei litotipi marnosi sono prevalentemente associati a colamenti rapidi in terra e scivolamenti rotazionali, mentre nei litotipi conglomeratici sono prevalenti i crolli, anche solo di limitate porzioni isolate di roccia.

Questi eventi si distribuiscono temporalmente nei periodi compresi tra marzo-aprile ed ottobre-novembre, entrambi caratterizzati da notevoli variazioni climatiche accompagnate da importanti precipitazioni. Si è notato che gli eventi innescati durante il periodo autunnale necessitassero di un quantitativo di pioggia minore rispetto a quelli avvenuti durante la stagione primaverile; ciò è probabilmente legato alla minor evapotraspirazione del suolo e ad una maggiore ritenzione idrica.

Per quanto riguarda invece il settore di pianura, questo presenta esclusivamente dinamiche di pericolosità collegate a fenomeni di esondazione del Rio Maggiore e dei canali irrigui. In particolare, la limitata luce di passaggio, che caratterizza l'attraversamento del Rio al di sotto del canale ENEL Cime-na, costituisce un ostacolo al deflusso delle acque di piena che drenano la collina per confluire nel Fiume Po, provocando l'inondazione dell'area pianeggiante a monte dell'opera. Il territorio che caratterizza il bacino in questione, per quasi tutta la sua estensione, è suscettibile quindi allo sviluppo di fenomeni che possono recare danni a edifici, infrastrutture ed attività commerciali. La pianificazione territoriale è quindi il mezzo che, tramite la consapevolezza delle pericolosità, dovrebbe mettere in

atto interventi volti a mitigarne i rischi associati, garantendo una gestione sostenibile dal punto di vista economico, ambientale e sociale.

BIBLIOGRAFIA

- CHOW V.T. (1964), *Handbook of Applied Hydrology*. Mc Graw-Hill Book Company, New York
- FERRO V. (2002), *La sistemazione dei bacini idrografici*. Mc Graw-Hill Book Company. New York.
- FESTA A., BOANO P., IRACE A., LUCCHESI S., FORNO M.G., DE LA PIERRE F., FIORASO G., PIANA F. (2009), *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 156 Torino Est*. ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca ambientale, Roma.
- GIANDOTTI M. (1934), *Previsione delle piene e delle maree dei corsi d'acqua*. Memorie e Studi idrografici, vol.8, Ministero dei L.L.P.P., Servizio Idrografico Italiano Roma, Italia.
- GUMBEL E.J. (1941), *The return period of flood flows*. The Annals of Mathematical Statistics, 12, 163-190.
- KIRPIC Z.P. (1940), *Time of concentration of small watersheds*. Civ. Eng.
- KOPPEN W. (1936), *Das geographische System der Klimate*. Handbuch der Klimatologie, vol. 1, Berlin, Borntraeger.
- PASINI P. (1910), *Coefficienti udometrici desunti dal lavoro delle macchine nelle bonifiche meccaniche*. Giornale Genio Civile.
- PEZZOLI G. (1970), *Schemi e modelli in Idrologia*. Istituto di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Politecnico di Torino.
- VENTURA G. (1905), *Bonificazione della Bassa pianura bolognese*. Giornale del Genio Civile, 43,1.

Lo stoccaggio di energia termica nel sottosuolo. Un esperimento a scala reale nella pianura torinese

Underground thermal energy storage. A living lab in the Turin Po Plain

JESSICA MARIA CHICCO¹, CESARE COMINA², GIUSEPPE MANDRONE³

¹ Dipartimento Interateneo di Scienze, progetto e politiche del Territorio (DIST) – Università degli studi di Torino

² Dipartimento di Scienze della Terra (DST) – Università degli studi di Torino

³ Dipartimento Interateneo di Scienze, progetto e politiche del Territorio (DIST) – Università degli studi di Torino

E-mail: jessica.chicco@unito.it (J. M. Chicco), cesare.comina@unito.it (C. Comina), giuseppe.mandrone@unito.it (G. Mandrone)

Parole chiave: stoccaggio, energia termica, fabbisogno termico, calore sensibile, sonde geotermiche, conducibilità termica
Key words: storage, thermal energy, energy demand, sensible heat, geothermal pipes, thermal conductivity

1. INTRODUZIONE

La dipendenza di energia è aumentata significativamente negli ultimi decenni. I sistemi di climatizzazione hanno subito una forte crescita in tutto il mondo da circa 4000 GW nel 1990 a circa 11000 GW (e oltre) nel 2016, e il consumo di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli spazi si prevede raggiunga oltre il triplo entro il 2050 (International Energy Agency, 2018). Data la crescente domanda energetica per il riscaldamento e il raffrescamento, sono molto importanti gli aspetti economici e ambientali.

La Commissione Europea prevede di raggiungere il 27% di produzione di energia rinnovabile entro il 2030 (Menéndez *et al.*, 2019). Attualmente, gli edifici in Europa consumano il 41% dell'energia, più del trasporto (32%) e dell'industria (25%). Quindi l'integrazione delle tecnologie per la produzione di energia rinnovabile è estremamente necessaria (Todorov *et al.*, 2020). In tal senso alcune fonti rinnovabili, come ad esempio il solare e l'eolico, presentano caratteri di non-programmabilità e disallineamento tra la domanda e l'offerta. A tal riguardo, per poter superare la discrepanza temporale tra richiesta e fornitura di energia termica sono necessari sistemi di stoccaggio dell'energia termica. I sistemi UTES (Underground Thermal Energy Storage) si basano sullo stoccaggio del calore sensibile, favorendo un'elevata efficienza dell'intero sistema, una fattibilità tecnico-economica e un impatto limitato sulle falde acquifere (Giordano *et al.*, 2016a; Giordano *et al.*, 2016b). Nello specifico, tra i sistemi UTES, vi sono tecnologie che permettono di diminuire il divario tra la sorgente di energia e la domanda giornaliera (detta "a breve termine" o "diurna") o per un periodo di tempo maggiore (es. stagionale) per cui le applicazioni sono dette "a lungo termine" o "stagionali".

Per quanto riguarda l'immagazzinamento "stagionale", alcuni metodi prevedono di utilizzare il sottosuolo come volume di accumulo aumentandone la temperatura nella stagione estiva (fase di carica) ed estraendone calore nella stagione invernale (fase di scarica) al fine di soddisfare i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento, nonché la

produzione di acqua calda sanitaria, per edifici residenziali e commerciali. Pertanto, il terreno agisce come volume di accumulo nella fase di carica e come sorgente di calore, nella fase di scarica (Giordano *et al.*, 2015) e sicuramente, si rivela importante la dettagliata analisi del suo comportamento termico nonché della sua capacità di accumulare e rilasciare energia. Dettagli, da tenere in forte considerazione in corso della progettazione al fine di raggiungere una piena ottimizzazione del sistema. Sofisticati metodi di monitoraggio, sono altresì utili per implementare l'operatività dell'intero sistema di stoccaggio ottenendo un maggiore dettaglio dei dati acquisiti.

Il presente lavoro mira alla necessità di comprendere la risposta del terreno soggetto a immissione ed estrazione di energia termica attraverso il monitoraggio di un impianto. Nello specifico, si fa riferimento all'impianto localizzato a Grugliasco, nella periferia nord-occidentale di Torino e composto da n. 2 pannelli solari termici collegati a n. 4 sonde geotermiche (a circa -30 m di profondità) impostate in depositi alluvionali ghiaioso-sabbiosi insaturi (Comina *et al.*, 2015; Giordano *et al.*, 2017). Il sistema è un laboratorio a scala reale, per lo studio dell'interazione opera-terreno e per la valutazione di tecniche indirette di monitoraggio circa l'estensione del pennacchio termico indotto. L'impianto, ispirato al concetto dei living lab, è stato messo in funzione per la prima volta nel 2014, è stato recentemente ristrutturato ed integrato rispetto alla versione originale.

2. I SISTEMI DI STOCCAGGIO TERMICO A CALORE SENSIBILE: STATO DELL'ARTE SULLE TIPOLOGIE ESISTENTI

Nell'ambito dello stoccaggio del calore i più avanzati sistemi sfruttano il calore sensibile, che si distingue dal calore latente, in quanto si tratta di energia che comporta un aumento di temperatura del materiale soggetto a riscaldamento senza indurre ulteriori cambiamenti di fase (Cabeza, 2015). In tal senso, l'acqua (Capacità termica $C = 4.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) rientra tra i mezzi più favorevoli per l'accumulo di calore sensibile in quanto ha una

buona capacità termica e può essere pompata ed estratta facilmente, oltre a essere ampiamente disponibile. Altri materiali adatti all'accumulo di energia termica sono la roccia o il terreno, che presentano capacità termiche pari a $C = 1.3 - 2.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$.

A seconda del materiale di stoccaggio, l'energia termica di stoccaggio include differenti tecnologie ognuna delle quali con le sue specifiche caratteristiche, applicazioni e costi. I diversi sistemi di stoccaggio termico possono essere facilmente integrati in una rete di riscaldamento con modalità centralizzata (perlopiù grandi unità di stoccaggio) o decentralizzata (di solito più unità più piccole in edifici pubblici, uffici o abitazioni private).

I primi sistemi utilizzati per tali scopi riguardano serbatoi artificiali interrati, nella maggior parte dei casi cisterne d'acqua termicamente stratificate (composte da calcestruzzo, acciaio inossidabile o fibre di plastica rinforzata), come i Tank Thermal Energy Storage (Xu *et al.*, 2014). Esistono anche sistemi più complessi che prevedono di estrarre acqua di falda ad una certa temperatura dal sottosuolo (solitamente 10-15°C, a seconda delle condizioni idrogeologiche e climatiche locali), riscaldarla per mezzo dell'energia termica a disposizione e re-iniettarla nello stesso (o diverso), acquifero ad una temperatura maggiore. Tra i sistemi di stoccaggio più comuni che utilizzano l'acqua di falda, vi sono i sistemi detti Aquifer Thermal Energy Storage (ATES), per cui è necessaria la realizzazione di due pozzi posizionati in modo tale da non creare interferenza tra estrazione ed immissione oltre ad evitare un corto-circuito termico. I Paesi Bassi, la Germania e, subordinatamente la Turchia, sono pionieri nell'installazione dei sistemi ATES.

Tra le altre applicazioni che sfruttano l'acqua come mezzo di stoccaggio vi sono anche: i CTES, Cavern Thermal Energy Storage (Lee, 2013), sistemi che utilizzano serbatoi sotterranei precedentemente sfruttati da industrie minerarie o petrolifere che permettono di accumulare grandi quantitativi di acqua; i Water-Gravel o Pit Thermal Energy Storage (WGTES o PTES) che raggiungono profondità variabili tra i 5 e i 10 m e per cui è richiesta una fossa riempita di acqua o acqua mista a ghiaia (Fan *et al.*, 2017).

Al contrario, nel caso non siano presenti le condizioni geologiche e idrogeologiche necessarie alla realizzazione di un impianto tra quelli sinora elencati è possibile sfruttare, in modo indiretto, le proprietà termo-fisiche di terreni o rocce a diverse profondità nel sottosuolo. Tra i sistemi adatti a tale scopo vi sono i sistemi BTES (Borehole Thermal Energy Storage), una tecnologia che può essere considerata come un miglioramento di sistemi geotermici convenzionali, a bassa entalpia e a circuito chiuso (GSHP, Ground Source Heat Pump). Specificatamente, consiste di pozzi verticali BHE (Borehole Heat Exchanger) con una configurazione a singola o doppia U, posti ad una determinata distanza e profondità che dipendono principalmente dalle condizioni geologiche, idrogeologiche e termo-fisiche del sottosuolo. I pozzi BHE sono progettati in modo tale da poter stoccare o estrarre, stagionalmente specifiche quantità di energia (sia caldo che freddo) da un volume di terreno o roccia mentre. Le sonde geotermiche raggiungono

solitamente profondità variabili tra -30 e -150 m p.c. Ai fini dello stoccaggio, le sonde sono spesso presenti in numero variabile da 30 a 50, collegate in serie, disposti su un'area circolare. Nelle configurazioni classiche le sonde centrali agiscono da nucleo caldo e, spostandosi verso l'esterno, la temperatura di ingresso diminuisce progressivamente.

3. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO/ GEOLOGICO DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE DI GRUGLIASCO

Il sito sperimentale è localizzato nel comune di Grugliasco e, precisamente, nella porzione nord-occidentale dell'alta Pianura Padana delimitata a S dal T. Sangone, a E dal F. Po e a N dal F. Dora Riparia, a circa 287 m s.l.m.

Geomorfologicamente l'area, settore di pianura compreso tra l'arco delle Alpi Occidentali e la Collina di Torino, è costituita da una potente successione sedimentaria di depositi fluvio-glaciali (Pleistocene - Attuale), organizzati in numerosi conoidi coalescenti che si adagiano sulle facies di transizione marino-continentali (Pliocene Med. - Pleistocene Inf.) e più in profondità sulle unità Mioceniche della Collina di Torino (Fig. 1).



FIGURA 1. Inquadramento geografico e geologico dell'area in esame (ridisegnata da Giordano *et al.*, 2015).

I depositi superficiali consistono di ghiaie e sabbie ad alta permeabilità, con potenza massima di 60-70 m (più potente nei settori mediani, minore nei settori apicale e distale). All'interno di tali materiali è frequente trovare porzioni particolarmente compatte e spesso cementate con materiali di natura carbonatica e origine fluvio-glaciale. In particolare, in corrispondenza del sito d'indagine, affiorano depositi appartenenti al Subsistema di Col Giansesco (Pleistocene Inf. - Olocene), a sua volta parte del "Sistema di Frassinere": all'interno di questo litotipo si distinguono ciottoli di quarziti, serpentiniti, gneiss, prasiniti e calcesci-

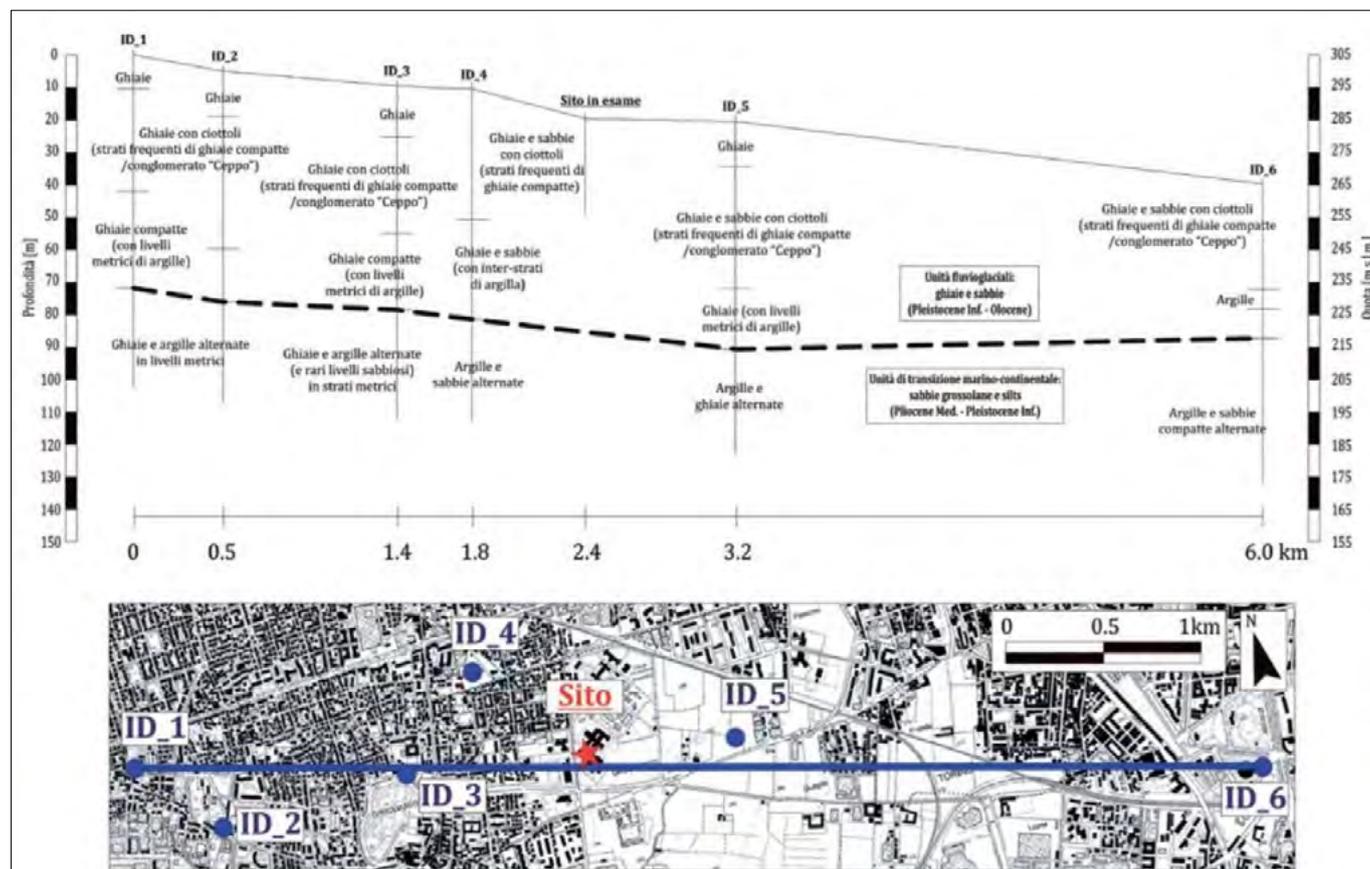


FIGURA 2. Sezione stratigrafica dell'area in esame (ridisegnata da Giordano *et al.*, 2015).

Tab. 1 Misure di conducibilità termica sui campioni di terreno (Giordano *et al.*, 2015).

Profondità	Conducibilità termica [W/m/K]		Strumento
	secco	saturo	
7,5	0.47	2.55	ISOMET 2114
21	0.55	2.52	ISOMET 2114
27	0.45	2.31	KD2 Pro

sti (Polino *et al.*, 2010). Al di sotto di tale termine, la successione continua con alternanze di sabbie e limi tipiche di un ambiente deposizionale di transizione, in cui si sono susseguiti fenomeni di trasgressione e regressione della linea di costa nel Pliocene Med. – Pleistocene Inf. (Fig. 2).

Per quanto riguarda l'aspetto idrogeologico, i depositi affioranti nell'areale d'indagine ospitano una falda superficiale libera e in connessione diretta con il reticolato idrografico principale. Sulla base dei dati disponibili in letteratura e delle indagini eseguite in sito si ipotizza che la falda freatica si attesti ad una profondità di -35/-40 m rispetto al piano campagna e che abbia un andamento E-NE. Inoltre, dai dati emersi si evince che l'unità più profonda è costituita da facies di transizione a permeabilità medio-bassa, con presenza di un sistema multi-falde. Grazie a successive e specifiche analisi granulometriche su alcuni campioni prelevati a tre diverse profondità, Giordano *et al.*, 2015 hanno potuto stimare la conducibilità idraulica K [m/s] delle unità litologiche in posto, eseguita tramite l'equazione di Kozeny-Carman (Carrier, 2003). I tre campioni superficiale, intermedio e profondo hanno restituito valori di K pari a 2.3×10^{-4} , 5.6×10^{-4} e 3.5×10^{-4} m/s rispettivamente

presentando, in generale, una permeabilità medio-alta. Ulteriori perforazioni effettuate in prossimità del sito d'indagine hanno rivelato la presenza fino a 30-32 m di ghiaie e sabbie non sature, con locali livelli di depositi cementati (a -10.0 e -21.0 m p.c.): ciò ha permesso di ottenere carote compatte, grazie alla presenza di abbondante cemento carbonatico. Per completare la caratterizzazione del sottosuolo nell'areale indagato, sede dell'impianto sperimentale, si sono svolte analisi di conducibilità termica su depositi sciolti, prelevati nel corso delle perforazioni e precisamente a -7.5, -21.0 e -27.0 m p.c. Grazie all'utilizzo di strumenti specifici come ISOMET 2114 (Applied Precision Ltd.) e KD2 Pro (Decagon Devices Inc.), che si basano entrambi sul modello di sorgente lineare transiente ("transient line source method"; Giordano *et al.*, 2019), si sono ottenuti i risultati che si riassumono brevemente in Tab. 1.

4. DESCRIZIONE DELLA REALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO

In Italia gli impianti di stoccaggio di energia termica nel terreno non sono ancora contemplati a livello normativo, data la sostanziale innovatività in ambito italiano: pertanto; nella

realizzazione del sistema sperimentale di stoccaggio, si è deciso di non interferire con l'acquifero onde evitare eventuali contaminazioni o perturbazioni all'idrosfera sotterranea.

Nello specifico, l'impianto oggetto del presente lavoro è situato a fianco dell'edificio di Topografia del Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari all'interno del comprensorio UniTo di Grugliasco, alla periferia W di Torino. Esso presenta tutte le caratteristiche di un living lab, ossia un laboratorio a cielo aperto grazie al quale è principalmente possibile valutare la capacità di depositi ghiaioso-sabbiosi a bassa conducibilità termica, ad ospitare sistemi di accumulo stagionale (Fig. 3).

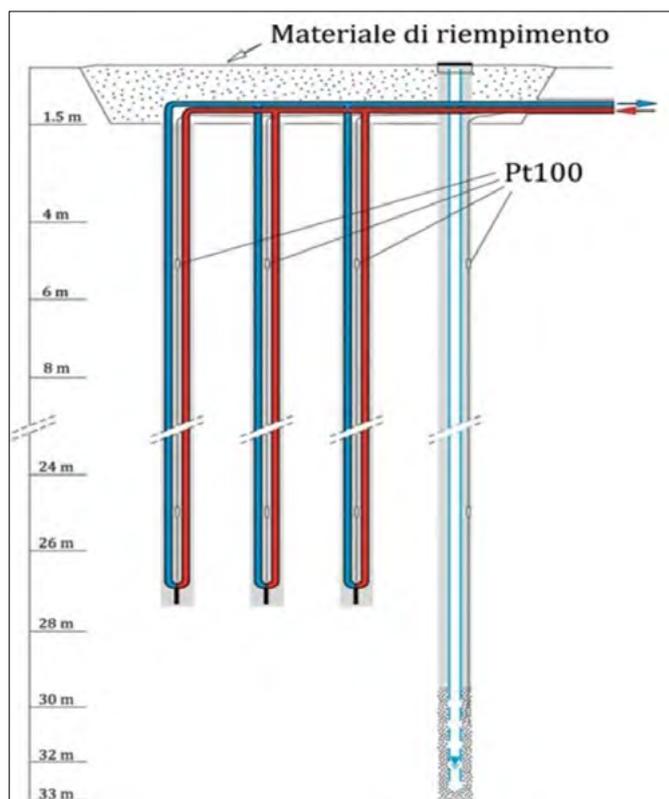


FIGURA 3. Sezione schematica della parte di impianto, al di sotto del piano campagna (ridisegnata da Giordano *et al.*, 2015).

Il sistema consiste di n. 4 perfori a circa -30 m p.c. attrezzati con sonde geotermiche adatte a resistere alle alte temperature. La configurazione delle sonde geotermiche è stata impostata in modo tale da creare un nucleo caldo interno, con una sonda centrale a doppia U e un anello protettivo intorno, costituito da n. 3 sonde a singola U disposte ai vertici di un triangolo equilatero di 2.0 m di lato. A fianco del campo sonde è stato eseguito un perforo profondo circa -33 m p.c., attrezzato a piezometro con tubo aperto, al fine di monitorare le oscillazioni freatiche della falda oltre alla sua temperatura e alla sua composizione chimica (talvolta influenzata dai materiali di cui è costituito l'impianto). Il piezometro è principalmente utilizzato come tubo di monitoraggio della temperatura del sottosuolo, con un franco di 6.0 m rispetto alla base delle sonde geotermiche, al fine di permettere un controllo su una possibile interferenza per risalita della superficie piezometrica.

Tra gli altri dettagli costruttivi, a -1.5 m p.c. è stata posizionata la boccaforo in modo tale da creare uno strato iso-

lante e minimizzare le perdite termiche verso l'atmosfera. Alla medesima profondità sono stati inseriti i tubi in uscita dai perfori, che collegano l'edificio ai pannelli solari. Inoltre, al fine di ottenere una maggior conducibilità termica (fino a circa $2.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) e ottenere un buon isolamento termico del sistema sonda/perforo/terreno, è stato impiegato uno specifica miscela cementizia addizionata con materiale ad elevata conducibilità termica, per migliorarne le caratteristiche termo-fisiche. Successivamente alla fase di perforazione, sono stati prelevati n.3 campioni della miscela cementizia utilizzata al fine di analizzarne la conducibilità termica effettiva a seguito della sua interazione con il terreno. Dai risultati risultano valori inferiori a $1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. La conducibilità termica risultante è sicuramente molto inferiore al valore atteso ma, se paragonato ai valori termo-fisici del terreno circostante, può essere accettata in quanto si garantisce l'omogeneità termica.

Al fine del funzionamento dell'impianto, scorre un fluido termo-vettore costituito da acqua additivata da Glicole Propilenico al 25% vol, con una percentuale di anti-congelante piuttosto elevata in modo da prevenire la possibilità di congelamento anche a temperature di $-15/-20^\circ\text{C}$.

In superficie il sistema di stoccaggio è costituito da n. 2 pannelli solari termici con superficie lorda pari a 5 m^2 , posizionati sul tetto dell'edificio e inclinati di 10° rispetto all'orizzontale. Il circuito che collega i pannelli solari alle sonde geotermiche è determinato da una pompa idraulica da 59W, una portata nominale di 200 l/h e una pressione costante di circa 2 bar, installata al piano interrato dell'edificio. Invertendo il ciclo, gli stessi pannelli solari termici sono utilizzati come dissipatori di calore nella stagione invernale.

In aggiunta è stato impostato un sistema di acquisizione dati con gestione da remoto, costituito da n. 20 sensori di temperatura RTD Pt100 a 4 fili (range di misura $-50/+180^\circ\text{C}$, accuratezza 5%), all'interno dei perfori eseguiti. In particolare, lungo 3 dei perfori dove sono installate le sonde geotermiche sono stati inseriti sensori ogni 5 m di profondità a partire dal fondo foro. Gli stessi sensori di temperatura sono stati inseriti anche in corrispondenza del circuito sopra-terra e sui pannelli solari. Tale sistema è stato recentemente aggiornato, in quanto sono subentrati dei malfunzionamenti che non hanno permesso di acquisire i dati degli ultimi 2 anni di misure. Inoltre, "a monte" e "a valle" del campo sonde sono stati inseriti sia un misuratore di flusso ad ultrasuoni che un contabilizzatore di energia, al fine di calcolare la potenza istantanea (P , in W) dell'impianto e l'energia trasferita o estratta dal terreno progressivamente. Sulla base della differenza di temperatura ΔT [$^\circ\text{C}$] tra ingresso e uscita dal campo geotermico, la portata q [m^3/s] e la capacità termica volumetrica C [$\text{J}/\text{m}^3/\text{K}$] del fluido termo-vettore è possibile calcolare prima la potenza ($P=C \cdot (T_{\text{out}}-T_{\text{in}}) \cdot q$) e successivamente l'energia prodotta E [Wh] in base alle ore di funzionamento dell'impianto. I sensori, il misuratore di flusso e il contabilizzatore sono inoltre collegati ad un data-logger che acquisisce in continuo i dati e archivia gli stessi con un intervallo di campionamento di 10 minuti.



FIGURA 4. Schema di acquisizione, controllo e diffusione dei dati registrati dal sistema di monitoraggio.

Nello specifico, durante la “fase di carica” (trasferimento di energia termica dai pannelli al terreno) si crea un nucleo caldo protetto dalle sonde geotermiche esterne, in cui vi è una temperatura minore. Il circuito principale prevede che il fluido in uscita dai pannelli sia indirizzato prima alla sonda centrale e successivamente, in uscita da questa, in parallelo alle tre sonde esterne. Successivamente, il fluido ritorna ai pannelli solari termici per una nuova ricarica di energia termica da trasferire analogamente al terreno. Il sistema è inoltre provvisto di logiche preimpostate in modo tale da impostare una determinata funzionalità automatica (oltre a quella manuale), a seconda delle necessità dell’impianto stesso. Diversamente, la “fase di scarica” viene applicata nella stagione invernale procedendo all’estrazione dell’energia accumulata nella stagione precedente: in questo caso il fluido viaggia in parallelo nelle 4 sonde e i pannelli solari termici sono isolati dal sistema, mettendo in funzione il dissipatore di calore e quantificando l’energia prodotta dal terreno.

L’impianto è stato avviato nel 2014 e nel 2021 ha subito un profondo aggiornamento che ha previsto la sostituzione della centralina di controllo (Fig. 4, come da progetto e realizzazione dalla Eurix srl), del contacalorie ad ultrasuoni e la messa in opera di un boiler elettrico in grado di funzionare da accumulo temporaneo ed eventualmente, come integrazione del solare termico.

5. ESEMPIO DI MONITORAGGIO DIRETTO

In Fig. 5 è rappresentato un esempio di monitoraggio diretto circa l’andamento di tutti i parametri registrati nel corso del funzionamento dell’impianto (compresi i dati meteorologici) durante il mese di luglio ritenuto il più caldo e quindi il più esemplificativo, per definire le caratteristiche operative di un sistema di stoccaggio.

Precisamente:

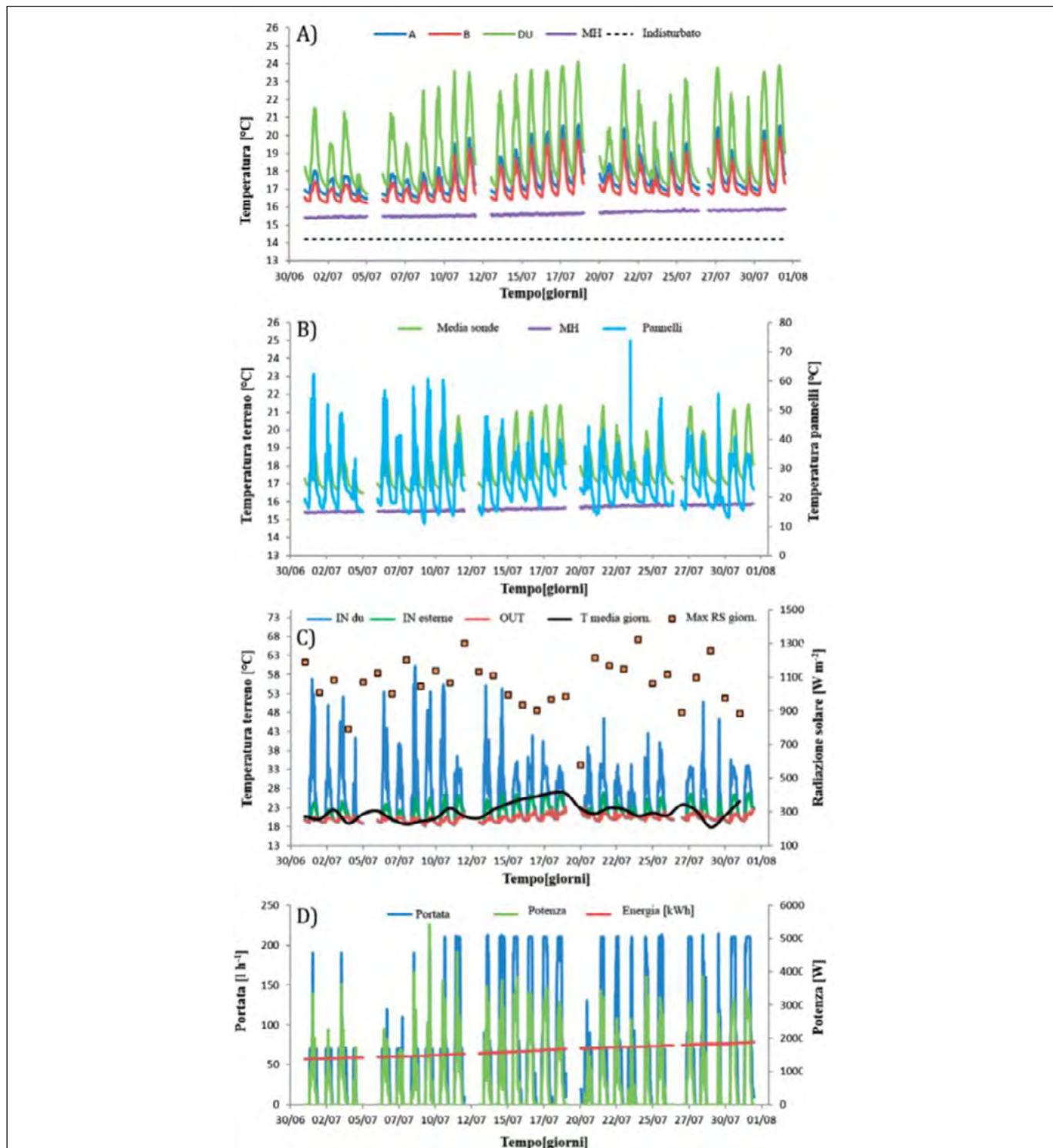
- il *grafico A* mostra i dati ottenuti dai sensori di temperatura installati a diverse profondità del terreno, lungo

le sonde geotermiche ed esternamente ad esse. Le sigle “DU”, “A”, “B” e “MH” si riferiscono rispettivamente alla sonda centrale, a due sonde esterne e al tubo di controllo;

- nel *grafico B* si ha un confronto tra le temperature del sottosuolo con quelle registrate dai pannelli solari termici;
- il *grafico C*, invece, rappresenta le temperature in ingresso e in uscita dai collettori rispetto ai dati meteorologici (in particolare, temperatura media e radiazione solare massima giornaliera);
- il *grafico D*, infine, mostra la portata del circuito, la potenza istantanea e la progressiva produzione di energia.

Il sistema di gestione dell’intero impianto è stato vincolato in modo tale da garantire portate su valori intermedi (80/90 l/h c.a.) a regime, durante la prima parte della fase di carica. Ciò ha permesso di massimizzare la temperatura del fluido termo-vettore in ingresso alla sonda centrale, al fine di creare un nucleo più caldo. Tale situazione si è mantenuta sino al 10 luglio, data oltre la quale si sono modificati i vincoli garantendo sempre la portata massima di 200 l/h (Fig. 5D). In seguito a tali modifiche la potenza ottenuta è risultata analoga ma sono stati osservati cambiamenti nella distribuzione del calore all’interno del campo geotermico, in particolare in corrispondenza delle sonde geotermiche esterne dove le temperature registrate sono risultate maggiori rispetto al periodo precedente, mentre sono rimaste invariate nella sonda geotermica centrale (Fig. 5A). La differenza di temperatura tra fluido in ingresso sia alla sonda centrale che a quelle esterne è diminuita sino a raggiungere valori di 10-15°C rispetto ai 30°C circa, registrati in precedenza (Fig. 5C); ciò si traduce in una maggiore efficienza della distribuzione del calore.

Inoltre, dal 20 al 31 luglio, il tubo di controllo ha registrato il tasso di crescita maggiore del valore di temperatura. Una risposta tardiva come atteso, data la distanza di 2 m dal centro del campo geotermico, rispetto all’elevata produzione di energia termica registrata nel periodo 8-18 luglio.

FIGURA 5. Dati di monitoraggio del mese di Luglio (da Giordano *et al.*, 2015)

Il totale dell'energia prodotta e trasferita al sottosuolo ammonta in media a 2.5-3.0 MWh termici. Considerando che l'energia che è possibile produrre nel mese di luglio con i pannelli utilizzati (efficienza 82%) è solitamente stimata intorno a 4.2 MWh, circa il 65% dell'energia prodotta dai pannelli solari termici può essere trasferita al terreno. Inoltre, ipotizzando la quota parte di perdite termiche lungo il circuito di circa il 5-10%, si assume un valore effettivo di energia trasmessa al sottosuolo pari a $ET = 9.1$ GJ. Il totale dell'energia termica presente nel volume cilindrico così definito è pari a 1.5-2.0 GJ. Tale risultato attesta l'efficienza di accumulo del sottosuolo in esame su valori del 17-22% che, per un impianto sperimentale, è più che soddisfacente.

6. CONCLUSIONI

Alla luce della bibliografia disponibile e dell'esperienza di questi primi anni di funzionamento è possibile indicare alcuni criteri per la valutazione ambientale e tecnica di questi impianti, oltre ai principali ostacoli riscontrati.

La valutazione preliminare delle caratteristiche litologiche, di concerto con l'analisi delle proprietà termofisiche dei terreni e delle rocce nel sottosuolo a diversi livelli di profondità, è fondamentale.

Allo stesso modo, si rivela essenziale anche l'analisi idrogeologica che permette sia di individuare il livello a cui è presente la falda acquifera che di valutare la circolazione idrica sotterranea, oltre a verificare le possibili itera-

zioni con le infrastrutture vicine o la presenza di sottoservizi. Oltre agli aspetti sopra elencati, i risultati dei primi monitoraggi effettuati, suggeriscono anche una maggiore attenzione sulla caratterizzazione termofisica dei terreni e rocce del sottosuolo che ospitano un sistema di stoccaggio dell'energia termica.

A tal proposito, un'indagine preliminare con l'esecuzione di un test di risposta termica (Ground Response Test; GRT) è senza dubbio utile, in quanto permette di definire dettagliatamente le proprietà termiche dei terreni e rocce sottostanti, valutarne le condizioni del terreno e stimare i costi di perforazione. La conoscenza delle proprietà termiche permette di fare alcune valutazioni: ad esempio, una bassa conducibilità termica favorisce un efficiente recupero ma diminuisce il tasso di carico/scarico; diversamente, l'utilizzo di determinate miscele cementizie impiegate successivamente alla realizzazione del perforo, sono indispensabili al fine di proteggere la circolazione idrica sotterranea ottenendo una buona conducibilità termica in condizioni non sature.

Inoltre, la coibentazione della parte superiore della perforazione è necessaria a ridurre le dispersioni di calore e può incidere fino a circa il 25%, nel costo totale dell'intero impianto. Ad esempio, tra gli altri accorgimenti tecnici da tenere in considerazione in un sistema di stoccaggio con sonde geotermiche verticali (Borehole Thermal Energy Storage; BTES) come quello descritto nel presente lavoro e che utilizza i pannelli solari termici come sorgente di calore, è richiesta l'installazione di un ulteriore sistema di accumulo (cisterna), in quanto il sistema reagisce lentamente alle fasi di carico e scarico. Parimenti i risultati possono essere considerati significativi solo dopo qualche anno di funzionamento.

Un vincolo alla realizzazione di tali impianti è rappresentato dal costo della perforazione, che può essere elevato sino a coprire circa il 50% del costo totale dell'intero sistema. Questo vuol dire che il costo dell'investimento è sbilanciato all'inizio del progetto, ma può ristabilirsi successivamente, in quanto i costi di manutenzione e mantenimento sono praticamente nulli.

Infine, un altro ostacolo alla messa in opera di tali sistemi è sicuramente la mancanza di chiare normative in materia che fa sì che si allunghino notevolmente i tempi per ottenere un permesso o per cui sia difficile, talvolta, ottenerlo.

BIBLIOGRAFIA

- CABEZA L.F. (2015). *Advances in thermal energy storage systems – methods and applications*. Woodhead Publishing Series in Energy, Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16453-7>
- CARRIER W.D.III, ASCE F. (2003). *Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny–Carman*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 129(11): 1054–1056. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:11\(1054\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:11(1054))
- COMINA C, GIORDANO N., GIULIANI A., MANDRONE G. (2015). *G.TES: Pilot Plant for Seasonal Ground Energy Storage in Italy. Engineering Geology for Society and Territory - Volume 1: Climate Change and Engineering Geology*, Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-09300-0>
- FAN J., HUANG J., CHATZIDIAKOS A., FURBO S. (2017). *Experimental and theoretic investigations of thermal behaviour of a seasonal water pit heat storage*. Solar World Congress 2017, Abu Dhabi, United Arab Emirates. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.057>
- GIORDANO N., COMINA C., MANDRONE G., CAGNI A. (2015a). *Il terreno come stoccaggio di energia termica: un sito sperimentale a Grugliasco – Università di Torino - Geologia Tecnica & Ambientale. - ISSN 1722-0025. - 3(2015), 55- 79.*
- GIORDANO N., COMINA C., MANDRONE G., CAGNI A. (2016a). *Borehole thermal energy storage (BTES). First results from the injection phase of a living lab in Torino (NW Italy)*. Renewable Energy 86, 993–1008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.052>.
- GIORDANO N., COMINA C., MANDRONE G. (2016b). *Laboratory scale geophysical measurements aimed at monitoring the thermal affected zone in underground thermal energy storage (UTES) applications*. Geothermics 61, 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.01.011>
- GIORDANO N., ARATO A., COMINA C., MANDRONE G. (2017). *Time-lapse electrical resistivity imaging of the thermally affected zone of a Borehole Thermal Energy Storage system near Torino (Northern Italy)*. Journal of Applied Geophysics 140, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.03.015>
- GIORDANO N., CHICCO J., MANDRONE G., VERDOYA M., WHEELER W.H. (2019). *Comparing transient and steady state methods for the thermal conductivity characterization of a borehole heat exchanger field in Bergen, Norway*. Environmental Earth Sciences 78 (460), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8397-7>
- LEE K.S. (2013) *Cavern Thermal Energy Storage Systems*. In: *Underground Thermal Energy Storage*. Green Energy and Technology. Springer, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4273-76>
- MENENDEZ J., ORDOÑEZ A., ÁLVAREZ R., LOREDO J. (2019). *Energy from closed mines: Underground energy storage and geothermal applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 108, 498-512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.007>
- POLINO R. (2010). *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 155 Torino Ovest*. Progetto CARG ISPRA, Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche, Arpa Piemonte
- TODOROV O., ALANNE K., VIRTANEN M., KOSONEN R. (2020). *A method and analysis of aquifer thermal energy storage (ATES) system for district heating and cooling: A case study in Finland*. Sustainable Cities and Society 53, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101977>
- XU J., WANG R.Z., LI Y. (2014). *A review of available technologies for seasonal thermal energy storage*. Solar Energy 103, 610-638.

Monitoraggio sismico passivo di ammassi rocciosi potenzialmente instabili: casi di studio nel territorio piemontese

Passive seismic monitoring of potentially unstable rock masses: case studies from Piedmont (NW Italy)

CHIARA COLOMBERO¹, CESARE COMINA², ALBERTO GODIO³, SERGIO CARMELO VINCIGUERRA⁴

¹ Ricercatrice, Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI)

² Professore associato, Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra (DST)

³ Professore ordinario, Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI)

⁴ Professore associato, Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra (DST)

E-mail: chiara.colombero@polito.it

Parole chiave: monitoraggio sismico passivo, microsismicità, frane, ammassi rocciosi instabili

Key words: passive seismic monitoring, microseismicity, landslides, unstable rock masses

INTRODUZIONE

L'identificazione di siti potenzialmente instabili, l'analisi dei fattori predisponenti e delle cause scatenanti la rottura sono elementi fondamentali per la caratterizzazione, il monitoraggio e la mitigazione dei rischi legati a fenomeni d'instabilità. Tra i metodi che permettono di investigare questi aspetti, il monitoraggio sismico passivo di frane e ammassi rocciosi potenzialmente instabili negli ultimi dieci anni ha visto crescere il numero di applicazioni e progressivamente affinare i metodi di analisi e interpretazione dei dati registrati (Colombero *et al.* 2021a).

Il monitoraggio sismico passivo prevede l'installazione di un numero limitato di stazioni sismiche nel sito potenzialmente instabile, con registrazione continua del rumore sismico ambientale naturalmente presente in sito o antropicamente indotto. I vantaggi legati alla sismica passiva sono legati alla non-invasività del metodo, alla facilità di installazione e alla quantità di informazioni che è possibile estrarre dalle registrazioni, per l'analisi dell'evoluzione delle condizioni di stabilità del sito monitorato e il riconoscimento di eventuali precursori della rottura.

Tra i metodi a disposizione, sono due i principali parametri sismici che possono essere estratti dalle registrazioni continue di rumore sismico ambientale e monitorati nel tempo: la/e frequenza/e di risonanza del comparto instabile e le variazioni della velocità sismica all'interno del mezzo investigato.

In analogia con gli oscillatori semplici, volumi di roccia parzialmente instabili e svincolati dall'ammasso roccioso stabile possono mostrare una o più frequenze di risonanza. Queste ultime vengono identificate come amplificazioni spettrali in determinate bande di frequenza dall'analisi del contenuto spettrale delle registrazioni continue di rumore sismico ambientale. Il loro valore è direttamente proporzionale alla rigidità interna al volume instabile e di contatto (tipicamente ponti di roccia lungo le fratture che delimitano il volume instabile) e inversamente proporzionale alla massa del volume instabile. È quindi facile intuire come una progressione verso la rottura (ad esempio la rottura dei

suddetti ponti di roccia) porti ad una diminuzione della rigidità di contatto e di conseguenza a una chiara diminuzione nel valore delle frequenze di risonanza misurate. Il monitoraggio temporale di questi valori può pertanto essere impiegato per identificare potenziali precursori della rottura (Lévy *et al.* 2010, Fiolleau *et al.* 2020).

Un metodo alternativo o complementare consiste nella cross-correlazione del rumore sismico simultaneamente registrato sul sito instabile e ad una stazione stabile di riferimento. È noto che questa operazione consente di ricostruire la risposta impulsiva tra i due sensori, come se uno agisse da sorgente sismica e l'altro da ricevitore, permettendo quindi di indagare il mezzo che si trova tra le due stazioni. In caso, ad esempio, di rottura di ponti di roccia o di una progressiva apertura della frattura tra i due settori, il segnale ricostruito subirà un ritardo nella propagazione, stimabile dal cross-correlogramma estratto. Da questa variazione temporale è quindi possibile risalire alla variazione di velocità interna dell'ammasso roccioso. Anche in questo caso una progressione verso la rottura porterà a una chiara variazione negativa della velocità sismica, che costituirà un secondo indicatore precursore della rottura (Mainsant *et al.* 2012).

A parte le variazioni irreversibili nei due parametri sismici monitorati, sia le frequenze di risonanza che le variazioni della velocità sismica subiscono poi variazioni reversibili nel loro valore legate a variazioni nella temperatura dell'aria e/o nella quantità di precipitazioni. L'analisi di queste variazioni reversibili è fondamentale per poterle distinguere da quelle potenzialmente irreversibili e, soprattutto, fornisce informazioni fondamentali sui fattori che influenzano la stabilità del sito.

Infine, la registrazione del rumore sismico ambientale permette di ottenere serie temporali continue dalle quali estrarre segnali sismici potenzialmente legati a fenomeni di fratturazione all'interno del volume investigato, anche noti come segnali microsismici. I fenomeni di micro-fratturazione provocano infatti un rilascio di onde elastiche che possono essere registrati dalle stazioni sismiche. L'analisi dell'evo-



FIGURA 1. Monitoraggio sismico passivo di ammassi rocciosi potenzialmente instabili, casi di studio nel territorio piemontese: Madonna del Sasso (VB) e Ormea (CN).

luzione temporale di questi eventi può fornire informazioni simili ai due parametri sismici estratti dal rumore sismico ambientale, permettendo di registrare aumenti nel numero di eventi registrati prima della rottura. Inoltre, la localizzazione delle sorgenti di questi eventi può dare informazione sulle zone a maggiore instabilità e sull'evoluzione verso la rottura o il collasso (Colombero *et al.* 2018a).

Negli ultimi anni, esperienze di monitoraggio sismico passivo sono state condotte sul territorio piemontese (Figura 1) dall'Università degli Studi e dal Politecnico di Torino, in collaborazione con ARPA Piemonte. I principali risultati ottenuti sulla rupe di Madonna del Sasso (VB) e su un torrione di quarzite potenzialmente instabile ubicato in prossimità dell'abitato di Ormea (CN) sono riportati nel seguito.

MADONNA DEL SASSO (VB)

La rupe di Madonna del Sasso è ubicata sulla sponda occidentale del Lago d'Orta. Si tratta di un alto affioramento granitico, con un'altezza di circa 200 m, delimitato su tre lati da pareti approssimativamente verticali (Figura 1). La sommità del rilievo è occupata da un piazzale panoramico, di fronte al Santuario del XVIII secolo da cui il luogo prende il nome. La rupe è interessata da quattro fratture principali che tendono a isolare la porzione frontale nord-occidentale della rupe la cui instabilità è quindi principalmente funzione dei ponti di roccia lungo le fratture e delle caratteristiche di innesco al piede.

Il sito è stato monitorato tra il 2013 e il 2016 con una rete di quattro stazioni (geofoni triassiali, frequenza pro-

pria 4.5 Hz) collegate via cavo a un acquirettore a 12 canali (Granite, Kinometrics). Due stazioni sono state installate al piede della porzione potenzialmente instabile, una sulla sommità, mentre la quarta è stata ubicata esternamente all'area potenzialmente instabile per essere usata come stazione stabile di riferimento. La rete ha registrato in continuo, fatto salvo i periodi di malfunzionamento, il rumore sismico ambientale, acquisito in file orari con frequenza di campionamento pari a 250 Hz.

Le frequenze di risonanza estratte con l'analisi spettrale del rumore sismico ambientale, le variazioni di velocità ottenute dalla cross-correlazione e il numero cumulativo di eventi microsismici potenzialmente legati a fenomeni di micro-fratturazione sono riassunti in Figura 2 e confrontati con i parametri meteorologici registrati alla stazione ARPA Piemonte più vicina al sito (Colombero *et al.* 2017, 2018a, 2018b).

Una evidente frequenza fondamentale è osservabile nel contenuto spettrale del rumore sismico, intorno a 3 Hz. Il valore di questa frequenza di risonanza subisce graduali variazioni reversibili nel tempo, guidate dalle variazioni della temperatura dell'aria (Figura 2). Questo meccanismo è legato alla dilatazione e contrazione termica del blocco potenzialmente instabile. Con una diminuzione della temperatura nei mesi autunnali e invernali, la contrazione termica del blocco porta a una progressiva apertura delle fratture che lo isolano dalla porzione di rupe stabile. Questa maggiore apertura delle fratture si traduce in una diminuzione della rigidità al contatto tra i due settori e quindi in una diminuzione dei valori della frequenza di risonanza. Analogamente, una maggiore apertura della frattura tra il sensore posto alla sommità della zona stabile e quello di riferimento dà origine a una diminuzione della velocità sismica all'interno del mezzo investigato. Il processo è reversibile: un aumento della temperatura dell'aria nei mesi primaverili ed estivi e la conseguente dilatazione termica del volume instabile portano a una parziale chiusura delle fratture, un aumento nei valori della frequenza di risonanza e della velocità sismica interna al blocco.

Questa interpretazione è pienamente supportata da misure pregresse dirette degli spostamenti a cavallo delle fratture, con estensimetri e monitoraggi topografici che confermano la stessa tendenza stagionale. Le precipitazioni non inducono variazioni osservabili nei parametri sismici misurati. Non sono inoltre state riscontrate variazioni irreversibili nei due parametri interpretabili come precursori del collasso. Il numero di eventi microsismici registrati (Figura 2) è maggiore nei mesi primaverili ed autunnali, a rimarcare le variazioni di vincolo legate alle diverse condizioni lungo le fratture del sito.

ORMEA (CN)

Una seconda esperienza di monitoraggio continuo del rumore sismico ambientale e della microsismicità è stata condotta recentemente sul versante posto ad ovest dell'abitato di Ormea (Colombero *et al.* 2021b). Anche in questo caso, il versante quarzítico è interessato da almeno tre sistemi di discontinuità principali, alcune subverticali, che tendono a isolare alti torrioni e pinnacoli potenzialmente instabili.

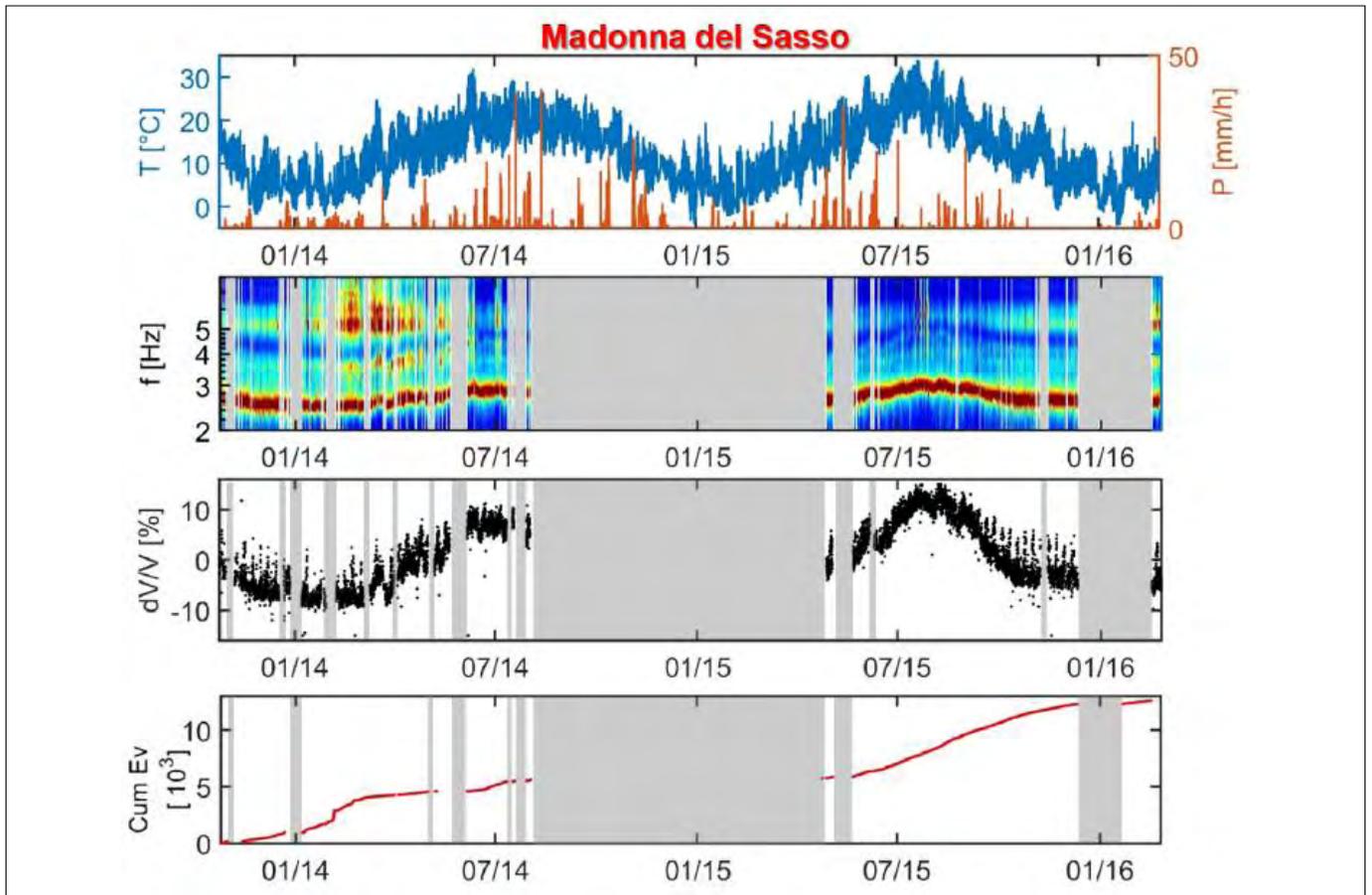


FIGURA 2. Risultati del monitoraggio sismico passivo a Madonna del Sasso. Dall'alto verso il basso: temperatura dell'aria e precipitazioni orarie, frequenza di risonanza, variazioni di velocità, numero cumulativo di eventi microsismici.

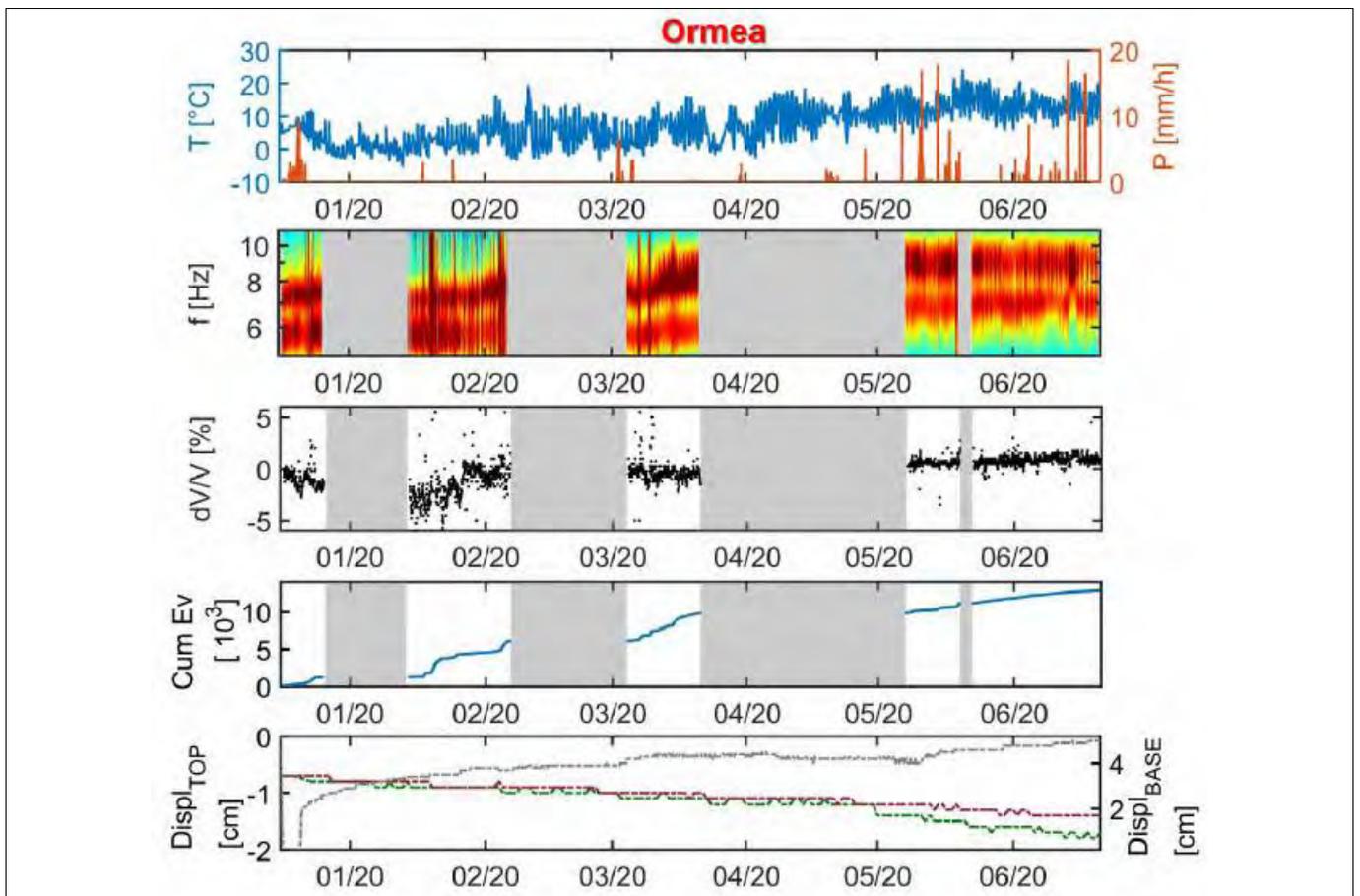


FIGURA 3. Risultati del monitoraggio sismico passivo Ormea. Dall'alto verso il basso: temperatura dell'aria e precipitazioni orarie, frequenze di risonanza, variazioni di velocità, numero cumulativo di eventi microsismici, spostamenti misurati dagli estensimetri a filo posti alla base (in grigio) e a cavallo delle fratture alla sommità del torrione (in rosso e verde).

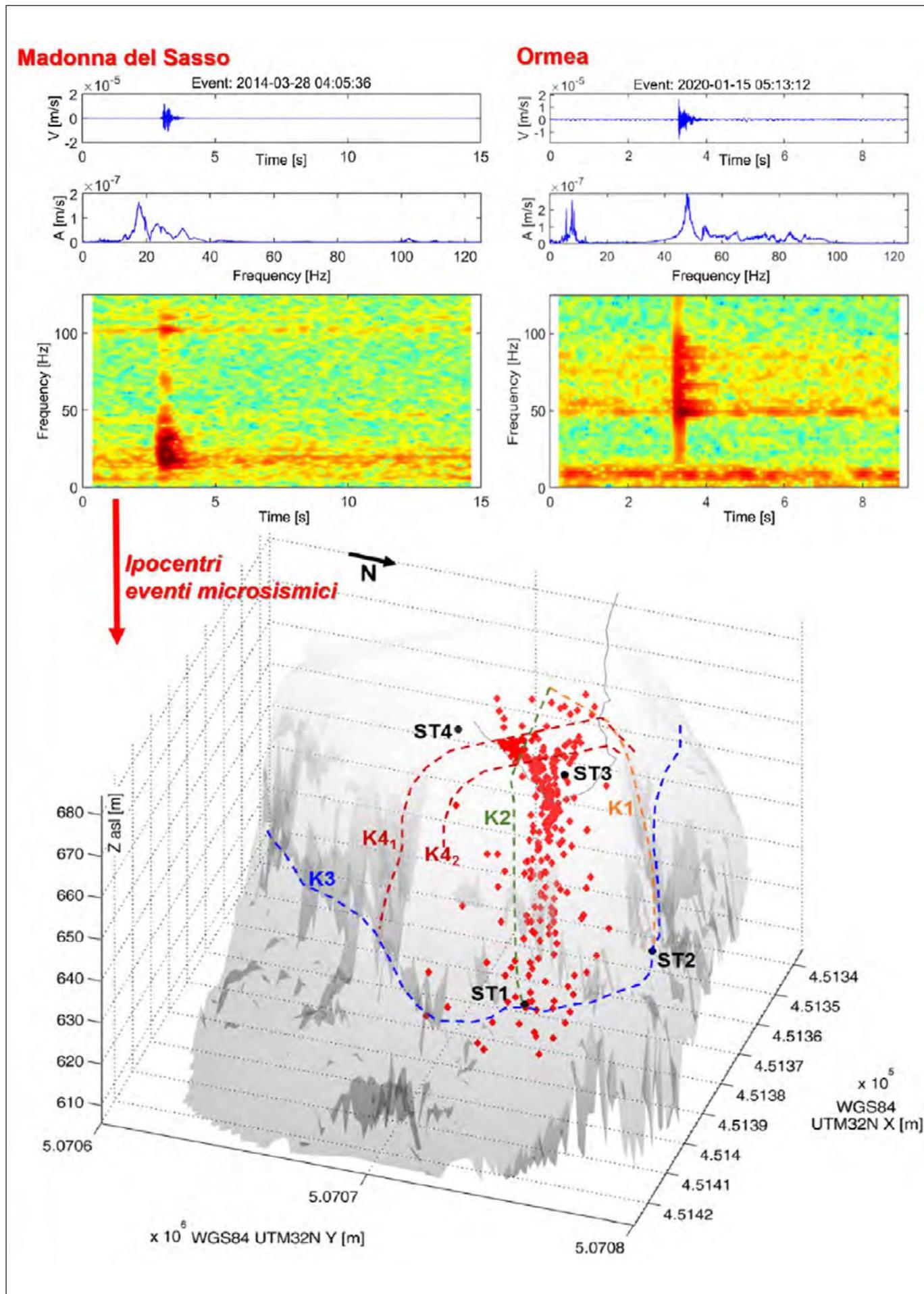


FIGURA 4. Esempi di eventi microsismici legati a fenomeni di micro-fratturazione. In alto: Madonna del Sasso (a sinistra) e Ormea (a destra). Ciascun evento è riportato in tempo, spettro di ampiezza e spettrogramma caratteristico. In basso: localizzazione ipocentrale degli eventi microsismici di Madonna del Sasso registrati a quattro stazioni.

A seguito delle intense precipitazioni primaverili e autunnali, alla base di uno di questi torrioni (Figura 1) si è sviluppata una frana superficiale che ha coinvolto le coperture di versante e blocchi di quarzite provenienti dalle pareti a monte. L'arretramento della frana potrebbe progressivamente destabilizzare il torrione quarzítico di circa 25 m di altezza e dimensioni alla sommità di circa 10x12m. Per questo motivo è stata installata una rete di quattro stazioni sismiche wireless con geofoni triassiali 2 Hz (GEA-GPS, PASI s.r.l. e Iridium s.a.s.). Vista la difficile accessibilità del sito, le stazioni sono state appositamente sviluppate per poter operare in autonomia e a basso consumo energetico. Ogni stazione triassiale è dotata di un acquisitore e digitalizzatore del dato con stoccaggio su scheda di memoria interna. La sincronizzazione tra le varie stazioni avviene grazie al tempo fornito dall'antenna GPS di ogni stazione. L'autonomia, anche in assenza di pannelli solari esterni, è di circa un mese con registrazioni continue del rumore sismico, acquisite in file orari campionati a 250 Hz.

Due stazioni sismiche sono state ubicate alla sommità del torrione quarzítico potenzialmente instabile. Le altre due stazioni sono state installate a monte, sul versante stabile. Il monitoraggio ha avuto durata di circa sei mesi, tra il dicembre 2019 e il giugno 2020. I risultati sono riassunti in Figura 3.

Anche in questo caso, le frequenze di risonanza e le variazioni di velocità estratte dal rumore sismico ambientale mostrano un evidente controllo della temperatura dell'aria. L'interpretazione è analoga ai fenomeni di dilatazione e contrazione termica riportati per Madonna del Sasso, come testimoniato dagli estensimetri a filo installati in sito (Figura 3) alla sommità del torrione, operativi nella stessa finestra di monitoraggio. Le precipitazioni favoriscono invece spostamenti più marcati, soprattutto alla base del torrione (dicembre 2019, Figura 3) associati ad alti tassi di microsismicità, come osservabile nella curva cumulativa del numero di eventi registrati. L'andamento del numero di eventi microsismici nel tempo è in grado di tracciare fedelmente, seppur indirettamente, gli spostamenti in sito. Perturbazioni evidenti nel contenuto spettrale (frequenze di risonanza in Figura 3) sono inoltre osservabili nelle stesse finestre temporali. Nel periodo monitorato questi processi sono tuttavia reversibili e non tali da causare cali repentini nel valore delle due frequenze di risonanza individuate (variabili tra 5.5-7 Hz e 7-9.5 Hz) e interpretabili come precursori della rottura.

CONCLUSIONI

Le esperienze di monitoraggio sismico passivo condotte sul territorio piemontese negli ultimi anni permettono di evidenziare i vantaggi e le potenzialità del metodo per lo studio delle condizioni di stabilità di un sito e l'identificazione di potenziali precursori della rottura in un'ottica di *early warning*.

Le frequenze di risonanza e le variazioni di velocità restituiscono risultati paragonabili che permettono di seguire a lungo termine l'evoluzione delle condizioni di stabilità e di riconoscere i meccanismi in atto.

Gli eventi microsismici registrati (Figura 4) mostrano forme spettrali molto simili, caratterizzate da un rapido

decremento esponenziale del contenuto in alte frequenze. La frequenza dominante di ogni evento è invece diversa e sito specifica. Nel caso di Madonna del Sasso, la geometria della rete di monitoraggio ha inoltre permesso di procedere alla localizzazione degli eventi registrati da tutte le stazioni (Figura 4). Gli ipocentri risultano in larga parte superficiali e collocati nelle vicinanze di una delle fratture più aperte e pervasive (K2, in Figura 4), avvalorando l'ipotesi del controllo termico reversibile sull'apertura e chiusura delle fratture.

In entrambe le esperienze di monitoraggio, la variazione dei parametri sismici considerati risulta reversibile, ma i metodi si dimostrano idonei per il riconoscimento di variazioni irreversibili nella stabilità del sito, come già osservato in alcuni casi di letteratura. Nonostante la natura indiretta del metodo, la sismica passiva offre quindi strumenti continui e innovativi per la caratterizzazione e il monitoraggio di frane e ammassi rocciosi potenzialmente instabili.

BIBLIOGRAFIA

- COLOMBERO C., BAILLET L., COMINA C., JONGMANS D., VINCIGUERRA S. (2017). *Characterization of the 3-D fracture setting of an unstable rock mass: from surface and seismic investigations to numerical modeling*. In "Journal of Geophysical Research: Solid Earth", 122, 8, 6346-6366.
- COLOMBERO C., COMINA C., VINCIGUERRA S., BENSON P.M. (2018a). *Microseismicity of an unstable rock mass: From field monitoring to laboratory testing*. In "Journal of Geophysical Research: Solid Earth", 123.
- COLOMBERO C., BAILLET L., COMINA C., JONGMANS D., LAROSE E., VALENTIN J., VINCIGUERRA S. (2018b). *Integration of ambient seismic noise monitoring, displacement and meteorological measurements to infer the temperature-controlled long-term evolution of a complex prone-to-fall cliff*. In "Geophysical Journal International", 213, 3, 1876-1897.
- COLOMBERO C., JONGMANS D., FIOLEAU S., VALENTIN J., BAILLET L., BIÈVRE G. (2021a). *Seismic noise parameters as indicators of reversible modifications in slope stability: a review*. In "Surveys in Geophysics", 42, 339-375.
- COLOMBERO C., GODIO A., JONGMANS D. (2021b). *Ambient Seismic Noise and Microseismicity Monitoring of a Prone-To-Fall Quartzite Tower (Ormea, NW Italy)*. In "Remote Sensing", 13, 1664.
- FIOLEAU S., JONGMANS D., BIÈVRE G., CHAMBON G., BAILLET L., VIAL B. (2020). *Seismic characterization of a clay block rupture in Harmalière landslide, French Western Alps*. In "Geophysical Journal International", 221, 3, 1777-1788.
- LÉVY C., BAILLET L., JONGMANS D., MOUROT P., HANTZ D. (2010). *Dynamic response of the Chamouset rock column (Western Alps, France)*. In "Journal of Geophysical Research", 115, F04043.
- MAINSANT G., LAROSE E., BRÖNNIMANN C., JONGMANS D., MICHOD C., JABOYEDOOF M. (2012). *Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: toward failure prediction*. In "Journal of Geophysical Research: Earth Surface", 117, F01030.

Le miniere di Traversella, un sito di interesse per la storia mineraria del Piemonte

Traversella, a site of interest for the mining history of Piedmont

EMANUELE COSTA, SABRINA BONETTO, GIOVANNA ANTONELLA DINO, ARIANNA PASCHETTO, PIERA BENNA

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino

E-mail: emanuele.costa@unito.it

Parole chiave: Traversella, skarn, miniere di ferro, produzione di ferro

Key words: Traversella, skarn, iron mine, iron production

INTRODUZIONE

Il circondario di Traversella (Fig. 1), comune situato nel Piemonte centro settentrionale a circa 60 km a nord di Torino, è stato, insieme al vicino comune di Brosso, una zona mineraria molto importante e un distretto fondamentale per l'estrazione dei minerali di ferro negli stati Sabaudi prima, nel Piemonte e nell'Italia post unione poi. Il giacimento minerario di Traversella si reputa sia stato oggetto di coltivazione a partire dal tardo medioevo, e il suo sfruttamento è continuato fino alla metà del XX secolo. È un tipico deposito di *skarn*, al contatto tra un corpo intrusivo dioritico e rocce incassanti metamorfiche preesistenti, e rappresenta l'unica mineralizzazione di tipo *skarn* interessata da attività mineraria nelle Alpi.

Il minerale di ferro estratto in loco era costituito principalmente da magnetite (Fe_3O_4). Solo dopo l'inizio del XX secolo, la coltivazione mineraria ha coinvolto anche pirite

(FeS_2) e calcopirite (CuFeS_2), usate principalmente per la produzione di acido solforico e, in subordine, rame. La miniera, dopo alcune interruzioni e riaperture, è stata ufficialmente chiusa nel 1971, a causa degli alti costi di estrazione e della concorrenza dei giacimenti esteri di minerale di ferro.

La presente nota vuole sottolineare la notevolissima importanza di questo sito minerario da un punto di vista scientifico ma anche storico e culturale. Il caso di Traversella può infatti evidenziare lo stretto legame tra lo sviluppo economico, culturale e sociologico di un territorio e le sue risorse naturali e caratteristiche fisiografiche. A tal proposito, le cave e le miniere rappresentano spesso l'anello di congiunzione tra territorio, economia, uomo e cultura. L'inizio o la fine di un'attività estrattiva ha infatti da sempre provocato profondi cambiamenti nelle tradizioni locali, segnando la storia e la cultura della popolazione stanziale e provocando, a volte, immigrazioni o, viceversa, abban-

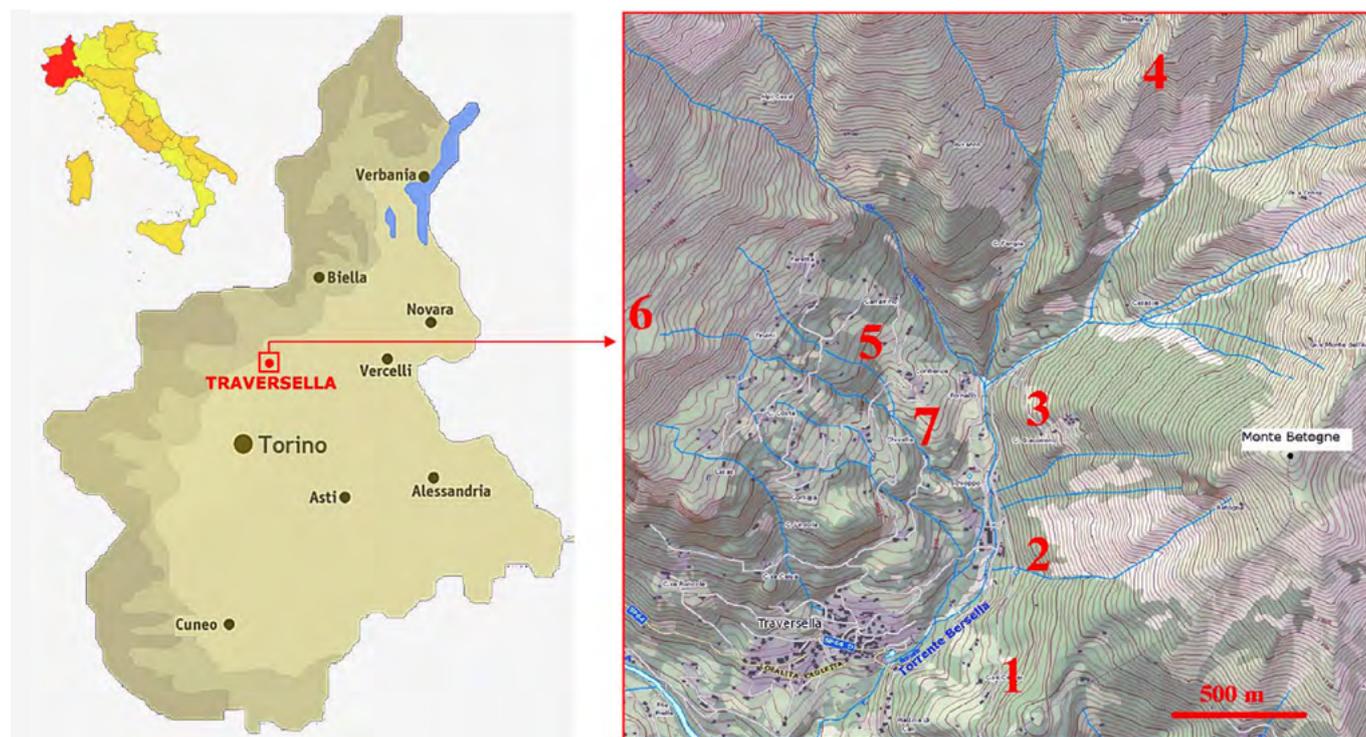


FIGURA 1. Localizzazione schematica delle miniere di Traversella. I numeri si riferiscono alle zone estrattive, sia antiche che moderne: 1. Cevreij; 2. Riondello; 3. Castiglione; 4. Montajù-Pian del Gallo; 5. Carrairino; 6. Balma Bianca; 7. Ferriere. La maggior parte dell'attività estrattiva moderna si concentrava nell'area 2, Riondello.

doni di interi paesi. Il lavoro minerario, col suo indotto industriale ed artigianale, ha infatti contribuito maggiormente allo sviluppo di intere aree, rappresentando una fonte di occupazione ed un incentivo a non abbandonare i luoghi natali, bensì trasformando in una ragione di vita ed in una fonte di guadagno le risorse naturali - anche relativamente povere - che il territorio stesso poteva offrire. In conseguenza di tutto ciò, l'attività mineraria ha dunque anche fortemente influenzato stili di vita, stili architettonici e trasformazioni del paesaggio ed è per tale ragione che ad essa viene dedicata una particolare attenzione, non solo nel settore dell'economia industriale, ma anche nell'ambito della valorizzazione didattico-turistica del territorio e della promozione della cultura.

Il presente lavoro è il risultato di un'attività di ricerca volta alla promozione geoturistica del territorio regionale, sviluppata nell'ambito del progetto multidisciplinare PROGEOPIEMONTE, nato nel 2012, in cui nove aree geotematiche strategiche sono state selezionate per essere indagate come rappresentanti della geodiversità della Regione Piemonte (Ferrero *et al.* 2012). Tra i nove geositi selezionati, è appunto presente l'area mineraria di Traversella.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GIACIMENTOLOGICO

Come mostrato nel riquadro di Fig. 2, dal punto di vista geologico le Alpi sono composte da diversi domini (Penninico, Sudalpino, Austroalpino ed Elvetico), ciascuno dei quali è composto da rocce che condividono un'area comune di origine prima della collisione alpina, cioè prima della collisione tra la placca Europea (a nord) e la placca Apula (a sud). Il Dominio Elvetico, ad esempio, include rocce appartenenti all'ex placca europea, mentre il Dominio Sudalpino è composto da rocce appartenenti alla placca Apula. Il Dominio Penninico include rocce correlate ad un antico bacino oceanico di età giurassica (Tetide) nonché al suo margine continentale settentrionale, fortemente metamorfosate e deformate durante la collisione alpina. Infine, il Dominio Austroalpino rappresenta una porzione del Dominio Sudalpino che fu traslato a nord sovrascorrendo il Dominio Penninico. I domini sono delimitati da piani di scorrimento e/o faglia, che sono mostrati come linee spesse nell'inserito. Il più importante di loro è il Lineamento Insubrico, composto da una serie di faglie che segnano il contatto tra Dominio Penninico e Sudalpino. Un certo numero di intrusioni si verificarono lungo il Lineamento Insubrico, durante un evento magmatico (Magmatismo Periadriatico) che ebbe luogo tra l'Eocene e l'Oligocene (ca. 43-29 milioni di anni fa; Fig. 2). Tale evento è sicuramente posteriore alle fasi principali di formazione della catena alpina: infatti i corpi magmatici non risentono del metamorfismo associato all'evento alpino.

Tra le intrusioni del Magmatismo Periadriatico si annovera anche il plutone di Traversella a cui sono associate le mineralizzazioni oggetto di coltivazione mineraria. Rispetto ad altre intrusioni periadriatiche, il plutone di Traversella è relativamente piccolo ed è composto da una roccia di età oligocenica (ca. 30 milioni anni) a grana da

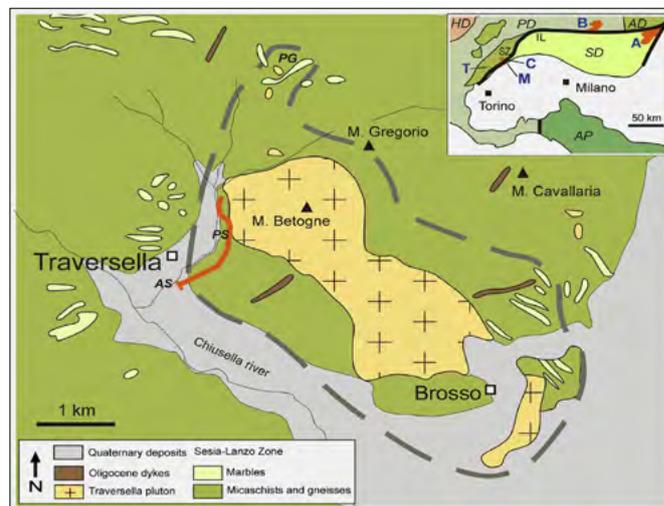


FIGURA 2. Schema geologico semplificato della zona di Traversella. PG: Pian del Gallo; PS: Pian degli Svedesi; AS: Galleria "Anglosarda" (è anche mostrata la proiezione approssimativa della galleria principale in superficie). Linea tratteggiata grigia: approssimativa estensione del contatto dell'aureola. La mappa è ridisegnata da Müller (1912), Mattiolo *et al.* (1959) e Zucchetti (1960). L'inserito mostra i principali domini delle Alpi: Elvetico (HD), Penninico (PD), Sudalpino (SD) e Austroalpino (AD), quest'ultimo comprende la Zona Sesia Lanzo (SZ). Principali corpi intrusivi relativi al Magmatismo Periadriatico: Adamello (A), Bregaglia (B), Cerro (C), Miagliano (M), Traversella (T). Linee spesse: i sistemi principali di faglie e sovrascorrimenti (IL: Lineamento Insubrico). AP: catena appenninica.

media a fine che varia in composizione da quarzodiorite a monzodiorite. Tale litotipo è ben osservabile nelle cave di Traversella e di Vico, dove viene coltivato come pietra ornamentale, ed in alcune gallerie del complesso minerario di Traversella (tra cui quella denominata "Anglosarda"). Tale corpo magmatico risulta intruso nella Zona Sesia Lanzo, un'unità tettonica appartenente al Dominio Austroalpino, composta prevalentemente da micascisti e gneiss, con corpi minori di metabasiti. Nell'area di Traversella si segnala inoltre la presenza, insieme a gneiss e micascisti, di lenti di rocce carbonatiche (principalmente marmi dolomiti). Avvicinandosi all'intrusione, tutte queste rocce sono interessate da un forte metamorfismo di contatto, il cui principale effetto macroscopico è la ricristallizzazione dei marmi e il cambiamento in colore dei micascisti, che diventano neri a causa dello sviluppo di abbondante biotite in sostituzione della fengite. Queste modificazioni possono essere viste anche in superficie, nella zona mineraria di Pian del Gallo, ma i cambiamenti nei micascisti avvicinandosi al plutone possono essere osservati al meglio lungo la galleria "Anglosarda", una delle meglio conservate della zona.

In particolare, nella letteratura geologica, i giacimenti minerari di Traversella sono classificati come depositi di tipo *skarn*: il termine *skarn*, coniato da Törnebohm, ingegnere minerario svedese (Törnebohm 1875), è diffuso in tutto il mondo, per indicare analoghi giacimenti che ancora oggi rappresentano un'importante fonte di metalli come W, Fe, Au, Cu, Zn, Mo, Sn (Meinert *et al.* 2005). Lo *skarn* è una roccia la cui formazione è legata a processi metasomatici, conseguenti all'interazione tra fluidi caldi (generalmente, anche se non sempre, provenienti da un corpo

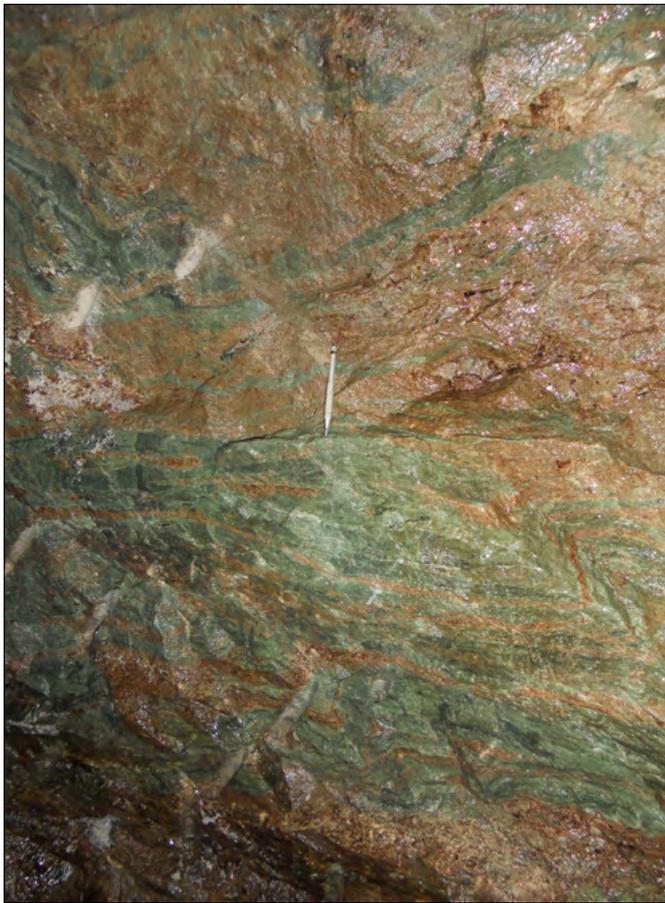


FIGURA 3. Tipico *skarn* formato da diopside, $\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$, (verde) e granato, $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$, (rosso-bruno).

intrusivo) e rocce incassanti preesistenti. Tale interazione provoca forti cambiamenti nella composizione chimica del litotipo preesistente, con frequente formazione di granato, pirosseno, biotite, anfiboli, fillosilicati e minerali utili di vari metalli. Come in altri giacimenti dello stesso tipo, a Traversella esistono due tipi di *skarn*. Un primo tipo, spesso descritto in letteratura come *skarn* primario o progrado, è dato dallo spettacolare sviluppo di rocce granoblastiche per lo più composte da diopside e granato (Fig. 3). Queste rocce sostituiscono completamente la roccia preesistente. Si trovano all'immediato contatto con le rocce dioritiche e si sono formate ad alta temperatura, come prodotto della reazione metasomatica tra fluidi magmatici connessi alla presenza del plutone, e marmi dolomitici, con aggiunta di silice e di vari elementi, che hanno permesso la formazione di diopside, granato e spesso anche forsterite. Si possono osservare affioramenti di *skarn* progradati nell'area di Pian del Gallo e Pian degli Svedesi, e lungo la galleria "Anglosarda" del complesso minerario. In particolare, le masse di magnetite in esso riconosciute, si presentano come corpi allineati lungo una direzione N-S, subparalleli al contatto intrusivo, e sono collocate principalmente nelle porzioni più esterne degli *skarn* progradati, in prossimità del contatto con le rocce incassanti (micascisti e marmi dolomitici).

Il secondo tipo di *skarn*, chiamato anche *skarn* secondario retrogrado, è rappresentato dallo sviluppo a temperatura più bassa di minerali che trasformano la paragenesi dello *skarn* primario. Lo *skarn* retrogrado è correlato alla circolazione dei fluidi che causano idratazione delle fasi

preesistenti, con formazione di una serie di diverse specie minerali, che si succedono nel tempo via via che le temperature decrescono: le osservazioni petrografiche mostrano, infatti, che una tale fase retrograda è polifasica (Marcelli 2016). I minerali tipici legati allo *skarn* retrogrado includono talco, anfiboli (principalmente tremolite e actinolite), carbonati e clorite; la scheelite probabilmente si è formata principalmente durante questa fase. I solfuri, che sono rari negli *skarn* progradati, diventano comuni, principalmente come pirrotite, pirite, calcopirite e arsenopirite. Diversi esempi di *skarn* retrogradati si possono osservare nel complesso minerario di Traversella, ad esempio, lungo la galleria "Anglosarda", vicino alla "Massa Bertolino" e lungo le gallerie nei livelli superiori della miniera (ad esempio, lungo il livello 826 "Mongenet").

La circolazione tardiva dei fluidi ha portato anche alla formazione di diversi tipi di vene e brecce idrotermali, la cui composizione è molto variabile: molti campioni pregiati da collezionismo come quelli di quarzo, diversi tipi di carbonati, pirite ma anche oro, galena e molte altre fasi sono legate a questa circolazione post-*skarn* lungo vene e fessure beanti che hanno permesso la cristallizzazione dei minerali con notevole perfezione d'abito e valore collezionistico.

Gli *skarn* non sono comuni e gli *skarn* mineralizzati sono ancora più rari: in particolare, Traversella rappresenta l'unico deposito *skarn* mineralizzato delle Alpi.

ATTIVITÀ MINERARIA: EVOLUZIONE STORICA

La storia di Traversella e dell'intera Val Chiusella è stata intensamente influenzata dall'abbondanza di minerali di ferro, ben nota in tutta Europa, e dal conseguente sviluppo di una importante attività mineraria il cui periodo di maggiore sviluppo industriale e commerciale risale ai secoli XVIII-XIX, quando le miniere raggiunsero, per un insieme di fattori tecnologici ed economici, il picco di attività. Ma la miniera di Traversella è stata un'importante fonte di sostentamento per tutte le valli Bersella e Chiusella anche precedentemente nel tardo medioevo e attestata sicuramente nel XV secolo. Infatti tracce evidenti dell'attività estrattiva risalgono al 1487, anno indicato in una prova documentale dei lavori di estrazione nella zona, all'interno di un reclamo dell'amministrazione sabauda dove vengono riportate testualmente queste frasi "*che gli inabitanti di Brosso e Traversella devono rimanere nel loro libero e pacifico possesso del minerale di ferro*". Esistono alcune indicazioni che sposterrebbero addirittura l'estrazione del ferro (magari saltuaria e molto limitata) in epoca romana; infatti recentemente, vicino al paese di Traversella in un cosiddetto *croso* (piccolo tunnel di esplorazione e estrazione del minerale di ferro), sono state ritrovate alcune monete di epoca imperiale (300 a.C. circa). Nel tardo medioevo, le varie sequenze di eventi, l'alternanza di guerre e periodi di pace nella zona all'epoca molto combattuta tra i Savoia e altre signorie, hanno sicuramente influito sull'attività mineraria che, a quel tempo, era occasionale e non primaria. L'estrazione era sovente limitata all'apertura da parte di singoli individui o di gruppi famigliari di piccoli cantieri (a fossa, o con gallerie, il più

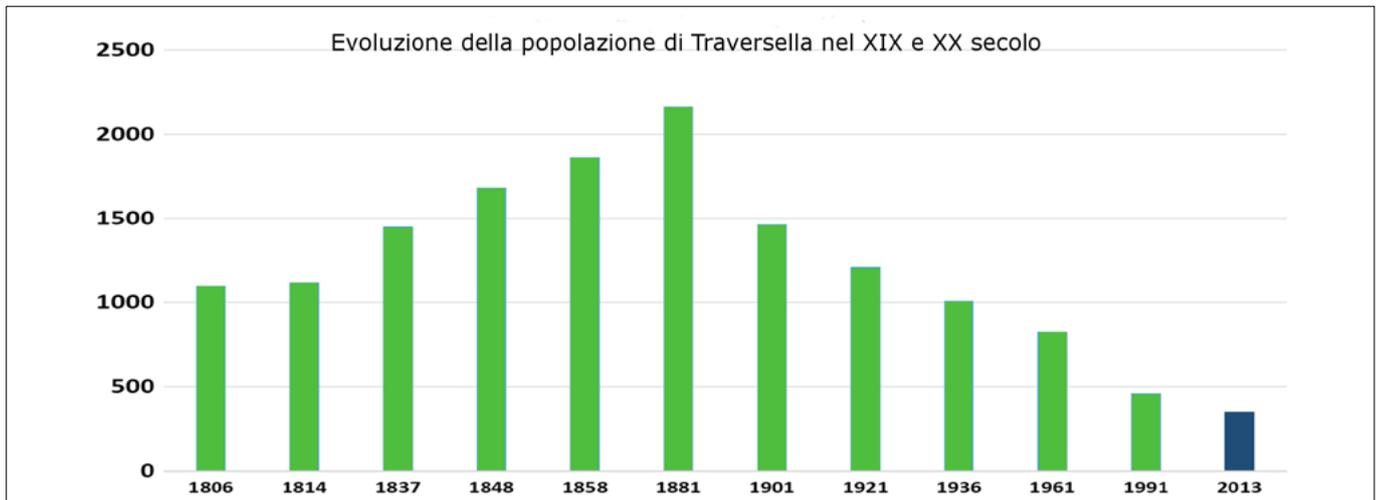


FIGURA 4. Durante il periodo caratterizzato dalla florida attività mineraria, la popolazione di Traversella raggiunge l'apice di oltre 2000 abitanti. Le miniere non sono mai state dichiarate esaurite, ma la concorrenza con l'estrazione oltre i confini nazionali e il ritardo dell'industria portarono alla loro ingloriosa chiusura. L'attuale popolazione di Traversella è di meno di 400 abitanti.

delle volte corte e non attrezzate) localizzati dove il minerale era chiaramente visibile in superficie, mentre l'attività principale della popolazione locale si basava su attività agro-pastorali e l'attività estrattiva si concentrava in inverno e tardo autunno, quando l'agricoltura era meno esigente. Probabilmente, a partire dal XVI secolo e con l'aumento di domanda di ferro per usi civili e militari, l'attività estrattiva andò incrementando, dapprima nel limitrofo comune di Brosso, collegata in modo migliore al territorio circostante, e successivamente nell'areale di Traversella. I confini delle singole proprietà erano incerti e le gallerie, scavate solitamente senza alcuna concordata progettualità, finivano spesso per intrecciarsi e interferire le une con le altre (in questo caso i due minatori avrebbero dovuto, secondo le regole dell'epoca, invertire la loro direzione di scavo). I tunnel venivano spesso direzionati sotto altri tunnel, quindi i crolli erano frequenti, ed era comune che l'acqua di una galleria, confluiva, anche solo per infiltrazione, in quelle adiacenti o sottostanti causando allagamenti incontrollati. Nel corso del XVIII secolo l'attività mineraria si intensificò, probabilmente grazie al ritrovamento (da parte di Bernardo Mutta, 1716) della principale vena mineraria nel sito di Pian del Gallo. L'estrazione divenne molto importante per la zona di Traversella, e nel 1723 i Savoia decisero di applicare una tassazione sulla quantità di minerale prodotto. Anche se molte difficoltà rimangono sulla determinazione della reale quantità di minerale scavato (scavi abusivi, frodi sulla pesatura, distrazione e contrabbando di minerali da parte dei locali che utilizzavano scomodi sentieri di montagna pur di non pagare le tasse), il reddito da tassa mineraria era così alto che, nel comune di Traversella fu abrogata ogni altra forma di tassazione, eliminando così la pressione fiscale sui cittadini locali. Il periodo 1732-1884 è noto per essere l'età dell'oro per Traversella (Berattino 1988, Gruppo Mineralogico Valchiusella *et al.* 2005): i lavori minerari diventano la principale attività contribuendo in modo massivo all'economia della valle, e mai dopo quel periodo l'estrazione del ferro ha raggiunto una tale importanza.

La presenza della miniera aveva portato alla concomitante crescita di una moltitudine di servizi e attività corre-

late, che hanno coinvolto diverse maestranze del territorio: trasporto minerario, guida di animali da soma, costruzione e gestione dei forni, fabbricazione di ferramenta metallica, taglio e sagomatura del legno per infrastrutture minerarie, percorsi e manutenzione delle strade, sorveglianza dei punti di controllo, gestione e manutenzione, attività di ricezione alberghiera e di produzione di cibo, e così via.

All'inizio del XIX secolo la popolazione residente era di circa 1000 individui, mentre alla fine dello stesso secolo la popolazione raggiunse un picco mai superato di quasi 2000 persone (oggi il comune comprende circa 400 individui) (Fig. 4). Alla fine dell'800 molti problemi interessarono la miniera di Traversella, con la sospensione dell'attività estrattiva e riduzione del minerale estratto. Nel 1883, l'ultimo proprietario dichiarò solo 17.000 "rubbi" di produzione (il "rubbo" era un'antica unità di misura piemontese corrispondente a circa 9,2 kg) e l'anno successivo decise di chiudere la miniera. Il ritardo nell'innovazione tecnologica, l'apertura in altri siti di miniere più ricche e con minori costi di estrazione, il sottosviluppo nella rete dei trasporti (si pensi che una strada carrozzabile collegante Traversella con il fondovalle fu costruita solo nella seconda metà dell'800) hanno contribuito ad accelerare l'ingloriosa conclusione dell'attività estrattiva di Traversella. All'inizio del XX secolo il sito minerario fu acquisito dalla Società Anonima delle Miniere di Traversella, e dopo vari passaggi di consegne, le miniere furono finalmente acquistate nel 1914 dalla FIAT. Nel XX secolo la miniera è formata da un enorme rete di gallerie, pozzi e cameroni (Fig. 5). L'attività mineraria è stata nuovamente interrotta negli anni della prima Guerra Mondiale, ma con l'arrivo del fascismo e dell'autarchia, la miniera fu riavviata e nel 1938 fu costruita una funivia per la consegna rapida del minerale alla vicina stazione ferroviaria di Montalto Dora. Con l'inizio della seconda Guerra Mondiale, ogni estrazione fu sospesa. Nell'immediato dopoguerra molti sforzi furono fatti per far ripartire la produzione, ma la scarsa qualità del minerale, l'alto costo di estrazione e la crescente concorrenza con altre risorse minerarie in tutto il mondo, portarono alla sua chiusura definitiva nel 1971 (Gruppo Mineralogico Valchiusella *et al.* 2005). Disponiamo (a causa del registro fiscale

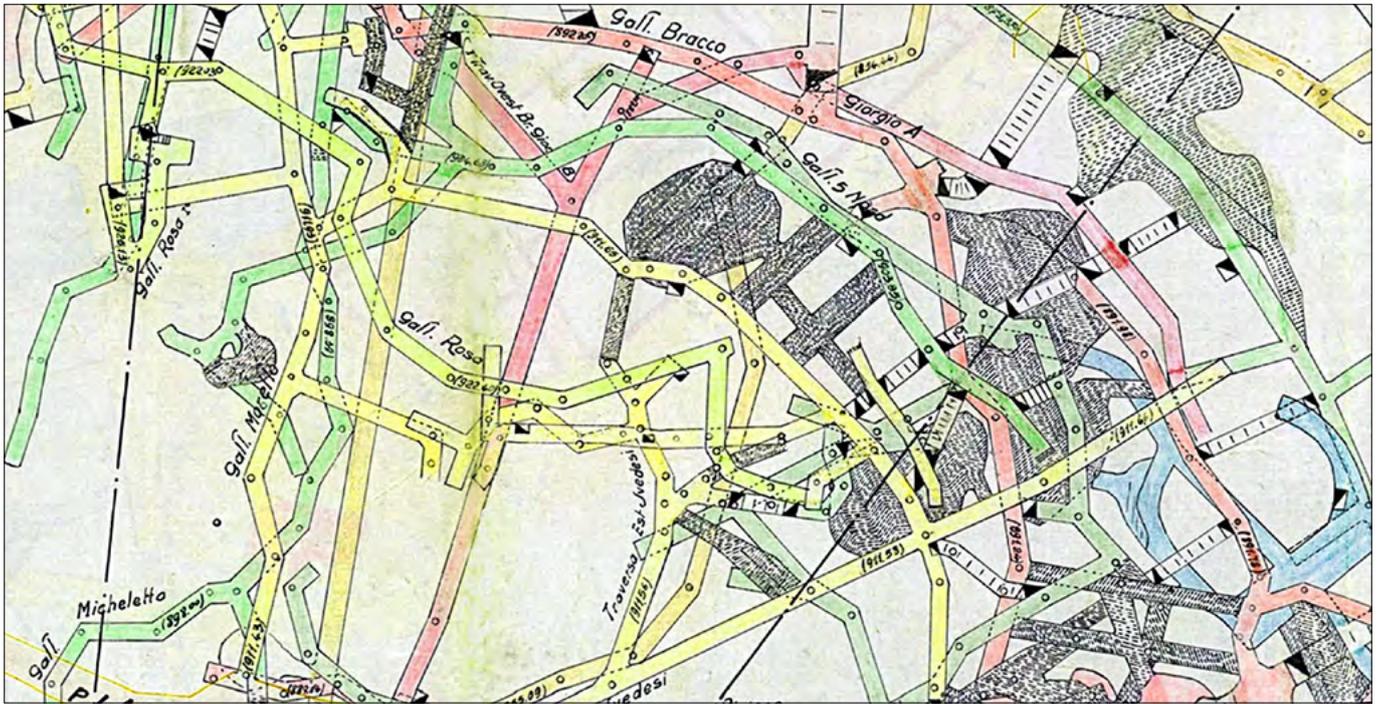


FIGURA 5. Parte di un disegno delle gallerie esistenti alla fine degli anni '50 (XX secolo): la miniera è un'immensa rete di gallerie, pozzi e cavità scavate nella montagna.

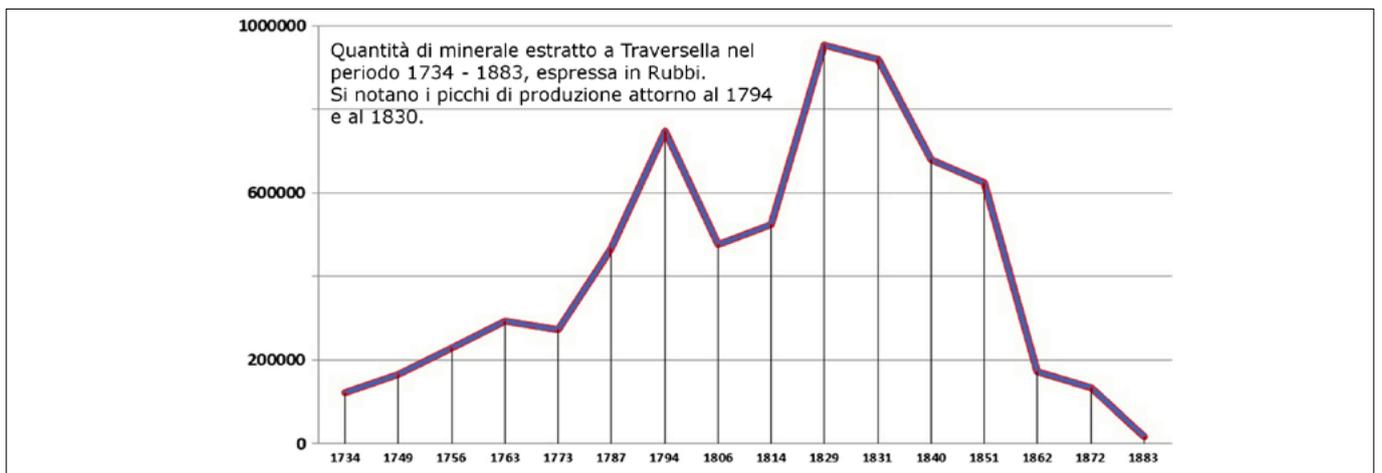


FIGURA 6. La quantità di minerale estratto è stata registrata e misurata in "rubbi", un'antica misura piemontese corrispondente a circa 9,2 kg. Dobbiamo l'abbondanza di informazioni sulla produzione, nel periodo specifico, alla tassazione imposta sul peso del minerale estratto, che per motivi fiscali veniva quindi riportata. Con alcune eccezioni, i registri sono stati conservati e hanno permesso di ricostruire l'andamento della produzione nel periodo specificato. La produzione è probabilmente sottovalutata, perché molti piccoli minatori e proprietari hanno cercato di nascondere parte della produzione, per evitare i balzelli sul prodotto.

imposto dai Savoia) di una documentazione esauriente della produzione dell'area mineraria durante il 1700 e 1800. Ad esempio, nel 1745 la produzione era di 100.000 rubbi, quindi la quantità totale di minerale era di circa 920 tonnellate. Nel 1750, la produzione salì a 190.000 rubbi, e nel 1794 si raggiunse l'importante produzione di 700.000 rubbi. Il massimo è stato ottenuto nel 1829, quando l'obiettivo di quasi un milione di rubbi è stato raggiunto. A partire da quell'epoca, un continuo e lento declino è stato osservato nell'area mineraria (Fig. 6). La quantità totale di minerale di ferro prodotto nel complesso di Traversella durante il periodo 1723-1884 è stato stimato in 342.000 tonnellate metriche (114.000 tonnellate di Fe, valutando una resa alla fusione di circa 1/3). In totale il ferro ricavato dal giacimento potrebbe essere considerato equivalente a circa 11 volte il ferro usato per costruire la Tour Eiffel (Fig. 7).

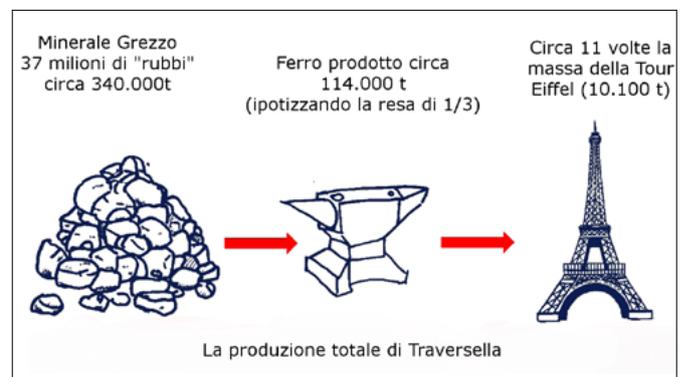


FIGURA 7. Quantità totale di minerale di ferro (37.100.000 rubbi, 342.100 tonnellate) prodotta nel complesso minerario di Traversella durante il periodo 1723-1884. Il ferro totale ricavato dal minerale grezzo (valutando una resa di 1/3) potrebbe essere considerato equivalente a 11 volte il ferro usato per la costruzione della Tour Eiffel.

INNOVAZIONI TECNOLOGICHE PIONIERISTICHE PER IL TRATTAMENTO DEI MINERALI

La ricchezza delle miniere, con lo sviluppo dell'attività estrattiva, ha condotto nel tempo anche alla ricerca di innovazioni tecnologiche che sono nate proprio nella zona. Tra di queste non possiamo non segnalare la cernitrice elettromagnetica, nata grazie all'intuizione di Quintino Sella, e i dispositivi per la flottazione a umido perfezionati dall'ingegner Alcide Froment.

Nel 1854, Quintino Sella (per conto del conte Riccardi di Netro, all'epoca proprietario di importanti concessioni) progettò e realizzò un magnete rotante separatore, per garantire una cernita più efficiente dei minerali. Basato sugli studi di Faraday (1845) sulle proprietà magnetiche dei minerali, consisteva in un cilindro con 48 magneti fissi, che permettevano di estrarre dal macinato le parti magnetiche del *tout-venant* (il materiale grezzo estratto dalla miniera) aumentando così di molto l'efficienza del recupero. Nel 1855 Quintino Sella ottenne il "Privilegio" per la separazione, grazie al separatore elettromagnetico, di minerali di rame contenenti magnetite; questo privilegio (precursore dei brevetti attuali) è durato 15 anni (Gilli 2007). Separatori magnetici sono stati poi installati a Traversella dalla società FIAT quasi un secolo dopo (metà del XX secolo). Questa invenzione, che è diventata poi famosa in tutto il mondo, è stata in seguito perfezionata e si è evoluta nei separatori magnetici attualmente utilizzati in tantissimi campi dell'industria, non solo mineraria; basti pensare al recupero di materiali ferrosi (o comunque con proprietà magnetiche) nel settore del riciclo industriale, della separazione dei rifiuti e così via.

La separatrice per flottazione venne invece installata quando, nel 1900, le miniere di Traversella passarono alla Società Anonima delle Miniere di Traversella, e si sentì l'esigenza di testare nuove modalità di trattamento per separare i minerali di rame (in genere solfuri) dalla magnetite e dalla ganga silicatica.

In particolare, l'ingegner Froment volle testare il processo inventato da Elmore (nel 1896), che si basava sull'affinità dei solfuri e gli idrocarburi. Si osservò così che, grazie all'idrorepellenza dei solfuri (bagnati con piccole quantità di idrocarburi), e facendo gorgogliare dei gas nella miscela acqua-olio-minerale in polvere, era possibile ottenere una schiuma che fungeva da veicolo di trasporto in superficie per i solfuri in grani. Questo processo è stato brevettato con il nome di flottazione; all'epoca il processo era ancora imperfetto, ma col tempo è stato affinato e ancora oggi è alla base di tantissimi impianti di purificazione del minerale diffusi in tutto il mondo. Purtroppo a Traversella, a causa delle cattive condizioni economiche in cui versava la società, il brevetto fu venduto nel 1904 per £ 225 alla Minerals Separations Ltd., che lo ha poi sfruttato a livello internazionale.

I MINERALI DI TRAVERSELLA

Traversella costituisce un *unicum* geologico di enorme valore scientifico e storico a livello internazionale, poiché oltre ad aver fornito ingenti quantità di minerali di ferro

e rame utilizzabili in campo industriale, ha anche fornito notevoli campioni di minerali di interesse scientifico e collezionistico. Infatti, le eccezionali condizioni di variabilità genetica, create dall'intrusione del plutone monzodioritico, hanno generato a Traversella una delle più alte concentrazioni di specie minerali in una estensione di pochi chilometri. Gli *skarn* mineralizzati hanno fornito ai collezionisti bellissimi cristalli di varie specie tra cui: magnetite, Fe_3O_4 , in grandi cristalli rombododecaedrici con le tipiche facce striate (fra i più grandi al mondo) (Fig. 8); quarzo, SiO_2 , incolore, o verde (prasio) o viola (ametista); dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, anch'essa fra i campioni di dimensioni eccezionali raramente ritrovati in altre località, in cristalli romboidrici incolori (Fig. 9) a volte parzialmente incrostati da ematite, Fe_2O_3 , lamellare nera; calcite, CaCO_3 , sia in abito prismatico che scalenoedrico; siderite, FeCO_3 , in cristalli sia romboidrici che lamellari (Fig. 10); "mesitina", (Mg,Fe)



FIGURA 8. Magnetite, Fe_3O_4 , in cristalli rombododecaedrici a facce striate, dimensioni totali cm 12. Il campione appartiene alle collezioni storiche dell'Università di Torino ed è attualmente conservato al Museo Regionale di Scienze Naturali di Torino col numero di catalogo MU 2939.



FIGURA 9. Dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, cristalli di eccezionali dimensioni, appartenente alle collezioni storiche dell'Università di Torino ed attualmente conservata al Museo Regionale di Scienze Naturali col numero di catalogo MU 8244.



FIGURA 10. Campione con romboedri pluricentimetrici di siderite, FeCO_3 , su quarzo, SiO_2 . Collezioni storiche dell'Università di Torino presso il Museo Regionale di Scienze Naturali: numero di catalogo MU 3445.



FIGURA 11. Cristallo isolato di scheelite, $\text{Ca}(\text{WO}_4)$. Il cristallo è alto 6 cm e presenta abito bipiramidale ben sviluppato. Collezioni storiche dell'Università di Torino, MU 9841.

CO_3 , una magnesite ricca di ferro, in cristalli lenticolari; scheelite, $\text{Ca}(\text{WO}_4)$, in cristalli bipiramidali in una matrice talcosa (Fig. 11); "fassaita", $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})(\text{Al},\text{Si})_2\text{O}_6$, una varietà di pirosseno. L'associazione particolarmente elegante di grandi e limpidi cristalli di quarzo, dolomite, calcite e/o "mesitina" è ben rappresentata in molti fra i più importanti musei scientifici in Italia, in Europa e nel mondo. Citiamo ad esempio Torino, Milano, Roma, Napoli, Bologna, Padova, Londra, Parigi, Praga, San Pietroburgo, Stoccolma, Vienna, e musei americani (Piccoli *et al.* 2007). Nel Museo dei Minerali e delle Attrezzature di Traversella sono esposti al pubblico oltre ottocento notevoli campioni dei minerali presenti nelle miniere, oltre ad attrezzatura varia proveniente dalle miniere stesse, e a strumenti e dispositivi originali. Recentemente Traversella è diventata Località Tipo (TL) di un anfibolo di colore verde scuro, la ferro-ferri-orneblenda, segnalata da Oberti e collaboratori nel 2016, di formula: $\text{Ca}_2(\text{Fe}^{2+}_4 \text{Fe}^{3+})(\text{AlSi}_7\text{O}_{22})(\text{OH})_2$.

IL MUSEO DEI MINERALI E DELLE ATTREZZATURE DI TRAVERSELLA

Il Museo dei Minerali e delle Attrezzature della miniera di Traversella (MMT), situato in parte degli edifici dedicati al tempo alla macinazione e al trattamento dei materiali estratti, è stato istituito nel 2007, grazie allo sforzo

di collezionisti e appassionati (il Gruppo Mineralogico Valchiusella, GMV) con l'aiuto del Comune. Esibisce una collezione di minerali di grande valore scientifico e una sezione molto interessante dedicata agli strumenti antichi e ai macchinari d'epoca (Fig. 12) (Gruppo Mineralogico Valchiusella *et al.* 2005). In alcuni pannelli esplicativi presenti nelle sale si descrivono le origini geologiche dei giacimenti minerari e dei minerali presenti, sia nella miniera sia nelle vicine cave di diorite. La sala principale, situata al piano terra (dedicata a Rodolfo Maffei, fondatore del GMV e principale iniziatore del Museo) mostra alcune carte geologiche del territorio, presenta mediante strumenti multimediali la storia e la natura delle miniere ed espone una raccolta con minerali estetici classici (quarzo, dolomite, calcite, pirite), alcuni campioni di minerali industriali (magnetite, scheelite, calcopirite) e alcune specie estremamente rare per la località (oro, sfalerite, apofillite, prehnite, ametista) finora scoperte nelle miniere di Traversella. La stanza principale, al piano superiore, espone la collezione mineralogica sistematica composta da oltre 300 esemplari di alto valore estetico, notevoli sia per la loro bellezza che per unicità (Fig. 13). L'ultima sala del Museo raccoglie le



FIGURA 12. Una delle sale del Museo dei Minerali e delle Attrezzature della miniera di Traversella, con esposti strumenti ed attrezzature d'epoca, ricavata in uno dei locali di servizio alla miniera stessa (cabine elettriche di trasformazione, tuttora conservate) (foto cortesia Museo).



FIGURA 13. La grande sala superiore del Museo dei Minerali e delle Attrezzature con la collezione sistematica ed estetica dei minerali di Traversella (foto cortesia Museo).

tipiche attrezzature e diversi strumenti storici impiegati dai minatori, alcuni lasciati in eredità proprio dai vecchi minatori (e molti recuperati all'interno delle gallerie e negli edifici adiacenti, e restaurati dal GMV). Le collezioni mineralogiche del Museo sono in continua crescita grazie all'attività dei soci che ancora operano, con cautela e sotto supervisione tecnica, all'interno delle miniere, cercando di mantenere in buone condizioni le gallerie e continuando a svolgere ricerche scientifiche, reperire campioni minerali interessanti e nuove specie (come cobaltite, eritrite, bismutinite, argento e tochilinite).

L'obiettivo del Museo è sensibilizzare i visitatori sulle risorse geologiche di Traversella, e promuovere e diffondere la conoscenza dei minerali scoperti nell'area. Il Museo offre al pubblico la possibilità di conoscere la storia delle miniere di Traversella, e allo stesso tempo, contribuisce alla loro conservazione.

CONCLUSIONI

L'area di Traversella rappresenta un *unicum* per le caratteristiche del giacimento minerario, per la sua mineralogia e per l'importanza storico culturale che ha rivestito a livello regionale e nazionale.

Numerose sono le realtà italiane e straniere che hanno saputo valorizzare le risorse del territorio per un suo rilancio economico e turistico ed una contestuale salvaguardia della propria identità socio-culturale. Ne sono un esempio il museo della miniera di Prali, i Geoparchi della Val di Cornia in Toscana, il Parco Geominerario della Sardegna, il Geoparco della miniera di Floristella in Sicilia, la miniera altoatesina di Monteneve, le Carrières de Lumières a Le Baux in Francia, il museo minerario di Bochum in Germania, il distretto Carbonifero inglese ecc.

L'area di Traversella, con le sue vestigia di attività minerarie presenti dal XVI secolo, gli elementi di archeologia industriale ancora conservati, le tracce di antichi scavi del '700 ed il groviglio di gallerie (in parte ancora in buone condizioni) presenta enormi potenzialità per un rilancio, anche turistico ed economico, del territorio e dell'intera vallata.

I cunicoli esistenti si prestano infatti alla definizione di percorsi di visita differenziati a seconda del tipo di utenza con diversi gradi di difficoltà a seconda che si tratti di famiglie, scolaresche e turisti occasionali oppure esperti ed appassionati del settore, tecnici, ricercatori, speleologi, ecc. A tal riguardo, potrebbero essere utilmente valorizzate alcune parti del vecchio complesso della galleria "Anglosarda", ancora molto ben conservata con i binari delle decauville e le opere idrauliche (Fig. 14), il settore in cui erano posizionati gli elevatori che mettevano in comunicazione i diversi livelli di coltivazione (Fig. 15) o ancora gli impressionanti vuoti di coltivazione (cameroni) in corrispondenza delle masse di magnetite estratta (Fig. 16). Sono inoltre presenti cunicoli di più difficile accesso, ma di elevato interesse scientifico e minerario, che potrebbero essere dedicati alle visite specialistiche e tecniche. Anche la parte esterna è ricca di notevoli punti di interesse come gli ingressi della vecchia galleria (Fig. 17), la riserverta per lo stoccaggio degli esplosivi, gli alloggi dedicati ai minatori e alcuni impianti di



FIGURA 14. Galleria "Anglosarda" con binari delle decauville e le opere idrauliche ben conservate.

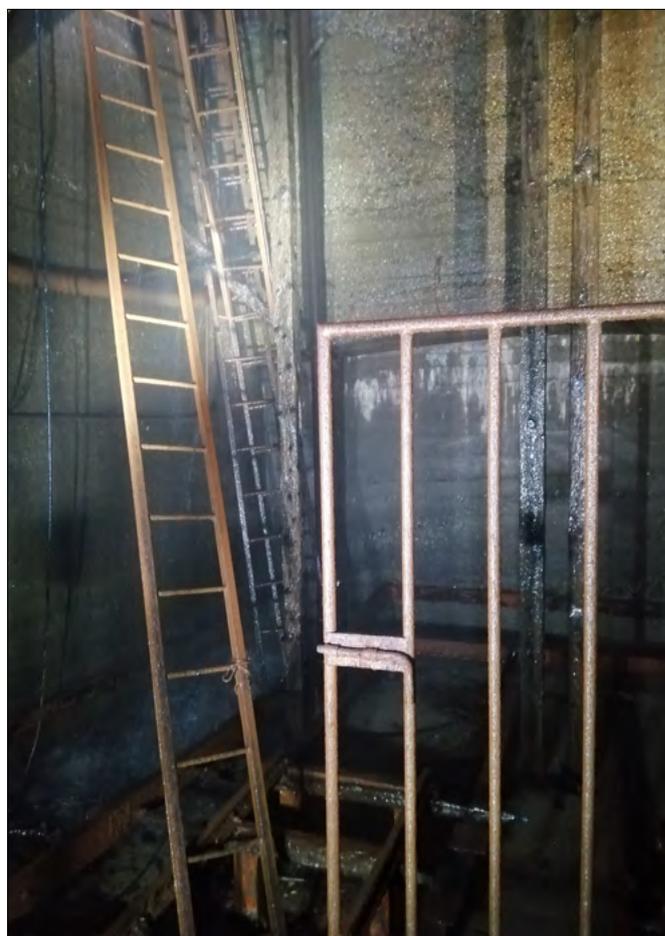


FIGURA 15. Parte del sistema di pozzi e elevatori che metteva in comunicazione i diversi livelli delle gallerie di Traversella.



FIGURA 16. Vuoti di coltivazione nella miniera.



FIGURA 17. Uno degli ingressi delle gallerie. Si noti la pregevole opera muraria in diorite locale, e la scritta FIAT (ultima proprietaria delle miniere) sulla chiave di volta dell'arco.



FIGURA 18. La rampa che trasportava il minerale negli impianti di macinazione (che, nella loro parte inferiore, ospitano ora il Museo dei Minerali e delle Attrezzature di Traversella).

trattamento con la rampa per il trasferimento del minerale agli impianti di macinazione (Fig. 18). La presenza di un museo attivo - gestito, al momento, da volontari - arricchisce ancora di più l'offerta culturale.

Un simile recupero didattico-turistico del patrimonio minerario di Traversella potrebbe pertanto utilmente integrare e completare ciò che la Val Chiusella già offre in termini di percorsi escursionistici, siti panoramici, palestre di roccia e peculiarità enogastronomiche, contribuendo a

promuoverne una maggior fruizione ed un rilancio economico per contrastare il processo di marginalizzazione, tipico di numerose aree montane, segnato da calo della popolazione, riduzione dell'occupazione e dell'utilizzo delle risorse territoriali locali.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano dedicare il presente contributo al collega prof. Piergiorgio Rossetti, coinvolto nella ricerca e prematuramente scomparso nel mese di agosto del 2019.

BIBLIOGRAFIA

- BERATTINO G. (1988). *Le miniere dei "Baduj" di Traversella*, Collana "Il Canavese ieri e oggi", Ivrea, 460 pp.
- FERRERO E., GIARDINO M., LOZAR F., GIORDANO E., BELLUSO E., PEROTTI L. (2012). *Geodiversity action plans for the enhancement of geoheritage in the Piemonte region (north-western Italy)*, Ann Geophys 55(3):487-495, <https://doi.org/10.4401/ag-5527>.
- GILLI M. (2007). *Innovazioni scientifiche a Traversella*. In: Traversella. Storie di polvere, di fatica e di cristalli, Lorenzo Mariano Gallo Editore, Collana "Natura Preziosa" 2, Museo Regionale di Scienze Naturali:22-24, ISBN: 88-86041-65-2.
- GRUPPO MINERALOGICO VALCHIUSELLA, PAGANO R., BARRESI A. (2005). *La miniera di Traversella: passato, presente e futuro*, GMV Gruppo Mineralogico Valchiusella, Rivista Mineralogica Italiana, Gruppo Mineralogico Lombardo, 29:8-26.
- Marcelli I. (2016) *Studio geologico strutturale, petrografico e metallogenico degli skarn di Traversella (Valchiusella, Alpi Occidentali)*, tesi di Laurea Magistrale inedita, Università di Torino, 247 pp.
- MATTIROLO E., NOVARESE V., FRANCHI S., STELLA A., COZZOLINO F., MORGANTI E., GERONZI A. (1959). Carta Geologica d'Italia, 1:100.000, Foglio 42, Ivrea, Servizio Geologico d'Italia.
- MEINERT M.D., DIPPLE G.M., NICOLESCU S. (2005). *World skarn deposits*, Economic Geology 100th Anniversary Volume: 299-336.
- MÜLLER F. (1912). *Die Erzlagerstätten von Traversella im Piedmont, Italien*, Zeitschrift für praktische Geologie, 20:209-240.
- OBERTI R., BOIOCCHI M., HAWTHORNE F.C., BALL N.A., CÁMARA F., PAGANO R., PAGANO A. (2016). *Ferro-ferri-hornblende from the Traversella Mine (Ivrea, Italy): occurrence, mineral description and crystal-chemistry*, Mineralogical Magazine, 80, 1233-1242.
- PICCOLI G.C., MALETTO G., BOSIO P., LOMBARDO B. (2007). *Minerali del Piemonte e della Valle d'Aosta*, Giancarlo Piccoli Editore, Associazione Amici del Museo F. Eusebio, Alba, 607 pp.
- TÖRNEBOHM A.E. (1875). *Geognostisk beskrifning öfver Persbergets Grufvefält*, Sveriges Geologiska Undersökning, P.A. Norstedt and Sons, Stockholm, 21 pp.
- ZUCCHETTI S. (1960). *Studio geo-minerario delle zone radioattive nel deposito di Traversella (Torino)*, L'Industria Mineraria, 11:887-909.

Le attività di educazione ambientale dell'ARPA Valle d'Aosta

The environmental education activities of ARPA Valle d'Aosta

SARA FAVRE

ARPA Valle d'Aosta

E-mail: s.favre@arpa.vda.it

Parole chiave: educazione ambientale, Agenzia per l'ambiente della Valle d'Aosta, collaborazione con le istituzioni scolastiche

Key words: environmental education, Environmental Agency of Valle d'Aosta, collaboration with educational institutions

L'ARPA VALLE D'AOSTA

L'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Valle d'Aosta (ARPA Valle d'Aosta), è un ente pubblico istituito con legge regionale 4 settembre 1995, n.41 con lo scopo di assicurare le funzioni in materia di prevenzione e tutela ambientale.

Con Legge regionale 29 marzo 2018 n.7 l'Amministrazione regionale ha provveduto a stabilire nuove disposizioni per la disciplina dell'ARPA Valle d'Aosta. La necessità di tale riforma, a più di vent'anni dall'istituzione dell'Agenzia, viene dalla profonda evoluzione della normativa ambientale nel ventennio trascorso, ed è direttamente collegata all'istituzione del Sistema nazionale a rete per la protezione dell'ambiente (SNPA), avvenuta con la Legge 28 giugno 2016 n.132, entrata in vigore il 14 gennaio 2017.

Il ruolo chiave delle Agenzie ambientali, quasi tutte nate negli anni novanta, è stato appunto rafforzato dalla legge di "Istituzione del Sistema nazionale a rete per la protezione dell'ambiente e disciplina dell'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale."

Questo provvedimento, oltre ad istituire il Sistema nazionale a rete per la protezione dell'ambiente (del quale fanno parte l'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA) e le agenzie regionali e delle province autonome di Trento e di Bolzano per la protezione dell'ambiente), ne definisce anche il ruolo. Il suo compito, infatti, consiste, da un lato, nel perseguimento degli obiettivi dello sviluppo sostenibile, della riduzione del consumo di suolo, della salvaguardia e della promozione della qualità dell'ambiente, dall'altro, nella piena realizzazione del principio «chi inquina paga», così da promuovere la tutela la salute umana, mediante lo svolgimento delle attività tecnico-scientifiche definite in legge.

LA COLLABORAZIONE CON LE ISTITUZIONI SCOLASTICHE

L'articolo 3, comma 1, lettera g) della suddetta legge definisce esplicitamente che, tra le funzioni del Sistema nazionale, e quindi di riflesso delle singole ARPA, deve esserci la collaborazione con istituzioni scolastiche e universitarie per la predisposizione e per l'attuazione di programmi di divulgazione e di educazione ambientale, nonché di formazione e di aggiornamento del personale di amministrazioni e di enti pubblici operanti nella materia ambientale.

Tali aspetti sono stati ripresi dalla nuova Legge regionale che, all'articolo 3 - Attività istituzionali, comma 1, lettera n) rimarca "la collaborazione con le istituzioni scolastiche e universitarie per la predisposizione e per l'attuazione di iniziative e programmi di formazione e di educazione ambientale".

In un'ottica di collaborazione attiva con le istituzioni scolastiche, di promozione e diffusione della conoscenza delle tematiche ambientali, oltretutto delle attività svolte dall'Agenzia nel contesto valdostano l'Agenzia ogni anno propone un proprio progetto formativo da inserire nei programmi scolastici delle diverse scuole valdostane.

La proposta mira a soddisfare le esigenze conoscitive degli interlocutori in età scolare, rivolgendosi alle istituzioni scolastiche di base (infanzia, primaria e secondaria di primo grado) e alle istituzioni scolastiche superiori.

PROGETTO DI EDUCAZIONE AMBIENTALE RIVOLTO ALLE ISTITUZIONI PRESCOLASTICHE, SCOLASTICHE PRIMARIE E SECONDARIE DI PRIMO GRADO

Le proposte formative offerte vertono sull'approfondimento di tematiche semplici, maggiormente concrete e facilmente riconducibili alla vita delle bambine e dei bambini in fascia d'età 3-6 anni e 6-13 anni.

Nello specifico le tematiche sono le seguenti:

- Rifiuti (Io differenzio e poi...) – attività rivolta alle classi della scuola dell'infanzia e alle classi prime e seconde della scuola primaria
- Rumore (Cammino e ascolto) - attività rivolta alle classi quarte e quinte della scuola primaria e alle classi della scuola secondaria di primo grado
- Aria (Noi e l'aria) – attività rivolta alle classi quarte e quinte della scuola primaria e alle classi della scuola secondaria di primo grado
- Acque superficiali (Non ci sono solo trote nei nostri torrenti...) - attività rivolta alle classi della scuola primaria e alle classi della scuola secondaria di primo grado
- Acque sotterranee (L'acqua sotto i nostri piedi...) - attività rivolta alle classi della scuola primaria e alle classi della scuola secondaria di primo grado

Tutte queste attività hanno la finalità di approfondire concetti conosciuti prevalentemente da un punto di vista



FIGURA 1. Attività sul campo “Non ci sono solo trote nei nostri torrenti...” rivolta alle classi quarte e quinte della scuola primaria e alle classi della scuola secondaria di primo grado

teorico, integrandoli con la pratica sul campo (Fig. 1) e osservazioni che possono essere compiute direttamente dalle bambine e dai bambini, che hanno così anche l'occasione di applicarsi come piccoli scienziati e ricercatori, giocando e divertendosi.

Il messaggio che si vuole trasmettere, in termini di sensibilizzazione e attenzione nei confronti dei genitori e degli adulti in generale, nel momento in cui viene veicolato dai piccoli interlocutori risulta essere maggiormente efficace: il loro livello di attenzione e curiosità, correttamente stimolato, porta risultati stupefacenti, mettendoli nelle condizioni di essere i protagonisti di processi di cambiamento di mentalità all'interno delle mura familiari.

PROGETTO DI EDUCAZIONE AMBIENTALE RIVOLTO ALLE ISTITUZIONI SCOLASTICHE SECONDARIE

ARPA Valle d'Aosta opera in un contesto che necessariamente deve tenere conto delle dinamiche fra Ambiente, inteso come interconnessione naturale fra le cose, e Territorio, cioè lo spazio nel quale si esplicita la presenza e l'attività umana.

Nell'approfondire le attività svolte nel percorso formativo, è necessario tenere conto del fatto che il Territorio ha voci multiformi, ha sue regole, afferma – esprime/impone – valori. È generatore di istanze a diversi livelli e secondo orientamenti differenti. L'Ambiente si esprime attraverso

le sue proprie dinamiche e impone le condizioni che, variamente conosciute, riconosciute o considerate, hanno comunque sempre l'ultima parola.

Con il progetto formativo proposto, si dà quindi corso ad una presentazione organica delle attività svolte in Valle d'Aosta per la tutela dell'ambiente nelle sue diverse articolazioni: monitoraggio della qualità dell'aria e dell'atmosfera, delle acque superficiali e sotterranee, dell'esposizioni a campi elettromagnetici, rumore e radiazioni e dell'effetto dei cambiamenti climatici sul territorio della regione, energia.

La finalità della proposta scolastica, offerta dall'Agenzia, è quella di dare concretezza e declinare a scala regionale i grandi temi ambientali legati a fonti, stato ed impatti delle diverse forme di inquinamento chimico e fisico ed introdurre le risposte che vengono date, illustrando concretamente in quale modo nostra regione vengono affrontati i temi citati.

I contenuti sono i seguenti:

- La qualità dell'aria
- La radioattività naturale ed artificiale
- I campi elettromagnetici: antenne ed elettrodotti
- Qualità delle acque superficiali
- Qualità delle acque sotterranee
- La presenza di amianto
- Energia e ambiente
- I cambiamenti climatici e gli effetti sul territorio di montagna

I progetti formativi strutturati per le tematiche sopra richiamate sono pensati per fornire un quadro quanto più completo su argomenti molto attuali e anche, in alcuni casi, complessi.

Per questo motivo si è deciso di formulare una proposta didattica che possa essere utilizzata dalle istituzioni scolastiche secondo diverse modalità, che si adattino il più possibile alle differenti esigenze dettate proprio dalla tipologia di istituzione, dalle materie affrontate, dai programmi scolastici e altro ancora:

- Progetto completo: la proposta didattica "Dall'ambiente al territorio: analisi ambientali e ricerche innovative nell'esperienza dell'Arpa VdA" viene sviluppata nella sua interezza, affrontando, nel corso di incontri programmati durante l'anno scolastico, ogni singola tematica secondo le diverse modalità indicate per ogni argomento;
- Progetto parziale: viene data facoltà all'istituzione scolastica di scegliere solo alcune tematiche ambientali tra quelle proposte, affrontandole in maniera organica, sempre tenendo conto di quanto previsto per ogni singolo argomento;
- Scheda singola: l'istituzione scolastica può decidere di approfondire una sola tematica tra quelle proposte.

CONCLUSIONI

Poiché ARPA Valle d'Aosta si fa promotrice di una proposta didattica che vuole essere di informazione/formazione ambientale, gli attori coinvolti possono essere sia i docenti sia gli alunni.

Ciò significa che l'Agenzia è disponibile a mettere a disposizione degli insegnanti gli strumenti e le conoscenze

necessarie a trattare autonomamente in classe i singoli temi ambientali (percorso informativo/formativo rivolto al corpo docente); i tecnici di ARPA sono altresì disponibili a incontrare direttamente gli alunni proponendo "lezioni" integrative al programma scolastico (percorso informativo/formativo rivolto agli studenti).

Lavorare con quelle che saranno le generazioni del futuro, ed interfacciarsi con loro, con la loro curiosità e la loro voglia di "sapere", è sempre uno stimolo arricchente reciproco, perché il livello delle loro conoscenze, ma anche della loro consapevolezza in merito alla complessità dei temi ambientali è elevatissimo (Fig. 2).

Si segnala infine "Alla scoperta di ARPA", un ciclo di 5 *webinar* tenuti nel periodo 13 ottobre - 10 novembre 2021 per far conoscere al pubblico i tanti settori e ambiti nei quali lavora l'ARPA Valle d'Aosta:

1. *Rumore, campi elettromagnetici, radioattività ambientale: onde e particelle monitorate da ARPA*
2. *Viaggio dietro le quinte: il ruolo del laboratorio di ARPA nella produzione di dati*
3. *Acqua: la nostra risorsa più preziosa che ARPA studia e monitora*
4. *Rumore, campi elettromagnetici, radioattività ambientale: onde e particelle monitorate da ARPA*
5. *L'acqua sotto i nostri piedi: monitoraggio delle falde e dei siti contaminati*

Il link per poterli seguire nuovamente è il seguente:

<https://vimeo.com/showcase/9052646>

Verrà organizzato un secondo ciclo di *webinar* a fine anno 2022.



FIGURA 2. Attività sul campo rivolta alle classi delle scuole secondarie.

Alcuni problemi aperti sull'analisi del rischio di caduta massi: il caso di Rovenaud (AO)

Some open issues on rockfall risk analysis: the Rovenaud (AO) case study

ANNA MARIA FERRERO¹, MARIA RITA MIGLIAZZA², GESSICA UMILI¹

¹Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino

²Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

E-mail: anna.ferrero@unito.it

Parole chiave: caduta massi, rischio, pericolosità, incertezza

Key words: rockfall, risk, hazard, uncertainty

ABSTRACT

Il rischio è un aspetto imprescindibile di ogni settore della progettazione ingegneristica ed è una conseguenza delle incertezze connesse con i confini cognitivi (incertezze epistemiche) e con la naturale variabilità delle grandezze rilevanti (variabilità aleatoria) in un determinato processo. Nell'ambito della geotecnica, e delle rocce in particolare, le incertezze sono legate a diversi aspetti quali la determinazione delle caratteristiche geometriche e meccaniche dell'ammasso roccioso ma anche al modello utilizzato per la schematizzazione del problema. Mentre le incertezze dovute a lacune cognitive potrebbero essere colmate migliorando la qualità dei codici numerici e degli strumenti di misura, nulla può essere fatto per rimuovere la casualità delle variabili naturali, se non definirne la variabilità con approcci stocastici. Le analisi probabilistiche rappresentano uno strumento utile per eseguire analisi parametriche e per identificare gli aspetti più significativi di un dato fenomeno e possono essere utilizzate per una razionale quantificazione e mitigazione del rischio.

Il presente lavoro descrive i problemi e le tecniche più affidabili utilizzate per quantificare le incertezze che caratterizzano i parametri coinvolti nella valutazione della pericolosità dei pendii in roccia, attraverso l'analisi di un caso studio in cui si verificano periodicamente fenomeni di caduta massi.

1. INTRODUZIONE

Secondo le definizioni più recenti, accettate a livello internazionale (Fell *et al.* 2005, 2008), la pericolosità da frana deve essere caratterizzata in base alla frequenza (o probabilità) di accadimento del processo e alla sua probabilità di impatto in un determinato punto del pendio. Per il caso della caduta massi, ciò significa determinare la frequenza con cui i blocchi si staccano da falesie potenzialmente instabili, quale probabilità hanno i blocchi di raggiungere un punto specifico sulla superficie del pendio e l'energia cinetica che caratterizza le loro traiettorie.

Il suddetto processo di analisi è dominato dall'incertezza, riguardante la caratterizzazione del sito, la valutazione delle proprietà dei materiali, la scelta dei modelli

costitutivi, matematici e numerici e le analisi di stabilità statica e dinamica (van Westen *et al.* 2008). Inoltre, sono da considerare come variabili aggiuntive il fattore tempo e la dimensione spaziale dell'area che può essere coinvolta in caso di evoluzione dinamica di un processo di instabilità.

Il progettista deve rispondere a domande del tipo: cosa succede quando il pendio subisce uno sbalzo di temperatura, di pressione dell'acqua o quando è soggetto a un terremoto? Cadranno alcuni blocchi di roccia, quali sono i loro volumi e il loro numero? Quali saranno i loro percorsi e le loro energie?

Se non è possibile rispondere a queste domande, il futuro non può essere previsto con certezza e il progetto sarà necessariamente soggetto a un determinato livello di incertezza e quindi di rischio (Brown 2012). Poiché non è possibile definire deterministicamente il problema, qualsiasi progetto presenta un certo livello di incertezza e quindi di rischio che il progettista deve valutare e quantificare.

In questo contesto devono essere effettuate analisi di pericolosità e rischio da frana, ed i risultati possono essere espressi, sia quantitativamente (Rouiller *et al.* 1998; Guzzetti *et al.* 2002; Crosta e Agliardi 2003; Jaboyedoff *et al.* 2005; Lan *et al.* 2007) che in maniera semiquantitativa o qualitativa (Mazzoccola e Hudson 1996; Bunce *et al.* 1997; Molk *et al.* 2008). I metodi quantitativi utilizzano valori numerici o intervalli di valori ed esprimono il rischio come probabilità di un dato livello di perdita e le relative incertezze (Corominas *et al.* 2014). Questi metodi possono essere deterministici o probabilistici (tenendo conto dell'effetto di diversi possibili scenari) (van Westen 2004).

I metodi qualitativi caratterizzano il rischio in termini descrittivi: livello alto, moderato o basso (van Westen 2004; Lateltin *et al.* 2005). Vengono utilizzati quando il pericolo non può essere espresso in termini quantitativi (ad esempio, le informazioni sul pericolo non consentono di esprimere la probabilità di accadimento, o non è possibile stimare la magnitudo), e/o quando la vulnerabilità non può essere espressa quantitativamente.

Le tecniche semiquantitative esprimono il rischio in termini di indici di rischio: si tratta di valori numerici, spesso compresi tra 0 e 1, e non hanno un significato diretto di

perdite attese, ma sono solo indicazioni relative di rischio (Budetta e Nappi 2013).

Tuttavia, le stime quantitative non sono necessariamente più accurate delle stime qualitative (Corominas *et al.* 2014) poiché l'accuratezza di una stima non dipende dall'uso dei numeri; piuttosto, dalla corretta considerazione delle componenti dell'analisi della pericolosità da frana e del rischio da frana e dalla disponibilità, qualità e affidabilità dei dati richiesti. Di conseguenza, la decisione se effettuare e riassumere i risultati di un'analisi di frana quantitativamente o qualitativamente dipende principalmente dalla qualità e dalla quantità dei dati disponibili.

In generale, per una vasta area in cui la qualità e la quantità dei dati disponibili sono troppo scarse per l'analisi quantitativa, una valutazione qualitativa del rischio può essere più applicabile, mentre per uno specifico pendio oggetto di analisi convenzionali dell'equilibrio limite è necessaria una dettagliata valutazione quantitativa del rischio.

Questo articolo si concentra sull'approccio quantitativo applicato alla caduta massi: si è scelto di effettuare un'analisi probabilistica su un caso localizzato a Rovenaud (Regione Valle d'Aosta), analizzando le cause delle incertezze geometriche e fisico-meccaniche e suggerendo alcuni possibili strumenti per la loro riduzione.

In particolare, vengono descritte alcune soluzioni per ottenere dati di maggiore qualità, al fine di trattarli con approcci quantitativi attraverso analisi statistiche e analisi spazio-temporali avanzate dei fenomeni di instabilità. Infine, il lavoro si propone di mostrare come il miglioramento della quantità e della qualità dei dati e dei modelli rappresenti il primo passo per un'accurata analisi della pericolosità.

2. INCERTEZZA E ANALISI DEI RISCHI

La pericolosità è espressa come la probabilità che un particolare fenomeno (la caduta massi, in questo caso) si verifichi con una determinata intensità in un determinato periodo di tempo. Intensità e frequenza sono quindi parametri chiave per la valutazione del rischio di caduta massi (Corominas *et al.* 2003; Jaboyedoff *et al.* 2005). Tuttavia, la zonizzazione del pericolo di caduta massi viene per lo più eseguita utilizzando una scala di rischio relativo (van Westen 2004), che non tiene conto esplicitamente del tempo. Per affinare la pericolosità da caduta massi è obbligatorio utilizzare la frequenza degli eventi, o almeno una stima qualitativa. Passando all'analisi della relazione tra pericolosità e rischio, è bene specificare che l'analisi del rischio mira a determinare la probabilità che un determinato pericolo causi un danno, e indaga la relazione tra la frequenza degli eventi dannosi e l'intensità delle loro conseguenze. La vulnerabilità cerca di stabilire soglie per il rischio individuale (cioè il rischio imposto dal pericolo a qualsiasi individuo identificato) e il rischio sociale (cioè il rischio imposto dal pericolo sulla società) (Guzzetti 2004).

2.1 Fonti di incertezza

La natura delle incertezze nella meccanica delle rocce è ampiamente discussa in letteratura (ad esempio, Wenner e

Harrison 1996; Guo e Du 2007; Dubois e Guyonnet 2011; Bedi e Harrison 2013). Einstein e Baecher (1983), ad esempio, hanno classificato le fonti di incertezza come:

- variabilità spaziale e temporale;
- errori di misura (sistematici o casuali);
- incertezza del modello;
- incertezza dei carichi agenti.

Ogni diversa fonte di incertezza deve essere attentamente analizzata e valutata matematicamente, tenendo conto anzitutto che le incertezze possono essere epistemiche, cioè dovute ad una mancanza di conoscenza, o aleatorie, cioè legate alla loro intrinseca variabilità (Baecher e Christian 2003).

Si considerino ad esempio le incertezze relative all'orientazione e alla spaziatura delle discontinuità. L'interpretazione statistica delle misure porta alla quantificazione dell'errore di campionamento, di fondamentale importanza dato che tali caratteristiche geometriche influiscono sui meccanismi di innesco e movimento dei blocchi.

2.2 Analisi probabilistiche

Una delle sfide più difficili nella valutazione del rischio di caduta massi è la stima della ricorrenza temporale degli eventi e della magnitudo associata (Corominas e Moya 2008).

Un'altra fonte di incertezza è legata alla dimensione e alla forma dei blocchi instabili, che influenzano significativamente le traiettorie lungo il pendio e il run-out. Oltre alle incertezze che coinvolgono le caratteristiche dell'area sorgente della caduta massi, ulteriori incertezze influenzano le successive fasi di calcolo nella produzione di una mappa di pericolosità, vale a dire la propagazione dei blocchi, le tecniche di mappatura dei pericoli e come unire tutti i dati disponibili, ad esempio, in un ambiente GIS (van Westen *et al.* 1997; Corominas *et al.* 2003). Per quanto riguarda la propagazione della caduta massi, risultano molto utili i codici di simulazione della traiettoria (Bunce *et al.* 1997; Guzzetti *et al.* 2002).

Le analisi probabilistiche forniscono uno strumento oggettivo per quantificare e modellare la variabilità e l'incertezza riguardanti i parametri geotecnici e geologici coinvolti nella stabilità dei pendii rocciosi. Ad esempio, supponendo che sia nota la spaziatura delle discontinuità all'interno di un ammasso roccioso, è utile definire la variabilità della dimensione dei blocchi che possono distaccarsi, al fine di valutare le energie in gioco e, di conseguenza, progettare misure di protezione.

Nelle sezioni seguenti viene mostrato un esempio di analisi statistica applicata alle diverse fasi di caduta massi: In particolare, per il caso di studio, viene fornita la relazione tra il volume di caduta massi e la sua probabilità di rottura, basata su rilievi in situ.

Nell'ultima sezione, i risultati, ottenuti dalla caratterizzazione dell'ammasso roccioso, in termini di distribuzione di frequenza del volume dei blocchi distaccabili, sono stati utilizzati come dati di input per studiare la fase di propagazione della caduta massi. In questo caso è stato utilizzato il codice CRSP (Colorado Rockfall Simulation Program)

(Pfeiffer e Bowen 1989) che si basa su un approccio statistico per analizzare come la forma e la dimensione dei blocchi possono influenzare i risultati e quindi il progetto di protezione.

3. VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI FENOMENI DI CADUTA MASSI A ROVENAUD

Negli ultimi 50 anni, l'International Society for Rock Mechanics (ISRM) ha compiuto sforzi significativi per la comprensione del pericolo dovuto a fenomeni di instabilità delle rocce (Brown 2012). Di conseguenza, oggi si sa molto di più sulle fasi di innesco e propagazione degli eventi di instabilità. Tuttavia, altri aspetti, come la probabilità spazio-temporale di tali eventi, sono scarsamente noti. Il meccanismo di innesco prevede lo studio della cinematica dei blocchi e la conseguente analisi dell'equilibrio di eventuali blocchi mobilitabili, mentre la fase di propagazione prevede lo studio della dinamica dei blocchi lungo il pendio una volta distaccatisi. Le frane da crollo sono fenomeni caratterizzati da elevata mobilità; di conseguenza è necessario eseguire un'analisi di run-out che includa non solo le zone di origine, ma l'intera area che può essere potenzialmente coinvolta. La presenza di blocchi alla base del pendio è testimonianza di eventi accaduti in passato; questi blocchi forniscono informazioni significative sul fenomeno sia in termini di distribuzione del volume sia delle loro traiettorie. Al fine di valutare la pericolosità da caduta massi, vengono generalmente eseguite le seguenti fasi:

- individuazione della possibile area di innesco,
- determinazione della distribuzione di probabilità dei volumi potenzialmente instabili (magnitudo dell'evento),
- determinazione della frequenza dei fenomeni di instabilità,
- calcolo delle traiettorie per la determinazione delle distanze e delle energie cinetiche coinvolte.

Di seguito, attraverso la descrizione del caso studio, verrà illustrato il processo di rilevamento e calcolo necessario per valutare la pericolosità associata ad un pendio roccioso.

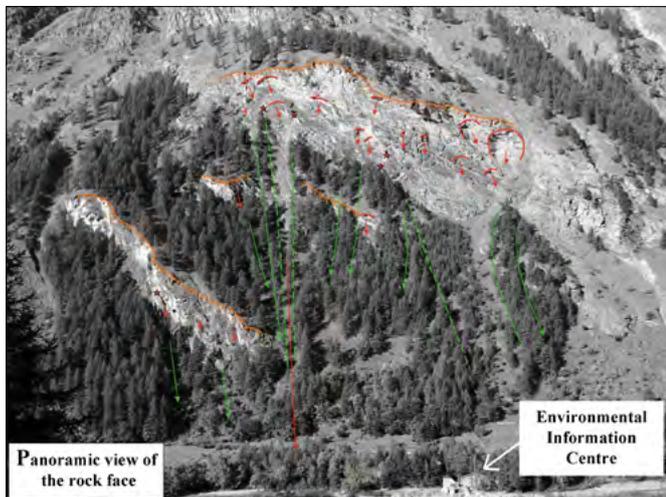


FIGURA 1. Vista panoramica della parete rocciosa: sono mostrate le aree sorgente (arancione), le aree di evidente distacco dei blocchi (rosso) e le traiettorie (verde).

3.1 Il caso di studio di Rovenaud

La figura 1 presenta le zone di distacco dei blocchi di roccia individuabili lungo una parete rocciosa situata a Rovenaud, nel Parco Nazionale del Gran Paradiso (Valsavaranche, Aosta) e che sovrasta un edificio che ospita il "Centro Informazione Ambientale" del parco. A causa della riattivazione dei fenomeni di caduta massi da questa parete rocciosa, si è reso necessario uno studio finalizzato alla messa in sicurezza del sito. Il versante roccioso è costituito da scisti e micascisti calcarei, appartenenti all'unità di Rovenaud, a contatto con gneiss dell'unità litologica del Grand Nomenon. Una sezione geologica della Valsavarenche che passa appena a sud del Centro di Informazione Ambientale è mostrata in Figura 2. La base del pendio è caratterizzata da una pendenza media di 40 gradi e dalla presenza di detriti vegetati e zone terrazzate costituite da muretti a secco; a circa 300 m sopra la base del pendio, si può osservare che la parete rocciosa è larga 400 m e alta da 70 a 100 m, con una pendenza tra 75° e 85°. Attraverso l'acquisizione di immagini digitali terrestri, è stato realizzato un Modello Digitale di Superficie (DSM) del pendio al fine di eseguire sia un rilievo di discontinuità senza contatto diretto con la parete, sia simulazioni di caduta massi (Ferrero *et al* 2016). In questa zona si osservano distacchi di blocchi isolati e accumuli di blocchi alla base dei versanti.

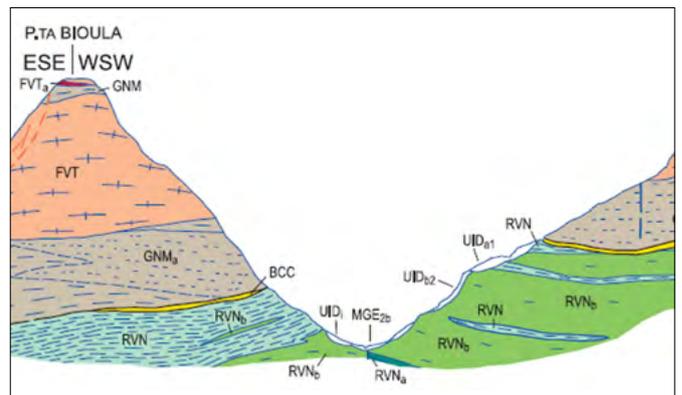


FIGURA 2. Sezione geologica della Valsavarenche, poco a sud del Centro di Informazione Ambientale (Polino *et al.*: Note esplicative della Carta Geologica Italiana scala 1: 50.000, Foglio 090 Aosta).

3.2 Caratterizzazione e determinazione in loco di blocchi potenzialmente instabili

Come si può notare osservando in dettaglio il fronte roccioso (Fig. 3), i blocchi rocciosi hanno origine dall'intersezione tra le discontinuità preesistenti e ubique all'interno dell'ammasso roccioso. Il rilievo geostrutturale è stato eseguito attraverso l'acquisizione di immagini digitali terrestri e la ricostruzione fotogrammetrica del DSM. L'uso di un software sviluppato specificamente per misurare l'orientazione dei piani (Rockscan, Ferrero *et al*, 2009) ha permesso di raccogliere 237 dati di alta qualità (Fig. 4). Il metodo semi-automatico di estrazione delle tracce proposto da Umili *et al.* (2013) è stato applicato al DSM ottenuto ed è stato ottenuto un database composto da 10'720 tracce, che vanno da 0.3 m a circa 50 m, associate automaticamente ai tre sistemi di discontinuità (Fig. 5). La Figura 6 mostra che nel caso analizzato la distribuzione esponenziale ne-

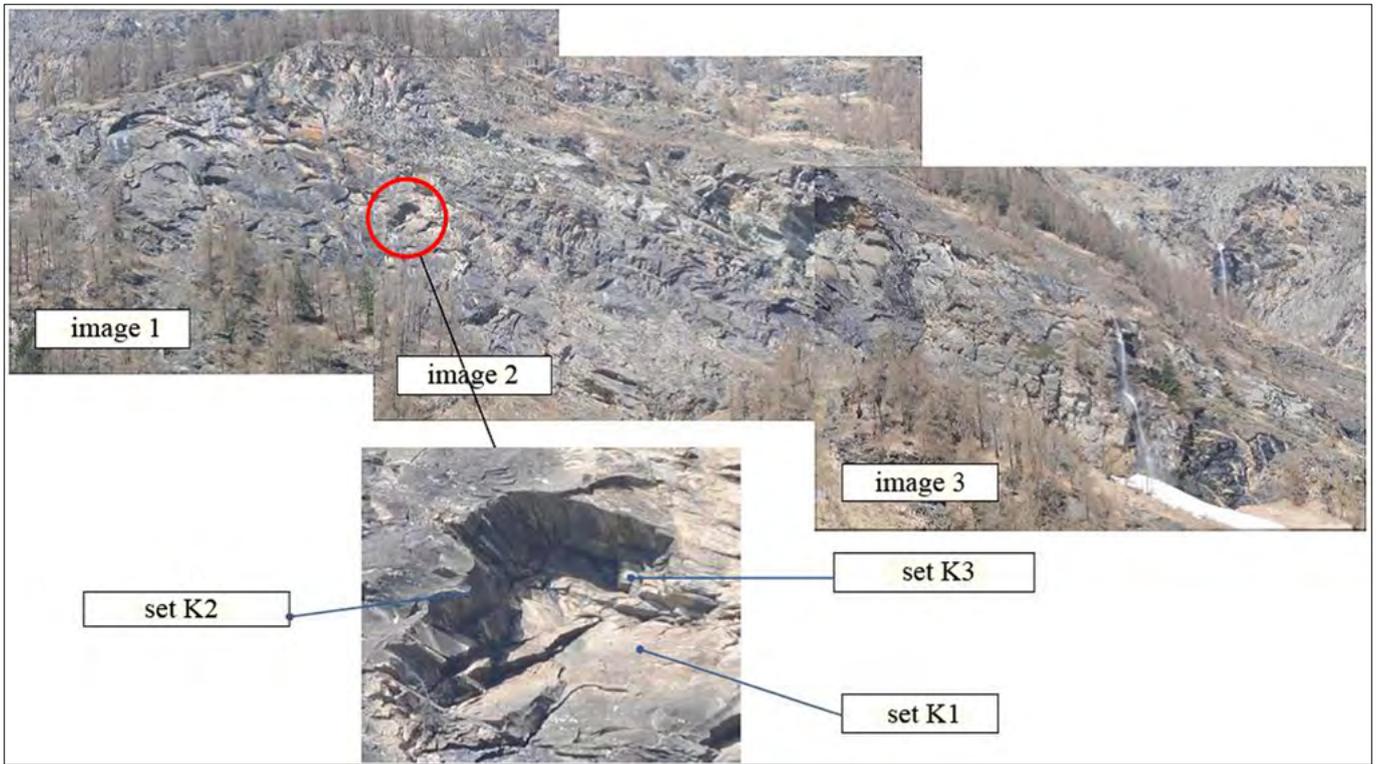


FIGURA 3. Identificazione della zona di innesco della caduta massi e dei pattern di discontinuità.

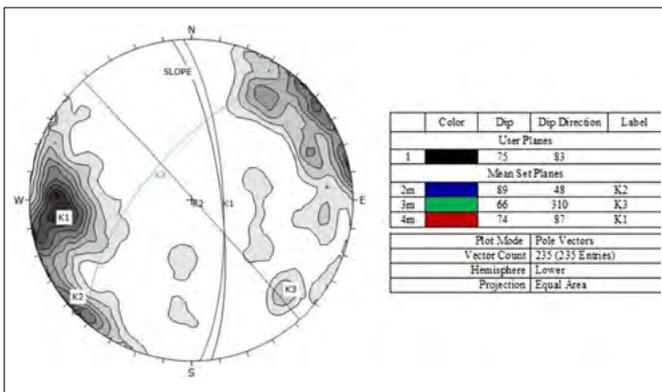


FIGURA 4. Identificazione e orientamento dei piani medi dei tre principali sistemi di discontinuità (K1, K2, K3).

gativa si adatta molto bene alle tracce campionate, sia per ciascuno dei tre sistemi sia per il dataset globale.

3.3 Volume del blocco

Sulla base dei dati geometrici delle famiglie di discontinuità è possibile valutare la dimensione dei blocchi di roccia. Una simulazione Monte Carlo, che tiene conto delle

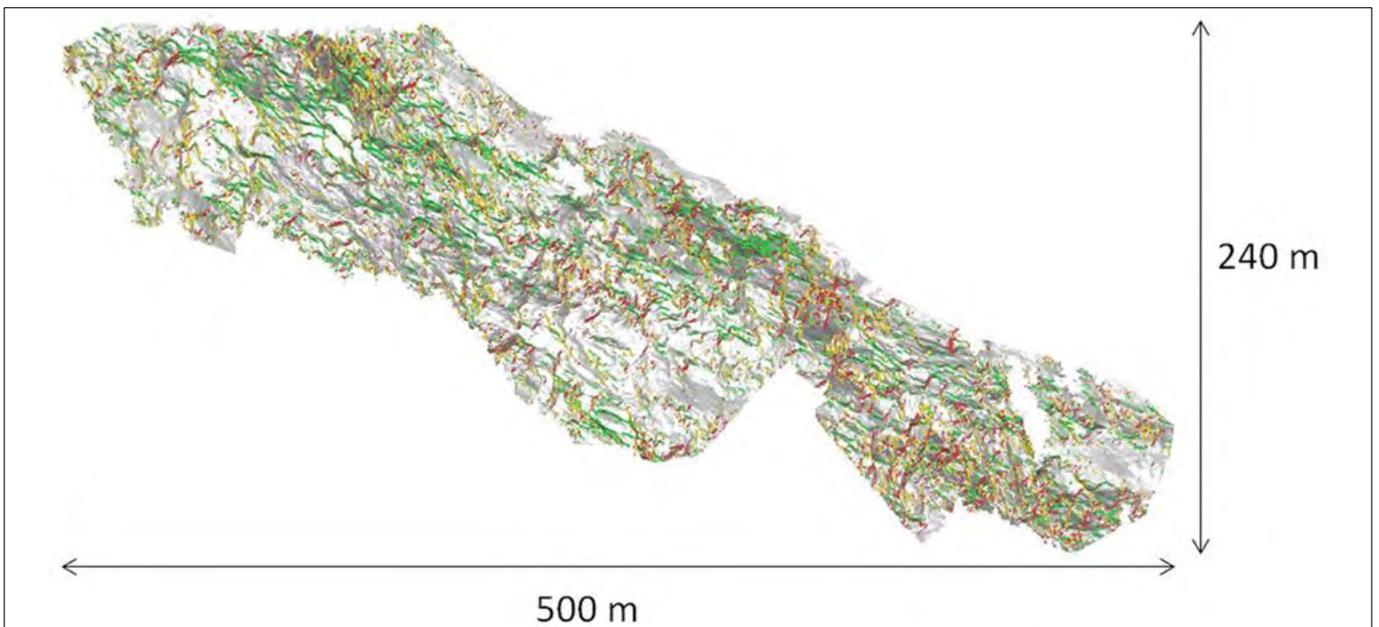


FIGURA 5. Rovenaud DSM e tracce individuate da CurvaTool (Umili *et al.* 2013); le tracce sono colorate in relazione all'insieme di appartenenza (rosso set 1; verde set 2; giallo set 3).

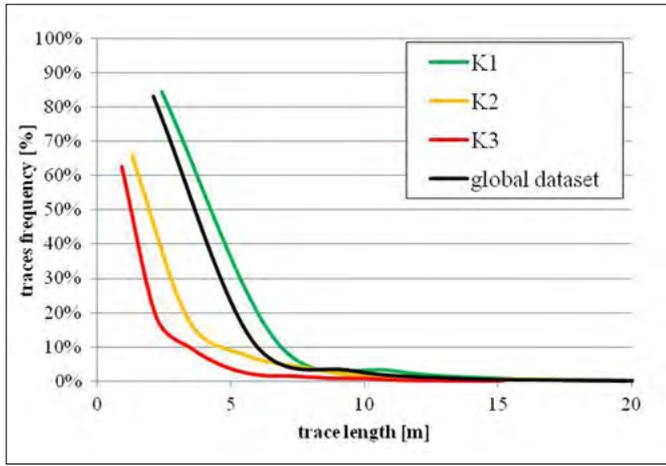


FIGURA 6. Distribuzioni ottenute per ciascuno dei tre set di discontinuità e per il dataset globale.

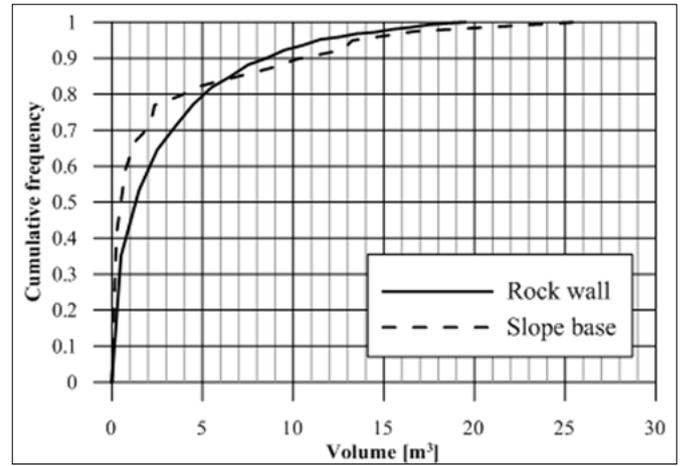


FIGURA 7. Confronto tra le curve di frequenza cumulative del volume del blocco roccioso rilevato sulla parete rocciosa e alla base del pendio.

distribuzioni di frequenza delle spazature, ha permesso di determinare la distribuzione di frequenza per il volume del blocco (Fig. 7). Tale distribuzione può essere validata mediante un confronto con quella del volume dei blocchi rocciosi osservati alla base del pendio. La Figura 8 mostra la posizione dei blocchi distaccati osservati alla base del pendio oggetto di studio: le posizioni sono indicate con cerchi, la cui dimensione è proporzionale al volume misurato e il cui colore si riferisce alla data di caduta del blocco.

3.4 Analisi della fase di propagazione

Le simulazioni effettuate con il software CRSP lungo quattro sezioni verticali hanno permesso di tracciare curve che identificano aree con la stessa percentuale di arresto dei blocchi e possono essere utilizzate per validare il modello confrontando le piste calcolate con quelle rilevate in sito (Fig. 8).

I blocchi considerati in queste simulazioni hanno un volume di 0,5, 1,5, 6, 10 e 16 m³ corrispondenti, rispettivamente, al 35, 50, 80, 90 e 95% della curva di frequenza cumulata ottenuta per i blocchi rilevati alla base del pendio (Fig. 7).

4. CONCLUSIONI

La pericolosità è legata all'esistenza di diverse fonti di incertezza, che rendono difficile prevedere l'evoluzione di un dato fenomeno. Questa affermazione generica è particolarmente vera nella meccanica dei terreni e delle rocce. La mancanza di conoscenza può essere parzialmente compensata attraverso l'applicazione di tecniche avanzate, in modo da ridurre le incertezze epistemiche: i modelli possono essere molto sofisticati e realistici, soprattutto se calibrati attraverso confronti con misure di monitoraggio affidabili. Tuttavia, permane un'insormontabile variabilità aleatoria che rende necessaria l'esecuzione di analisi statistiche che consentano di quantificare l'effetto di tale variabilità e quindi la pericolosità associata ai pendii rocciosi.

Il presente lavoro ha utilizzato un caso di studio per descrivere come la comunità scientifica stia lavorando per migliorare la qualità degli strumenti di misurazione e di calcolo, che possono contribuire a una previsione più affidabile del pericolo correlato alla caduta di massi. È stato determinato l'effetto di scala sulla lunghezza della traccia di discontinuità e sul volume del blocco, ed è stata mostrata

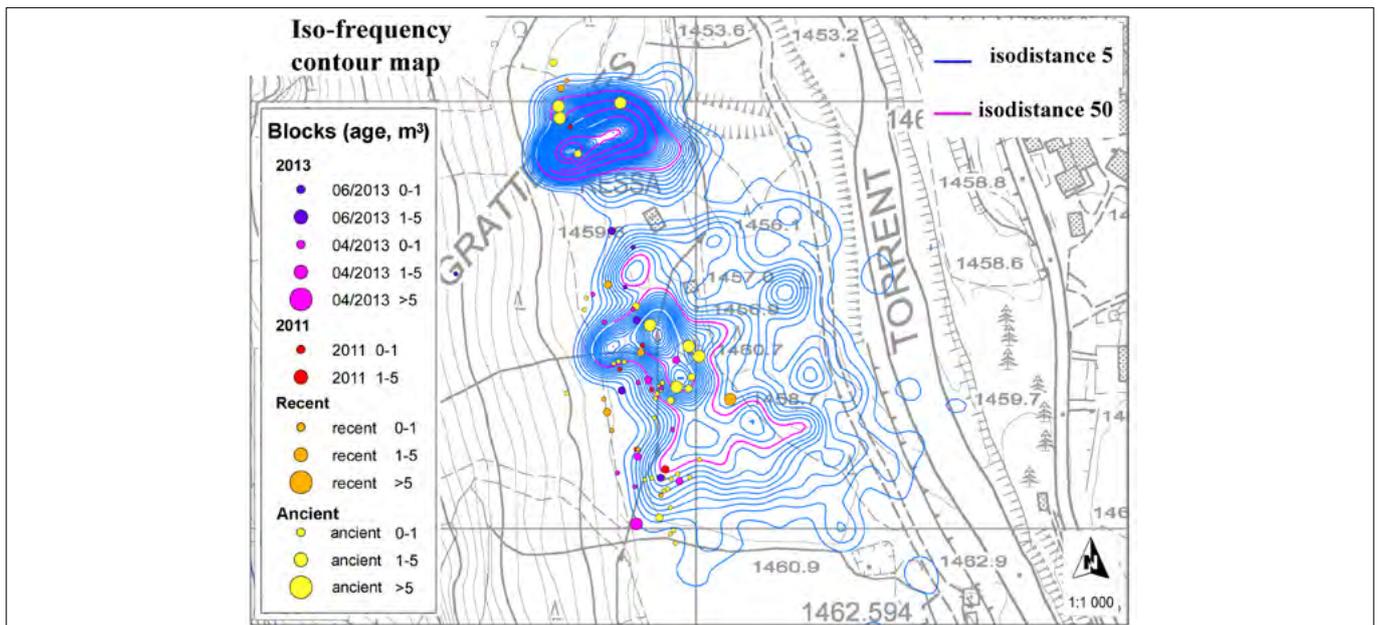


FIGURA 8. Sito di studio di Rovenaud. Curve di pari percentuale dei blocchi di arresto ottenute dalla simulazione, rispetto alla posizione dei blocchi rilevati in loco (cerchi colorati) (Ferrero *et al* 2016).

la sua influenza sulle simulazioni di caduta massi, al fine di evidenziare che una corretta mappatura del rischio di caduta massi deve contemplare la valutazione delle incertezze.

BIBLIOGRAFIA

- BAECHER G.B., CHRISTIAN J.T. (2003). *Reliability and statistics in geotechnical engineering*, John Wiley and Sons Inc, New York, p 618.
- BEDI A., HARRISON J.P. (2013). *Characterisation and propagation of epistemic uncertainty in rock engineering: a slope stability example*, in: Kwasniewski M, Łydzba D (eds) Proceedings of ISRM international symposium Eurock 2013 on: rock mechanics for resources, energy and environment. CRC Press, Wrocław, pp 105–110.
- BROWN E.T. (2012). *Risk assessment and management in underground rock engineering - an overview*, J Rock Mech Geotech Eng 4(3):193–204.
- BUDETTA P., NAPPI M. (2013). *Comparison between qualitative rockfall risk rating systems for a road affected by high traffic intensity*, Nat Hazard Earth Syst 13(6):1643–1653.
- BUNCE C.M., CRUDEN D.M., MORGENSTERN N.R. (1997). *Assessment of the hazard from rock fall on a highway*, Can Geotech J 34:344–356.
- COROMINAS J., COPONS R., VILAPLANA J.M., ALTIMIR J., AMIGO J. (2003). *Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the principality of Andorra*, Nat Hazards 30:421–435.
- COROMINAS J., MOYA J. (2008). *A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes*, Eng Geol 102:193–213.
- COROMINAS J., VAN WESTEN C., FRATTINI P., CASCINI L., MALET J.P., FOTOPOULOU S. et al. (2014). *Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk*, Bull Eng Geol Environ 73:209–263.
- CROSTA G.B., AGLIARDI F. (2003). *A methodology for physically based rockfall hazard assessment*, Nat Hazard Earth Syst 3:407–422.
- DUBOIS D., GUYONNET D. (2011). *Risk-informed decision making in the presence of epistemic uncertainty*, Int J Gen Syst 40(2):145–167.
- EINSTEIN H.H., BAECHER G.B. (1983). *Probabilistic and statistical methods in engineering geology*, Rock Mech Rock Eng 16(1):39–72.
- FELL R., HO K.K.S., LACASSE S., LEROI E. (2005). *A framework for landslide risk assessment and management*, in: Hungr O., Fell R., Couture R., Eberhardt E. (eds) Landslide risk management. Taylor and Francis, London, pp 3–26.
- FELL R., COROMINAS J., BONNARD C., CASCINI L., LEROI E., SAVAGE W.Z. (2008). *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*, Eng Geol 102:85–98.
- FERRERO A.M., FORLANI G., RONCELLA R., VOYAT H.I. (2009). *Advanced geo structural survey methods applied to rock mass characterization*, Rock Mech Rock Eng 42:631–665.
- FERRERO A.M., MIGLIAZZA M.R., PIRULLI M., UMILI G. (2016). Some open issues on rock fall hazard analysis in fractured rock mass: problems and prospects. Rock Mech Rock Eng 49 (9): 3615-3629.
- GUO J., DU X.P. (2007). *Sensitivity analysis with mixture of epistemic and aleatory uncertainties*, AIAA J 45(9):2337–2349.
- GUZZETTI F., CROSTA G., DETTI R., AGLIARDI F. (2002). *STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls*, Comput Geosci 28(9):1079–1093.
- GUZZETTI F. (2004). *Landslide mapping, hazard assessment and risk evaluation, limits and potential*, in: Proceedings of international symposium on landslide and debris flow hazard assessment. National Center for Research on Earthquake Engineering, October 7, Taipei, Taiwan, vol 8, pp C1–C17.
- JABOYEDOFF M., DUDT J.P., LABIOUSE V. (2005). *An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree*, Nat Hazard Earth Syst 5:621–632.
- LAN H., DEREK MARTIN C., LIM H.C. (2007). *RockFall analyst: a GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modelling*, Comput Geosci 33:262–279.
- LATELTIN O., HAEMMING C., RAETZO H., BONNARD C. (2005). *Landslide risk management in Switzerland*, Landslides 2:313–320.
- MAZZOCOLA D., HUDSON J. (1996). *A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability*, QJ Eng Geol Hydrogeol 29:37–56.
- MOLK M., POISEL R., WEILBOLD J., ANGERER H. (2008). *Rockfall rating systems: is there a comprehensive method for hazard zoning in populated areas?*, in: Proceedings of the 11th interpraevent 2008 congress, vol 2, 26–30 May 2008. Dornbirn (Vorarlberg), Austria.
- PFEIFFER T.J., BOWEN T.D. (1989). *Computer simulation of rockfalls*, Bull Assoc Eng Geol 26(1):135–146.
- ROUILLER J.D., JABOYEDOFF M., MARRO C., PHILLIPPOSIAN F., MAMIN M. (1998). *Pentes instables dans le Pennique valaisan*, Rapport final PNR 31. VDF, Zurich.
- UMILI G., FERRERO A.M., EINSTEIN H.H. (2013). *A new method for automatic discontinuity traces sampling on rock mass 3D model*, Comput Geosci 51:182–192.
- VAN WESTEN C.J., RENGHERS N., TERLIEN M.T.J., SOETERS R. (1997). *Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation*, Geol Rundsch 86:404–414.
- VAN WESTEN C.J. (2004). *Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments*, in: Lacerda W.A., Ehrlich M., Fontoura A.B., Sayo A. (eds) Landslides Evaluation and stabilization. Balkema, Leiden, The Netherlands, pp 39–56.
- VAN WESTEN C.J., CASTELLANOS E., KURIAKOSE S.L. (2008). *Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview*, Eng Geol 102:112–131.
- WENNER D., HARRISON J.P. (1996). *Techniques to cope with uncertain parameters in geomechanics on different levels of information*, in: Proceedings of Eurock '96, September 2–5, Torino, Italy, pp 327–334.

Il Verde Cesana: una storica pietra ornamentale delle Alpi Occidentali

The Verde Cesana: a historical ornamental stone of Western Alps

FRANCESCA GAMBINO^{*1}, ALBERTO AGOSTONI², LUCA BARALE³, SABRINA BONETTO⁴, ALESSANDRO BORGHİ⁴, ALBERTO CORNO⁴, PIETRO MOSCA³

¹ CNR-ISTEC (Istituto di Scienza e Tecnologia dei Materiali Ceramici) - Corresponding author

² Freelance

³ CNR-IGG (Istituto di Geoscienze e Georisorse)

⁴ Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino

* Corresponding author

E-mail: francesca.gambino987@gmail.com (F. Gambino), alberto.agostoni@gmail.com (A. Agostoni), luca.barale@igg.cnr.it (L. Barale), sabrina.bonetto@unito.it (S. Bonetto), alessandro.borghii@unito.it (A. Borghi), alberto.corno@unito.it (A. Corno), pietro.mosca@cnr.it (P. Mosca)

Parole chiave: Pietre ornamentali, Siti estrattivi, Oficalciti, Alpi Occidentali

Key words: Ornamental stones, Quarry sites, Ophicalcite, Western Alps

INTRODUZIONE

Fra le pietre ornamentali coltivate nelle Alpi occidentali, il Verde Alpi (noto anche come Marmo Verde delle Alpi) occupa una posizione di indiscussa rilevanza e prestigio. Classificabile come oficalcite (e come “marmo” dal punto di vista commerciale), il Verde Alpi è un materiale di grande impatto visivo grazie alle numerose tonalità e sfumature di verde ed al suo aspetto variamente brecciato e ricco di venature, caratteristiche che lo rendono un materiale elegante e di elevato pregio estetico, utilizzato come pietra ornamentale fin dall'epoca medioevale.

I siti di estrazione del Verde Alpi sono collocati all'interno di varie unità del dominio oceanico Ligure-Piemontese (indicato in letteratura come Zona dei Calcescisti con Pietre Verdi), ampiamente affioranti in tutto l'arco alpino occidentale (Dal Piaz *et al.*, 2003; Piana *et al.*, 2017). In campo commerciale sono conosciute e catalogate diverse varietà di Verde Alpi, denominate in base alla località di estrazione. Una di queste varietà è il Verde Cesana, il cui bacino estrattivo è ubicato nel Comune di Cesana Torinese (Città Metropolitana di Torino) nelle Alpi Cozie piemontesi (vedi ad es. Barale *et al.*, 2020)

Questo bacino estrattivo e le sue cave, sfruttate per circa un secolo a partire da fine '800, sono state oggetto di alcuni studi di dettaglio, fra i quali quelli di Masini (1930) e di Fiora e Di Piero (1998).

Attualmente in tale area è in corso una serie di studi multidisciplinari a carattere storico-scientifico i quali hanno lo scopo principale di investigare e rimarcare il valore culturale e paesaggistico dei siti di estrazione del Verde Cesana nel contesto territoriale delle Alpi piemontesi e più in generale dell'arco alpino occidentale. In questo contesto, il presente contributo ha l'obiettivo di fornire un inquadramento preliminare dei caratteri geologici dei siti di estrazione del Verde Cesana e delle tappe fondamentali del loro sfruttamento con alcuni esempi di utilizzo di tale materiale lapideo.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Nel complesso quadro geologico della catena collisionale alpina (Fig. 1A e B), i siti di estrazione del Verde Cesana sono ubicati nella unità del Lago Nero (Polino, 1984; Polino & Lemoine; 1984; Servizio Geologico d'Italia, 2021), la quale rappresenta una porzione del dominio oceanico Ligure-Piemontese individuatosi nel Giurassico medio-superiore tra i paleomargini continentali Europeo ed Adriatico (vedi ad esempio Dal Piaz *et al.*, 2003; Piana *et al.*, 2017).

L'unità del Lago Nero affiora estesamente nell'alta valle di Susa ed in alta val Chisone. Essa è costituita da un basamento oceanico di serpentiniti variamente ricoperte da meta-oficalciti e, localmente, da meta-basalti. Al di sopra è presente una successione meta-sedimentaria costituita nei suoi termini inferiori da livelli discontinui di metabrecce ad elementi di serpentiniti e di metabasalti, cui seguono metaradiolariti con sottili livelli scistosi (con resti di radiolari dell'Oxfordiano superiore-Kimmeridgiano medio) e quindi marmi (considerati di età Titoniano-Neocomiano?). Tale successione prosegue con una alternanza di filladi e livelli marmorei con bordi silicizzati passante verso l'alto a filladi nere (Cretacico inferiore?) ed infine micascisti carbonatici (calcescisti), più o meno arenacei, alternati a filladi carbonatiche (Cretacico superiore?).

Caratteristica peculiare di tale successione è la presenza di intercalazioni detritiche e di olistoliti costituiti da materiale di derivazione sia oceanica che continentale, presenti in particolare nella parte sommitale della successione stratigrafica.

All'interno della pila di unità Liguri-Piemontesi affioranti nel settore di catena qui considerato e caratterizzate a scala regionale da contatti e foliazioni principali generalmente immergenti verso i settori occidentali, l'unità del Lago Nero identifica un'unità con metamorfismo alpino di alta pressione, ad est in posizione geometrica superio-

re rispetto l'unità di Cerogne-Ciantiplagna (anch'essa in condizioni metamorfiche alpine di alta pressione) e a ovest sovrascorsa dalla unità dello Chenaillet, caratterizzata da una evoluzione metamorfica alpina di grado molto basso. A scala cartografica, i contatti dell'unità del Lago Nero (in particolare nella area di Cesana Torinese) risultano dislocati da sistemi di faglie trascorrenti a direzione NE-SO.

SITI ED ATTIVITÀ ESTRATTIVA

Le cave di Verde Cesana presenti nel territorio comunale di Cesana Torinese, ormai completamente abbandonate ma con ancora ben riconoscibili tracce dei vecchi fronti di coltivazione e di reperti di archeologia industriale, sono ubicate in corrispondenza di affioramenti di serpentiniti e oficalciti dell'unità Lago Nero, all'interno di un'area di una decina di chilometri quadrati compresa tra Punta Rascià-Rocca Clari a ovest, l'abitato di Cesana Torinese a Nord, la frazione Champlas Seguin a Est e Costa Turanja a sud (Fig. 1C). In particolare sono identificabili tre principali areali di estrazione (corrispondenti alle principali zone di affioramento dei maggiori corpi di serpentiniti con oficalciti all'interno di successioni di micascisti carbonatici e filladi, più o meno mascherati da depositi quaternari).

- l'areale compreso tra la strada provinciale SP 23R del Colle di Sestriere, la strada provinciale 215 che da Cesana conduce a Busson e l'abitato di Champlas Seguin (1 in Fig. 1C); tale areale è comprensivo del Monte Cruzore, e, nel fondovalle, della località Rocciaglia;
- la località Roche Noire, ad est dell'abitato di Sagna Longa (2 in Fig. 1C);
- la località Livernea, lungo le pendici settentrionali di P.ta Rascià (3 in Fig. 1C);

Le segnalazioni più antiche del Verde Cesana come materiale lapideo risalgono alla fine del XIX secolo con la individuazione di "marmi verdi" nella regione Liute o Liuttès (toponimo con cui si indicavano le pendici occidentali del Monte Cruzore in corrispondenza della attuale strada per il Sestriere ed oggi riportate come Rocciaglia) e Rochas de Peiron di Bousson, da parte di commercianti in marmi francesi (Sibille e Vangelista, 2017). Nei suoi dettagliati studi, anche Masini (1930) ubica le cave più antiche (dismesse ai tempi delle osservazioni di tale Autore e con presenza di vari saggi esplorativi) proprio nell'area immediatamente ad ovest di Champlas Seguin. Oggi, in tale area, sono presenti alcuni affioramenti con sbancamenti interpretabili appunto come antiche cave (di dimensioni ridotte), come quelli identificati lungo la strada Champlas Seguin-Monte Cruzore (a in Fig. 1C) e lungo la SS 23 per il Sestriere (b in Fig. 1C). L'estrazione di Verde Cesana in tale settore inizia in modo significativo con l'attività della Ditta Catella proprio nella regione Liuttès sul finire del 1800 (Sibille e Vangelista, 2017). Immediatamente a monte della strada statale per il Sestriere, in corrispondenza delle pendici occidentali del Monte Cruzore, è ancora ben riconoscibile il fronte della cava sfruttata a partire dagli anni '20 del Novecento dalle Ditta Lazzoni e quindi dalla Ditta Catella (c in Fig. 1C). Le stesse ditte sfruttarono le oficalciti affioranti nel fondovalle lungo la statale per Bous-

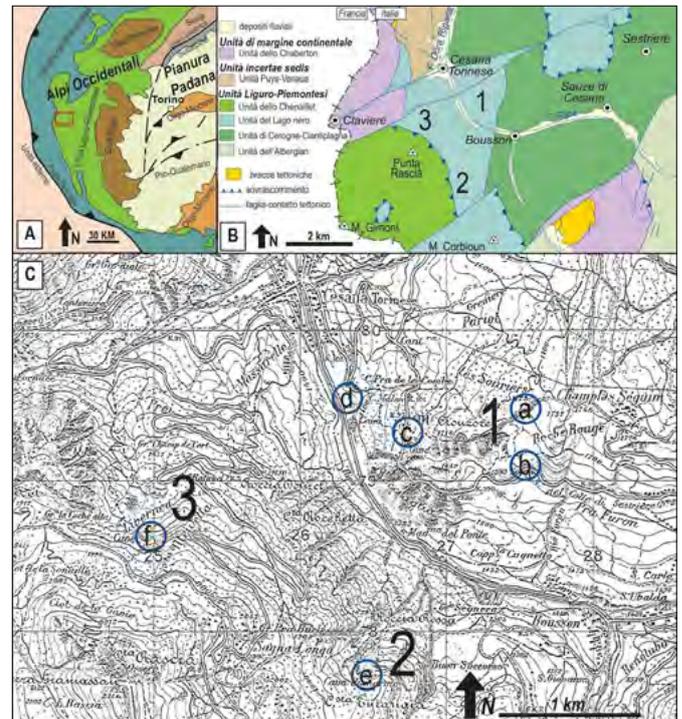


FIGURA 1. A) Inquadramento geologico delle Alpi occidentali. Il rettangolo in rosso indica l'area della Fig. 1B. B) Assetto tettonico della area di Cesana Torinese (Da Servizio geologico d'Italia, 2021). C) Ubicazione delle principali cave del bacino estrattivo di Cesana Torinese. 1, 2 e 3 indicano gli areali di affioramento dei maggiori corpi di serpentiniti ed oficalciti coltivate. Generalmente le cave sfruttate sono riportate nella letteratura di riferimento con i seguenti nomi: a- e b- cave di Champlas Seguin o del Monte Cruzore, c- cava Lazzoni-Catella, d- cava Palestra di Roccia, e- cava Roche Noire o Menconi, f- cava di Livernea.

son; le cui pareti di cava sono oggi utilizzate come palestra di roccia (d in Fig. 1C).

In generale, le cave di tale areale furono le prime ad essere abbandonate per la scarsa qualità del materiale, per le difficoltà operative e per il procedere dell'urbanizzazione (Masini, 1930; Di Pierro, 1997).

In località Roche Noire (e in Fig. 1C) l'attività estrattiva, sviluppatasi essenzialmente in corrispondenza di tre cave poste a quote differenti, cominciò tra il 1924 ed il 1925 ad opera della "Società Marmifera Verde Alpi - Smiva" (Masini, 1930). Dopo un primo distacco di lastre dalle porzioni più superficiali dell'ammasso roccioso, gli scavi proseguirono in sotterraneo con tecnica di estrazione simile a quella utilizzata per i marmi delle Alpi Apuane, introdotta dall'ultimo proprietario Menconi (proveniente da Massa, nel distretto apuano), e terminarono agli inizi degli anni '70 con il completo abbandono del sito estrattivo.

A nord di tale località, in località Livernea (f in Fig. 1C), avveniva la maggior produzione di Verde Cesana. Qui l'estrazione del marmo verde, cominciata nel primo dopoguerra nella cava gestita dalla Ditta Catella, fu inizialmente caratterizzata da una produzione limitata alle esigenze del mercato locale a causa delle conoscenze tecnologiche ancora ridotte, degli elevati costi di produzione e dei problemi di accessibilità al sito stesso. Solo dopo la Seconda Guerra Mondiale la cava Catella in località Livernea (Fig. 2) visse un vero e proprio "boom estrattivo" che si protrasse fino agli anni '80, con un solo periodo di interruzione tra il 1972

ed il 1973 in seguito a una valanga che comportò la sostituzione delle attrezzature e una riorganizzazione del cantiere (Di Pierro, 1997).

Oltre al classico Verde Cesana, nel medesimo luogo veniva estratta una varietà di colore rosso-violaceo nota come Rosso Cesana (Fiora e Gambelli, 2003a). Benché le attività siano ormai cessate da tempo, in questo sito sono ancora presenti varie attrezzature del vecchio cantiere tra cui il “derrick” utilizzato per lo spostamento dei blocchi ed alcuni cavi metallici, fortemente usurati, che venivano impiegati nel taglio della pietra.

Come per le altre cave della zona, il taglio del “marmo verde” avveniva mediante il filo elicoidale, il cui funzionamento richiedeva elevati quantitativi di sabbia quarzosa che doveva essere fatta arrivare da Carrara, via ferrovia fino ad Oulx e poi con camion fino alle cave di Cesana, con alti costi di trasporto. Si ricavano così sia blocchi di grandi dimensioni, sia lastre di pochi centimetri di spessore che costituivano un materiale da ornamentazione, “*d’effetto grandioso ed austero*” (Peretti, 1937).

Sul finire degli anni cinquanta, l’elevata fratturazione della roccia, gli scarti eccessivi, i crescenti oneri di trasporto del materiale e la stagionalità del lavoro in cava (da maggio ad ottobre) imposta dall’altitudine, resero impossibile un adeguato ammortamento dei costi di produzione e portarono alla chiusura delle cave di Verde Cesana (Fiora e Di Pierro, 1998). A tutto ciò si aggiunse inoltre la concorrenza di altri prodotti sia nazionali, provenienti ad esempio dalla Valle d’Aosta, sia internazionali, quali quelli indiani, cinesi e brasiliani.

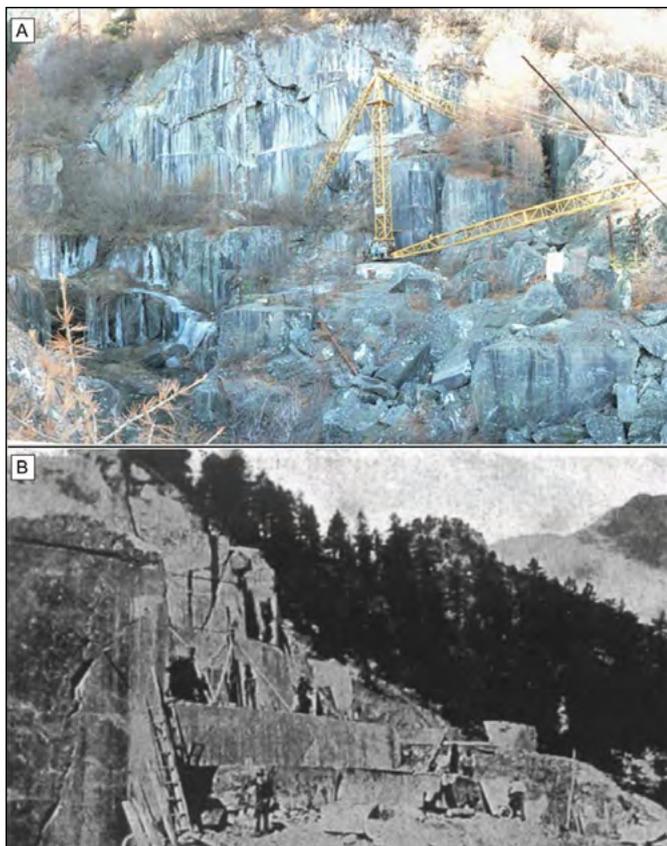


FIGURA 2. Cava Livernea. A) Stato attuale della cava con evidenze di archeologia industriale. B) Foto d’epoca della cava maggiore a Livernea (da Peretti, 1938).

In aggiunta ai sopradescritti siti presenti nel comune di Cesana Torinese, è opportuno ricordare la presenza di un sito di estrazione immediatamente ad ovest nel Comune di Claviere (Fiora e Gambelli, 2003b). Inoltre, a nord di Cesana Torinese, nei valloni del Fréjus e di Rochemolles nel Comune di Bardonecchia, sono note alcune cave dismesse di “marmo verde”, il cui materiale estratto talvolta è indicato come Marmo Verde di Bardonecchia, di Fréjus o di Rochemolles (Lomagno, 1992; Bonetto e Fornaro, 2005).

DESCRIZIONE DEL MATERIALE

Il Verde Cesana presenta caratteristiche piuttosto omogenee nelle diverse cave del bacino di Cesana Torinese. Si tratta di una (meta)oficalcite, ovvero una serpentinite più o meno intensamente brecciata, cementata da vene a carbonato (Fig. 3). Oltre al Verde Cesana classico, di colore verde scuro, erano localmente cavate anche delle porzioni di oficalcite rossastra o verde-rossastra e marmi rosso-violacei ad esso associati (Cava Livernea Est, Cava Lazzoni-Catella). Questi litotipi di colore rossastro erano commercializzati con il nome di Rosso Cesana.

Le serpentiniti che costituiscono le oficalciti si presentano di colore verde scuro. Localmente, è possibile osservare relitti tessiturali dell’originaria peridotite. Sono presenti minerali opachi in cristalli nerastri fino a millimetrici, localmente abbondanti e visibili a occhio nudo sulla superficie della roccia. In sezione sottile, oltre al serpentino, prevalente, si riconoscono, clorite, talco, spinelli e altri opachi (ilmenite, etc.).

Le serpentiniti sono attraversate da una trama più o meno fitta di vene carbonatiche, che definiscono una struttura brecciata cementata con clasti generalmente angolosi, di dimensioni centimetrico-decimetriche. Le vene carbonatiche hanno spessore da millimetrico a pluricentimetrico, e sono costituite da calcite bianca a grana grossolana. Le vene presentano spesso un riempimento polifasico e, oltre alla calcite, possono contenere serpentino (localmente rappresentato da crisotilo) e magnetite. In alcuni casi, il serpentino cresce in lamelle intimamente associate alla calcite, conferendo alle vene carbonatiche una colorazione verdastra. Sono inoltre presenti sottili vene a serpentino (localmente crisotilo), di spessore generalmente millimetrico o sub-millimetrico.

Il “Rosso Cesana” comprende materiali di diversa composizione. Si tratta di oficalciti del tutto simili a quelle sopra descritte, ma pigmentate di rosso per una fine dispersione di ematite, analogamente al più celebre “Rosso Levante” delle successioni ofiolitiche dell’Appennino Ligure (es., Cortesogno *et al.*, 1980). Con il nome di “Rosso Cesana” sono inoltre stati coltivati alcuni sottili corpi di marmi calcitici associati alle meta-oficalciti, che presentano anch’essi un colore rosso-violaceo per la presenza di pigmento ematitico. Questi marmi sono costituiti da calcite prevalente, con minori serpentino, talco, magnetite ed ematite.

IMPIEGHI ARCHITETTONICI

Il Verde Cesana, e più in generale tutti i litotipi appartenenti al gruppo del “Verde Alpi”, sono stati e sono tuttora

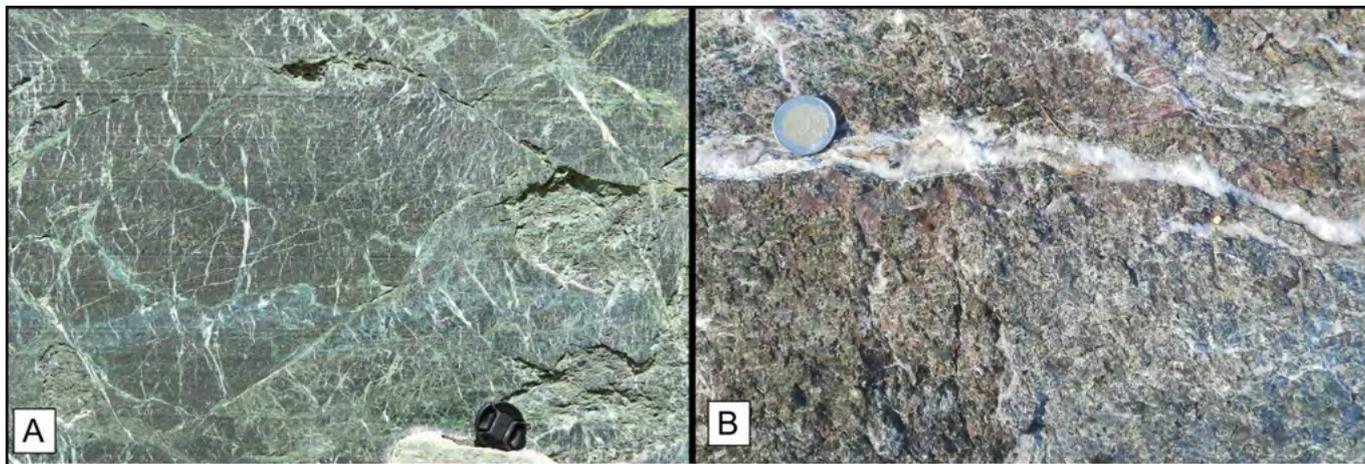


FIGURA 3. Aspetto mesoscopico del Verde Cesana. A) Materiale lapideo caratterizzato da una fitta trama di vene biancastre a carbonato e verde chiaro a carbonato+serpentino, affiorante in una porzione di parete di cava con evidenti tracce di taglio con filo elicoidale. Cesana T.se, Cava “Palestra di Roccia” (44°56’39.5”N 6°47’53.2”E). B) Oficalcite in cui si riconoscono porzioni rossastre maggiormente ricche in ematite.

molto apprezzati per la particolarità cromatica del materiale. A Torino, il Verde Cesana fu impiegato nell’architettura e nell’edilizia decorativa durante tutto il periodo in cui durò l’attività di estrazione, ovvero dagli ultimi anni del XIX secolo fino agli anni ’70 del ’900, come testimoniano le numerose applicazioni riscontrabili in città (Borghesi *et al.*, 2015; Fiora e Di Piero, 1998; Gambino *et al.*, 2017). Tra i principali impieghi del Verde Cesana è possibile annoverare: la zoccolatura interna del porticato di Palazzo di Città; la zoccolatura, la pavimentazione e ulteriori elementi architettonici minori della Galleria dell’Industria Subalpina (Fig. 4); le lesene, il davanzale, gli stipiti e le cornici della scenografica Galleria San Federico.

Tra gli utilizzi nel capoluogo piemontese si possono ancora citare: le decorazioni del basamento della statua dedicata a Giovanni Battista Bottero eseguita da Odoardo Tabacchi nel 1899 e collocata in Largo IV Marzo; la pavimentazione della Presidenza del Politecnico di Torino risalente agli anni ’60 del ’900 (Di Piero, 1997), la pavimentazione del foyer del Teatro Regio (1965-1973), le colonne e lesene interne della sede locale della Banca d’Italia e

i davanzali del Palazzo delle Poste e Telegrafi. Negozi e caffetterie storiche del centro, come ad esempio il Caffè Platti in Corso Vittorio Emanuele II, vedono anch’essi l’impiego di questo pregiato materiale.

Anche per quanto riguarda gli edifici sacri l’impiego della roccia è stato diffuso e destinato soprattutto a impreziosire le pareti interne. È il caso delle decorazioni delle cappelle laterali della Cattedrale di San Giovanni Battista (Duomo di Torino), di alcune decorazioni interne (balaustre, pavimentazione, stipiti e lastre ornamentali) del Santuario della Consolata e infine delle colonne e dei decori della gradinata del Santuario di Nostra Signora della Salute.

Ovviamente, il Verde Cesana ha avuto un impiego locale nel comune di Cesana Torinese e negli immediati dintorni, in tempi anche precedenti alla sua estrazione industriale. Tra le applicazioni più antiche, risalenti verosimilmente al Medioevo e al Rinascimento, vi sono numerose acquasantiere e dei tondi a decorazione del portale della Parrocchia di Cesana.

Dalla fine del XIX si registra una maggiore varietà di impieghi locali, con il moltiplicarsi delle pose in opera in esterni, dove spesso il materiale si presenta oggi in uno stato conservativo non buono, certamente aggravato dagli sbalzi termici ai quali è sottoposto a queste altitudini.

A testimonianza dell’apprezzamento internazionale del Verde Cesana, l’uso di tale materiale lapideo è indicato nella Cattedrale di Annecy, nella gioielleria Cartier di Parigi, nel Palazzo di Giustizia di Bruxelles, nel palazzo uffici della società M.A.N. ad Augsburg, in alcune costruzioni a Bangkok e nel Palazzo di Vetro delle Nazioni Unite a New York (Peretti 1938, Catella 1969, Di Piero 1997).

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Questo contributo riassume i principali aspetti storico-scientifici relativi al Verde Cesana, di certo la più rinomata e pregiata oficalcite piemontese.

Tale materiale fu estratto dalla fine del 1800 fino agli anni ’70 del secolo successivo in diverse cave ubicate nel territorio comunale di Cesana Torinese in alta Valle di Susa. Le ragioni dell’interruzione dell’attività di estrazione



FIGURA 4. Esempi di utilizzo del Verde Cesana a Torino. A) Galleria dell’Industria Subalpina, con zoccolatura, pavimentazione e altri elementi architettonici minori in Verde Cesana. B) Particolare della pavimentazione della Galleria Subalpina in Verde Cesana.

sono da ricercarsi nell'elevato grado di fratturazione della roccia con conseguente eccessiva produzione di scarti, negli elevati costi di trasporto del materiale di cantiere e nel limitato periodo in cui era possibile lavorare in cava (da maggio ad ottobre) (Fiora e Di Pierro, 1998). Tuttavia, il Verde Cesana venne ampiamente impiegato in numerosi edifici, soprattutto in Torino ma anche all'estero, rendendo così celebre il nome di Cesana Torinese nel campo dell'industria marmifera nazionale ed internazionale.

L'attività estrattiva ha inoltre rappresentato da sempre un volano per lo sviluppo socio-economico di intere aree, spesso anche isolate e abbandonate, producendo un incremento della popolazione ed offrendo un'occasione di crescita economica e di rilancio del territorio. Per tale ragione, assume oggi una importante connotazione storico-culturale, avendo influenzato per secoli le abitudini e le tradizioni della popolazione.

A seguito dunque del valore non solo scientifico, ma anche storico-culturale ed architettonico di tale materiale, il Verde Alpi Cesana è ancora oggi oggetto di studi ed approfondimenti che riguardano la raccolta di materiale storico-bibliografico, il censimento e la caratterizzazione dei siti estrattivi storici, l'archeologia industriale, l'analisi minero-petrografica, l'approfondimento di aspetti geologici e la valorizzazione storico-culturale dell'attività di estrazione che ha influenzato decenni di storia e sviluppo del territorio.

BIBLIOGRAFIA

- BARALE L., BORGHI A., D'ATRI A., GAMBINO F., PIANA F. (2020). *Ornamental Stones of Piemonte (NW Italy): an updated geo-lithological map*. Journal of Maps v. 16, pp.867-878.
- BONETTO S., FORNARO M. (2005). *Il verde alpi cesana: un contributo geominerario alla memoria delle sue cave in un percorso fra tecnica e natura* – Atti del Convegno di medio periodo “Le pietre del Territorio. Cultura, Tradizione, Sviluppo sostenibile” inserito nel Programma interuniversitario di Ricerca Scientifica COFIN 2004: “Le risorse lapidee dall'antichità ad oggi in area mediterranea: identità culturali e tecnologie. Sperimentazioni integrate per la conoscenza, restauro e valorizzazione”, Isola Palmaria, 17-18 ottobre 2005, pp. 7-9.
- BORGHI A., D'ATRI A., MARTIRE L., CASTELLI D., COSTA E., DINO G., FAVERO LONGO S.E., GALLO L.M., GIARDINO M., GROppo C., PIERVITTORI R., ROLFO F., ROSSETI P., VAGGELLI G. (2014). *Fragments of the Western Alpine Chain as Historic Ornamental Stones in Turin (Italy): Enhancement of Urban Geological Heritage through Geotourism*. Geoheritage v. 6, pp. 41–55.
- CATELLA M. (1969). *Marmi Piemontesi*. Cronache economiche CCIAA v. 313, pp. 51–64.
- CORTESOGNO L., GALBIATI B., PRINCIPI G. (1980). *Le brecce serpentinitiche giurassiche della Liguria orientale*. Archives des sciences v. 33, pp.185-200.
- DAL PIAZ G.V., BISTACCHI A., MASSIRONI M. (2003). *Geological outline of the Alps*. Episodes v. 26, pp. 175–180.
- DI PIERRO S. (1997). *Studio geologico – petrografico del Marmo Verde Alpi Cesana e confronto petrografico con analoghe rocce oficarbonatiche di provenienza straniera*. Tesi di Laurea inedita in Scienze Geologiche, Università degli Studi di Torino.
- FIORA L., DI PIERRO S. (1998). *Caratterizzazione petrografica della oficalcite “Verde Cesana” e di potenziali rocce oficarbonatiche sostitutive*. Atti del Convegno “Le Scienze della Terra e l'Archeometria”, Bari – 19 e 20 febbraio 1998. Patron Editore – Bologna, pp. 99 – 108.
- FIORA L., GAMBELLI E. (2003a). *Pietre naturali in Val di Susa. Parte seconda*, Marmor v. 81, pp. 37-50.
- FIORA L., GAMBELLI E. (2003b). *Pietre naturali in Val di Susa. Parte prima*. Marmor v. 80, pp. 37-48.
- GAMBINO F., BORGHI A., D'ATRI A., GALLO L.M., GHIRALDI L., GIARDINO M., MARTIRE L., PALOMBA M., PEROTTI L., MACADAM J. (2019). *TOURinSTONES: a Free Mobile Application for Promoting Geological Heritage in the City of Torino (NW Italy)*. Geoheritage v. 11, pp. 3–17.
- LOMAGNO P. (1992) *Miniere e cave in Valle di Susa*. Seguisium v. 33, pp.105-118.
- MASINI R. (1930). *I dintorni di Cesana Torinese, di Busson e di Clavières (Alpi Cozie) nella geologia e nell'industria marmifera. Parte II*. Bollettino della Società Geologica Italiana v. 49, pp. 105 – 142.
- PERETTI L. (1937). *Pietre da costruzione e da ornamentazione nel primo tratto della nuova via Roma in Torino*. Marmi, Pietre e Graniti v. 15, pp. 1-15.
- PERETTI L. (1938). *Rocce del Piemonte usate come pietre da taglio e da decorazione*. Marmi, Pietre e Graniti v. 16, pp.11-51.
- PIANA F., FIORASO G., IRACE A., MOSCA P., D'ATRI A., BARALE L., FALLETTI P., MONEGATO G., MORELLI M., TALLONE S., VIGNA G.B. (2017). *Geology of Piemonte region (NW Italy, Alps-Appennines interference zone)*. Journal of Maps v. 13, pp. 395–405.
- PIERI M. (1966). *Marmologia. Dizionario di marmi e graniti italiani ed esteri*. Hoepli, Milano.
- POLINO R. (1984). *Les séries océaniques du haut val de Suse (Alpes Cottiennes): analyse des couvertures sédimentaires*. Ofioliti v. 9, pp. 547-554.
- POLINO R., LEMOINE M. (1984). *Detritisme mixte d'origine continentale et océanique dans les sédiments jurassico-crétacés supra-ophiolitiques de la Téthys ligure: la série du Lago Nero (Alpes Occidentales franco-italiennes)*. Comptes Rendus de l'Académie de Sciences de Paris v. 298, pp.359-364.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (2021). Foglio 171 Cesana Torinese della Carta geologica d'Italia a scala 1:50000. Servizio Geologico d'Italia, Roma.
- SIBILLE R., VANGELISTA Z. (2017). *Viaure come un ours din quellou precipice! Cave e miniera nell'Alta Valle della Dora*. Cahier ecomuseo n. 27. Ecomuseo Colombano Romean.

Il Campo Geo-sperimentale dell'Orto Botanico di Torino

The Geo-experimental Field of the Turin Botanical Garden

LUCIANO MASCIOTTO

Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Torino - Consiglio Nazionale Sigea

E-mail: luciano.masciocco@unito.it

Parole chiave: Campo Geo-sperimentale, prova pozzo-piezometri, centralina meteorologica

Key words: Geo-experimental Field, well-piezometer test, weather station

PREMESSA

L'idea di un Campo Geo-sperimentale utile per la didattica e la ricerca in Scienze della Terra nell'Università di Torino nasce dall'esperienza avuta dall'Autore quando nel 1983, ancora studente in Scienze Geologiche, partecipò ad alcune prove sperimentali presso il *Centre de recherches geodynamiques* di Thonon Les Bains, sulla riva francese del Lago di Ginevra (Fig. 1).



FIGURA 1 - Il Centre de Recherches Geodynamiques dell'Università Pierre e Marie Curie di Parigi sorge presso Thonon Les Bains, sulla riva francese del Lago di Ginevra.

Sotto la guida dei proff. Martial Dray e Giovanni Maria Zuppi (mancato prematuramente nel maggio 2011), e insieme agli altri tre studenti del corso di Laboratorio di Idrogeologia, Stefano De Leo (attuale Presidente dell'Ordine Regionale dei Geologi della Valle d'Aosta), Maria Governa (oggi funzionaria della Regione Piemonte) e Paolo Ricci (ora geologo professionista), vennero eseguite: a) misure del livello di falda su un'ampia zona con l'elaborazione della relativa Carta delle isopiezometriche, b) prove di pompaggio su campo attrezzato con pozzo e piezometri, c) prelievi di acque e di sedimenti di fondo del lago di Ginevra a bordo di un battello appositamente attrezzato d) analisi chimico-fisiche di laboratorio, e) misure di portata di corsi d'acqua sia con metodi meccanici sia con metodi chimici.

GLI INIZI (2015 – 2017)

Dopo numerosi anni, l'occasione per realizzare un Campo Geo-sperimentale anche presso l'Università di Torino si presenta nell'ambito della programmazione del Piano Triennale 2015/2017 del Dipartimento di Scienze

della Terra. In tale contesto, l'Autore presenta in Commissione Didattica una **linea di intervento** con l'**obiettivo** di *migliorare la qualità e fruibilità delle esercitazioni sul campo nell'ambito della geologia applicata*. L'**azione** prevista era quella di *reperire e attrezzare un sito a disposizione dei Corsi di Studi con strutture fisse (un pozzo e alcuni piezometri per prove di pompaggio, prove di tracciamento, etc.; parcelle per lo studio della zona non satura, una stazione meteorologica, etc.) ed entro il quale condurre prove e test con strumentazioni di campagna (penetrometro, georadar, tomografia elettrica, sismica a rifrazione, etc.) per la corretta formazione del geologo*. L'Autore identificava come sito ottimale l'Orto Botanico di Torino, gestito dal Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi dell'Università di Torino e a soli 200 m dal Dipartimento di Scienze della Terra.

Il Piano viene approvato dal Consiglio di Dipartimento di Scienze della Terra in data 15/07/15.

Nel febbraio 2016 l'Autore, dopo aver preso contatti con la Direttrice, prof.ssa Siniscalco effettua un sopralluogo presso le strutture dell'Orto Botanico, insieme ai colleghi Roberto Ajassa, Cesare Comina e Domenico De Luca. Durante il sopralluogo, si verifica la presenza un pozzo della profondità di circa 30 m completo di pompa sommersa, utilizzato per l'impianto di irrigazione del giardino e dell'arboreto, e una stazione meteorologica (misure di pioggia, velocità del vento, temperatura e umidità), collegata alla rete elettrica. Da ulteriori indagini, si accerta però che il pozzo non permette l'introduzione di un sondino piezometrico e che comunque il Giardino non è adatto a ospitare il sito attrezzato per le sperimentazioni geologiche. Per tali motivi si conviene di utilizzare una zona dell'Arboreto a una quota inferiore di circa 8 m, con notevole risparmio sulle perforazioni da effettuare. In quell'occasione si accerta che la stazione meteo non è più funzionante da tempo (Fig. 2).

Alla luce delle indagini effettuate ed espone alla direttrice dell'Orto Botanico le intenzioni dei ricercatori del DST, viene proposto e successivamente stipulato un accordo quadro tra il Dipartimento di Scienze della Terra e il Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi per l'utilizzo delle strutture dell'Orto Botanico di Torino per condurre sperimentazioni a fini didattici. Indi, su proposta della Commissione Didattica, il Consiglio del Dipartimento di Scienze della Terra approva il finanziamento sui fondi



FIGURA 2 – Vista aerea dell’Orto Botanico di Torino, posto in posizione adiacente al Castello del Valentino (in basso a sinistra si scorge il bellissimo lastricato di ingresso al Castello) all’interno dell’omonimo parco in riva al Po. Nel Giardino è stato segnalato il pozzo ad uso irriguo (non adatto alle prove) e l’ubicazione della vecchia centralina meteo ora sostituita dalla nuova. Nell’Arboreto è evidenziata l’area destinata alle prove pozzo-piezometri e alle altre sperimentazioni geologiche descritte nell’articolo.

per la didattica per la realizzazione di due piezometri: uno a distruzione di nucleo, l’altro a carotaggio continuo. Le perforazioni hanno luogo nel periodo 23-28 marzo 2017.

Si approfitta dell’occasione per portare gli studenti di alcuni insegnamenti (Idrogeologia applicata, Laboratorio di Geologia Ambientale) ad assistere alle operazioni. La stratigrafia del terreno viene descritta in situ dalla prof.ssa Gabriella Forno e dal prof. Franco Gianotti: dopo circa 5 m di terreno vegetato costituito da limo sabbioso argilloso di colore bruno rossastro, plastico, con frammenti angulari di materiale di riporto (mattoni, clasti, etc.) si incontra materiale ben permeabile costituito da ghiaia con minori sabbie e ciottoli (saturo da 8 m di profondità). A circa 23 metri di profondità si incontra del terreno impermeabile (argille nocciola e marne grigio azzurre) su cui vengono intestati i due piezometri.

Le marne grigio azzurre, sottoposte ad analisi micropaleontologiche dalla prof.ssa Francesca Lozar, vengono attribuite al Pliocene marino. In particolare sono state studiate le associazioni a coccolitoforidi; questi sono alghe unicellulari marine che costruiscono uno scheletro calcareo facilmente fossilizzabile e sono normalmente abbondanti in sedimenti marini, grazie anche alle dimensioni molto minute (alcuni micron). Grazie alla presenza delle specie *Helicosphaera sellii*, rara nei campioni studiati, ma concomitante con *Reticulofenestra pseudoumbilicus* e *Discoaster asymmetricus*, si è potuto acclarare che il sedimento studiato appartiene alla biozona MNN 14-15, che ha un’età zancleana superiore (Fig. 4).

A cominciare dall’anno accademico 2017-2018 nel sito attrezzato per la Geologia sperimentale presso l’Orto Botanico di Torino inizia l’attività didattica e di ricerca. Ad esempio, durante l’insegnamento di Geografia Fisica e Geomorfologia, col prof. Marco Giardino, il sito è stato



FIGURA 3 – Perforazione a carotaggio continuo per l’installazione del primo piezometro.



FIGURA 4 – Nella sequenza fotografica, i 25 m di carotaggio: a circa 23 metri di profondità si incontra del terreno impermeabile (argille nocciola e marne grigio azzurre in basso a sx) su cui vengono intestati i due piezometri. Dalle analisi micropaleontologiche effettuate dalla prof.ssa Francesca Lozar, le marne grigio azzurre vengono attribuite al Pliocene per la presenza di particolari microfossili (in basso a sinistra).



FIGURA 5 - Il prof. Marco Giardino (primo a sinistra) con gli studenti del corso di Geografia Fisica e Geomorfologia sul sito destinato la Geologia sperimentale presso l'Orto Botanico di Torino dopo la realizzazione dei due piezometri.

sottoposto dagli studenti a un accurato rilevamento geomorfologico di dettaglio. Sono stati individuati dei capisaldi topografici, rilevati punti tramite cartografia, bussole e GPS e realizzati profili topografici (Fig. 5).

Durante l'insegnamento di Idrogeologia Applicata il prof. Domenico De Luca può mostrare agli studenti cos'è

un piezometro, come effettuare misure di livello della falda, effettuare prelievi tramite bayler, nonché condurre prove di tracciamento nell'acquifero (Fig. 6).

Nelle esercitazioni dell'insegnamento di Geofisica Applicata, il prof. C. Comina, oltre ad effettuare agevolmente prove elettriche e sismiche (rifrazione) posizionando i re-



FIGURA 6 - Prove di tracciamento nell'acquifero con NaCl. A sinistra, tubazione utilizzata per l'iniezione; a destra, immissione di soluzione salina a caduta all'interno dell'imbuto.



FIGURA 7 - Prova Downhole DH2. In primo piano si può notare il foro di sondaggio S2, allestito per l'esecuzione della prova, mentre in secondo piano il foro di sondaggio S1. All'interno dell'S2 è situato il sistema ricevente collegato in superficie al sistema di acquisizione; a metà fra S2 e S1 è situato il sistema energizzante costituito da una mazza sismica, collegata al trigger, e da una zavorra metallica su cui si eseguiranno le energizzazioni.

lativi stendimenti lungo il prato dell'arboreto, sfruttando i due piezometri ha potuto mostrare agli studenti sia la prova *Downhole* DH2 (Fig. 7) sia la prova *Crosshole* (Fig. 8), utili entrambe per la valutazione della risposta sismica locale.

IL COMPLETAMENTO (2018-2022)

Al fine di completare il Campo Geosperimentale, l'autore presenta apposita domanda di finanziamento alla **Fondazione CRT**, partecipando al *Bando Ricerca e Istruzione - 2° sessione erogazioni ordinarie 2018* e vincendolo.

Il completamento del Campo Geo-sperimentale presso l'Orto Botanico di Torino ha inteso soddisfare i seguenti bisogni:

- migliorare la preparazione di studenti, ricercatori e professionisti per affrontare con le migliori tecniche disponibili i problemi di mitigazione del rischio geologico e del rischio tecnologico;
- aumentare la consapevolezza del pericolo sismico, della pericolosità geomorfologica e della vulnerabilità delle risorse idriche nei cittadini e in particolare negli amministratori del territorio.

La necessità di preparare tecnici e professionisti ad affrontare con le migliori tecniche disponibili i problemi di mitigazione del rischio geologico e del rischio tecnologico e quella di diffondere nella popolazione la conoscenza di tematiche quali il pericolo sismico, la pericolosità geomorfologica e la salvaguardia delle risorse idriche sono state identificate dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Torino sia direttamente, durante la propria attività istituzionale sui territori di Piemonte e Valle d'Aosta, sia nelle attività di collaborazione con i seguenti Enti territoriali (dei quali sono state certificate lettere di



FIGURA 8 - Esecuzione della prova Crosshole. Il sistema energizzante è stato inserito all'interno del sondaggio S1, mentre il sistema ricevente all'interno del sondaggio S2. Tramite gas in pressione contenuto all'interno della bombola, visibile in primo piano, viene mantenuta l'aderenza ai tubi in PVC dell'insieme cavo-ricevitori all'altezza voluta.

sostegno al Campo Geo-sperimentale presso l'Orto Botanico di Torino):

- Regione Piemonte – Direzione Ambiente, Governo e Tutela del territorio – Settore Tutela delle Acque;
- Regione Piemonte – Direzione Opere pubbliche, Difesa del suolo, Montagna, Foreste, Protezione civile, Trasporti e Logistica – Settore Sismico e Geologico;
- Regione Valle d'Aosta;
- Arpa Piemonte - Dipartimento Sistemi previsionali – Dipartimento Geologia e dissesto;
- Arpa Valle d'Aosta;
- Città Metropolitana di Torino;
- Comune di Torino;
- Ordine regionale dei Geologi del Piemonte;
- Ordine regionale dei Geologi della Valle d'Aosta.

Per rispondere ai bisogni individuati, con il presente progetto è stato completato il campo Geo-sperimentale tramite l'installazione di una nuova centralina meteorologica e la realizzazione di un pozzo per acqua.

Installazione della centralina meteorologica

La centralina consente il monitoraggio di pioggia, temperatura dell'aria umidità dell'aria, pressione atmosferica e radiazione solare (Fig. 9). Le tempistiche, tra contatti con la ditta fornitrice, preventivo, richiesta d'acquisto, installazione e collaudo, sono state di quasi un anno, da metà 2019 a metà 2020, contando anche la riparazione del trasformatore posto a monte della centralina, saltato a causa di un fulmine che, nell'occasione ha anche abbattuto un albero dell'Orto Botanico.

Da allora la centralina registra in continuo le grandezze meteorologiche che vengono utilizzate dai ricercatori del DST.



FIGURA 9. La centralina meteo del Campo geo-sperimentale presso l'Orto Botanico di Torino. Sullo sfondo, il Castello del Valentino.



FIGURA 10 – Il pozzo con pompa sommersa capace di pompare fino a 15 l/s e i due piezometri realizzati precedentemente.

La centralina, insieme ad altre strutture di monitoraggio ambientale del DST, fa parte della rete strumentale di dipartimento “GEOClima-UNITO Simona Fratianni”, dedicata alla professoressa che ha attivamente collaborato alla realizzazione del presente progetto, prematuramente scomparsa il 12 settembre 2020.

La rete strumentale “GEOClima-UNITO Simona Fratianni” è uno degli obiettivi del piano triennale 2022-2024 del DST (approvato nel Consiglio di Dipartimento del 23 marzo 2022), in linea con gli Obiettivi Strategici di Ateneo n. 3.1 (innovare e valorizzare la ricerca) e n. 3.3 (irradiare l’innovazione).

Realizzazione del pozzo per acqua

Insieme ai due piezometri già realizzati dal DST nel 2017, il pozzo con elettropompa sommersa consente di effettuare sia prove a portata variabile (prove a gradini), per la valutazione dell’efficienza dei pozzi, sia prove a portata costante, per la valutazione delle caratteristiche idrodinamiche dell’acquifero (Figg. 10 e 11).

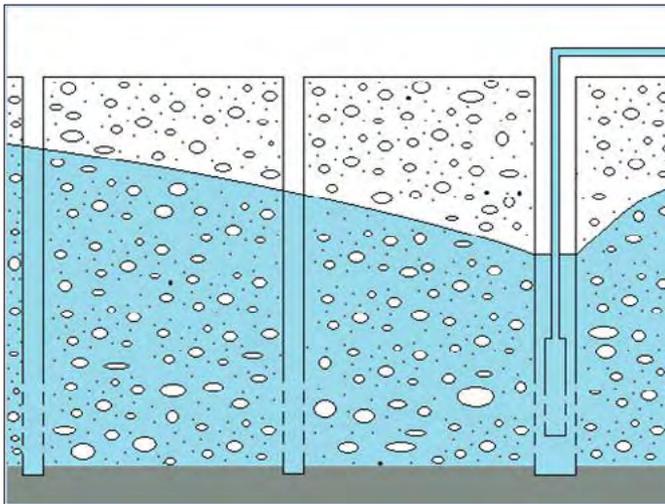


FIGURA 11 – Le prove a portata costante vengono effettuate per ricavare le caratteristiche idrodinamiche dell’acquifero, dalle relazioni tra la portata estratta e gli abbassamenti registrati nel tempo nel pozzo e nei piezometri.

Le tempistiche sono state molto lunghe per diversi motivi: all’inizio la lunga scelta della ditta (che però alla fine ha portato un risparmio intorno al 40%); poi il *lock down* e il maltempo hanno fatto rimandare l’inizio dei lavori ma alla fine, nel mese di novembre 2020, è stato realizzato il pozzo completo di pompa sommersa capace di pompare fino a 15 l/s. Il problema la cui risoluzione ha richiesto più tempo è stato il collegamento elettrico secondo norma all’impianto dell’Orto Botanico nonché il ripristino del fosso storico in mattoni, per il corretto smaltimento delle acque di pompaggio del pozzo. Quest’ultimo ha richiesto il nulla osta di ben tre Sovrintendenze (ai beni storici, ai beni archeologici, ai beni culturali). Il collaudo finale, con il pozzo che estraeva la portata massima e il fosso che smaltiva correttamente le acque di pompaggio, è avvenuto in data 17 maggio 2022, dopo la fine dell’*Eurovision Song Contest* il cui svolgimento nell’area intorno all’Orto Botanico ha creato ulteriori ritardi.

Esecuzione di un video sulla realizzazione del pozzo

Il risparmio ottenuto dall’oculata scelta della ditta per la realizzazione del pozzo ha permesso di finanziare l’esecuzione di un video della durata di circa 20 minuti su come si realizza un pozzo per acqua. Il video è destinato agli stessi soggetti destinatari del progetto ed è stato messo a disposizione sul sito del Dipartimento di Scienze della Terra e sui canali social della SIGEA. Le tempistiche per l’esecuzione del video sono state le stesse che sono occorse per la realizzazione del pozzo, dall’accesso della sonda nel novembre 2020 fino al collaudo del fosso per lo smaltimento delle acque del 17 maggio 2022.

CONCLUSIONI

Il progetto è stato chiuso con tutte le attività previste svolte regolarmente, rendicontato dal Polo di Scienze della Natura e firmato dal Rettore dell’Università di Torino entro i termini stabiliti del 10 giugno 2022.

A parte gli inconvenienti imprevisti (sanitari, maltempo) e la burocrazia (problema nazionale) il progetto ha funzionato bene probabilmente perché puntava sulla realizzazione di cose pratiche, concrete, che resistano nel tempo e che nel tempo siano utili alla maggior parte dei destinatari: gli studenti universitari dei corsi di Laurea in Scienze Geologiche e in Scienze Naturali, dei corsi di Laurea Magistrale in Scienze Geologiche Applicate, in Scienze Geografiche e in Monitoraggio Ambientale, Tutela e Ripristino che regolarmente effettuano prove e sperimentazioni nel Campo Geo-sperimentale e che continueranno a farlo meglio con l’incremento delle strutture.

Alcuni aspetti del progetto evidenziano l’impegno dell’Università di Torino verso il raggiungimento degli obiettivi dell’*Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile*.

Permettere agli studenti di diversi corsi di laurea e di laurea magistrale di svolgere attività di ricerca e di didattica a poca distanza dai propri Dipartimenti consente un notevole risparmio di tempo e di danaro altrimenti necessari come in passato per raggiungere luoghi dove erano in programma i test e le sperimentazioni che ora si possono effettuare in una struttura dell’Università. Questo aspetto è sicuramente in linea con la *sostenibilità economica, sociale, ed ambientale*, ma favorisce anche l’*inclusione l’accessibilità* e la *parità di genere*.

Poiché le prove in situ che si effettuano nel Campo Geo-sperimentale (oltre alle prove idrogeologiche pozzo-piezometro, anche prove geofisiche, prove penetrometriche¹, etc...) sono tra le più utili nella professione del geologo, il progetto è sicuramente in linea con l’*inserimento nel lavoro* e col *ricambio generazionale*.

¹ Mentre viene pubblicato il presente articolo, con la collaborazione dei Dott.ri Enrico Destefanis e Battista Taboni e delle prof.sse Sabrina Bonetto e Gessica Umili, si sta ripristinando un penetrometro carrellato fornito in comodato d’uso dalla Regione Piemonte che verrà trasferito nel Campo Geo-sperimentale.

Studio degli aspetti del microclima di grotta fondamentali nella qualità ambientale del S.I.C. Borna Maggiore di Pignetto (Valli di Lanzo, Piemonte)

Fundamental aspects of the cave microclimate in the environmental quality of Borna Maggiore di Pignetto S.C.I. (Lanzo Valley, Piedmont)

MICHELE MOTTA

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino

E-mail: michele.motta@unito.it

LUIGI MOTTA

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino

E-mail: luigi.motta@unito.it

Parole chiave: Qualità ambientale, Grotte, Microclima ipogeo, Oscillazioni termiche, Umidità

Key words: Environmental quality, Caves, Cave microclimate, Temperature, Humidity

INTRODUZIONE

La Borna Maggiore è una grotta della valle di Lanzo presso Pignetto (375551 E, 5014621 N, 820 m s.l.m.), Sito di Interesse Comunitario (Direttiva Europea Habitat 43/92) essendo fondamentale area di svernamento di diverse specie di chiroterri, alcune seriamente minacciate di scomparsa: *Rhinolophus ferrumequinum*, *Myotis emarginatus*, *Myotis blythii*, *Myotis myotis*, *Myotis bechsteinii*, *Myotis daubentonii*, *Myotis nattereri*, *Plecotus auritus*. Infatti, Pignetto è l'unica area carsica nelle Valli di Lanzo (Balbiano d'Aramengo, 1993) e comprende, oltre alla Borna Maggiore, solo cavità minori non così adatte al letargo dei pipistrelli. Poiché la grotta non è stata mai raggiunta dai ghiacciai (Motta, 2014), vi si osservano artropodi e crostacei endemici che ne accrescono il valore ambientale, provenienti dal soprastante MSS (*Milieu Souterraine Superficiel*) o viventi in essa, come *Dellabeffaella roccai*, *Alpioniscus feneriensis caprae*, *Dolichopoda ligustica septentrionalis*, *Troglohyphantes bornensis*. Anche l'interesse mineralogico è alto, per le abbondanti druse di calcite formatesi in condizioni subacquee (quando la grotta era in condizioni freatiche), e per le concrezioni di silice idrata dette "lacrime di Santa Maria". La grotta ha pure un alto interesse speleologico poiché, come le altre grotte dell'area, è in calcescisti, rocce in cui altrove le cavità ipogee sono rare e in genere derivanti da semplice allargamento tettonico o gravitativo di fratture e non, come qui, da vera dissoluzione carsica.

Il valore del sito come area di svernamento dei chiroterri deriva *in primis* dalle sue peculiarità microclimatiche e geomorfologiche quali l'assenza di periodi di gelo e la disponibilità di superfici strapiombanti pressoché irraggiungibili dai predatori.

Come tutti i microclimi di grotta, quello della Borna è potenzialmente vulnerabile sia al *Global Warming*, sia a modifiche indotte da eccessiva o mal gestita frequentazione turistica. Scopo di questo lavoro è caratterizzare gli aspetti del microclima interno della Borna di maggiore importan-

za per la stabilità dell'ecosistema (oscillazioni termiche, umidità) e potenzialmente sensibili ad azioni antropiche (chiusura della grotta, illuminazione, ecc.). In particolare, si confrontano i risultati del progetto CAVELAB (2012-2014) con dati più recenti (2014-15), relativi specificatamente al periodo di letargo dei pipistrelli.

GEOMORFOLOGIA

È stato condotto uno studio geomorfologico preliminare (Fig. 1) utile a caratterizzare numero e posizione degli ingressi, aspetto determinante per la meteorologia ipogea e il microclima interno delle grotte (Badino, 1995; Motta & Motta, 2019). I risultati di questo studio non sono definitivi: ulteriori successive esplorazioni hanno già portato alla scoperta di nuovi rami e del collegamento (non percorribile) con la vicina Tana del Lupo; inoltre, sono in progetto indagini geofisiche, sia per individuare l'intero percorso della parte attiva della grotta, sia per scoprire nuovi rami.

In generale la grotta si è formata come collegamento idrogeologico tra i valloni del Rio Cenere (a quota relativamente più elevata) e della Comba, separati da un rilievo, il Truc d'le Tampe (Fig.1), molto accentuato ma costituito da rocce solubili (calcescisti ricchi di facies marmoree). Una serie di fratture di origine tettonica ha favorito e guidato la carsificazione, da cui il caratteristico *pattern* della grotta (Fig.1). Le principali linee strutturali sono piani di faglia F1 (da 336° / 71° a 310° / 76°) separanti rocce con scistosità S1 (60°-84° / 33°-60°) da altre con S1 165° / 59°; sono inoltre presenti le famiglie di giunti J1 0° / 80° e J2 124°-130° / 50° (Motta & Motta, 2015).

La grotta è quasi orizzontale, poggiando su un acquitar-do costituito da filliti, permeabili per fratturazione ma molto meno degli spessi livelli di marmi a silicati in cui si sviluppano le principali gallerie. Gran parte della morfologia originaria delle gallerie è stata ampiamente rimodellata dal *cave breakdown*, il progressivo collasso gravitativo dei soffitti cau-

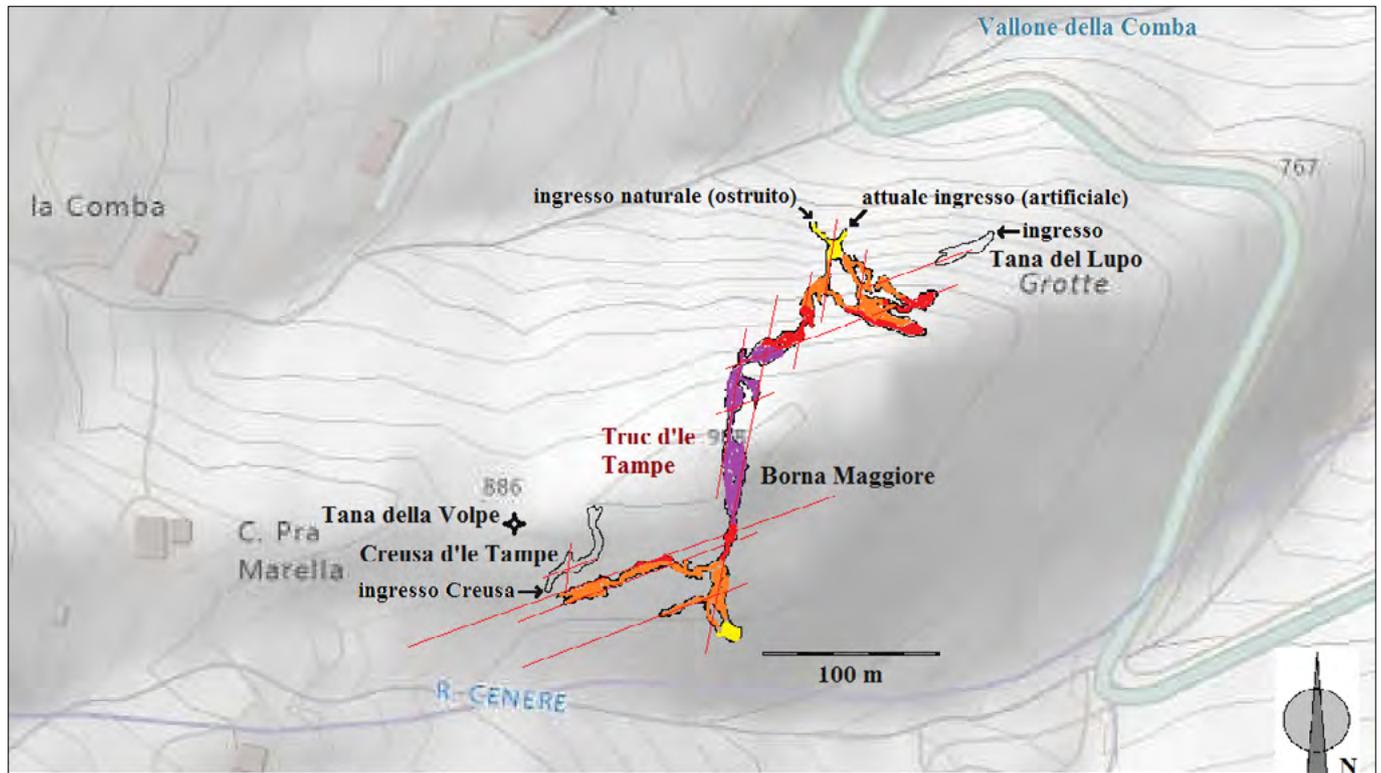


FIGURA 1. Borna Maggiore e cavità minori vicine. Le linee rosse rappresentano le principali fratture, i colori la distanza verticale dalla superficie topografica soprastante. Giallo: 0-20 m; arancione: 20-40 m; rosso: 40-60 m; violetto: 60-80 m.

sante a più riprese distacchi di lastroni e il loro accumulo sui pavimenti. Tale processo ha modificato significativamente la sezione delle gallerie, estendendola verso l'alto e dividendola quasi ovunque in parte superiore, percorribile agevolmente (camminando sui lastroni caduti), e parte inferiore ingombra di blocchi. Alla base della parte inferiore passa, insinuandosi fra i massi, il flusso idrico. Quest'ultimo è così facilmente visibile solo al termine a monte del Ramo della Fontana (Fig. 2), costituito da una stretta galleria epifreatica che non ha ancora subito fenomeni di *cave breakdown*. Uscendo da questa galleria l'acqua si infossa sotto ai blocchi crollati che costituiscono il pavimento del resto del Ramo della Fontana, scorrendo nel cosiddetto Ramo Inferiore (in effetti la parte bassa, ingombra di blocchi, della medesima galleria del Ramo della Fontana), che si può percorrere per breve tratto strisciando tra i massi. Sia il letto della parte del Ramo della Fontana percorsa dall'acqua, sia una galleria recentemente scoperta (non riportata in Fig. 1) che sfocia nel Ramo della Fontana, contengono numerosi ciottoli fluitati di serpentiniti provenienti dal Rio Ceneri. Mancano invece del tutto fossili di macromammiferi, suggerendo che le gallerie oggi percorribili dall'uomo siano diventate tali solo da poco.

La diffusa presenza di druse di calcite formatesi in condizioni subacquee indica che tutto il volume della grotta è stato in condizioni freatiche. Il tratto terminale del Ramo della Fontana è in condizioni epifreatiche (durante le piene l'intera sezione di deflusso è allagata) da tempi abbastanza recenti. Forme epifreatiche ormai inattive sono visibili in tutto il Ramo della Fontana e nel ramo a esso parallelo più a S, in cui scorre acqua nei periodi più piovosi. Salvo la galleria al termine del Ramo della Fontana, al giorno d'oggi tutta la parte conosciuta della Borna è in condizioni vadose (Motta & Motta, 2017).

I PARAMETRI MICROCLIMATICI

Il progetto CAVELAB, primo studio moderno della grotta (Isaia *et al.*, 2013) ha monitorato gli interstizi dei pavimenti delle gallerie (principale habitat degli artropodi), con sensori a precisione $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ misuranti ogni tre ore, dal 27.05.2012 al 6.02.2013 (Fig. 2). Per stimare il dato annuale nonostante il breve periodo di osservazioni, in Motta & Motta (2015) sono usate media, deviazione standard e media dell'escursione termica giornaliera di gennaio 2013 e luglio 2012 (tab. 1). La differenza fra gennaio e luglio non va intesa come escursione termica annua, poiché in grotta gennaio e luglio di norma non sono i mesi più freddo e più caldo dell'anno (Motta & Motta, 2019).

In riferimento alle condizioni termiche delle grotte piemontesi (Motta & Motta, 2014), a distanza maggiore di 30 m dall'ingresso la Borna Maggiore appartiene alle condizioni del tipo A, caratterizzato da bassissime escursioni termiche sia a scala giornaliera ($< 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$) sia annuale ($< 0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$). Vicino all'ingresso la Borna ha invece condizioni termiche di tipo B: escursione termica giornaliera molto bassa ($0,02\text{-}0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$), escursione annua bassa ($2\text{-}5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Le oscillazioni termiche nella Borna sono connesse alle variazioni meteorologiche esterne, specie in autunno. In questa stagione presso l'ingresso la temperatura talvolta scende improvvisamente, probabilmente perché acqua molto più fredda della grotta arriva dalla superficie, grazie al forte surplus idrico nel suolo sopra la grotta, tipico dell'autunno (Motta & Motta, 2015).

Nell'ambito del progetto CAVELAB sono stati condotti rilevamenti stagionali di temperatura e umidità (sensore Pt100 con errore massimo di $T \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, precisione di $\text{RH} \pm 2\%$), lungo l'asse dei principali rami della grotta ogni 10 m, e in sezioni trasversali delle gallerie ai nodi di una rete

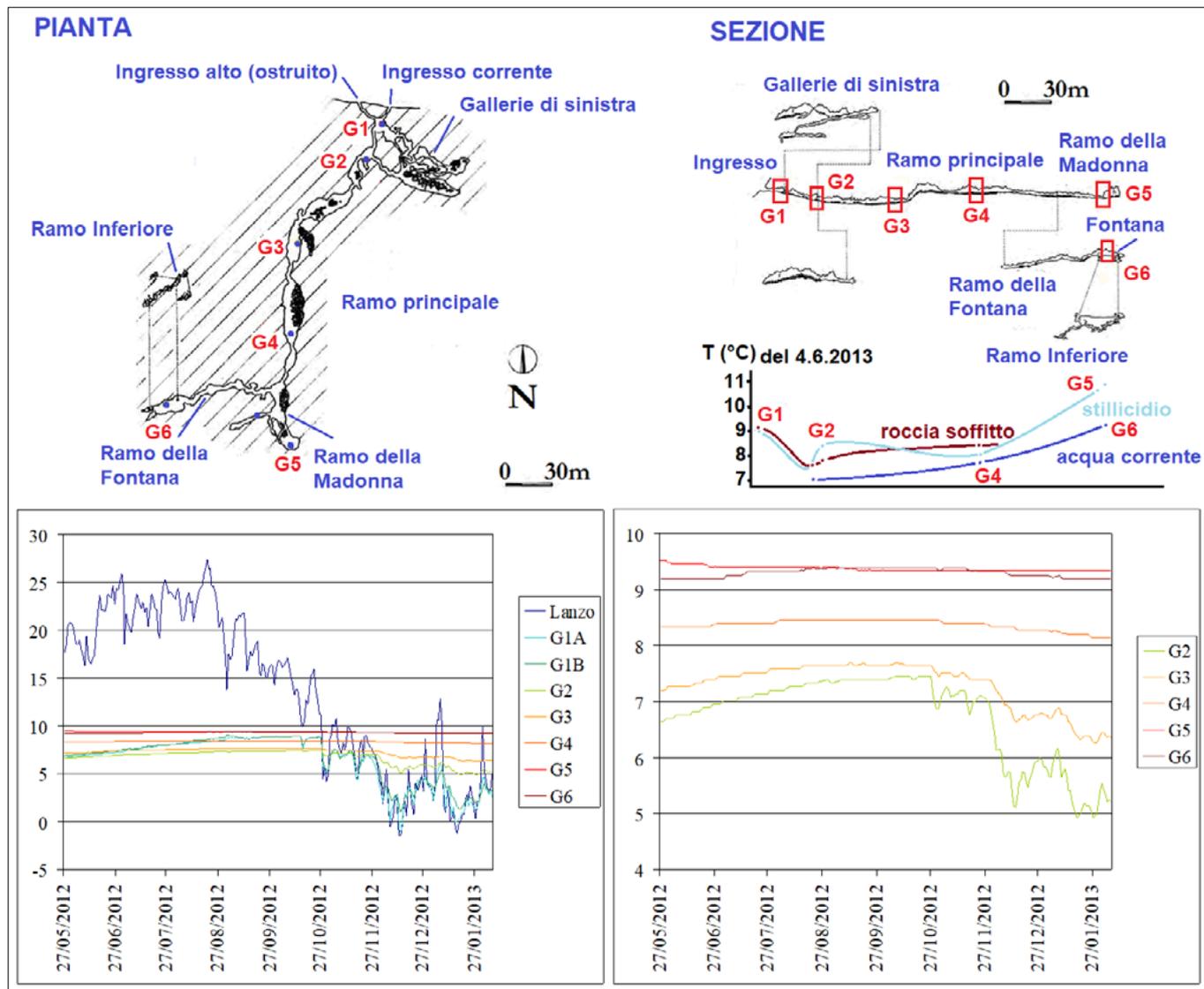


FIGURA 2. Posizione degli I-button del progetto CAVELAB e temperature di acqua e roccia in corrispondenza a essi (sopra); temperatura misurata dagli I-button e dalla stazione ARPA di Lanzo, la più vicina al sito (sotto, da Motta & Motta, 2015). Il grafico in basso a destra riporta ingrandite le misure degli I-button più lontani dall'ingresso.

Tabella 1. Dati termici (°C) di luglio 2012 (L) e gennaio 2013 (G), da Motta & Motta (2015). La media annua è stimata mediando luglio e gennaio, in considerazione dell'elevata stabilità termica dell'ambiente ipogeo.

I-button	Distanza da ingresso (m)	Media		Differenza	Media annua	Deviazione standard		Escursione giornaliera	
		G	L			G	L	G	L
G1A	3	2,38	7,76	5,38	5,07	1,69	0,20	1,50	0,06
G1B	3	2,95	7,82	4,87	5,38	1,13	0,16	0,41	0,05
G2	30	5,40	7,09	1,69	6,25	0,39	0,06	0,14	0,01
G3	90	6,54	7,50	0,96	7,02	0,21	0,04	0,03	0,00
G4	150	8,21	8,40	0,19	8,30	0,04	0,00	0,02	0,00
G5	230	9,34	9,40	0,06	9,37	0,00	0,00	0,00	0,00
G6	350	9,21	9,29	0,08	9,25	0,02	0,04	0,01	0,01

a maglie di 0,5 m. Inoltre è stata misurata l'umidità interna delle pareti laterali con sensore dielettrico. La distribuzione abbastanza omogenea di T e RH (Fig. 3) indica buona circolazione dell'aria, salvo che:

- nelle depressioni, evidenzianti l'effetto "buca fredda" (ad es. nella galleria principale a 40 – 120 m dall'ingresso, o nelle Gallerie di Sinistra);
- al fondo del Ramo della Madonna, evidenziante l'effetto "trappola d'aria calda".

L'umidità assoluta varia molto con le stagioni: la grotta si asciuga molto d'inverno, in primavera resta ancora poco umida nei primi 60 m, mentre in estate e autunno è ovunque molto umida, specie in fondo al Ramo della Fontana (per la presenza di acqua corrente), e nel Ramo della Ma-

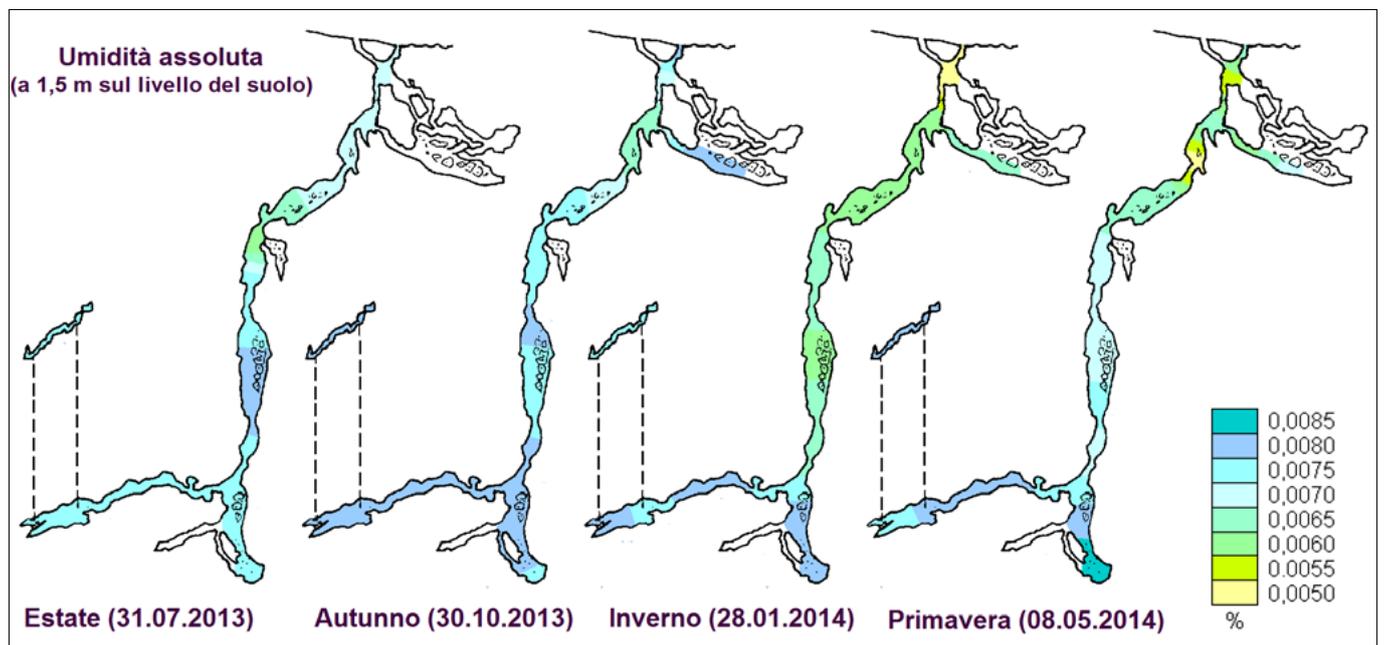
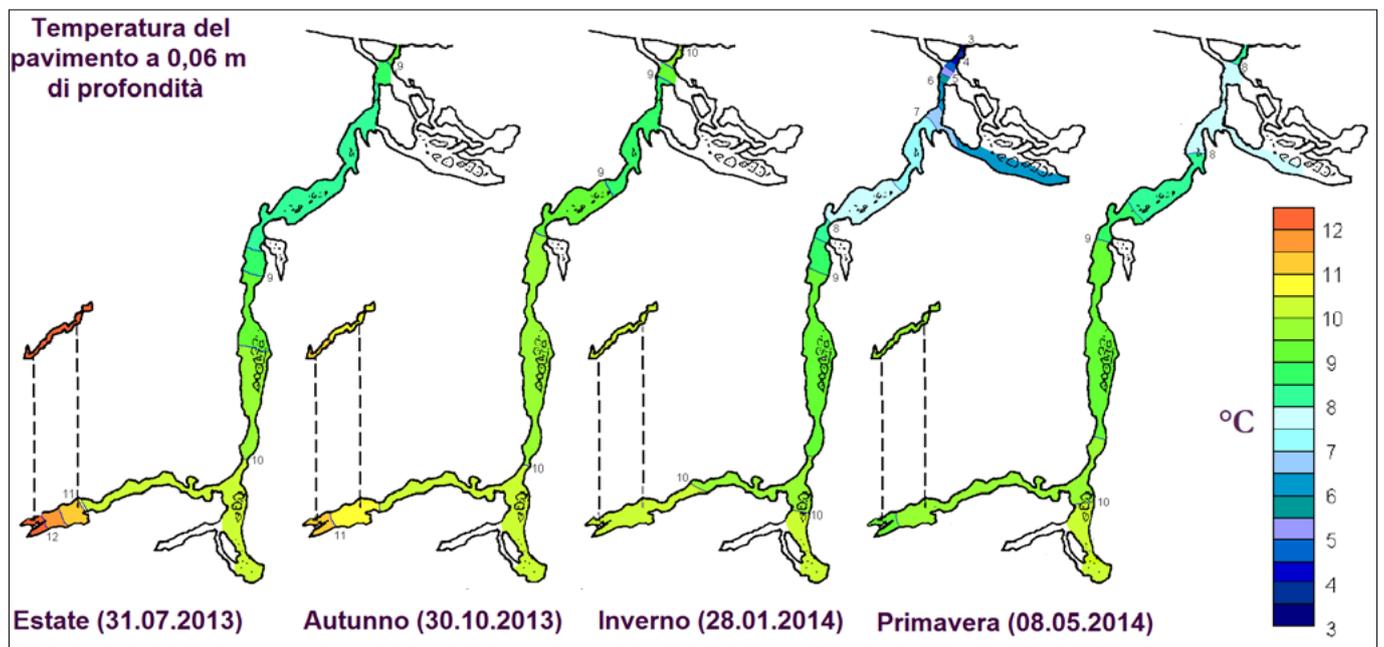
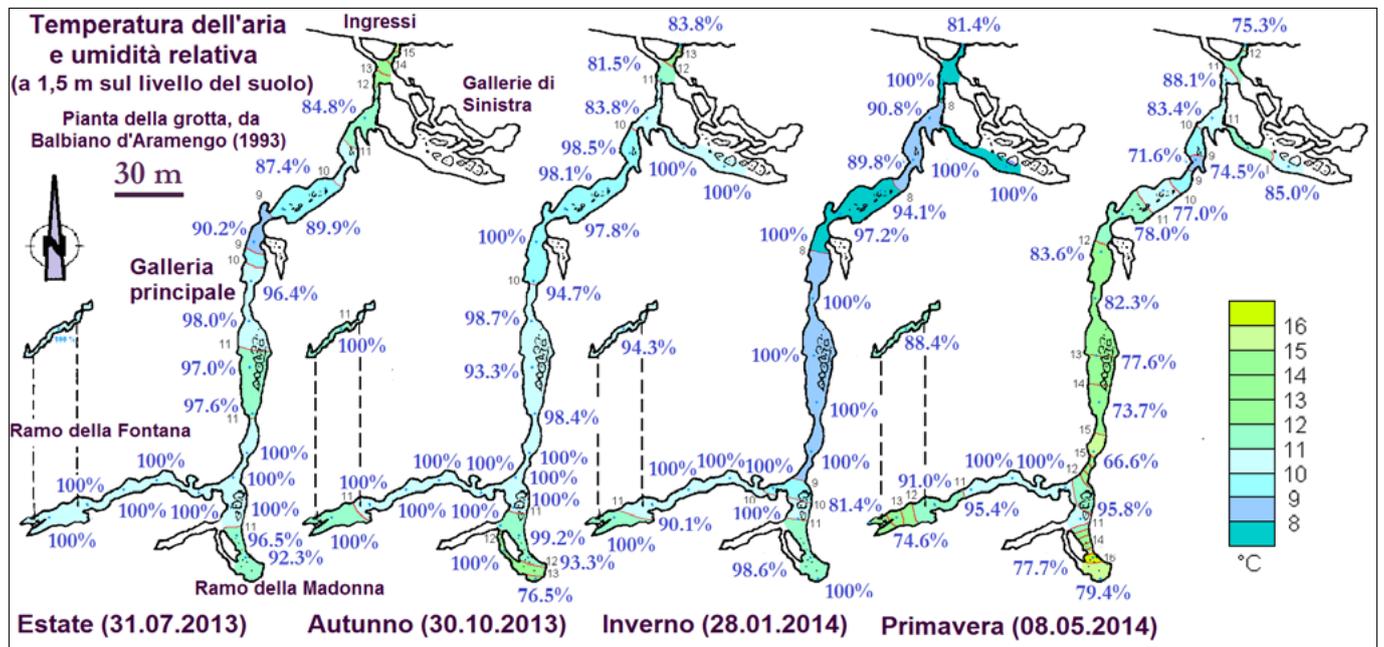


FIGURA 3. Distribuzione stagionale di umidità e temperature (da Motta & Motta, 2015).

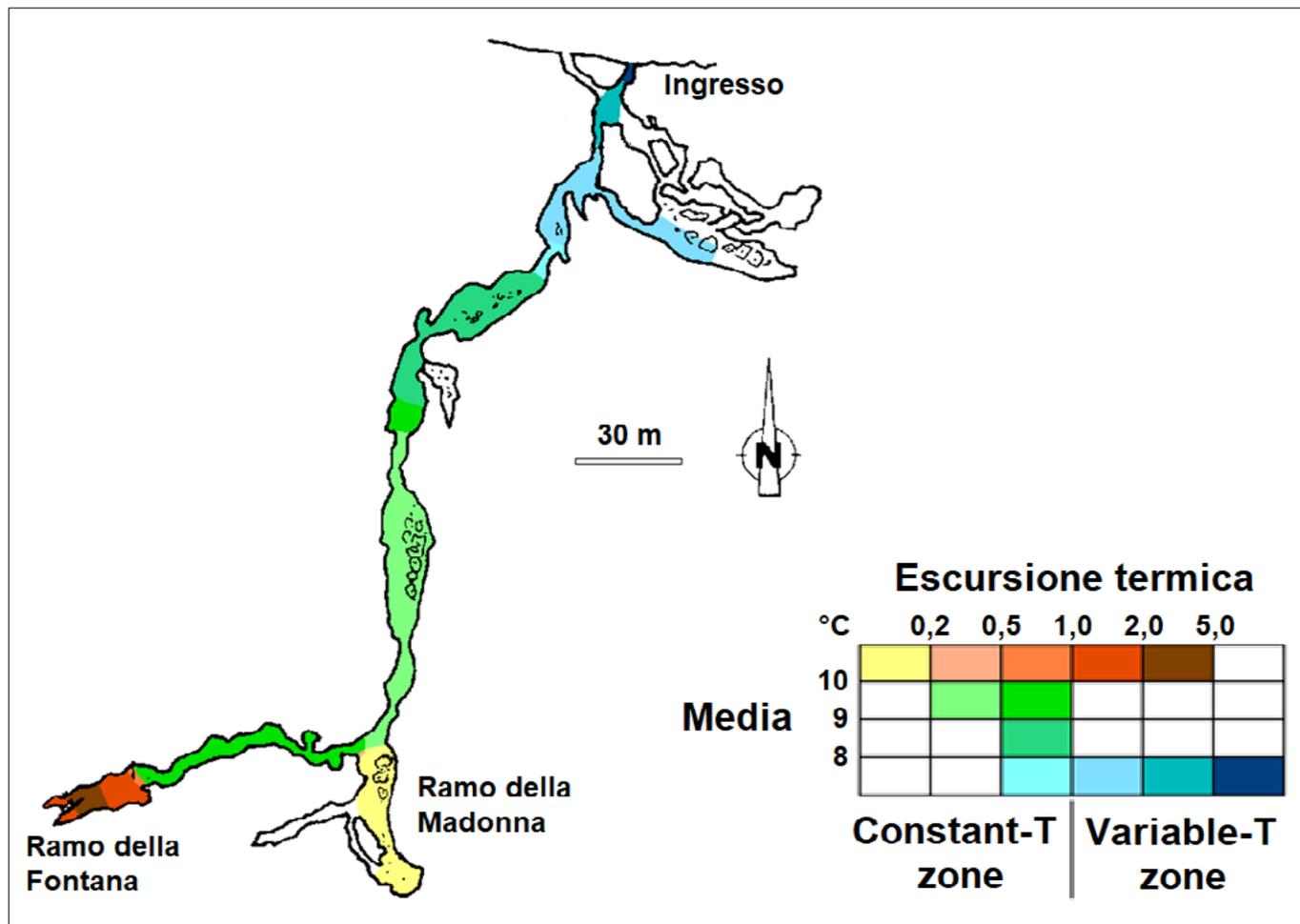


FIGURA 4. Zone termiche del pavimento della grotta, basate sulla media (delle temperature stagionali 2013-14) e sull'escursione termica (massima differenza tra i valori stagionali 2013-14). Da Motta & Motta (2015), base cartografica da Balbiano d'Aramengo (1993). Le zone in bianco nella mappa non sono state misurate; le caselle in bianco nella legenda sono condizioni assenti nella Borna.

donna (perché, leggermente ascendente, intrappola l'aria umida, più leggera).

L'umidità relativa, salvo che in prossimità allo scorrimento idrico, è ben lontana dalla saturazione, anche nelle stagioni di stillicidio abbondante. Presenta una forte variabilità spaziale, suggerendo che l'aria circolante, espandendosi e comprimendosi nell'attraversamento di camere e strettoie, alterna condensazione e evaporazione sulle superfici lungo cui scorre. Infatti, molte superfici rocciose sono bagnate anche dove non c'è stillicidio, e nonostante la bassa RH media dell'aria.

I pavimenti presentano comportamenti termici differenziati. Alcuni hanno variazioni termiche relativamente alte: quelli dei primi 140 m dall'ingresso, a causa dell'arrivo di aria esterna e acqua di stillicidio; quelli del Ramo della Fontana, la cui temperatura ricalca quella dell'acqua di sorgente. Gli altri pavimenti presentano una temperatura molto costante, anche nel Ramo della Madonna che è molto più vicino all'esterno del Ramo della Fontana, e sono, come l'acqua di stillicidio, sempre un po' più freddi dell'aria (mediamente 0,6 °C).

Le variazioni termiche della grotta (Fig. 4) sono sicuramente in relazione con le variazioni meteorologiche esterne, ma secondo un meccanismo complesso. Il notevole squilibrio termico perenne tra Ramo della Fontana (caldo) e zona d'ingresso (fredda) suggerisce tre fonti di variazioni termiche, tutte derivanti da flussi di materia: l'ingresso di

acqua (al Ramo della Fontana), l'entrata di aria dall'ingresso e dal collegamento con la Tana del Lupo, lo stillicidio. Le variazioni termiche associate a queste fonti sono sfasate nel tempo e a differente intensità. Una causa è probabilmente la variabilità di insolazione e quota della superficie topografica sopra la grotta: dai pendii più elevati ma ben soleggiati della Comba di Rio Cenere (da cui proviene l'acqua della Fontana), ai pendii attorno all'ingresso, più bassi di quota ma ombrosi.

LE VARIAZIONI TERMICHE NEL PERIODO DI LETARGO DEI CHIROTTERI 2014-2015

Per studiare più specificamente le condizioni termiche degli ambienti usati dai chirotteri per il letargo, dal 28.10.2014 al 22.04.2015 sono state installate tre centraline Mylog, ciascuna collegata a due sensori Pt100 ($\pm 0,1$ °C) sincronizzati. La prima, al fondo del Ramo della Fontana, aveva un sensore sospeso in aria, l'altro immerso nel corso d'acqua che alimenta la Fontana. I sensori della seconda, nella camera a metà della grotta, erano uno appeso alla parete laterale sinistra (entrando), l'altro immerso nel sedimento del pavimento a 20 cm di profondità. I sensori dell'ultima erano uno appeso al soffitto del corridoio d'ingresso, l'altro immerso a 20 cm di profondità nel sedimento del pavimento di un piccolo anfratto della parete sinistra prossima

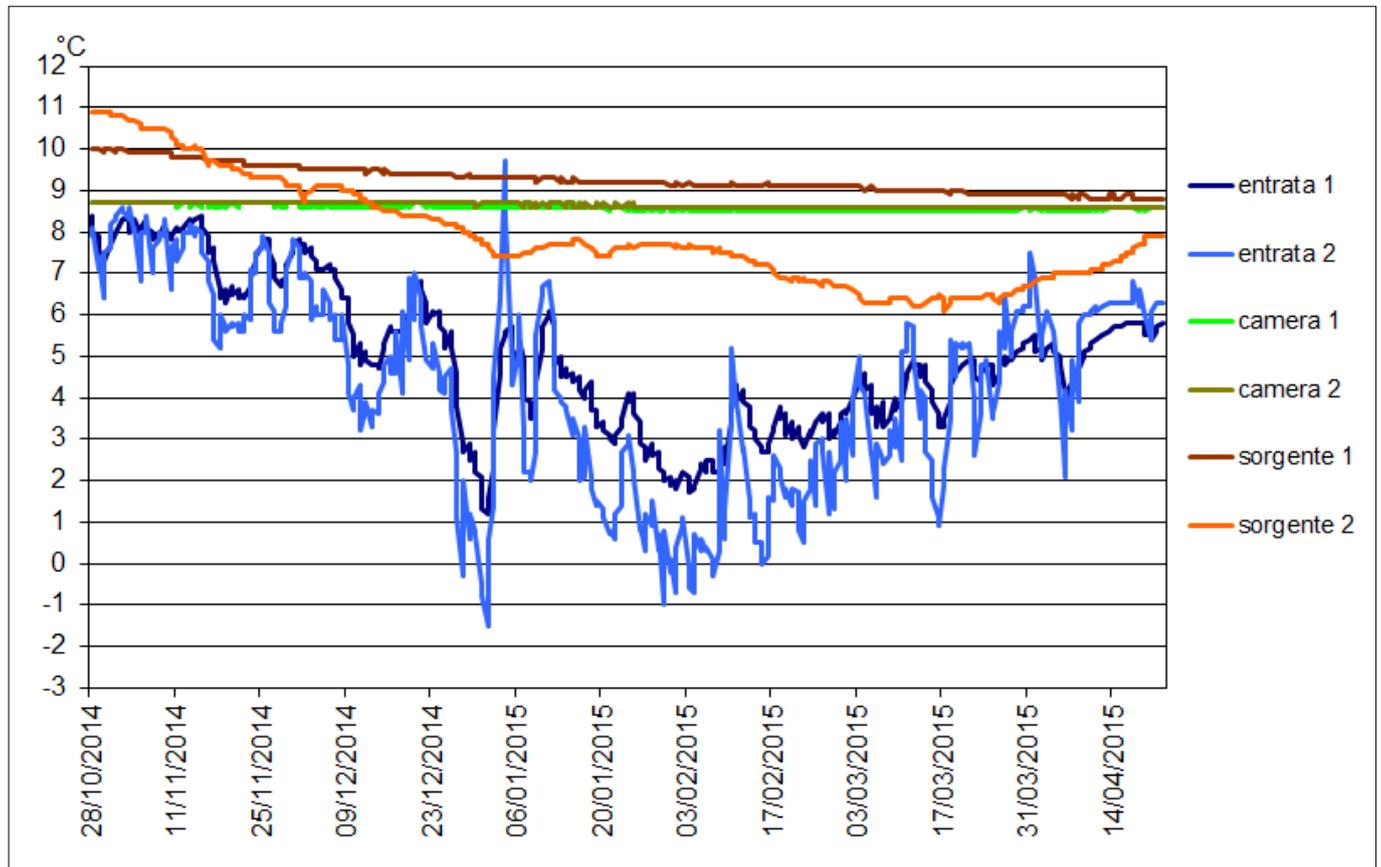


FIGURA 5. Temperature in pavimento (1) e aria (2) vicino all'entrata della grotta e nella camera centrale, in aria (sorgente 1) e acqua (sorgente 2) nel Ramo della Fontana.

all'entrata. I dati validati (Fig. 5) mostrano che all'ingresso l'influenza dell'aria esterna comporta forti e improvvise variazioni termiche dell'aria che, solo un po' attenuate, sono presenti anche nel sedimento a 20 cm di profondità. Nella camera centrale aria e sedimento non presentano significative oscillazioni termiche. Nel ramo della Fontana l'acqua presenta notevoli variazioni termiche, seguite in ritardo e in tono minore dalle variazioni a breve periodo dall'aria.

Il confronto tra le variazioni all'ingresso e nell'acqua del Ramo della Fontana indica che nel periodo più freddo dell'inverno ci sono momenti di contrapposizione tra l'aumento di temperatura dell'aria e il raffreddamento dell'acqua; questo fenomeno è tipico delle grotte alpine e causato da un aumento di temperatura dell'aria all'esterno (tipicamente per il foehn) che provoca (o aumenta) la fusione del manto nevoso, facendo arrivare in grotta acque molto più fredde delle acque residenti da più lungo tempo nella falda idrica che alimenta il corso d'acqua sotterraneo.

La differenza termica tra le sonde conferma le considerazioni basate sui rilevamenti stagionali CAVELAB: nella porzione centrale della grotta il pavimento è leggermente più freddo dell'aria; all'ingresso le differenze sono forti, ma senza significativo *trend* stagionale; nel Ramo della Fontana l'acqua comincia a diventare più fredda dell'aria da metà novembre, per arrivare alla massima differenza a marzo, mese del disgelo.

CONCLUSIONI

Ridotte oscillazioni termiche, assenza di periodi di gelo a breve distanza dall'ingresso, buona areazione ma senza

forti correnti d'aria: sono questi i principali fattori che rendono il microclima della Grotta della Borna favorevole allo svernamento dei chiroterri. Risulta importante anche il raffreddamento operato dall'acqua di fusione nivale: d'inverno arriva in grotta proprio quando entra aria più calda, evitando il risveglio prematuro dei chiroterri nei giorni di foehn.

Il mantenimento di queste condizioni favorevoli significa preservare la qualità ambientale del SIC. Tali condizioni sono in un equilibrio delicato, facilmente alterabile da azioni e interventi impropri, anche apparentemente innocui. In particolare, l'attuale ingresso della grotta, allargato artificialmente, causa nei pressi dell'ingresso picchi sotto gli 0 °C (Fig. 5), sicuramente assenti quando esisteva solo l'ingresso naturale (un buco triangolare alto meno di un metro, modificato già nel 1924: Berutto, 1983). Esso comunque garantisce ancora al tempo stesso sia il passaggio dei chiroterri, sia il mantenimento di una buona stabilità termica.

Un suo ulteriore ampliamento, invece, provocherebbe eccessivo ingresso d'aria fredda, causando un abbassamento della temperatura a livelli tali da essere insostenibili per i chiroterri. Allo stesso tempo, con effetti opposti, un impianto di illuminazione da "grotta turistica" inadatto (ad es. con luci a forte emissione di calore), o un eccessivo carico turistico, produrrebbero aria calda che rimarrebbe intrappolata nelle parti più interne della grotta (in particolare il Ramo della Madonna) alzandovi la temperatura a livelli probabilmente sfavorevoli per la microfauna, composta largamente da specie stenoterme (Isaia *et al.*, 2013).

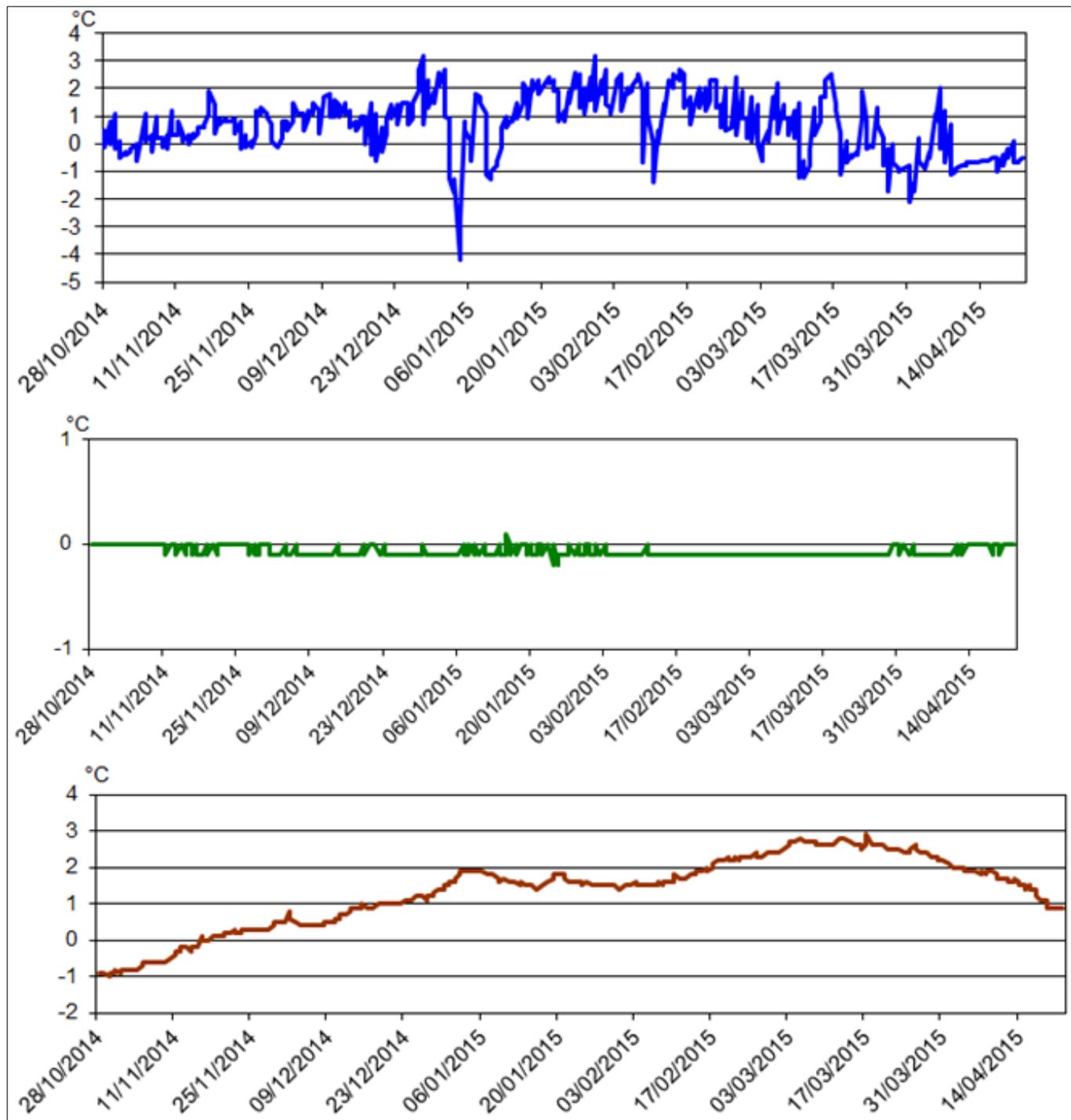


FIGURA 6. Dall'alto, differenza termica tra pavimento e aria all'ingresso, tra pavimento e aria nella camera centrale, tra aria e acqua nel Ramo della Fontana.

OPERE CITATE

- BADINO G. (1995). *Fisica del clima sotterraneo*, Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, Bologna.
- BALBIANO D'ARAMENGO C. (1993). *Le grotte del Piemonte*, Via dalla Pazza Folla, Cassolnovo.
- BERUTTO G. (1983) *Valli di Lanzo e Moncenisio*, Istituto Geografico Centrale, Torino.
- ISAIA M., PASCHETTA M., CHIARLE A., BADINO G., BERTO S., BONA F., MEREGALLI M., MOTTA M., MOTTA L., VIONE D., VIZZINI A. (2013). *CAVE-LAB, an interdisciplinary research project for the study of cave ecosystems and their potentialities for the study of global change*, Abstract Book of XIX International Congress of Arachnology, Kenting.
- MOTTA L., MOTTA M. (2014). *Oscillations of temperatures in Piedmont caves remarkable for speleofauna*, SCIECONF 2014, EDIS, Zilina.
- MOTTA M. (2014). *The definition of the extension of quaternary glaciers within alpine valleys, and his application to study of subterranean fauna*, QUAESTI 2014, EDIS, Zilina.
- MOTTA L., MOTTA M. (2015). *The climate of the Borna Maggiore di Pugno Cave (Lanzo Valley, Western Italian Alps)*, Universal Journal of Geoscience n. 3 (3).
- MOTTA L., MOTTA M. (2017). *The climatic study of caves with single entrance: temperatures, humidity, thermal exchanges*, Lulu, Raleigh.
- MOTTA L., MOTTA M. (2019). *Le stagioni delle grotte*, Lulu, Raleigh.

Pericolosità geo-idrologica del T. Malone (provincia di Torino – Italia nordoccidentale)

Geo - hydrological hazard of Malone stream (province of Turin – northwestern Italy)

MARIKA NOVELLO¹, ANNALISA BOVE², LUCIANO MASCIOTTO³

¹ Università degli Studi di Torino

² Geologo, Libero Professionista – Socio SIGEA-APS

³ Università degli Studi di Torino – Consigliere SIGEA-APS

E-mail: annalisa.bove@geologipiemonte.it (A. Bove), luciano.masciocco@unito.it (L. Masciocco)

Parole chiave: pericolosità idrologica, provincia di Torino, Italia nordoccidentale

Key words: hydrological hazard, province of Turin, northwestern Italy

1. INTRODUZIONE

Il presente lavoro è finalizzato alla valutazione della pericolosità idrologica del T. Malone il cui bacino si estende interamente nel territorio della provincia di Torino per circa 344 km², di cui il 25% in ambito montano e il 75% in pianura; esso digrada dai territori montuosi di Corio e Forno Canavese (quota max 2.167 m s.l.m.), proseguendo nel territorio di alto terrazzo (Vauda) e di pianura del Basso Canavese, fino alla confluenza del torrente nel fiume Po, a 181 m s.l.m., tra gli abitati di Brandizzo e di Chivasso (Fig. 1).

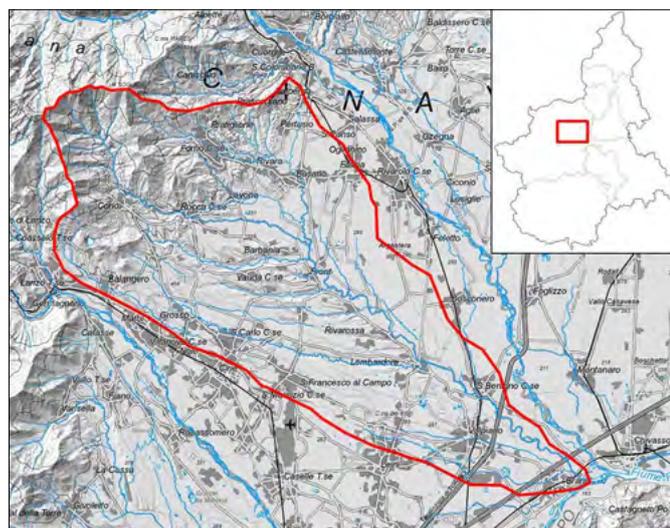


FIGURA 1. Il bacino del Torrente Malone.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Facendo riferimento alla Carta Geologica della Regione Piemonte alla scala 1:250.000 (Piana et al., 2017), nel bacino del T. Malone sono presenti le seguenti litologie (Fig. 2): Unità derivanti dal MARGINE CONTINENTALE PALEOADRIATICO

COMPLESSI METAMORFICI DEL DOMINIO AUSTRALPINO:

Zona Sesia-Lanzo:

- Unità di Rocca Canavese (SLs): serpentiniti antigoritiche;
- Unità di Rocca Canavese (SLR): gneiss, micascisti, miloniti;

- *Complesso dei Micascisti Eclogitici (SLEg)* (Permiano?): metagabbri;
- *Complesso dei Micascisti Eclogitici (SLE)*: micascisti eclogitici, paragneiss, eclogiti.

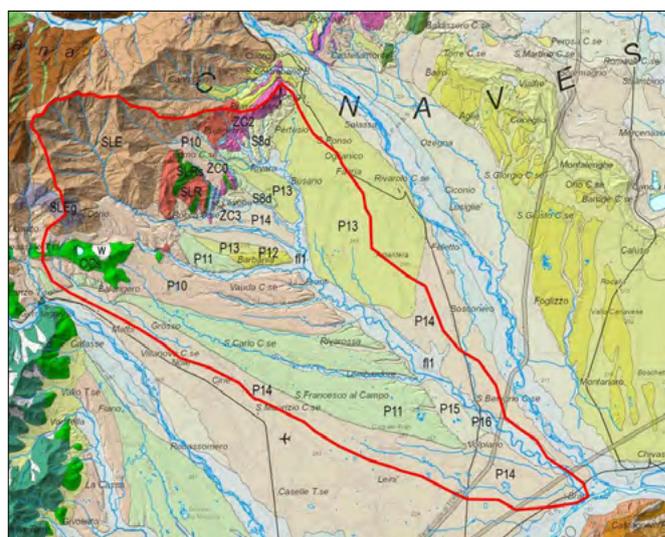


FIGURA 2. Il bacino del T. Malone (limite in rosso) riportato sullo stralcio della Carta geologica del Piemonte alla scala 1:250.000 (Piana et al., 2017).

ZONA A SCAGLIE TETTONICHE

Zona del Canavese:

- *Serpentinite di Pesmonte (ZC0)*: serpentinite, lizardite;
- *Rocce Permiane intrusive e vulcaniche (ZC2)*: graniti, vulcaniti e vulcanoclastiti permiane;
- *Successione sedimentaria Mesozoica (ZC3)*: quartzite, calcare, dolomite, breccia, arenaria, radiolarite e calcescisti.

Unità derivanti dal DOMINIO OCEANICO LIGURE-PIEMONTESE UNITÀ METAMORFICHE

Unità oceaniche delle Alpi occidentali, delle Alpi Liguri e dell'Appennino occidentale:

- *Serpentiniti, serpentinoscisti e serpentiniti* con associate breccie serpentinitiche e oficalciti (OCs).

BACINI SIN-OROGENICI

SUCCESSIONI CENOZOICHE DEI BACINI EPISUTURALI INTERNI

Successione Pliocenica:

- Successioni silteose e sabbioso-ghiaiose zancleano-piacenziane (S8d) (Piacenziano): “villafranchiano b”.

SUCCESSIONI QUATERNARIE

Bacino Padano Occidentale:

- Depositi fluviali (P10) (Pleistocene Inf.);
- Depositi fluviali, depositi glaciali di fondo e di ablazione, depositi fluvioglaciali (P11) (Pleistocene Medio);
- Depositi fluviali, depositi glaciali di fondo e di ablazione, depositi fluvioglaciali (P12) (Pleistocene Medio);
- Depositi fluviali, depositi glaciali di fondo e di ablazione, depositi fluvioglaciali (P13) (Parte superiore del Pleistocene Medio);
- Depositi fluviali, depositi fluvioglaciali, depositi di megafan e depositi glaciali di fondo e di ablazione (P14), (Pleistocene Medio-Sup.);
- Depositi fluviali, depositi glaciali di fondo e di ablazione, depositi fluvioglaciali (P15) (Pleistocene Sup.);
- Depositi fluviali (fl1) (Olocene-Presente).

EVENTI ALLUVIONALI PREGRESSI

Gli eventi più importanti e significativi verificatosi nel territorio in esame sono rappresentati dalle alluvioni del novembre 1994 e dell'ottobre del 2000.

L'evento del 2 – 6 novembre 1994

L'evento alluvionale del 2 - 6 novembre 1994 ha comportato effetti diffusi su tutta la provincia di Torino, con numerosi fenomeni franosi e di esondazione lungo i corsi d'acqua. La ricostruzione fornita dal quadro meteorologico evidenzia come a partire dal pomeriggio e durante la serata del giorno 5 e nel corso del giorno 6 le precipitazioni si siano intensificate lungo la fascia prealpina, per poi dirigersi verso la fascia meridionale della Regione.

Nell'area di studio, impostata nel Basso Canavese settore di pianura, a seguito della pioggia caduta nei giorni antecedenti l'evento, si è assistito a dissesti generati dalla dinamica fluviale dei corsi d'acqua principali - Fiume Po, T. Stura di Lanzo, T. Malone, T. Orco - e secondari - T. Bendola (Fig. 3), T. Ceronda - ed a fenomeni di allagamento e ristagno in superficie a seguito dalla risalita fino al piano campagna della falda (Regione Piemonte, 1998).

Nell'area di pertinenza del T. Malone, a partire dalla confluenza con il T. Viana, nei pressi del comune di Front Canavese, si sono verificati numerosi alluvionamenti e danni ad infrastrutture viarie e d opere di difesa idraulica; lungo tutto il tratto considerato il corso d'acqua ha, inoltre, riattivato un elevatissimo numero di paleoalvei, prevalentemente in sinistra orografica.

In destra orografica, le acque di piena del torrente Malone hanno tracimato (Fig. 4), proseguendo il loro corso verso le abitazioni poste nei settori più a valle, nei pressi di Rivarossa, centro abitato di Lombardore fino alla confluenza nel fiume Po, causando lo sgombero temporaneo di circa 150 persone

All'evento alluvionale e alle caratteristiche morfologiche del territorio considerato, va sommato lo stato di scarsa manutenzione che caratterizzava il reticolato minore, con alvei spesso occupati dalla vegetazione con attraversamenti insufficienti e strettoie di natura antropica (Regione Piemonte, 1998).



FIGURA 3 - Comune di Volpiano. Ripresa da Est dell'attraversamento sul T. Bendola, lungo la strada statale tra Volpiano e Leini, gravemente danneggiato dalle acque di piena del torrente (Regione Piemonte, 1998).



FIGURA 4 - Ripresa lungo la ferrovia canavese. Evidenti i danni causati dalle acque di esondazione del T. Malone straripate in destra idrografica a monte dell'abitato di S. Benigno (Regione Piemonte, 1998).

L'evento del 13 – 16 ottobre 2000

Nel bacino del torrente Malone, analogamente a tutti i bacini del Piemonte, sono stati registrati degli elevati valori di precipitazione caratterizzate da grande intensità che hanno causato tre principali ondate di piena tra i giorni 14 e 15, di cui l'ultima corrispondente al massimo livello registrato, provocando, anche in questa circostanza, l'esondazione dei corsi d'acqua principali e secondari con processi di erosione spondale, trasporto ed accumulo di materiale detritico negli alvei, allagamenti nei principali centri abitati e numerosi danni alle opere idrauliche di difesa ed alle infrastrutture. Lungo i versanti collinari si sono verificati localmente anche dei fenomeni gravitativi, rappresentati da un rapido colamento di coltre superficiale (*rapid earth flow*), di dimensioni molto ridotte (ARPA PIEMONTE, 2003).

VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ IDROLOGICA

La valutazione della pericolosità idrologica ha comportato la verifica idraulica su due sezioni fluviali che sembravano mostrare alcune criticità; la loro ubicazione, insieme alla delimitazione dei relativi bacini sottesi, è visualizzata in Fig. 5.

La *sezione 1*, più a monte, è stata individuata a quota 430 m s.l.m., in corrispondenza del ponte di Rocca Canavese (Fig. 6).

La *sezione 2*, più a valle, è invece localizzata in corrispondenza del ponte di San Benigno Canavese a quota 212 m s.l.m. (Fig. 7)

Per ciascuna di esse, sono state calcolate le portate di massima piena per diversi tempi di ritorno, successivamente verificate idraulicamente, mettendole a confronto con le portate massime ammissibili.

ANALISI PLUVIOMETRICA

I dati delle piogge intense riferiti al bacino del T. Malone sono stati ricavati dalle registrazioni delle stazioni meteorologiche dell'Arpa Piemonte poste lungo il T. Malone. In particolare, per quanto riguarda il bacino sotteso della sezione 1, sono state prese in considerazione due stazioni

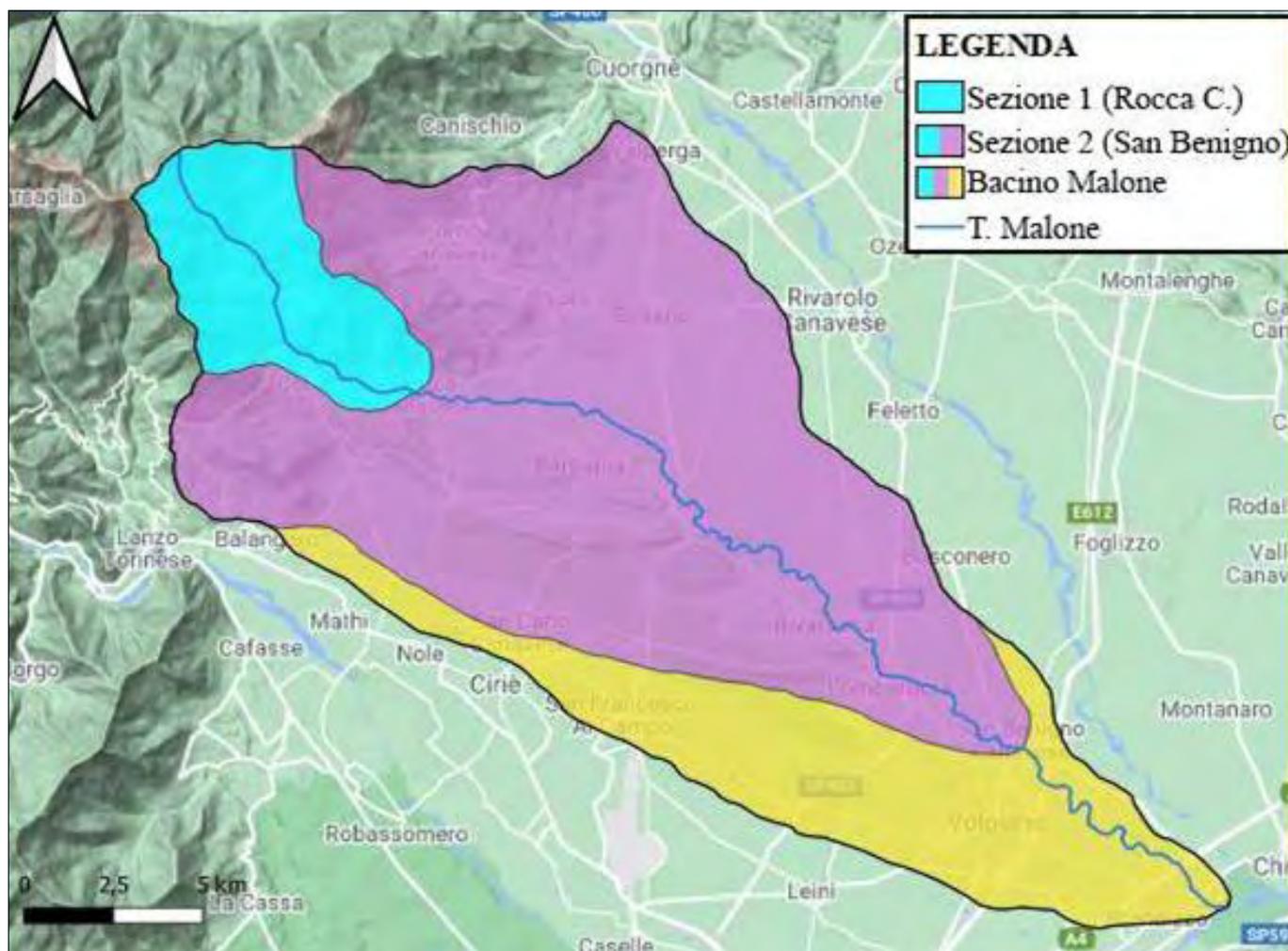


FIGURA 5. Ubicazione delle 2 sezioni e delimitazione dei bacini loro sottesi.



FIGURA 6. Ubicazione della sezione 1 a Rocca Canavese e sue dimensioni. L'attuale ponte è stato costruito in sostituzione del precedente, rovinato dall'alluvione del 1994.



FIGURA 7. Ubicazione della sezione 2 nel centro abitato di San Benigno Canavese.

nei pressi del comune di Corio, una più a monte in località Piano Audi Case Rui (1150 m s.l.m.) per il periodo 1997 – 2017 e una più a valle nel centro di Corio (562 m s.l.m.) per il periodo 2001 – 2017. Per il bacino sotteso dalla sezione 2, si è tenuto conto delle registrazioni del periodo 1996 – 2017 di una terza stazione ubicata in località Ponte S.P. 13 nel comune di Front Canavese (270 m s.l.m.).

I dati sono stati elaborati con il metodo di Gumbel per ricavare le curve di probabilità pluviometrica per tempi di ritorno di 10, 20, 50, 100, 200 e 500 anni. I valori dei coefficienti a ed n sono stati mediati sia per la sezione 1 che per la sezione 2, (Tab. 1) in modo da ottenere delle curve rappresentative del bacino in esame.

Tabella 1. Coefficienti a e n delle curve di probabilità pluviometrica calcolate per tempi di ritorno 10, 20, 50, 100, 200 e 500 anni alle 2 stazioni di Corio e a quella di Front e relativi valori medi per i bacini sottesi dalla sezione 1 e dalla sezione 2.

T	Corio 1		Corio 2		Front		Valori medi Sez.1		Valori medi Sez.2	
	a	n	a	n	a	n	a	n	a	n
10	55,197	0,4915	55,441	0,3078	56,963	0,2030	55,3190	0,3996	55,867	0,3341
20	61,331	0,5038	62,306	0,3083	64,883	0,1960	61,8185	0,4060	62,840	0,3366
50	69,289	0,5160	71,192	0,3087	75,122	0,1891	70,2405	0,4123	71,868	0,3379
100	75,263	0,5232	77,851	0,3090	82,789	0,1850	76,5570	0,4161	78,634	0,3391
200	81,220	0,5291	84,485	0,3092	90,424	0,1816	82,8525	0,4191	85,376	0,3399
500	89,086	0,5356	93,238	0,3094	100,49	0,1779	91,1620	0,4225	94,271	0,3409

Tabella 2. Dati fisiografici e tempi di corrivazione dei due bacini in esame.

	Area [km ²]	L [m]	Hm [m]	Hsez [m]	Hmr [m]	tc [ore]
Bacino 1	35,75	11,15	889,73	430	459,73	2,37
Bacino2	243,34	35,02	352,53	212	140,53	12,12

Calcolo delle portate di massima piena

Per il calcolo delle portate di massima piena, è stato utilizzato il Metodo Razionale, che utilizza la seguente relazione:

$$Q = k \cdot i \cdot C \cdot A$$

dove:

- Q è la portata di massima piena in m³/s;
- k è un fattore adimensionale che tiene conto della non uniformità delle unità di misura. Se A è espressa in km² ed i in mm/h per ottenere la portata in m³/s, k vale 0,278;
- C è il coefficiente di deflusso;
- i è l'intensità della precipitazione critica;
- A è l'area del bacino a monte della sezione presa in esame.

Il modello prevede che la pioggia di progetto cada con intensità costante e in modo uniforme sul bacino. Le precipitazioni considerate sono quelle descritte dalle curve di probabilità pluviometrica ricavate dai valori medi riportati in Tab. 1.

L'intensità critica i è stata ricavata attraverso la valutazione dei tempi di corrivazione.

Per entrambi i bacini 1 e 2, con area maggiore di 20 km², è stata utilizzata la formula di Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{h_{mr}}}$$

dove:

- t_c è il tempo di corrivazione espresso in ore;
- A è l'area del bacino preso in considerazione in km²;
- L è la lunghezza dell'asta fluviale principale fino al punto di misura;
- h_{mr} è l'altezza media del bacino rispetto alla sezione di chiusura.

In Tab. 2 vengono riportati i tempi di corrivazione dei due bacini, insieme ai parametri fisiografici utilizzati, ricavati tramite software Quantum Gis.

A questo punto, l'intensità critica i_c sarà data dal rapporto tra l'altezza della pioggia di durata pari al tempo di corrivazione h_c (per calcolare la quale basta sostituire t_c nella durata t delle equazioni delle curve di probabilità pluviometrica) e il tempo di corrivazione t_c stesso, riferita quindi a un determinato tempo di ritorno:

$$i_c = \frac{h_c}{t_c}$$

I dati di pioggia e intensità critica ottenuti per i due bacini e per i diversi tempi di ritorno sono riportati in Tab. 3.

Un altro parametro nel calcolo della portata di massima piena è rappresentato dal coefficiente di deflusso C che tiene conto della natura dei terreni, del tipo di copertura vegetale e, seppure non venga mai preso in considerazione, dal grado di saturazione del terreno al momento dell'infiltrazione.

Tabella 3. Altezze critiche di pioggia h_c , tempi di corrivazione t_c e intensità critiche i_c ottenute per diversi tempi di ritorno.

	h_c [mm]	t_c [ore]	i_c [mm/ora]
Bacino 1 (Tr = 10 anni)	78,10	2,37	32,95
Bacino 1 (Tr = 20 anni)	87,76	2,37	37,03
Bacino 1 (Tr = 50 anni)	100,25	2,37	42,30
Bacino 1 (Tr = 100 anni)	109,63	2,37	46,26
Bacino 1 (Tr = 200 anni)	118,95	2,37	50,19
Bacino 1 (Tr = 500 anni)	131,26	2,37	55,38
Bacino 2 (Tr = 10 anni)	128,57	12,12	10,61
Bacino 2 (Tr = 20 anni)	145,31	12,12	11,99
Bacino 2 (Tr = 50 anni)	166,97	12,12	13,78
Bacino 2 (Tr = 100 anni)	183,24	12,12	15,12
Bacino 2 (Tr = 200 anni)	199,40	12,12	16,45
Bacino 2 (Tr = 500 anni)	220,72	12,12	18,21

Per determinarlo si fa riferimento a valori di letteratura come ad esempio quelli di Tabella 4, proposti da Benini (1990).

Come si può notare dai valori riportati in tabella, la copertura vegetale influenza notevolmente la capacità di assorbimento. I boschi tendono a trattenere maggiormente le precipitazioni e pertanto i valori di C sono minori per i boschi rispetto alle aree a pascolo e a colture agrarie.

Tabella 4. Valori per il coefficiente C in funzione del tipo di terreno, dell'uso del suolo e della pendenza (Benini, 1990).

Vegetazione e pendenza		Tipi di terreno*		
		leggero	medio	compatto
Boschi	<10%	0,13	0,18	0,25
	>10%	0,16	0,21	0,36
Pascoli	<10%	0,16	0,36	0,56
	>10%	0,22	0,42	0,62
Coltivi	<10%	0,40	0,60	0,70
	>10%	0,52	0,72	0,82

*Cioè terreni con permeabilità alta (t. leggero), media (t. medio) o bassa (t. compatto).

Il bacino di interesse è stato suddiviso in aree boschive, aree adibite a colture agrarie, aree antropizzate e aree in cui sono visibili gli affioramenti. Non si è tenuto conto di aree adibite a pascoli in quanto poco estese e sporadiche.

Per le aree boschive si è fatto riferimento a pendenze >10% mentre per le colture agrarie a pendenze <10%.

Data la natura dei suoli presenti nel bacino, poco o punto permeabili, si è fatto sempre riferimento ai valori del terreno compatto. Alle aree antropizzate, fortemente impermeabilizzate, è stato assegnato un coefficiente C pari a 0,90.

Tramite il software *Quantum Gis*, sono state ricavate 4 categorie omogenee per pendenza e uso del suolo a cui è stato assegnato un coefficiente C, facendo riferimento ai valori sopra citati, mentre alle aree antropizzate è stato attribuito un coefficiente C pari a 0,90 (Tab. 5).

Tabella 5. Valori del Coefficiente di deflusso C assegnato alle superfici omogenee per uso del suolo e pendenza ottenute dalle analisi cartografiche tramite software Quantum GIS.

Uso del suolo	Penden-za	Area del Bacino 1	Area del Bacino 2	Coefficiente di deflusso C
Bosco	>10%	25,15	115,46	0,36
Colture agrarie	<10%	1,05	97,17	0,70
Aree antropizzate	-	0,95	19,25	0,90
Affioramento	-	8,60	11,46	0,90

Pesando i coefficienti di deflusso per le aree omogenee a cui sono riferiti, sono state calcolate le medie ponderali dei coefficienti C da attribuire ai due bacini in esame (Tab. 6).

Tabella 6. Valori medi dei coefficienti di deflusso per i due bacini in esame.

Coefficiente di deflusso C	
Bacino 1	0,51
Bacino 2	0,56

Utilizzando i dati ricavati sono state infine calcolate le portate di massima piena in corrispondenza delle due sezioni oggetto di studio, per i diversi tempi di ritorno presi in considerazione (Tab. 7).

Tabella 7. Portate di massima piena attese alle 2 sezioni di misura per i relativi tempi di ritorno.

	k	i_c [mm/ora]	C	A [km ²]	Portata [m ³ /s]
Sezione 1 (Tr = 10 anni)	0,278	32,95	0,51	35,75	167,01
Sezione 1 (Tr = 20 anni)	0,278	37,03	0,51	35,75	187,69
Sezione 1 (Tr = 50 anni)	0,278	42,30	0,51	35,75	214,40
Sezione 1 (Tr = 100 anni)	0,278	46,26	0,51	35,75	234,47
Sezione 1 (Tr = 200 anni)	0,278	50,19	0,51	35,75	254,39
Sezione 1 (Tr = 500 anni)	0,278	55,38	0,51	35,75	280,70
Sezione 2 (Tr = 10 anni)	0,278	10,61	0,56	243,34	401,94
Sezione 2 (Tr = 20 anni)	0,278	11,99	0,56	243,34	454,22
Sezione 2 (Tr = 50 anni)	0,278	13,78	0,56	243,34	522,03
Sezione 2 (Tr = 100 anni)	0,278	15,12	0,56	243,34	575,79
Sezione 2 (Tr = 200 anni)	0,278	16,45	0,56	243,34	623,18
Sezione 2 (Tr = 500 anni)	0,278	18,21	0,56	243,34	689,85

Verifiche idrauliche

Al fine di verificare se le portate di progetto appena calcolate sarebbero defluite normalmente nelle due sezioni o se in qualche occasione il fiume avrebbe esondato, inondando le zone abitate circostanti, è stato necessario fare un confronto con la *portata massima ammissibile* da ciascuna sezione, pari al prodotto dell'area A della sezione e la velocità del flusso idrico V :

$$Q = A \cdot V$$

Le aree A sono state ricavate da misure in situ delle lunghezze con telemetro e delle quote con battute topografiche. Come quota massima delle sezioni è stato preso il livello base delle abitazioni.

La velocità del flusso idrico V delle sezioni è stata valutata utilizzando la formula di Chézy:

$$V = \chi \cdot \sqrt{R \cdot i}$$

dove:

- V è la velocità media in m/s;
- χ è il coefficiente di Chézy che dipende dalla scabrezza dell'alveo e dal raggio idraulico;
- R è il raggio idraulico in m^{1/2}/s;
- i è la pendenza del fondo espressa in %.

Per raggio idraulico si intende il rapporto tra l'area della sezione e il perimetro bagnato e per perimetro bagnato la somma tra la lunghezza del fondo dell'alveo e delle sponde:

$$R = \frac{A}{p_b}$$

Con i dati ricavati dalle misure *sono stati ottenuti, quindi, i raggi idraulici* delle cinque sezioni (Tab. 8).

Tabella 8. Valori dell'area, del perimetro bagnato e del raggio idraulico delle due sezioni misurate.

	Area sezione [m ²]	pb [m]	R [m]
Sezione 1	83,47	40,88	2,04
Sezione 2	360,51	68,40	5,27

Le pendenze del fondo sono state ricavate, per ciascun bacino, suddividendo il profilo longitudinale dell'asta in diversi tronchi e calcolando la media ponderata con la formula di Taylor–Schwartz (Tab. 9):

Tabella 9. Pendenze medie del fondo calcolate con la formula di Taylor–Schwartz.

Tronchi asta Bacino 1	δL (m)	δL (m)	i (m/m)
2050 - 1800	620	250	0,40
1800 - 1400	888	400	0,45
1400 - 1000	1750	400	0,23
1000 - 600	4018	400	0,10
600 - 430	3824	170	0,04
pendenza media i_m			0,09
Tronchi asta Bacino 2	δL (m)	δL (m)	i (m/m)
2050 - 1800	620	250	0,40
1800 - 1400	888	400	0,45
1400 - 1000	1750	400	0,23
1000 - 600	4018	400	0,10
600 - 212	24380	388	0,01
pendenza media i_m			0,002

$$\frac{L}{\sqrt{i_m}} = \sum_{j=1}^{n^{\circ} \text{tronchi}} \frac{L_j}{\sqrt{i_j}}$$

dove:

- i_m = pendenza media dell'asta principale;
- i_j = pendenze dei singoli tronchi;
- L = lunghezza dell'asta;
- L_j = lunghezze dei singoli tronchi.

Al fine di determinare il coefficiente di scabrezza, necessario per il calcolo della velocità del flusso idrico, è stata utilizzata l'equazione di Manning:

$$\chi = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}}$$

dove:

- n è il coefficiente di Manning
- R è il raggio idraulico

La formula di Chézy quindi diventa:

$$V = \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * i^{\frac{1}{2}}$$

Il coefficiente n di Manning è stato calcolato dalla formula seguente (Chow, 1959), rifacendosi ai coefficienti parziali della Tabella 10:

Tabella 10. Valori da utilizzare per calcolare il coefficiente n di Manning (Chow, 1959).

Materiale costituente l'alveo	Terra		0,020
	Roccia		0,025
	Alluvione grossolana	n_0	0,028
	Alluvione fine		0,024
Irregolarità della superficie della sezione	Trascurabile		0,000
	Bassa		0,005
	Moderata	n_1	0,010
	Elevata		0,020
Variazione di forma e dimensione della sezione trasversale	Graduale		0,000
	Occasionale	n_2	0,005
	Frequente		0,010-0,015
	Trascurabile		0,000
Effetto relativo di ostruzioni	Modesto		0,010-0,015
	Apprezzabile	n_3	0,020-0,030
	Elevato		0,040-0,060
	Basso		0,005-0,010
Effetto della vegetazione	Medio		0,010-0,025
	Alto	n_4	0,025-0,050
	Molto alto		0,050-0,100
	Modesto		1,000
Grado di sinuosità dell'alveo	Apprezzabile	m_5	1,150
	Elevato		1,300

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

I coefficienti parziali utilizzati e i coefficienti n di Manning ricavati nella formula di Chow (1959) sono riportati in Tabella 11.

Tabella 11. Valori dei coefficienti parziali utilizzati e relativi coefficienti n di Manning.

	Sezione 1	Sezione 2
n_0	0,028	0,028
n_1	0,015	0,015
n_2	0,005	0,005
n_3	0,015	0,020
n_4	0,025	0,025
m_5	1,200	1,200
n	0,1056	0,1116

Avendo quindi a disposizione tutti dati necessari si sono calcolate le velocità di deflusso V tramite la formula di Chézy (Tab. 12). Infine, moltiplicando le aree delle sezioni per le rispettive velocità di deflusso, sono state ricavate le portate massime ammissibili per le due sezioni analizzate (Tab. 13).

Tabella 12. Valori delle velocità di deflusso.

	Velocità [m/s]
Bacino 1	4,55
Bacino 2	3,79

Tabella 13. Portate massime ammissibili nelle due sezioni.

	Area sezione [m ²]	Velocità [m/s]	Portata ammissibile [m ³ /s]
Bacino 1	83,47	4,55	379,79
Bacino 2	360,51	3,79	1366,33

Tabella 14. Verifica idraulica delle due sezioni prese in esame.

	Portata di massima piena [m ³ /s]	Portata ammissibile [m ³ /s]
Sezione 1 (Tr = 10 anni)	167,01	379,79
Sezione 1 (Tr = 20 anni)	187,69	379,79
Sezione 1 (Tr = 50 anni)	214,40	379,79
Sezione 1 (Tr = 100 anni)	234,47	379,79
Sezione 1 (Tr = 200 anni)	254,39	379,79
Sezione 1 (Tr = 500 anni)	280,70	379,79
Sezione 2 (Tr = 10 anni)	401,94	1366,33
Sezione 2 (Tr = 20 anni)	454,22	1366,33
Sezione 2 (Tr = 50 anni)	522,03	1366,33
Sezione 2 (Tr = 100 anni)	575,79	1366,33
Sezione 2 (Tr = 200 anni)	623,18	1366,33
Sezione 2 (Tr = 500 anni)	689,85	1366,33

Tabella 15. Verifica idraulica nelle due sezioni utilizzando i dati pluviometrici registrati il 24 ottobre 2011 alla stazione di Brugnato (SP). Entrambe le sezioni risultano insufficienti.

	k	ic [mm/h]	tc [ore]	hc[m]	C	Area [km ²]	Qmax [m ³ /s]	Qamm [m ³ /s]
Sezione 1	0,278	117,33	2,37	278	0,51	35,75	564,71	379,79
Sezione 2	0,278	42,48	12,12	515	0,56	243,34	1609,92	1366,33

Tabella 16 - Verifica idraulica nelle due sezioni utilizzando i dati pluviometrici registrati il 4 novembre 2011 alla stazione di Vicomorasso (GE). La sezione 1 risulta insufficiente.

	k	ic [mm/h]	tc [ore]	hc[m]	C	Area [km ²]	Qmax [m ³ /s]	Qamm [m ³ /s]
Bacino 1	0,278	124,51	2,37	295	0,51	35,75	631,08	379,79
Bacino 2	0,278	33,99	12,12	412	0,56	243,34	1287,94	1366,33

4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Dal confronto tra le portate massime ammissibili delle due sezioni e le portate di progetto calcolate con il Metodo Razionale (Tab. 14), per i tempi di ritorno considerati le portate di massima piena attese sono nettamente minori delle portate massime ammissibili.

Ciò significa che quando si ha il passaggio della piena, non si verificano gravi danni e non si prevedono allagamenti nelle zone edificate circostanti. Pertanto, le due sezioni sembrano ben dimensionate a sopportare piene anche con tempi di ritorno di 500 anni nell'alveo naturale.

È da specificare, però, che precipitazioni simili a quelle che hanno colpito negli ultimi anni il nostro Paese (Masciocco, 2011), causerebbero problemi. In particolare, prendendo in considerazione l'evento verificatosi ad ottobre 2011 nello Spezzino entrambe le stazioni risulterebbero insufficienti a contenere la piena (Tab. 15).

Considerando l'evento verificatosi a novembre 2011 nel genovesato (tragedia del Rio Fereggiano), la sezione di Rocca Canavese non riuscirebbe a contenere la piena (Tab. 16).

BIBLIOGRAFIA

ARPA PIEMONTE (2003). *Eventi alluvionali in Piemonte (Evento alluvionale del 13-16 ottobre 2000)*. AGES

ARTI GRAFICHE – Torino, 327 pp., Tavole fuori testo.

G. BENINI (1990). *Sistemazioni idraulico forestali*. Collana Scienze forestali e ambientali. UTET, Torino, 308 pp., ISBN-10: 880204340X, ISBN-13: 978-8802043401

V.T. CHOW (1959). *Open Channel Hydraulics*. Mc Graw Hill Company, 680 pp.

F. PIANA, G. FIORASO, A. IRACE, P. MOSCA, A. D'ATRI, L. BARALE, P. FALLETTI, G. MONEGATO, M. MORELLI, S. TALLONE, G.B. VIGNA (2017). *Geology of Piemonte region (NW Italy, Alps–Apennines interference zone)*, Journal of Maps, 13:2, 395-405, DOI: 10.1080/17445647.2017.1316218.

REGIONE PIEMONTE (1998). *Eventi alluvionali in Piemonte (2-6 novembre 1994; 8 luglio 1996; 7-10 ottobre 1996)*. Assessorato Ambiente, Energia, Pianificazione e gestione delle risorse idriche, Lavori Pubblici e Tutela del Suolo, Protezione Civile. Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione. L'Artistica Savigliano, 415 pp., Tavole fuori testo.

RIFERIMENTI WEB

https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/annali_meteoidrologici/

Studio geologico-petrografico delle pietre ornamentali della città di Ivrea (Piemonte) e loro valorizzazione in ambito culturale e divulgativo

Geo-petrographic study of the ornamental stones of the city of Ivrea (Piemonte) and their valorization in the cultural and enhancement field

GIORGIA PARMEGGIANI¹, ELENA STORTA^{2*}, ALESSANDRO BORGHI², LUIGI PEROTTI², ANNA D'ATRI², MAURO PALOMBA², ANGELA DEODATO³

¹ Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

² Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra

³ Museo Civico P.A. Garda, Ivrea

* Corresponding author

E-mail: elena.storta@unito.it

Parole chiave: petrografia applicata, Beni Culturali, Ivrea

Key words: applied Petrography, Cultural Heritage, Ivrea

RIASSUNTO

Ivrea è una città in cui la pietra da sempre è stata largamente impiegata come materiale da costruzione caratterizzando l'identità architettonica della città stessa. Considerato il capoluogo del Canavese, Ivrea fonda le proprie radici in epoca romana: per questo è stata scelta come sito in cui sviluppare una proposta divulgativa, di interesse geologico-culturale per la conservazione dei beni culturali. Lo scopo di questo lavoro è la caratterizzazione petrografica e la valorizzazione dei principali materiali lapidei di origine locale impiegati nel costruito storico e contemporaneo della città per diffondere le conoscenze sulla pietra sia dal punto di vista scientifico che turistico-culturale, attraverso la realizzazione di un percorso geoturistico, come applicazione delle Scienze Geologiche ai Beni Culturali. Le principali varietà litologiche impiegate nell'edilizia storica e contemporanea sono state studiate facendo riferimento da un lato all'unità geologica di provenienza e ai siti di estrazione e dall'altro riportando i principali esempi di utilizzo. I dati raccolti attraverso sistemi digitali sono stati elaborati tramite le moderne tecniche di allestimento cartografico QGIS e WebGIS per realizzare un prodotto multimediale fruibile da un vasto pubblico.

ABSTRACT

Ivrea is a city where stone has always been widely used as a building material, characterizing the architectural identity of the city itself. Considered the capital of Canavese, Ivrea bases its roots in Roman times: for this reason, it was chosen as place on which developing an informative proposal, of geological-cultural interest for the conservation of Cultural Heritage. The purpose of this work is the petrographic characterization and enhancement of the main stone materials of local origin used for the historical and contemporary buildings of the city to spread knowledge about stone both from a scientific and tourist-cultural point of view, through the creation of a geotouristic itinerary, as an application of geo-

logical sciences to Cultural Heritage. The main lithological varieties used in historical and contemporary buildings have been studied by referring on the one hand to the geological unit of origin and the extraction sites and on the other by reporting the main examples of use. The data collected through digital systems were processed using the modern techniques of QGIS and WebGIS cartographic preparation for a multimedia product that can be used by wide audience.

1. INTRODUZIONE

Lo studio delle risorse lapidee ornamentali storiche e contemporanee rappresenta uno dei principali approcci utili per coniugare geologia e patrimonio culturale all'interno di un contesto urbano (Cooper, 2015). Lo studio minero-petrografico e l'analisi dei materiali lapidei tramite la ricostruzione del loro utilizzo e delle tecniche di coltivazione dai tempi antichi fino ad oggi, è quindi di importanza fondamentale per la valorizzazione del territorio, poiché il patrimonio geologico rappresenta una testimonianza della sua storia e della sua cultura materiale (Borghi *et al.*, 2014; Brocx e Semeniuk, 2019). Nella città di Ivrea, fondata nel 143 a.C. dai Romani con il nome di *Eporedia*, la pietra è sempre stata il materiale da costruzione più utilizzato, grazie alla facilità di reperimento in loco. Ivrea, infatti, è ubicata in corrispondenza della Zona Ivrea-Verbano, unità geologica del Dominio Sudalpino delle Alpi Occidentali. Le fondamenta del centro storico poggiano in parte su rocce del Complesso Basico Stratificato di questa unità e in parte su ghiaie e ciottoli grossolani dei terrazzi fluviali del Fiume Dora Baltea che attraversa il capoluogo canavese. Per questo Ivrea, ricca di testimonianze archeologiche e monumenti di interesse storico-culturale e contemporaneo, che hanno reso la città patrimonio Mondiale UNESCO dal 2018, è stata scelta come esempio di integrazione multidisciplinare tra Archeologia, Scienze della Terra e patrimonio culturale.

Questo articolo riporta un elenco rappresentativo dei materiali lapidei locali impiegati nel costruito storico e

contemporaneo di Ivrea attraverso la descrizione di alcuni dei più importanti monumenti della città. Le rocce principali sono state identificate e descritte attraverso analisi petrografiche, riportando l'unità geologica di provenienza e, ove possibile, il sito di estrazione. I dati raccolti hanno reso possibile lo sviluppo di un percorso geoturistico, finalizzato a promuovere, valorizzare e accrescere la conoscenza dei materiali lapidei storici e contemporanei di Ivrea.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La grande varietà di pietre ornamentali e da costruzione impiegate a Ivrea è sicuramente da attribuire alla natura geologica estremamente composta del Canavese, area geografica di cui Ivrea rappresenta il centro abitato di riferimento, collocato al limite tra il dominio Sudalpino a SE e quello Austroalpino a NW (Fig. 1).

L'ampia varietà di rocce affioranti nella catena alpina è stata raggruppata in quattro domini principali, in base alle caratteristiche litostratigrafiche, all'evoluzione metamorfica e all'età del metamorfismo, separati da importanti contatti tettonici (Dal Piaz, 1992). Questi domini, dall'interno verso l'esterno della catena, sono stati denominati Sudalpino, Austroalpino, Pennidico ed Elvetico-Delfinese.

Il dominio Sudalpino, bordato verso S dal Fronte Sudalpino e verso N dalla Linea Insubrica, è costituito da unità di basamento metamorfico varisico, corpi magmatici permiani e successioni sedimentarie permiane, triassico-giurassiche e cretaco-paleogeniche. Tale dominio è tradizionalmente suddiviso in tre unità principali: la Serie dei Laghi, la Zona Ivrea-Verbano e la Zona del Canavese. La Zona Ivrea-Verbano corrisponde ad una sezione di crosta profonda (Zingg *et al.*, 1990; Handy e Zingg, 1991; Handy *et al.*, 1999) interpretata come uno dei migliori esempi di "magmatic underplating" continentale. Consiste in paragneiss con minori metabasiti e marmi con un grado metamorfico variabile tra la *facies* anfibolitica e granulitica (Complesso Kinzigitico) intrusi da un complesso magmatico basico-ultrabasico (Complesso Basico Stratificato) di età permiana (Quick *et al.*, 1994) costituito principalmente da gabbri, dioriti, tonaliti e ultramafiti.

Corpi di peridotiti a spinello, interpretati come porzioni di mantello sotto-continentale, affiorano al margine occidentale della Zona Ivrea-Verbano (Zingg *et al.*, 1990). La Serie dei Laghi, invece, è costituita in prevalenza da micascisti e gneiss derivanti da corpi sedimentari metamorfosati in *facies* anfibolitica. Questa unità comprende i cosiddetti "Graniti dei Laghi", importanti nell'attività estrattiva piemontese (Boriani *et al.*, 1992) e largamente impiegati come pietre ornamentali anche nel costruito di Ivrea. La Zona del Canavese è interpretata come una unità metamorfosata in *facies* da anchizonale a scisti verdi. È tettonicamente giustapposta tra il dominio Sudalpino e Austroalpino da cui è separata rispettivamente dalle Linee del Canavese Interna ed Esterna. Questa unità è costituita da un basamento metamorfico pre-mesozoico, granitoidi tardo varisici e coperture vulcano-sedimentarie permo-mesozoiche (Festa *et al.*, 2020).

Il dominio Austroalpino, delimitato verso SE dalla Linea Insubrica e verso NW dal contatto tettonico con le unità oceaniche, è costituito da unità di crosta continentale (Zona Sesia-Lanzo e falda della Dent Blanche s.l.) derivanti dal margine continentale Adriatico (basamento metamorfico varisico e corpi ignei permiani) coinvolte nella tettonica collisionale (Dal Piaz, 1999). Rappresenta l'elemento tettonico geometricamente più interno del settore assiale della catena alpina ed affiora al confine tra Piemonte e Valle d'Aosta. La Zona Sesia Lanzo è ulteriormente suddivisa in tre principali complessi litologici detti Complesso dei Micascisti Eclogitici, Complesso degli Gneiss Minuti e II Zona Dioritico-Kinzigitica rispettivamente metamorfosati in condizioni eclogitiche, scisti verdi e granulitiche (Dal Piaz *et al.*, 1972; Compagnoni *et al.*, 1977). All'interno della Zona Sesia-Lanzo si sono intrusi in età oligocenica due plutoni di piccole dimensioni a composizione sienitica e dioritica: i plutoni di Traversella e della Valle Cervo.

Completano l'assetto geologico alpino i domini Pennidico ed Elvetico. Il dominio Pennidico, bordato verso NW dal Fronte Pennidico, è costituito da unità di crosta continentale (Pennidico superiore, medio e inferiore) derivanti dal margine continentale europeo e da unità di crosta oceanica (Zona

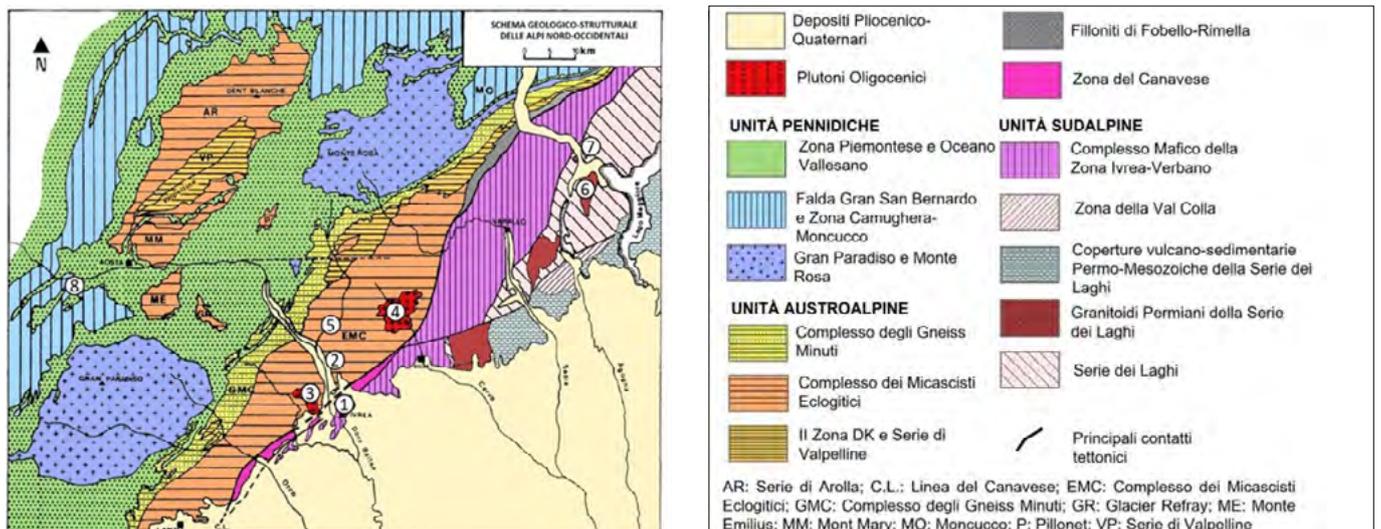


FIGURA 1. Schema geologico delle Alpi Nord-Occidentali; i numeri in carta indicano l'ubicazione delle rocce ornamentali descritte: 1) Rocce del Complesso Basico Stratificato; 2) Ortogneiss a giadeite; 3) Diorite del Canavese; 4) Sienite della Balma; 5) Micascisti eclogitici; 6) Granito Rosa di Baveno; 7) Granito Bianco di Montorfano; 8) Marmo Bardiglio di Aymavilles.

Piemontese) derivanti dall'oceano Ligure-Piemontese (Dal Piaz, 1999). Nella porzione a pertinenza continentale, le unità Pennidiche superiori sono costituite dai Massicci Cristallini Interni (Unità del Dora Maira, Gran Paradiso e Monte Rosa), formate da micascisti e ortogneiss mono e polimetamorfici e coperture metacarbonatiche di età mesozoica (De Giusti *et al.*, 2004). Le unità Pennidiche intermedie corrispondono alla Falda del Gran San Bernardo, costituita da un basamento polimetamorfico di origine continentale, un basamento monometamorfico di età carbonifero-permiana e coperture meta-carbonatiche mesozoiche. Il dominio Pennidico inferiore rappresenta l'elemento tettonico più profondo del settore assiale della catena alpina ed è indicato come "Duomo Lepontino". Le unità oceaniche pennidiche sono invece rappresentate dalla Zona Piemontese, suddivisa in un elemento tettonico superiore (Unità del Combin, costituito in gran parte da rocce metamorfiche originatesi da depositi torbiditici ora trasformati in calcescisti) e inferiore (Unità Zermatt-Saas, costituito essenzialmente da rocce metamorfiche di crosta oceanica riequilibrata in condizioni eclogitiche, formate da prevalenti metabasiti e serpentiniti).

Infine, il dominio Elvetico-Delfinese, bordato verso NW dal Fronte Elvetico e verso SE dal Fronte Pennidico, è costituito da unità di basamento polimetamorfico varisco, graniti permiani, successioni permiane terrigene e mesozoiche in gran parte carbonatiche, che hanno subito un debole metamorfismo alpino (Von Raumer, 1987).

3. LE ROCCE ORNAMENTALI DI IVREA

Data la grande varietà di materiali lapidei impiegati per la costruzione della città, in questo capitolo verranno brevemente descritti alcuni esempi di pietre ornamentali di origine piemontese e valdostana che caratterizzano il costruito storico e contemporaneo di Ivrea, i cui siti estrattivi sono riportati in Fig. 1.

Rocce del Complesso Basico stratificato

Il centro storico di Ivrea è stato edificato direttamente al di sopra del substrato roccioso che affiora in molti punti della città ed è attribuito al Complesso Basico Stratificato della Zona Ivrea-Verbano. Il particolare assetto geologico è stato interpretato come un ripetuto ed esteso layering litologico di natura magmatica (Quick e Denlinger, 1992; Quick *et al.*, 1994). Le rocce affioranti rappresentano rocce basiche-ultrabasiche di cui fanno parte quarzo-dioriti e gabbrì prevalenti, tonaliti e websteriti (Fig. 2.1). Tali rocce mostrano una struttura primaria preservata caratterizzata da una foliazione magmatica di alta temperatura, una evidente stratificazione magmatica e una forte differenziazione composizionale. Sono presenti anche lenti di duniti, pirosseniti e peridotiti. Si tratta quindi di rocce magmatiche intrusive a grana medio-grossa, tessitura debolmente granoblastica, costituite da plagioclasio, pirosseni, feldspati, anfiboli, quarzo e talvolta spinelli e olivina. Queste rocce si ritrovano come substrato affiorante nel centro storico di Ivrea: in particolare si segnalano gli affioramenti in via Vaglia, significativi perché in corrispondenza dei resti del Teatro Romano di *Eporedia* (I sec. d.C.), di cui rimangono solo alcuni speroni in mattoni

inglobati nelle mura di cinta medioevali. Inoltre queste rocce sono state largamente impiegate per l'edificazione dell'Anfiteatro romano (Storta *et al.*, 2022).

Ortogneiss a giadeite

Questa roccia, nota anche con il termine commerciale di Granito Verde Argento o Verde Selene, appartiene alla Zona Sesia-Lanzo e rappresenta il prodotto metamorfico di corpi acidi-intermedi permiani intrusi nel basamento polimetamorfico del Complesso dei Micascisti Eclogitici della Zona Sesia-Lanzo. I siti estrattivi in cui viene ancora oggi cavata questa varietà litologica si trovano nei pressi di Settimo Vittone, non distante da Ivrea. Si tratta di una roccia metamorfica in *facies* eclogitica di colore verde chiaro (per la presenza di giadeite), con debole scistosità definita da lepidoblasti di fengite orientati secondo la foliazione principale (Bottino *et al.*, 1989) (Fig. 2.2). Sono inoltre riconoscibili quarzo e K-feldspato. Questa roccia è stata principalmente impiegata per la realizzazione di portali di accesso e di balconi di abitazioni private nel centro storico di Ivrea ed in particolare lungo via Arduino (arteria principale della città) e all'esterno della Cappella dei Tre Re in via Boaro.

Diorite del Canavese, Sienite della Balma

Si tratta di rocce locali provenienti rispettivamente dal plutone oligocenico di Traversella circa 10 km a Ovest di Ivrea e della Valle Cervo a Nord di Biella. La diorite è una roccia magmatica intrusiva di colore grigio, olocristallina, faneritica, isotropa, a grana medio-fine. È costituita da plagioclasio, anfibolo, pirosseno, biotite e piccole quantità di quarzo e K-feldspato (Fig. 2.3). Tale materiale è stato impiegato all'esterno della Cappella dei Tre Re e nella pavimentazione antistante la Torre di Santo Stefano, nei pressi dei Giardini Giusiana e nella scalinata di accesso alla Antica Sinagoga di via Quattro Martiri. La Sienite della Balma invece è una roccia magmatica intrusiva di colore grigio-bruno-violaceo, olocristallina, faneritica, a grana media ed equigranulare. Sono identificabili plagioclasio, K-feldspato, anfibolo e scarsa biotite (Fig. 2.4). È il materiale impiegato nel rivestimento esterno delle Palazzine Olivetti, del Santuario Monte Stella, della Cappella dei Tre Re e nella pavimentazione antistante il Duomo e la Torre di Santo Stefano.

Micascisti eclogitici

Si tratta di rocce metamorfiche appartenenti al Complesso dei Micascisti Eclogitici della Zona Sesia Lanzo affiorante pochi km a NW di Ivrea. Sono caratterizzate da una grana fortemente eterogenea, con evidente foliazione metamorfica, tessitura lepidoblastica, con una struttura scistosa costituita dall'alternanza di livelli micacei fengitici che definiscono una foliazione molto continua e pervasiva e microlitoni di dimensioni millimetriche arricchiti in quarzo. Sono presenti porfiroblasti di glaucofane e la roccia è sovente attraversata da filoni aplitici (Fig. 2.5). Nelle varietà più impure del micascisto è anche presente carbonato ankeritico. Questa roccia è stata notevolmente utilizzata come materiale da costruzione ad Ivrea, principalmente nella facciata della Cattedrale di Santa Maria Assunta, nella pavimentazione e murature

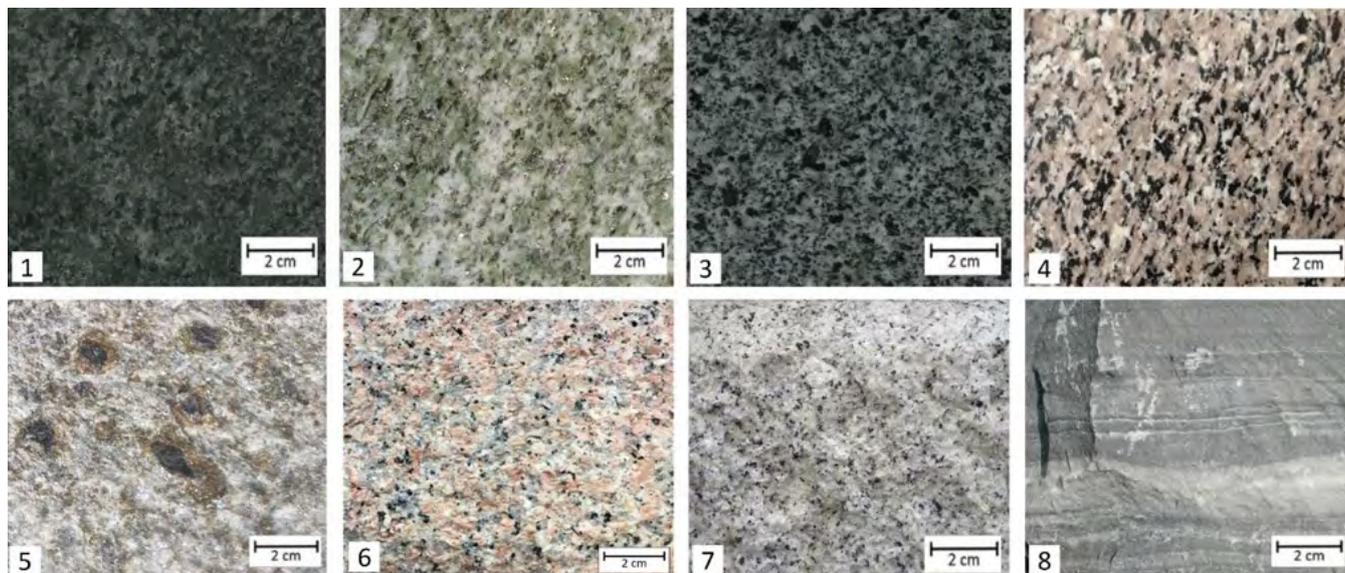


FIGURA 2. Immagini rappresentative delle principali pietre ornamentali storiche e contemporanee utilizzate nella città di Ivrea. 1) Gabbro-norite, Complesso Basico Stratificato della Zona Ivrea-Verbano; 2) Granito Verde Argento, Zona Sesia Lanzo; 3) Diorite del Canavese, Plutone di Traversella; 4) Sienite della Balma, Plutone della Valle Cervo; 5) Micascisto eclogitico, Zona Sesia Lanzo; 6) Granito Rosa di Baveno, Serie dei Laghi; 7) Granito Bianco di Montorfano, Serie dei Laghi; 8) Marmo Bardiglio di Aymavilles, Unità del Combin.

esterne della Torre di Santo Stefano e come materiale di reimpiego per le murature dell'Anfiteatro romano.

Graniti dei Laghi

Il Granito Rosa di Baveno (Fig. 2.6) e il Granito Bianco di Montorfano (Fig. 2.7) appartengono ad un batolite composto di età permiana intruso nel basamento della Serie dei Laghi. Si tratta quindi di rocce magmatiche intrusive a grana medio-fine costituite da quarzo, K-feldspato (rosa nel caso del Baveno a causa di microdispersioni di ematite), plagioclasio e biotite. Ad Ivrea il Granito Rosa di Baveno è stato utilizzato come parte del rivestimento esterno del Palazzo Uffici Olivetti, edificato negli anni '60 del secolo scorso, mentre il Granito Bianco di Montorfano è il materiale con cui è stata realizzata la cornice del portone di accesso alla Antica Sinagoga di Ivrea e la pavimentazione esterna delle Palazzine Olivetti.

Marmo Bardiglio di Aymavilles

Si segnala infine il Marmo Bardiglio di Aymavilles (Fig. 2.8), proveniente dal settore occidentale della Valle d'Aosta. Questo pregiato marmo valdostano, di notevole significato archeometrico e impiegato per alcune costruzioni storiche della città di Aosta, è stato ampiamente impiegato durante il periodo romano anche nell'antica *Eporedia*. Testimonianze del suo utilizzo sono alcune stele conservate presso il Museo Civico P.A. Garda che presenta una interessante collezione archeologica di reperti in materiale lapideo. Questa roccia è caratterizzata dall'alternanza regolare di livelli centimetrici di colore grigio chiaro e scuro, motivo per cui appare listato. In particolare la paragenesi risulta costituita, oltre che da calcite e dolomite, da alcuni silicati (fengite, paragonite, margarite, flogopite e Mg-clorite) (Borghi *et al.*, 2006).

4. IVREA STONES: PERCORSO GEOTURISTICO DELLA CITTÀ DI IVREA

Attraverso l'analisi del patrimonio storico-artistico-culturale della città eporediese è stato messo a punto un progetto

che permettesse di sviluppare strategie efficaci di divulgazione scientifica per migliorare l'educazione ambientale e la promozione delle geoscienze al grande pubblico. Per fare ciò sono stati individuati alcuni siti rappresentativi di interesse storico-culturale che sono stati inseriti in un percorso geologico-culturale fruibile da turisti e scolaresche (Fig. 3). La realizzazione dell'itinerario geoturistico ha comportato la creazione di una mappa online dell'itinerario proposto. Il risultato ottenuto tramite l'allestimento cartografico QGIS permette di visualizzare per ogni punto la relativa "tabella attributi" comprensiva delle informazioni geologiche e storiche essenziali. Il progetto può essere quindi visualizzato su qualunque dispositivo mobile e fisso tramite il seguente link: <http://www.geositlab.unito.it/ivrea>

Di seguito si riportano alcuni stop principali del percorso indicati anche in Figura 3.

STOP 1. SUBSTRATO AFFIORANTE NEI PRESIDI DEI RESTI DELL'ANTICO CASTELLO: Il percorso inizia da via delle Torri (Fig. 4.1), nel cuore del centro cittadino, uno dei luoghi in cui le rocce del substrato affiorano direttamente in superficie e per questo scelto come esempio di interazione tra costruito storico e substrato affiorante. Qui sorge l'antico Castello di Ivrea di epoca medievale, le cui fondamenta poggiano direttamente sulle rocce dioritiche del Complesso Basico Stratificato della Zona Ivrea Verbano.

STOP 2. CATTEDRALE DI SANTA MARIA ASSUNTA: Il Duomo di Ivrea (Fig. 4.2) dedicato a Santa Maria Assunta costruito nel 568 d.C. si sviluppa nella parte vecchia della città vicino al Castello di Ivrea e rappresenta il più importante luogo di culto della città. Il reperimento di resti di materiali lapidei romani reimpiegati nelle parti più antiche della chiesa ora custoditi nella cripta (come il sarcofago in marmo proconnesio realizzato per il questore Caio Atecio Valerio nel I secolo d.C.) fanno ritenere che sopra l'altura sulla quale sorge attualmente il Duomo fosse già presente, fin dal I secolo a.C., un tempio romano di cui sono ancora visibili alcune tracce. Le pietre ornamentali

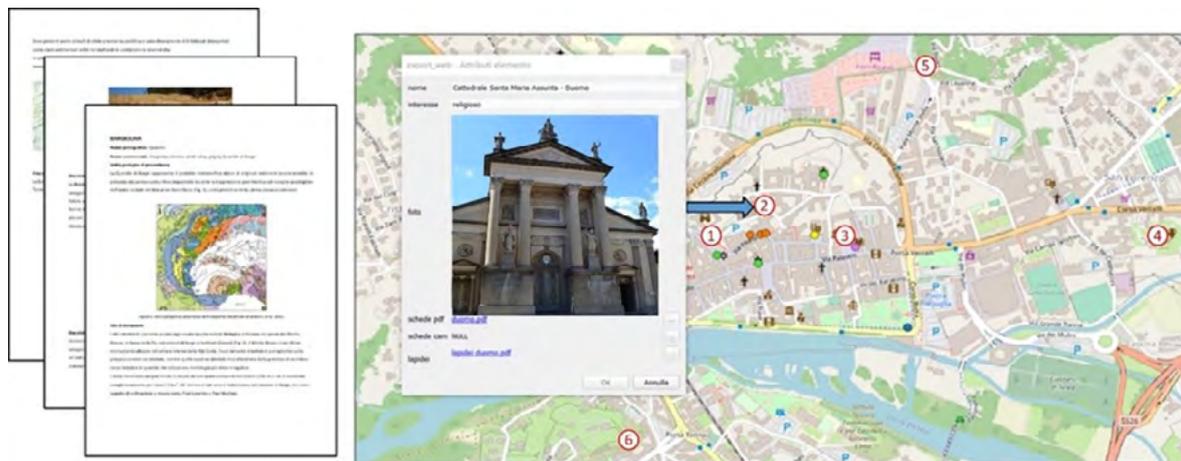


FIGURA 3. Visualizzazione del progetto corredato di schede petrografiche. In dettaglio (al centro) un esempio di tabella attributi, relativa alla Cattedrale di Ivrea.

impiegate all'esterno del Duomo comprendono la Sienite della Balma per la pavimentazione e ciottoli di serpentinite per la piazza antistante l'ingresso. La pietra ornamentale impiegata nella facciata del Duomo è il Micascisto eclogitico della Zona Sesia Lanzo, caratterizzato da porfiroblasti di glaucofane e attraversato da frequenti filoni aplitici. Le pietre ornamentali impiegate all'interno di questo edificio comprendono numerosi esempi di re-impiego in epoca medievale di materiali lapidei di età romana provenienti anche da siti storici dell'Antica Grecia come il Marmo Cipollino dell'Eubea, il Marmo Proconnesio proveniente dall'isola di Marmara (attuale Turchia) e altri marmi bianchi greci usati per le colonne della cripta e dell'abside di epoca medievale.

STOP 3. PIAZZA OTTINETTI E MUSEO CIVICO P.A. GARDA: Il Museo è ospitato nei locali dell'ex Monastero di Santa Chiara situato in piazza Ottinetti. Nell'arredo urbano di questa piazza sono state utilizzate numerose rocce ornamentali (Sienite della Balma, Diorite del Canavese) caratterizzate da differenti finiture superficiali che conferiscono alla pietra un determinato aspetto. Si tratta di una lavorazione fondamentale per lo sfruttamento delle possibilità espressive dei prodotti lapidei in quanto i colori, le tessiture, la scabrezza, le rugosità e tutte le caratteristiche estetiche naturali e talune proprietà meccaniche della roccia vengono valorizzati, modificati o minimizzati mediante opportuni trattamenti. Il Museo conserva preziose collezioni di archeologia, arte orientale e opere pittoriche e presenta, nel rinnovato allestimento concluso a fine 2013, le tre sezioni che costituiscono il percorso museale. La sezione archeologica raccoglie le testimonianze della città e del suo territorio dall'età neolitica fino al periodo basso medievale. Tra queste sono da ricordare numerosi reperti in marmo bianco di provenienza alpina ma anche mediterranea, il Marmo Bardiglio di Aymavilles di epoca romana e macine in pietra ollare di provenienza alpina (Fig. 4.3).

STOP 4. ANFITEATRO ROMANO DI EPOREDIA: Portato alla luce durante gli scavi condotti dalla Soprintendenza alle Antichità del Piemonte tra il 1955 e il 1964, si ritiene che l'Anfiteatro (Fig. 4.4) sia stato costruito tra la fine del I secolo d.C. e l'inizio del II secolo d.C. nei pressi della strada per Vercelli fuori dalle mura e che potesse ospitare da dieci a quindicimila spettatori. I resti dell'anfi-

teatro rappresentano una delle poche testimonianze architettoniche dell'antica città romana di *Eporedia*. I materiali lapidei impiegati per la sua costruzione comprendono rocce di origine locale (dioriti, gabbroniti e websteriti del Complesso Basico Stratificato) o provenienti da unità geologiche vicine (graniti e metagranofiri della Zona del Canavese, granuliti acide della II Zona Dioritico-Kinzigitica, micascisti della Zona Sesia-Lanzo, calcescisti della Zona Piemontese e ortogneiss della Falda della Dent Blanche), oltre al Marmo Bardiglio di Aymavilles (Aosta), utilizzato per le porzioni centrali dell'arena. Le pareti dell'anfiteatro risultano quindi una raccolta petrografica a cielo aperto, rappresentativa dell'orogenesi alpina. Per questo motivo è stato realizzato uno studio multimediale di questo monumento, con l'obiettivo di realizzare un percorso geoarcheologico su base GIS per valorizzare il patrimonio lapideo affiorante nel territorio di Ivrea e nella bassa Valle d'Aosta (Storta *et al.*, 2022).

STOP 5. SANTUARIO DI MONTE STELLA: Il Santuario di Monte Stella è stato edificato nel 1627 sulla collina che si erge nei pressi della piazza del mercato sulla sommità del Monte Stella (Fig. 4.5). Della struttura iniziale oggi sono rimasti integri solo il campanile e una parete adiacente all'attuale chiesa. L'odierna struttura risalente al XIX secolo, ha la forma di un tempio a pianta circolare in stile neogotico. Le pietre ornamentali impiegate nelle murature esterne di questo edificio comprendono vari litotipi tra cui Diorite del Canavese, Sienite della Balma, gabbri e dioriti del Complesso Basico Stratificato e laterizi. Le pietre ornamentali impiegate all'interno comprendono: brecce di origine incerta, marmi apuani e serpentiniti per gli altari, vulcaniti della Zona del Canavese, marmi apuani e serpentiniti per la pavimentazione.

STOP 6. PALAZZINE OLIVETTI: L'edificio è stato realizzato nel 1960-1964 per rispondere alle esigenze della prestigiosa fabbrica di macchine per scrivere di dotarsi, in un momento di grande espansione industriale, di una sede di rappresentanza che ospitasse anche la presidenza della Società. Le pietre ornamentali impiegate nella facciata di questo edificio (Fig. 4.6) comprendono: Sienite della Balma, Granito Rosa di Baveno e Serizzo Antigorio, mentre il Granito Bianco di Montorfano è stato utilizzato per la pavimentazione esterna. Le pietre ornamentali impiegate



FIGURA 4. Principali monumenti di interesse storico e contemporaneo di Ivrea. 1) Resti delle mura dell'antico Castello di Ivrea, che poggia direttamente sulle rocce affioranti del Complesso Basico Stratificato della Zona Ivrea-Verbano; 2) Cattedrale di Santa Maria Assunta; 3) Macine in pietra conservate presso il Museo Civico Pier Alessandro Garda; 4) Rilevati in pietra dell'anfiteatro romano dell'antica Eporedia; 5) Muratura in pietra del Santuario di Monte Stella; 6) Palazzine Olivetti.

all'interno dell'edificio sono il Marmo Bianco di Carrara per la realizzazione dello scalone monumentale e alcuni graniti stranieri per la pavimentazione.

5. DISCUSSIONI E CONCLUSIONI

La finalità principale di questo studio è stata la diffusione delle conoscenze sulla pietra dal punto di vista scientifico-didattico e turistico-culturale, fornendo un nuovo approccio alla promozione del territorio. Per fare ciò è stato ideato un itinerario digitale che permette al pubblico di intraprendere un viaggio virtuale attraverso il patrimonio geoculturale della città di Ivrea tramite una mappa consultabile online contenente una serie di stop individuati in corrispondenza di siti di interesse geologico-culturale e attraverso schede esplicative relative a tali siti contenenti una breve descrizione storico-architettonica, una lista dei materiali lapidei impiegati e una loro descrizione petrografica. La divulgazione degli itinerari via web si rivela un ottimo strumento per la fruizione gratuita on-line, consentendo un approccio didattico e una visita virtuale in preparazione alla vera uscita sul terreno. Le informazioni sono così rese facilmente accessibili non solo ai professionisti, ma anche ad un più vasto pubblico in modo tale da creare un collegamento tra le Scienze della Terra, il territorio e la città di Ivrea stessa, tramite la valorizzazione e la tutela dei suoi principali Beni Culturali e Naturali.

RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata realizzata nell'ambito del Progetto GeoDIVE (coord. M. Giardino), cofinanziato da Fondazione Compagnia di San Paolo e Università di Torino.

BIBLIOGRAFIA

- BORGHI A., APPOLONIA L., FIORA L., ZOJA A. (2006). *The grey marble of Porta Praetoria (Aosta, Italy): a mineralogical-petrographic characterisation and provenance determination*, Periodico di Mineralogia, 75, 2-3, 59-74.
- BORGHI A., D'ATRI A., MARTIRE L., CASTELLI D., COSTA E., DINO G., FAVERO LONGO S.E., FERRANDO S., GALLO L.M., GIARDINO M., GROPPA C., PIERVITTORI R., ROLFO F., ROSSETTI P., VAGGELLI G. (2014). *Fragments of the Western Alpine chain as historic ornamental stones in Turin (Italy): a new geotouristic approach for the enhancement of urban geological heritage*. Geoheritage, 6, 41-55. <http://doi.org/10.1007/s12371-013-0091-7>
- BORIANI A., CAIRONI V., GIOBBI ORIGONI E., VANNUCCI R. (1992). *The Permian intrusive rocks of the Serie dei Laghi (Western Southern Alps)*. Acta Vulcanologica, 2, 73-86.
- BOTTINO G., DEL GRECO O., FORNARO M., MONETTI G. (1989). *Studi per la valorizzazione di giacimenti della Pietra Verde Argento nella Valle della Dora Baltea*. Atti Conv. Int. «Situazione e prospettive dell'industria lapidea», Cagliari, 3-5 aprile 1989, 99-104.
- BROCK M., SEMENIUK V. (2019). *Building stones can be of geoheritage significance*, Geoheritage, 11, 133-149. <http://doi.org/10.1007/s12371-017-0274-8>
- COMPAGNONI R., DAL PIAZ G.V., HUNZIKER J.C., GOS-
SO G. (1977). *The Sesia-Lanzo zone, a slice of continental crust with alpine high pressure-low temperature assemblages in the Western Italian Alps*. Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia, 33, 281-334.
- COOPER B.J. (2015). *The 'global heritage stone resource' designation: past, present and future*. In: Pereira D, Marker BR, Kramar S, Cooper BJ, Schouenborg BE (eds) *Global heritage stone: towards international recognition of building and ornamental stones*, Geological Society, Special Publications, London, 407, 11-20. <http://doi.org/10.1144/SP407.18>
- DAL PIAZ G.V., HUNZIKER J.C., MARTINOTTI G. (1972). *La Zona Sesia Lanzo e l'evoluzione tettono-metamorfica delle Alpi nordoccidentali interne*. Memorie Società Geologica Italiana, 11, 433-466.
- DAL PIAZ G.V. (1992). *Guide geologiche regionali. Le Alpi dal Monte Bianco al Lago Maggiore*. Società Geologica Italiana, Roma: 311 pp.
- DAL PIAZ G.V. (1999). *The Austroalpine-Piedmont nappes and the puzzle of Alpine Tethys*. Memorie di Scienze Geologiche, 51, 155-176.
- DE GIUSTI F., DAL PIAZ G.V., MASSIRONI M., SCHIAVO A. (2004). *Carta geotettonica della Valle d'Aosta*. Memorie di Scienze Geologiche, 55, 129-49.
- FESTA A., BALESTRO G., BORGHI A., DE CAROLI S., SUCCO A. (2020). *The role of structural inheritance in continental break-up and exhumation of Alpine Tethyan mantle (Canavese Zone, Western Alps)*. Geoscience Frontiers, 11, 167-188. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.11.007>
- HANDY M.R., ZINGG A. (1991). *The tectonic and rheological evolution of an attenuated cross section of the continental crust: Ivrea crustal section, southern Alps, northwestern Italy and southern Switzerland*. Geological Society of American Bulletin, 103, 236-253.
- HANDY M.R., FRANZ L., HELLER F., JANNETT B., ZURBRIGGEN R. (1999). *Multistage accretion and exhumation of the continental crust (Ivrea crustal section, Italy and Switzerland)*. Tectonics, 18, 1154-1177.
- QUICK J.E., DENLINGER R.P. (1992). *The possible role of ductile deformation in the formation of layered gabbros in ophiolites*. Ofioliti, 17, 249-253.
- QUICK J.E., SINIGOI S., MAYER S. (1994). *Emplacement dynamics of a large mafic intrusion in the lower crust, Ivrea Verbano Zone*. Journal of Geophysical Research, 99, 21559-21573. <https://doi.org/10.1029/94JB00113>
- STORTA E., BORGHI A., PEROTTI L., PALOMBA M., DEODATO A. (2022). *Mineralogical-petrographic characterization of stone materials used for the roman Amphitheater of Eporedia (Ivrea, TO): a scientific-dissemination proposal in the Cultural Heritage*. Resources Policy, submitted.
- VON RAUMER J.F. (1987). *Les massifs du Mont Blanc et des Aiguille Rouges: témoins de la déformation de croûte varisque dans les Alpes occidentales*. Geologie Alpine, 63, 7-24.
- ZINGG A., HANDY M.R., HUNZIKER J.C., SCHMID S.M. (1990). *Tectonometamorphic history of the Ivrea Zone and its relationship to the crustal evolution of the Southern Alps*. Tectonophysics, 182, 169-192. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90349-D](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90349-D)

Cattura e stoccaggio del diossido di carbonio: casi studio in Piemonte

Carbon capture and storage: case studies in Piedmont

LINDA PASTERO*, ENRICO DESTEFANIS, CATERINA CAVIGLIA, DAVIDE BERNASCONI, ALESSANDRO PAVESE

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino

* Corresponding author

E-mail: linda.pastero@unito.it

Parole chiave: CO₂, mineralizzazione, carbonatazione, ossalato

Key words: CO₂, mineral capture, carbonation, oxalate

1. L'AGENDA 2030 PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE

Il 25 settembre 2015, 193 Paesi dell'ONU tra i quali l'Italia sottoscrissero un piano di azione comune per lo sviluppo sostenibile, l'Agenda 2030. L'Agenda 2030 integra gli aspetti ambientali, economici e sociali, rendendoli interconnessi ed inscindibili e quindi superando ed integrando il modello di sostenibilità attento unicamente all'ambiente. L'approccio richiesto nell'affrontare lo sviluppo sostenibile non è più di intervento su ogni singolo aspetto, ma sistemico, basato sulle connessioni tra ambiente, economia e società e sulle ripercussioni che ogni azione esercitata su uno dei tre aspetti può avere sugli altri. L'Agenda globale definisce 17 obiettivi di sviluppo sostenibile (Sustainable Development Goals – SDGs) con termine ultimo il 2030. I 17 obiettivi sono articolati in 169 target che definiscono la via per lo sviluppo sostenibile a livello globale. La valutazione del raggiungimento di tali obiettivi è fatta in relazione ad oltre 240 indicatori, che rappresentano la base della valutazione periodica a cui ciascun Paese sottoscrittore è sottoposto in sede ONU e dalla opinione pubblica nazionale ed internazionale. Tutti i Paesi sono chiamati a contribuire allo sviluppo sostenibile, al raggiungimento degli SDGs e a rendicontare periodicamente all'ONU i risultati raggiunti, senza distinzioni tra Paesi emergenti, in via di sviluppo o sviluppati.

Nel 2017, il CIPE (Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica) ha approvato la Strategia Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile in forza della quale le Regioni sono tenute a presentare un documento coerente con la Strategia Nazionale che contribuisca al successo di quest'ultima. In questo quadro si collocano le collaborazioni tra Enti pubblici e soggetti privati per il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità ambientale, economica e sociale previsti dall'Agenda 2030.

Tra i 17 SDGs previsti dall'Agenda 2030, l'obiettivo 13 riguarda la lotta al cambiamento climatico ed è, come nello spirito dell'intera Agenda, fortemente interconnesso con tutti gli altri obiettivi, ed in particolare con: energia pulita ed accessibile, innovazione ed infrastrutture, città e comunità sostenibili e consumo e produzione responsabili. L'obiettivo 13 prevede l'adozione di misure urgenti per combattere il cambiamento climatico e le sue conseguenze.

Uno degli effetti più palesi del cambiamento climatico è il riscaldamento globale. Esso è definito come l'aumento a lungo termine delle temperature a livello globale, osservato a partire dall'epoca pre-industriale (1850-1900) ad oggi ed è riferito alle attività umane (utilizzo di combustibili fossili innanzitutto, ma anche ad attività industriali ed economiche più in generale) che hanno come conseguenza un aumento della concentrazione dei gas serra nell'atmosfera terrestre.

Rispetto all'epoca pre-industriale, un primo aumento della temperatura è stato registrato durante la Seconda Guerra Mondiale, a causa del forte incremento dell'attività produttiva collegata all'industria bellica. In seguito, a partire dagli anni 50 del 1900, l'aumento dell'attività industriale civile ha portato ad una crescita della temperatura globale media di circa 1°C, valore che, ai ritmi di emissioni attuali, è destinato a crescere di circa 0.2°C/anno. Un aumento di 2°C è considerato il valore limite per il rialzo della temperatura media globale oltre il quale sono destinati ad innescarsi cambiamenti ambientali catastrofici.

L'anidride carbonica (CO₂), è uno dei principali gas serra pur non essendo il gas con il maggior GWP (Global Warming Potential, potenziale di riscaldamento globale), in quanto prodotto in grande quantità e a ritmo sostenuto da tutte le attività antropiche. La concentrazione media di anidride carbonica in atmosfera è passata dalle 317 ppm registrate nel 1958, alle 400 ppm del maggio del 2013, alle 420 ppm dell'agosto 2021 (NASA Goddard Institute for Space Studies – GISS, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>).

La riduzione delle emissioni di CO₂ da una parte, e l'aumento della capacità di cattura e stoccaggio (CCS) della stessa dall'altra, sono dunque due facce della stessa medaglia e concorrono ugualmente alla riduzione della concentrazione di anidride carbonica in atmosfera. Se la riduzione delle emissioni è legata all'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili ed ecosostenibili, la cattura e lo stoccaggio del biossido di carbonio prodotto dalle attività umane sono affidati ad un ventaglio di tecniche più o meno consolidate. Fra queste possiamo citare ad esempio: lo stoccaggio geologico, i metodi di riduzione elettrochimica e catalitica, l'utilizzo di ammine per la cattura ed il recupero dell'anidride carbonica, lo stoccaggio minerale, al quale dedichiamo particolare attenzione in questa sede.

2. LA CATTURA DELLA CO₂ PER MINERALIZZAZIONE (MINERAL TRAPPING)

Tradizionalmente, per cattura minerale (mineral trapping) della CO₂, si intende l'immobilizzazione definitiva in fasi minerali carbonatiche stabili, o *carbonatazione*. In questo ambito, l'intrappolamento all'interno della struttura di minerali carbonatici, a partire in genere da rocce silicatiche basiche o ultrabasiche, è stata studiata in quanto potenziale metodo di cattura della CO₂ atmosferica. Le reazioni di carbonatazione, anche se termodinamicamente favorite, sono reazioni estremamente lente, che si realizzano alla scala dei tempi geologici. Si tratta genericamente di reazioni analoghe a quelle di alterazione naturale delle rocce.

Le reazioni di carbonatazione possono essere dirette o indirette e possono avvenire sia per reazione solido/gas che in presenza di una fase liquida (Wilcox, 2012). L'efficienza di conversione per carbonatazione diretta può raggiungere valori interessanti (25-30% in 2 ore), ma sempre in condizioni di alta temperatura e pressione o in presenza di CO₂ supercritica, quindi condizioni che richiedono un ingente impiego di energia e, conseguentemente, costi elevati di esercizio. Nella carbonatazione diretta di rocce ultramafiche, la fase minerale che presenta la maggiore reattività è la wollastonite (CaSiO₃) che raggiunge, nelle giuste condizioni (taglia inferiore a 75µm, 185°C e 150 atm di CO₂), il 70% circa di efficienza di conversione in un'ora.

Nel caso in cui si voglia ricorrere alla carbonatazione indiretta, gli ossidi di calcio e magnesio devono essere preventivamente estratti dalla roccia e solo dopo questo trattamento possono essere utilizzati per la reazione di cattura dell'anidride carbonica.

Sia nelle reazioni di carbonatazione diretta che in quelle di carbonatazione indiretta, la presenza di acqua aumenta la resa della reazione. Mentre allo stato solido la reazione si limita alla passivazione delle superfici delle fasi reattive, in presenza di acqua vede la cooperazione di fenomeni di dissoluzione e riprecipitazione ed una maggior efficienza dei meccanismi di trasporto delle specie reagenti. Per queste ragioni la carbonatazione in presenza di acqua è in generale un processo che permette di ottenere rese accettabili in condizioni energeticamente meno sfavorevoli.

Da un punto di vista pratico, un impianto di cattura e stoccaggio della CO₂ posto a valle di altre lavorazioni ha dei costi elevati: l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change dell'ONU) ha stimato che un impianto dotato di cattura e stoccaggio della CO₂ per mineralizzazione possa richiedere

un consumo di energia maggiore del 60-180% rispetto ad un impianto privo di servizi di CCS (Mazzotti, 2005).

In letteratura si trovano proposti e trattati metodi di cattura della CO₂ per carbonatazione che utilizzano scorie derivanti da processi di lavorazione piuttosto che materiali naturali. In Tabella 1 sono riportati alcuni fra i materiali alcalini adatti allo scopo (Wilcox, 2012).

Il pretrattamento di questi materiali, rispetto a quanto avviene per i materiali naturali, è molto limitato e questo evidentemente permette di abbattere i costi di gestione di impianti di questo tipo. Oltre alla CCS realizzabile attraverso l'uso di questi sottoprodotti, si aggiunge il fatto che la pericolosità di tali materiali di scarto, in termini di rilascio di inquinanti, viene drasticamente ridotta in quanto gli inquinanti contenuti vengono immobilizzati per carbonatazione.

In questo quadro di insieme si collocano studi che vedono coinvolte l'Università degli Studi di Torino ed alcune realtà industriali presenti sul territorio regionale.

3. CASI STUDIO.

3.1 Il termovalorizzatore del Gerbido (in collaborazione con TRM Torino - gruppo IREN S.p.A.)

La collaborazione nasce dalla necessità di chi, come nel caso di TRM (Trattamento Rifiuti Metropolitan Torino), che si occupa di gestione dei rifiuti solidi urbani, deve ridurre al minimo la quantità di rifiuti da smaltire. Questo può avvenire grazie alla valorizzazione dei prodotti da incenerimento promuovendoli, dopo opportuni trattamenti, a materie prime seconde, consentendone il reinserimento sul mercato in un contesto di economia circolare.

Al termine del processo di termovalorizzazione dei rifiuti solidi urbani, rimangono le ceneri (pesanti e leggere), una notevole quantità di vapore e l'energia prodotta proprio grazie alla combustione. In generale, le ceneri pesanti sono il principale residuo solido dell'incenerimento dei rifiuti solidi urbani e rappresentano circa il 20-25% in peso dei rifiuti bruciati. Sia la composizione chimica elementare che quella in termini di fasi solide sono piuttosto eterogenee e dipendono dalla taglia delle particelle, che varia da pochi micron ad alcuni centimetri. La frazione grossolana, superiore ai 4 mm, è costituita principalmente da frammenti di vetro, metalli e materiali ceramici. Il solido residuo, ottenuto come sottoprodotto del processo di incenerimento, contiene una varietà di specie contaminanti che fanno sì che le ceneri pesanti debbano essere classificate secondo normativa come rifiuti pericolosi.

Tabella 1. Processi industriali e scorie ad essi collegate

Processo industriale	Sottoprodotto alcalino
Combustione carbone	Ceneri leggere
Industria del ferro e dell'acciaio	Scorie di acciaio, scorie di altoforno
Industria del cemento	Polvere e scarti di lavorazione
Cavatura degli asbesti	Scarti di lavorazione
Industria dell'alluminio	Residui bauxitici
Termovalorizzazione rifiuti	Ceneri da termovalorizzatore

Tabella 2. Condizioni sperimentali di carbonatazione delle ceneri pesanti

Temperatura (°C)	Pressione CO ₂ (bar)	Rapporto acqua/solido	Tempo di reazione (minuti)
60 - 80	≤ 2 - 3	0.2 - 0.4	60-180

I contaminanti principali sono rappresentati da solfati, cloruri, nitrati e metalli pesanti (Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Cd), mentre arsenico, berillio, selenio, antimonio, vanadio e fluoruri presentano tenori inferiori ai limiti di legge (Destefanis, 2020).

Sono stati condotti alcuni esperimenti di carbonatazione sulle frazioni fini delle ceneri pesanti (tra 1 e 2 mm e sotto il mm) separate dal residuo di combustione del termovalorizzatore. Il materiale, posto all'interno di un reattore progettato per questo scopo (Maina G. S.r.l.) è stato sottoposto ad una atmosfera di CO₂ la cui pressione è stata monitorata tramite un manometro collegato. Gli esperimenti sono stati condotti in sistema chiuso in condizioni di temperatura costante secondo quanto riportato in Tabella 2.

In generale, la carbonatazione delle frazioni più fini delle ceneri pesanti risulta essere efficace per quanto riguarda l'abbattimento del rame, che passa da concentrazioni superiori ai 3 ppm a valori di concentrazione molto bassi (0.05 ppm), che risultano essere inferiori ai limiti di legge consentiti (0.5 ppm). D'altra parte, la carbonatazione risulta essere inefficace nell'abbattimento delle specie anioniche.

Sia il tempo di reazione prolungato che l'alta temperatura hanno un effetto positivo nell'abbattimento delle concentrazioni di tutti i metalli presenti nella frazione fine delle ceneri pesanti.

La fase minerale che viene a formarsi nel reattore e che risulta quindi essere direttamente collegata all'abbattimento delle concentrazioni risulta essere calcite (carbonato di calcio), con possibile incorporazione di metalli pesanti nel reticolo cristallino.

Un confronto tra tecniche diverse di carbonatazione di ceneri pesanti da termovalorizzatore è stato effettuato comparando le ceneri provenienti dall'impianto di Torino, sottoposte a carbonatazione accelerata secondo il metodo descritto (Tabella 2) e quelle provenienti dall'impianto francese di Salamandre gestito dalla società Sivert nella città di Lasse, all'interno del quale la carbonatazione naturale delle ceneri avviene per stoccaggio ed esposizione all'aria su tempi di maturazione molto lunghi (60-90 giorni). Sia la carbonatazione naturale che quella accelerata sono efficaci al fine di una inertizzazione dei rifiuti da termovalorizzatore, con il fine ultimo di poter riutilizzare il materiale come materia prima seconda. La carbonatazione naturale, che avviene per semplice esposizione all'aria del sottoprodotto da inertizzare, richiede ovviamente ampi spazi di stoccaggio che vengono impegnati per lunghi periodi di maturazione. La carbonatazione accelerata è più efficace di quella naturale e pur richiedendo un maggior dispendio dal punto di vista tecnologico, implica una notevole riduzione dei tempi richiesti per l'inertizzazione. Le due tecniche possono però essere integrate, applicando la carbonatazione naturale al materiale di scarto più grossolano e quella accelerata al materiale più fine, permettendo una riduzione della quantità di materiale destinato alla discarica (Bicchi et al., 2019).

3.2 La cattura della CO₂ tramite mineralizzazione in ossalati (in collaborazione con Ecospray Technologies S.r.l., Alzano Scrivia, AL)

Si tratta di un metodo di cattura per mineralizzazione che sfrutta l'azione riducente dell'acido ascorbico (vitamina C) per ridurre il carbonio della CO₂ ad ossalato e precipitarlo in forma solida (ossalato di calcio) (Pastero, 2019).

Rispetto alla carbonatazione tradizionale, il metodo permette di intrappolare nel reticolo dei cristalli di ossalato di calcio due molecole di CO₂ per unità formula, anziché una come avviene per il carbonato, raddoppiando così l'efficienza della mineralizzazione. Gli ossalati di calcio hanno una solubilità molto bassa (circa 61 mg/100g di acqua a 20°C), confrontabile (leggermente inferiore) con quella del carbonato di calcio (circa 66 mg/100g di acqua a 20°C). In ragione di ciò, la cattura in ossalati può essere considerata stabile esattamente come avviene per la cattura nei carbonati. A differenza dei carbonati, la mineralizzazione ad ossalati ha il vantaggio che, in caso di dissoluzione, non viene mobilizzato del carbonato, ma dell'ossalato e quindi non si ha diretta reimmissione della anidride carbonica nell'ambiente. La reazione di riduzione della CO₂ a C₂O₄²⁻ avviene in condizioni di pressione e temperatura ambiente e non origina sottoprodotti pericolosi, quindi in termini energetici e di gestione dei sottoprodotti è una reazione economicamente vantaggiosa.

Il principale svantaggio risiede nel fatto che non si tratta di una reazione istantanea, ma richiede un tempo di innesco di circa mezz'ora (valutato su reattori di laboratorio). Inoltre il costo della vitamina C può essere un ostacolo alla realizzazione di impianti di cattura basati su questo principio.

Il metodo è stato validato attraverso prove di laboratorio che sono state effettuate utilizzando reattori in vetro collegati ad un sistema di controllo e monitoraggio dei flussi e delle pressioni del gas immesso nel sistema di cattura. La CO₂ pura è immessa nel vaso di reazione tramite una valvola che interrompe il flusso quando la pressione all'interno del reattore raggiunge un valore limite predisposto. Il consumo di CO₂ nel sistema è valutato in base alla diminuzione di pressione nel reattore oppure al flusso in uscita, a seconda della configurazione sperimentale adottata (Figura 1). È necessario sottolineare che non sono richieste sovrappressioni elevate, e che si lavora a pressione leggermente superiore a quella ambiente (1.04 bar) al solo scopo di monitorare accuratamente il consumo di CO₂.

La capacità di cattura di una soluzione di ascorbato di calcio 1M, così come valutata in laboratorio, varia da 6 a 82% in funzione del metodo di miscelazione di gas e soluzione usato (Pastero, 2021), ma comunque sempre in condizioni di pressione e temperatura ambiente.

Ad oggi è in via di sperimentazione un dimostratore tecnologico costruito su progetto originale elaborato a partire dai dati di laboratorio in collaborazione con Ecospray

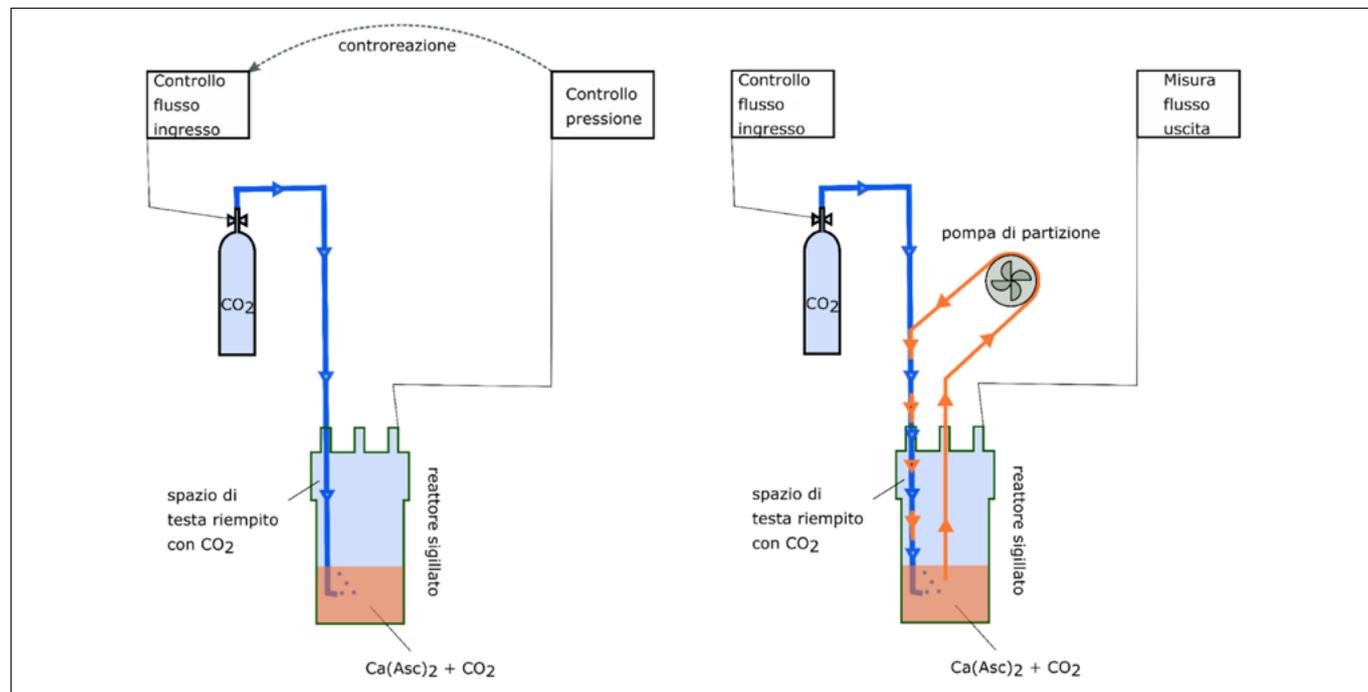


FIGURA 1. Schema del reattore di laboratorio dedicato alla cattura della CO₂. In figura è riportata la configurazione con controllo di pressione (a sinistra) e con misura del flusso in uscita (a destra).

Technologies S.r.l. (Alzano Scrivia, AL). La collaborazione nasce proprio dalla necessità di arricchire il portfolio di metodi di abbattimento della concentrazione di CO₂ atmosferica a disposizione delle industrie.

Il dimostratore tecnologico, costruito sullo schema degli abbattitori di fumi da combustione dei motori delle navi, sui quali l'interlocutore industriale ha forte esperienza, è utile a verificare la scalabilità del metodo dalla scala di laboratorio a quella pre-industriale.

Una applicazione a corollario del metodo riguarda la possibilità di trattare con la stessa soluzione utilizzata al fine di ridurre l'anidride carbonica anche le acque reflue dei processi di trattamento, ad esempio dei rifiuti. La presenza di acido ossalico in soluzione infatti permette di precipitare ossalati di calcio, ma anche ossalati di altri metalli presenti in soluzione, abbattendone le concentrazioni. In questo modo alla cattura dell'anidride carbonica viene accoppiata la rimozione dei metalli pesanti.

4. CONCLUSIONI

Concludendo, le azioni di ricerca e sviluppo di nuove metodologie di cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica, intraprese a livello regionale grazie alla collaborazione con alcune realtà industriali presenti sul territorio, rientrano appieno nelle strategie di mitigazione del cambiamento climatico così come intese a livello internazionale dall'Agenda 2030. L'approccio circolare, che prevede l'inertizzazione delle scorie al fine di un riutilizzo delle medesime come materie prime seconde, racchiude al suo interno anche tutti quei processi di cattura della CO₂, di recupero delle acque reflue e dei metalli in esse contenuti.

BIBLIOGRAFIA

BICCHI E., CAVIGLIA C., CHARRUAU J., CONFALONIERI G., DESTEFANIS E., MANDRONE G., PASTERO L., PAVE-

SE A., GERAULT L., BIZEUL F. (2019). *Natural and accelerated carbonation treatments for municipal solid waste incineration bottom ashes inertization: a comparative study*. 4th MatER Meeting, Piacenza (IT), May 27th - 28th - 29th /2019. Innovation & technologies in waste recovery.

DESTEFANIS E., CAVIGLIA C., BERNASCONI D., BICCHI E., BOERO R., BONADIMAN C., CONFALONIERI G., CORAZZARI I., MANDRONE G., PASTERO L., PAVESE A., TURCI F., WEHRUNG Q. (2020). *Valorization of MSWI Bottom Ash as a Function of Particle Size Distribution, Using Steam Washing*. Sustainability 2020, 12(22), 9461; <https://doi.org/10.3390/su12229461>

MAZZOTTI M., ABANADES J.C., ALLAM R., LACKNER K. S., MEUNIER F., RUBIN E., SANCHEZ J. C., YOGO K., ZEVENHOVEN R. (2005). *Mineral carbonation and industrial uses of CO₂*. In IPCC Reports, Chapter 7, pag 319-338, Bert Metz, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos and Leo Meyer (Eds.) Cambridge University Press, UK. pp 431. Cambridge University Press, The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge CB2 2RU ENGLAND IPCC

NASA Goddard Institute for Space Studies - GISS, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

PASTERO L., CURETTI N., ORTENZI M. A., SCHIAVONI M., DESTEFANIS E., PAVESE A. (2019). *CO₂ capture and sequestration in stable Ca-oxalate, via Ca-ascorbate promoted green reaction*. Science of the Total Environment 666 (2019) 1232-1244

PASTERO L., MARENGO A., BOERO R., PAVESE A. (2021). *Non-conventional CO₂ sequestration via Vitamin C promoted green reaction: Yield evaluation*. Journal of CO₂ Utilization 44 (2021) 101420

WILCOX, J. (2012). *The Role of Mineral Carbonation in Carbon Capture*. In Carbon Capture, Chapter 9, pp 257-273. Springer.

Cambiamenti climatici e innesco di megafrane in area appenninica mediterranea. Il caso della grande frana di Gavi del 1° dicembre 2019

Climate changes and related megalandslides in Mediterranean Apennine area. The case of the Gavi great landslide of December 1st, 2019

PAOLO SASSONE

Geologo, Studio Sassone Engineering Geology, Casalborgone (TO), socio SIGEA-APS

E-mail: info@studiosassone.it

Parole chiave: Cambiamenti climatici, megafrane, area appenninica mediterranea

Key words: Climate changes, megalandslides, Mediterranean Apennine area

1. PREMESSA

A seguito degli eventi alluvionali che hanno colpito il territorio di Gavi nei giorni 21-22/10/2019 e successivamente il 23-24/11/2019 si è osservato e attivato un importante movimento franoso in località Torrente Ardana - Cascina Sciotra, posta a sud del concentrico, in Comune di Gavi (AL), a carico dei terreni boschivi ed agricoli coltivati a vigneto di pregio. Il movimento, osservato come incipiente il 24/11 con la formazione di una prima fenditura a gradino di circa 40 cm e lunga alcune decine di metri, ha avuto la sua fase parossistica il giorno 1/12/2019 quando il fenomeno, già attivatosi dai giorni precedenti, ha interessato, con conseguenze disastrose, terreni per una estensione di poco inferiore a 11 ettari (Figg. 1 e 2). Il volume stimato di

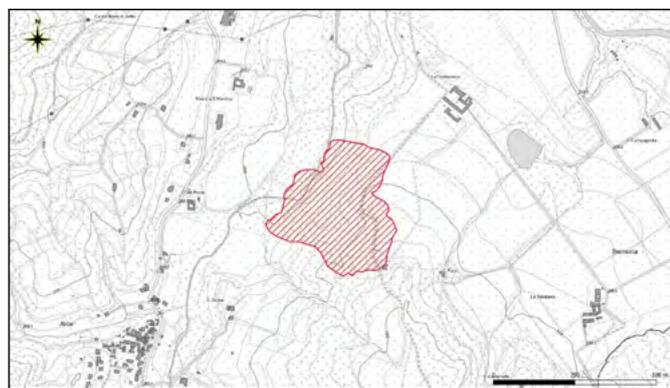


FIGURA 1. Area in dissesto per scivolamento planare (tratteggio rosso).



FIGURA 2. Situazione ante frana del 1° dicembre 2020; in rosso il perimetro della zona ante movimento. A sinistra il T. Ardana.

accumulo raggiunge il milione di metri cubi. La sequenza di eventi meteoroidrologici dell'autunno 2019, è stata la causa principale dei devastanti effetti al suolo registratisi nel bacino del T. Lemme e diffusamente in tutto il basso Alessandrino, come ben evidenziato nei rapporti di evento di Arpa Piemonte qui interamente richiamati ed ai quali si rimanda. Riferimenti si trovano in Arpa Piemonte, 2019 Parte 1; Arpa Piemonte, 2019 Parte 2; Arpa Piemonte (2019) – Eventi idrometeorologici dal 22 al 25 novembre 2019.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

La frana ha un'estensione, dalle rilevazioni del DEM Ortofoto appositamente eseguito con drone, di 10,5 ettari circa. Il volume coinvolto è stimato attorno a 1 milione di mc.

La frana si protrae verso il fondovalle del Torrente Ardana, che scorre da Sud Ovest a Nord Est quale tributario sinistro del Torrente Lemme. Allo stato attuale, la nicchia di frana è posta a ridosso di Cascina Sciotra e coinvolge largamente i vigneti dell'Azienda agricola, per almeno due ettari. Il corpo del movimento franoso raggiunge l'alveo del fiume e risulta per alcune parti dell'accumulo frontale, in movimento stimato di 2/4 cm giorno. Tale valore è stato stimato in fase di rilievo con drone per il periodo non piovoso eseguito il giorno 31/1 e 3/2.

Sulla base degli elementi misurati grazie al contributo del sistema GPR l'avanzamento del fronte frana ha visto l'invasione dell'alveo, fortunatamente ampio oltre 120 m, per almeno 60 metri. Analogamente la distanza dalla posizione apicale della nicchia di distacco dalla parte sommitale della frana misura circa 60 metri.

Il fenomeno franoso, classificabile come scivolamento planare, si è attivato coinvolgendo le "Coperture detritiche ed eluvio colluviali prevalentemente limoso argillose alla base dei versanti e lungo i fondovalle secondari" e "Depositi alluvionali antichi prevalentemente ghiaioso sabbiosi argillosi fortemente alterati con prodotti di alterazione giallastri e rossastri, presenza di paleosuoli rosso arancio e bruno rossastri" che sarebbero scivolati, ed in parte anche coinvolgendo, sulla Formazione di Costa Areasa (depositi di piana sottomarina costituiti da alternanze di marne,

marne argillose con livelli siltoso arenacei), afferente al bacino oligomiocenico ligure piemontese.

Dalle osservazioni di foto aeree è verosimile supporre che si tratti di una estesa mobilitazione che ha coinvolto anche precedenti accumuli di frana già messi in posto in tempi storici e rimodellati e rivegetati, ma ancora indivi-

duabili dagli archivi aerofotogrammetrici. Il Piano regolatore di Gavi (redatto nel 2010 dallo scrivente per quanto riguardava gli aspetti geologici) riconosceva la presenza, alla base del versante, di due accumuli franosi che potrebbero essere stati i dissesti precursori minori del più esteso dissesto 2019 in esame (Figg. 3 e 4).

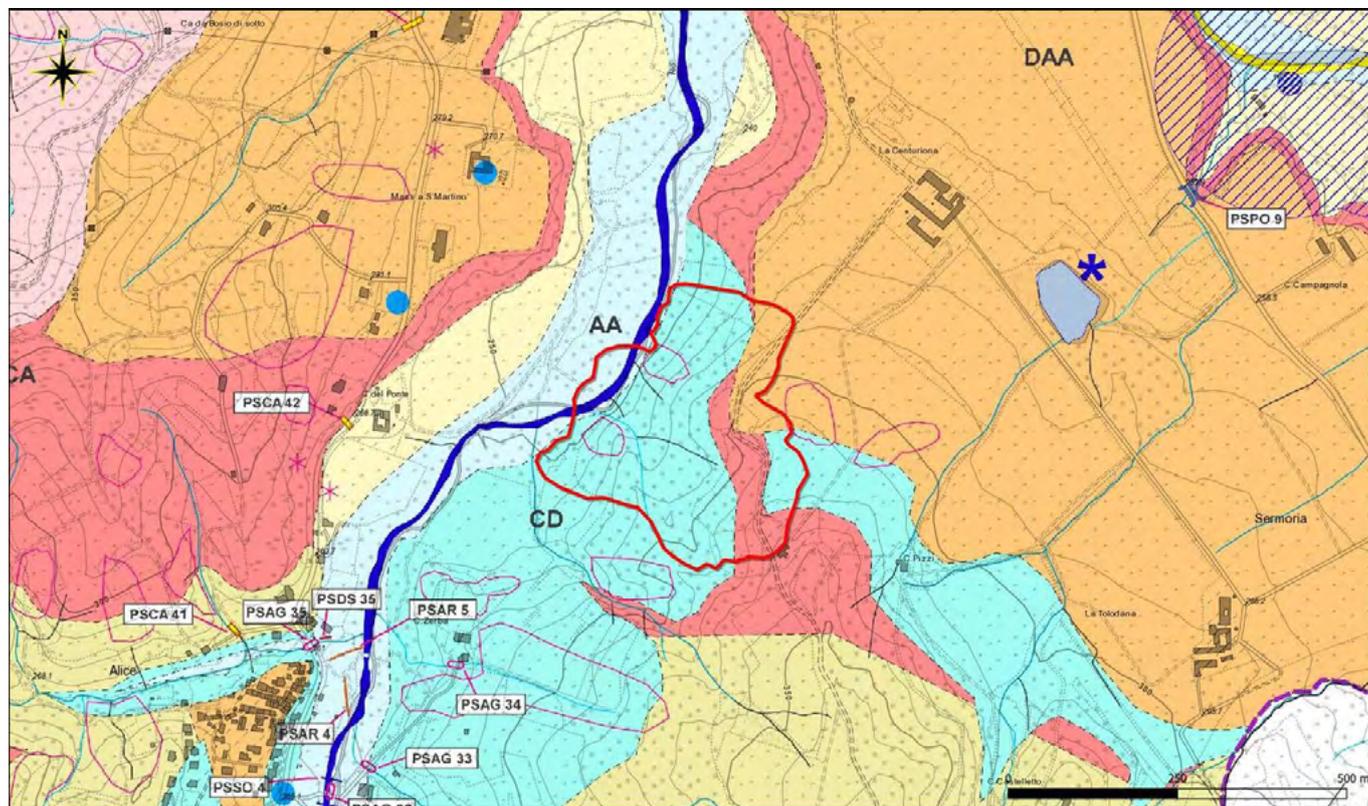


FIGURA 3. Stralcio della Carta geologico-strutturale, geoidrologica, della caratterizzazione litotecnica dei terreni e censimento S.I.C.O.D. In rosso il nuovo dissesto (PRGC di Gavi; Sassone, 2010).

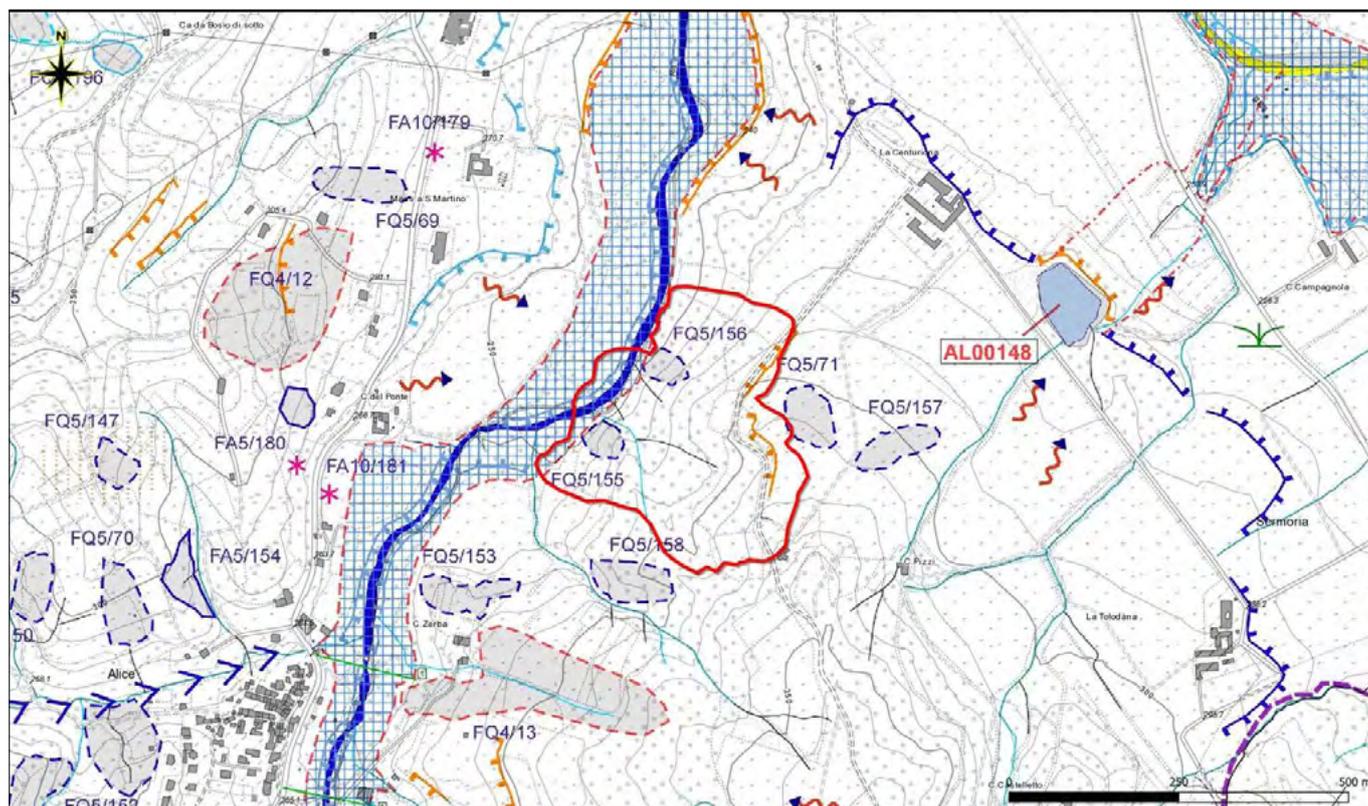


FIGURA 4. Stralcio della Carta geomorfologica dei dissesti, della dinamica fluviale e del reticolato idrografico minore. In rosso il nuovo dissesto (PRGC di Gavi; Sassone, 2010).

3. MODELLAZIONE GEOLOGICA E GEOMORFOLOGICA

3.1 Descrizione del dissesto

In fase preliminare è stato eseguito un sopralluogo conoscitivo finalizzato ad una prima modellazione geologica e geomorfologica qualitativa quantitativa del fenomeno.

L'allegato fotografico mette in evidenza l'entità del fenomeno che eccede le "normali" ricadute al suolo di eventi alluvionali, oramai reiterati nel territorio Gaviese, sottolineando l'eccezionale dimensione della frana e la conseguente sua imprevedibilità a fronte dell'estrema difficoltà di una normale gestione emergenziale della stessa.

La nicchia ha un'altezza di svincolo di circa 6/8m e, planimetricamente, il movimento è stato misurato in circa

na stessa costituisce una criticità non di secondaria importanza per la sottostante Città' di Gavi. Inoltre il materiale arboreo schiantato a seguito del movimento franoso in corrispondenza del fronte e del Torrente Ardana rappresenta, anch'esso, una criticità non indifferente soprattutto nel caso in cui dovesse verificarsi una nuova piena, ancorché non eccezionale come le precedenti, che potrebbe trasportare a valle il materiale arboreo con conseguenze facilmente preventivabili a carico delle opere idrauliche presente lungo l'aveo dell'Ardana e poi del Lemme.

Da una prima valutazione puramente geometrico/qualitativa emergerebbe che gli spessori mobilizzabili (condizione pre-frana) e successivamente mobilizzati siano dell'ordine di grandezza variabile tra 6/8 m e 19 m, (Figg. 5, 6, 7, 8, 9, 10).



FIGURA 5. Cascina Sciotra porzione NordOvest della Nicchia di distacco.

60m in direzione NO. La nicchia ha un'estensione di circa 450m (due tratti paralleli a quote differenti collegati da un tratto ortogonale) e il fronte di circa 350m. La nicchia apicale di frana, in questo momento, è inoltre molto prossima all'edificio di Cascina Sciotra recentemente oggetto di interventi di mitigazione e consolidamento con opere speciali. Il corpo di frana risulta particolarmente complesso con porzioni che sono state movimentate in maniera solidale anche di parecchi metri, zone con evidenti rigonfiamenti ed altre con sensibili svuotamenti. Il fronte della frana si trova a ridosso del Torrente Ardana in un settore dove l'alveo è ampio e non parrebbe che, al momento, possa comportare un'ostruzione dello stesso, anche se il fatto stesso che il corso d'acqua scorre proprio alla base della fra-



FIGURA 6. Cascina Sciotra e la Nicchia di distacco, vista da valle



FIGURA 7. Particolare del margine occidentale della frana, nella parte basale ove sorge un capanno, con sollevamento verticale di almeno 7 metri del fronte frana, e avanzamento del fronte frana di circa 60 metri ad invadere il T. Ardana.

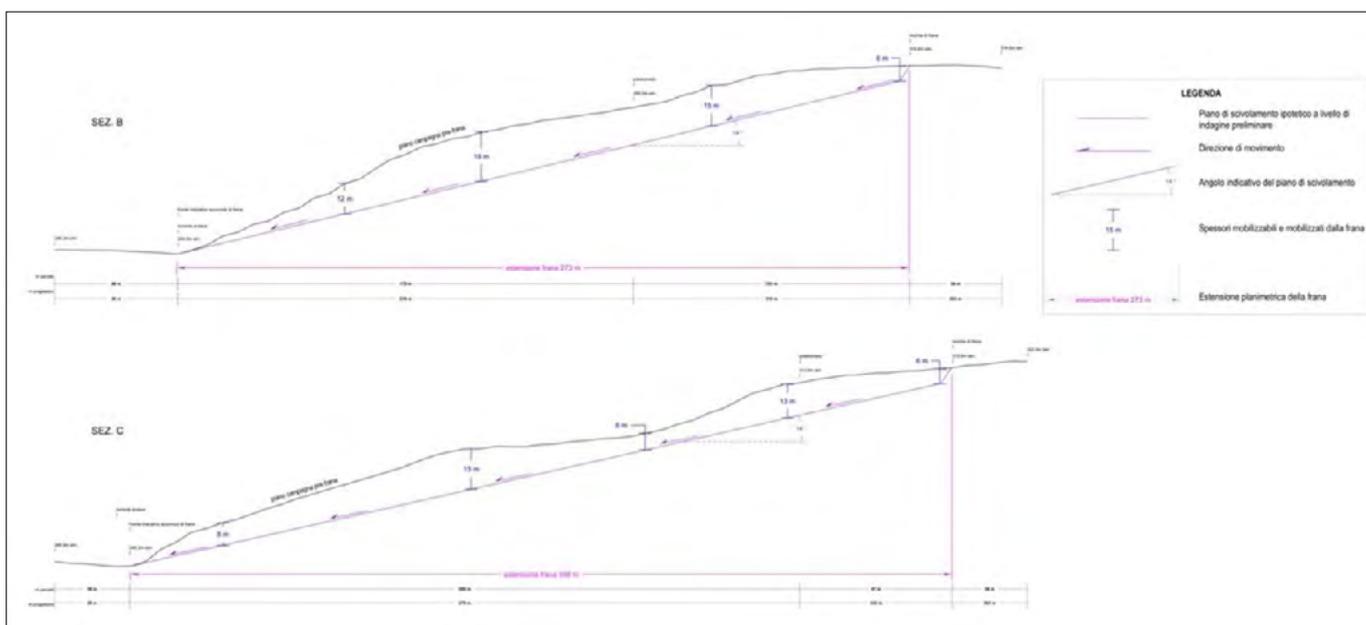


FIGURA 8. Ricostruzione delle geometrie e spessori coltri ante frana con spessori massimi stimati di 19 metri.

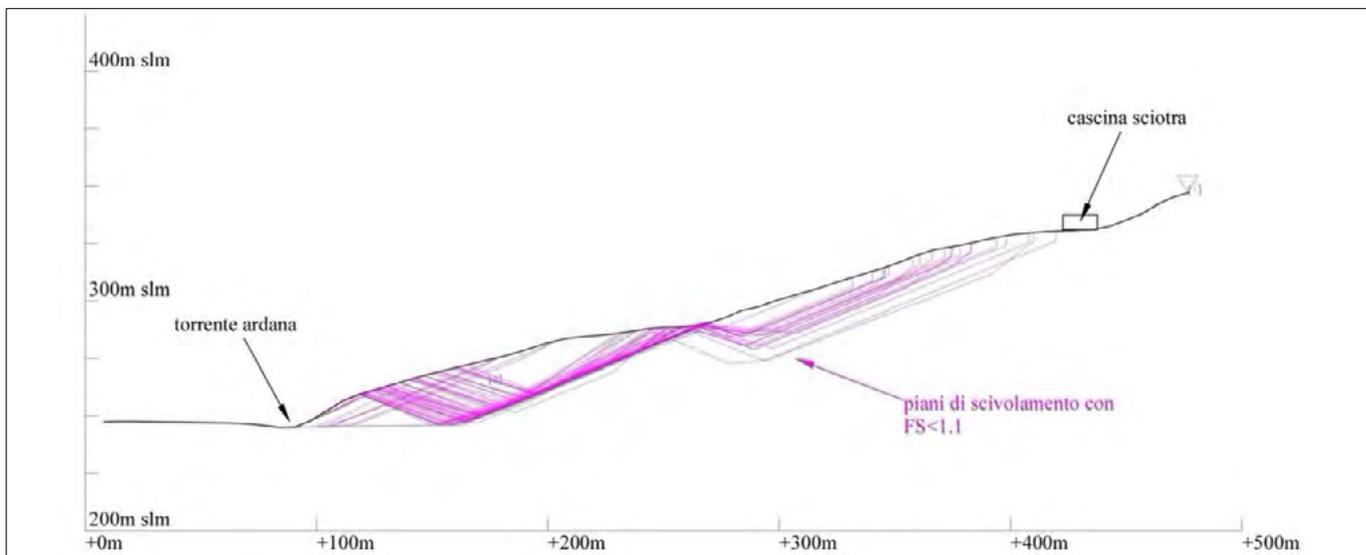


FIGURA 9. Analisi di stabilità del versante (back analysis). Metodo SSAP Slope Stability Analysis Program vers. 5/2020 del prof. Lorenzo Borselli.

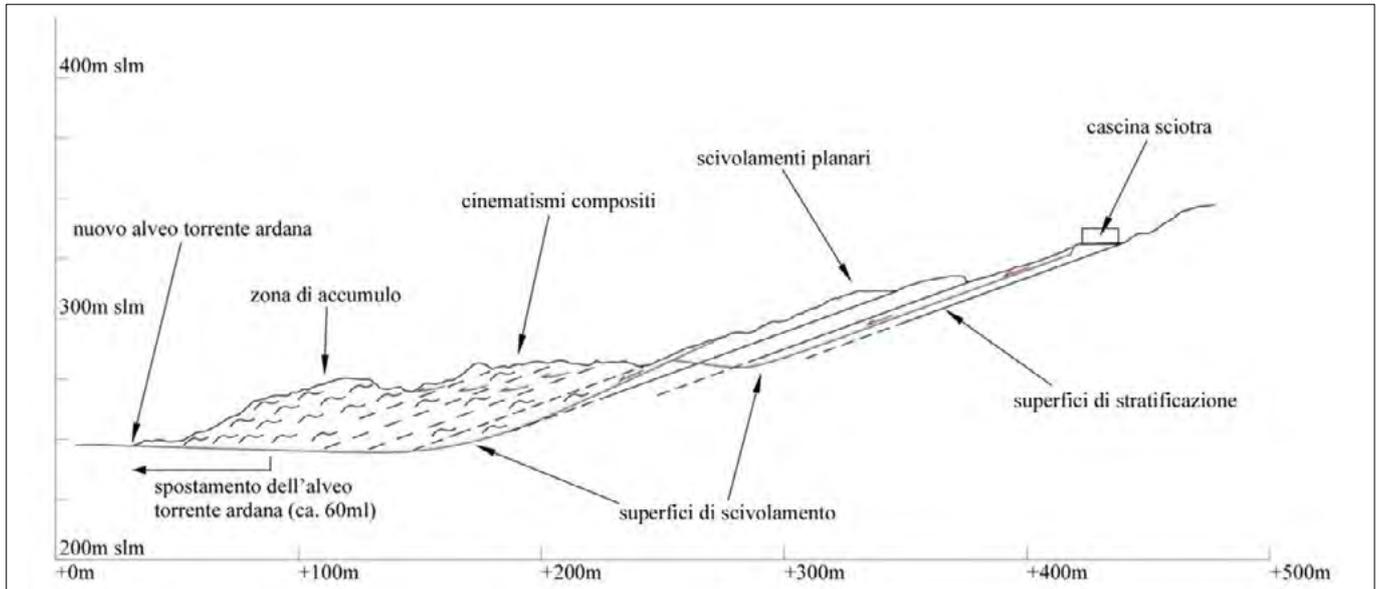


FIGURA 10. Sezione schematica degli effetti postcinematismo lungo la sezione principale di movimento.

La frana è classificabile con uno scivolamento planare evolutosi nel settore inferiore in un movimento composto rototraslativo con locale retroscorrimento, per via degli effetti di contrasto in avanzamento della parte basale.

Il dissesto è stato sottoposto a valutazioni di stabilità sia in condizioni ante scivolamento (simulando le condizioni potenzialmente presenti in precedenza all'evento), sia simulando le condizioni di stabilità residuali, con l'ausilio del Metodo SSAP (Borselli, 2020).

Attualmente, la porzione frontale dell'accumulo denuncia potenziali condizioni di instabilità geostatica con fattori di sicurezza inferiori a 1.

3.2 Analisi del dissesto su foto aerea

Le opere preliminari di studio del fenomeno hanno permesso di definire cartograficamente quale sia la situazione planoaltimetrica del dissesto, con superficie misurata pari a circa 10,5 ha. Il volo con drone eseguito con professionalità da Studio Verrua Drone Service Asti ha permesso di individuare in maniera precisa, il dissesto gravitativo quale scivolamento planare, facendo risaltare le caratteristiche geomorfologiche di dettaglio. Sfruttando i dati messi a disposizione dalla Regione Piemonte (Geoportale del Piemonte e Geoportale Arpa) è stato possibile procedere alla sovrapposizione catastale tra l'area in dissesto, foto aerea e rilievo preliminare con drone (Figg.11, 12, 13).



FIGURA 11. Vista da drone. Si noti il settore a meridione del perimetro rosso, interpretabile come area di pregressa frana rimodellata, attualmente quiescente.

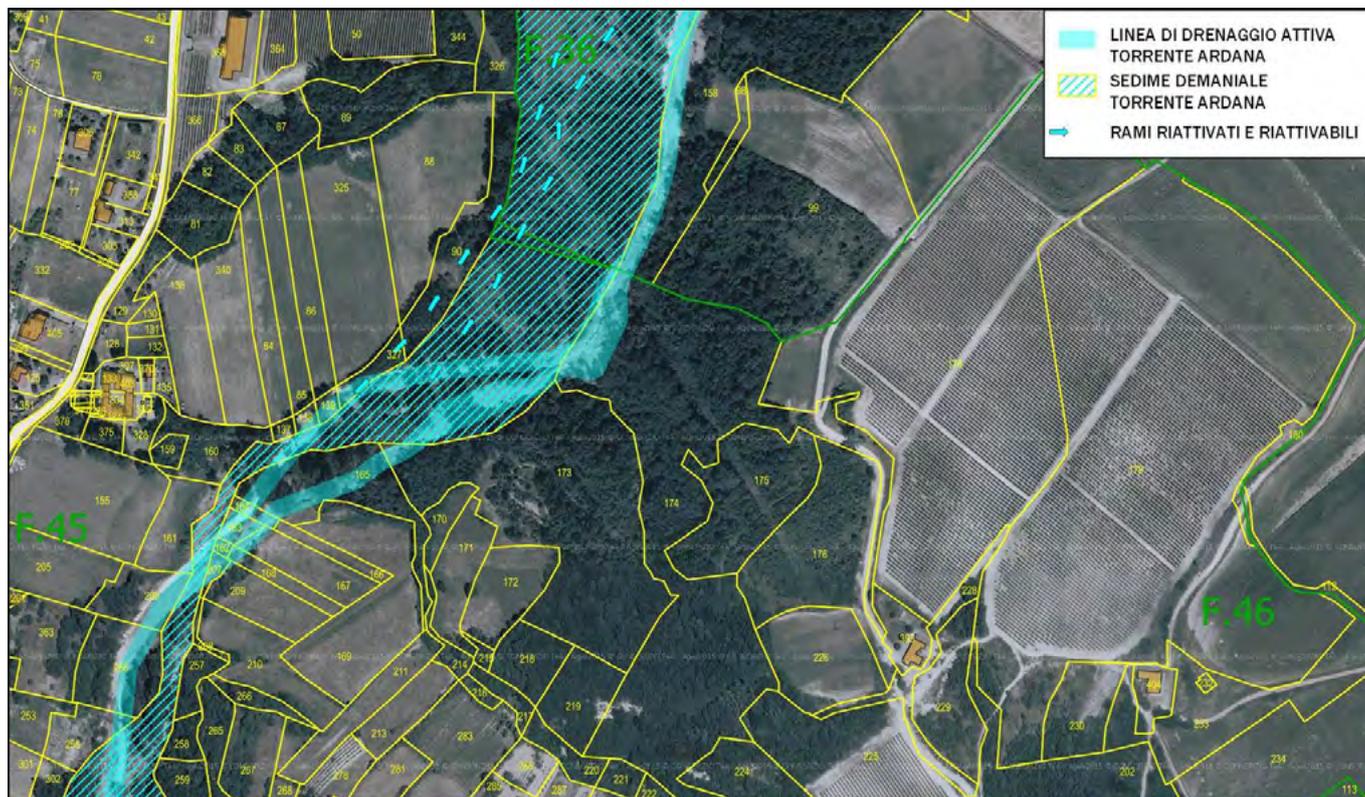


FIGURA 12. Sovrapposizione mappa catastale con foto aerea Agea 2015, con evidenza di erosione al piede del versante.

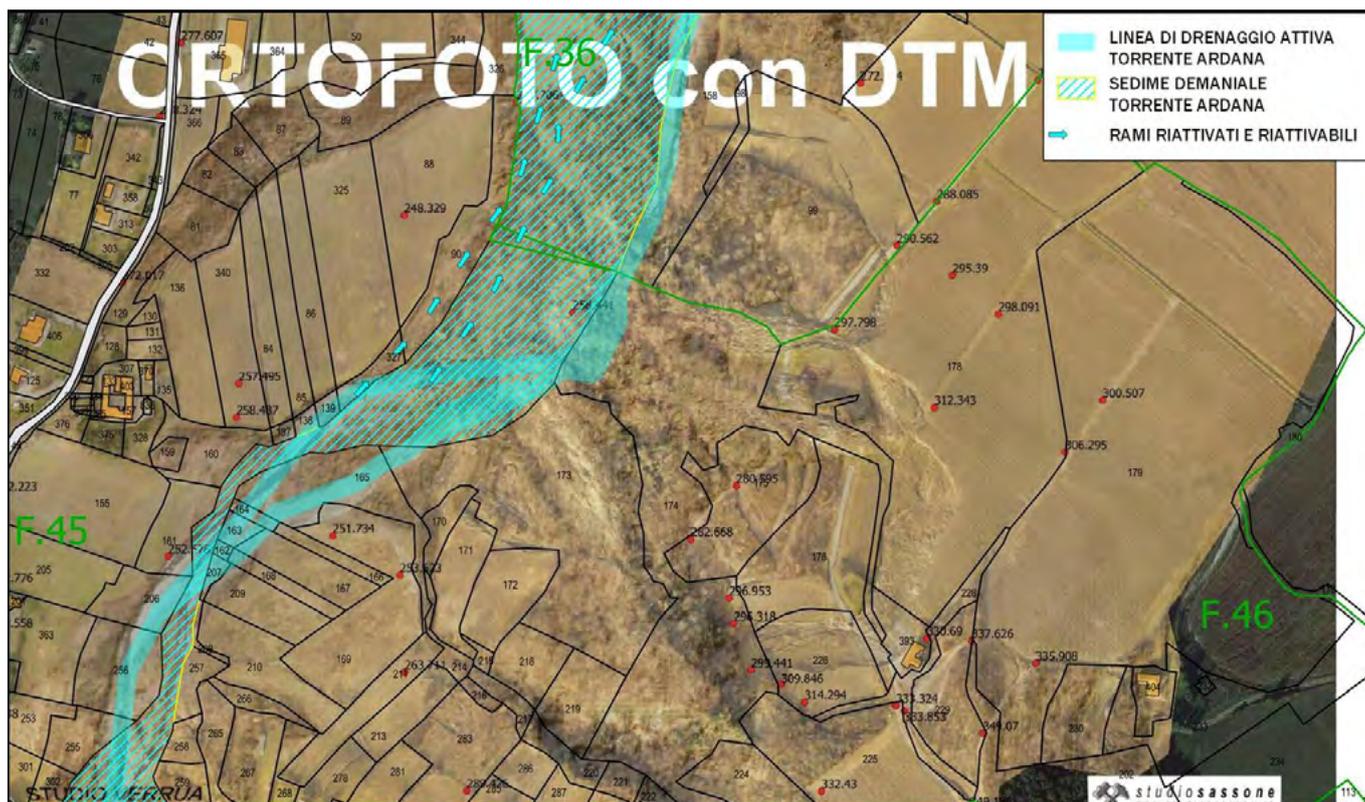


FIGURA 13. Sovrapposizione mappa catastale con foto aerea preliminare drone 2020.

3.3 Definizione dei fattori predisponenti e delle cause scatenanti

In via preliminare si ritiene che siano individuabili i seguenti fattori:

Fattori Predisponenti

- presenza di materiali dalle caratteristiche geotecniche da scarse a mediocri (Accumuli di frana di epoca stori-

ca, Coperture detritiche ed eluvio colluviali prevalentemente limoso argillose alla base dei versanti e lungo i fondovalle secondari” e “Depositi alluvionali antichi prevalentemente ghiaioso sabbiosi argillosi fortemente alterati con prodotti di alterazione giallastri e rossastri, presenza di paleosuoli rosso arancio e bruno rossastri”), in parte già coinvolti da fenomeni franosi (Fq5/155 e Fq5/156);

- giacitura a franapoggio del substrato terziario (Formazione di Costa Aresa) sui quali poggiano le suddette coperture, inclinazione media del piano di scivolamento circa 12/14° con orientamento a NO (circa 320/330°); non si escludono preesistenti venute sorgentizie lungo gli impluvi pregressi o interstrati ospitanti falde.
- azione di battuta di sponda ed erosione al piede del versante operata dal Torrente Ardana come peraltro evidenziato dall'analisi aerofotogrammetrica storica e cartografica riportata nel capitolo precedente.

Cause scatenanti

- eventi meteorologici intensi dell'ottobre e novembre 2019 (poco meno di 500mm di pioggia in 24h), con cumulate su base mensile che si attestano attorno a 1400 mm
- contemporanea, ed inevitabile, piena del Torrente Ardana che opera un'accentuata azione al piede in fase di piena.

Gli aspetti legati all'eccezionalità dell'evento meteoropluiometrico mettono in evidenza come, a fronte di precipitazioni sinora contenute al di sotto di 300 mm in 24 ore, la situazione geomorfologica locale fosse occasionalmente sollecitata ma con limitati eventi gravitativi areali, limitati a una diffusa prevalenza di colamenti e soil slip, che hanno pervaso da sempre i versanti più acclivi (ad. Esempio il versante sud del Forte di Gavi che ha periodicamente visto

fenomeni di colata rapida, molto pericolosi per l'abitato sottostante).

Nel settore di Gavi le grandi frane non sono state osservate su areali così estesi e soprattutto verosimilmente, erano proprio gli accumuni al piede del versante, riconosciuti solo dopo l'evento, a costituire gli esempi più estesi di depositi gravitativi.

Il reiterarsi in futuro di eventi meteoropluiometrici intensi e prolungati, superiori a 400 mm/giorno come nel ottobre 2014, nel Novembre 2016 e soprattutto negli eventi di ottobre e novembre 2019 può aprire una importante nuova fase di attività geomorfologica su tutto il settore appenninico della Valle Lemme e settori limitrofi del basso alessandrino, particolarmente esposti all'azione delle perturbazioni mediterranee autorigeneranti che trovano i loro massimi nell'autunno, generandosi sul Golfo di Genova, ove da alcuni anni il mare presenta valori di temperatura e evapotraspirazione ben superiori alle medie e predispone ad abbondanti rovesci sull'arco appenninico ligure (Fig. 14).

L'effetto al suolo è funzione dei punti di maggiore precipitazione che si possono localizzare a sud o a nord dello spartiacque influenzando rapidamente, come nel caso dell'ultimo evento recentissimo del 29/ agosto 2020 che ha visto la registrazione di ben 250 mm in meno di un'ora alla stazione di Franconalto, a fronte di circa 6 mm caduti alla stazione di Gavi, con effetti di piena istantanea del T. Lemme.

4. INTERVENTI DI SOMMA URGENZA

Innanzitutto è bene evidenziare che data l'estensione e le dimensioni del fenomeno franoso gli interventi prevedibili e programmabili non possono essere attuati con normali mezzi e metodi a carico di privati; si sottolinea inoltre che l'estensione ed il volume, oltre che la tipologia di dissesto con scivolamento planare non possono essere minimizzate solo con interventi superficiali di regimazione, ma richiedono un'articolata e complessa serie di azioni congiunte sia per gli aspetti di indagine geognostica, di monitoraggio che di stabilizzazione; soprattutto richiedono un'urgente valutazione e miglioramento delle condizioni al piede, ove il Torrente Ardana sta operando con la formazione di aree di ristagno.

È possibile definire quali possano essere le primarie attività di indagine e studio da eseguirsi (ancorchè già eseguite, programmate e attuate per parte privata), quali i primi interventi da eseguirsi in somma urgenza e tentare, con il supporto di un accurato studio geologico e geomorfologico, di attuare gli interventi di minimizzazione del rischio.

Primarie attività di indagine e studio già effettuati

- Sopralluogo conoscitivo sull'area
- Raccolta dati bibliografici
- Rilievo topografico di dettaglio georeferenziato mediante drone con restituzione DSM
- Rilievo di terreno geologico e geomorfologico di dettaglio
- Indagini geognostiche strumentali con eventuale installazione di sistema di monitoraggio

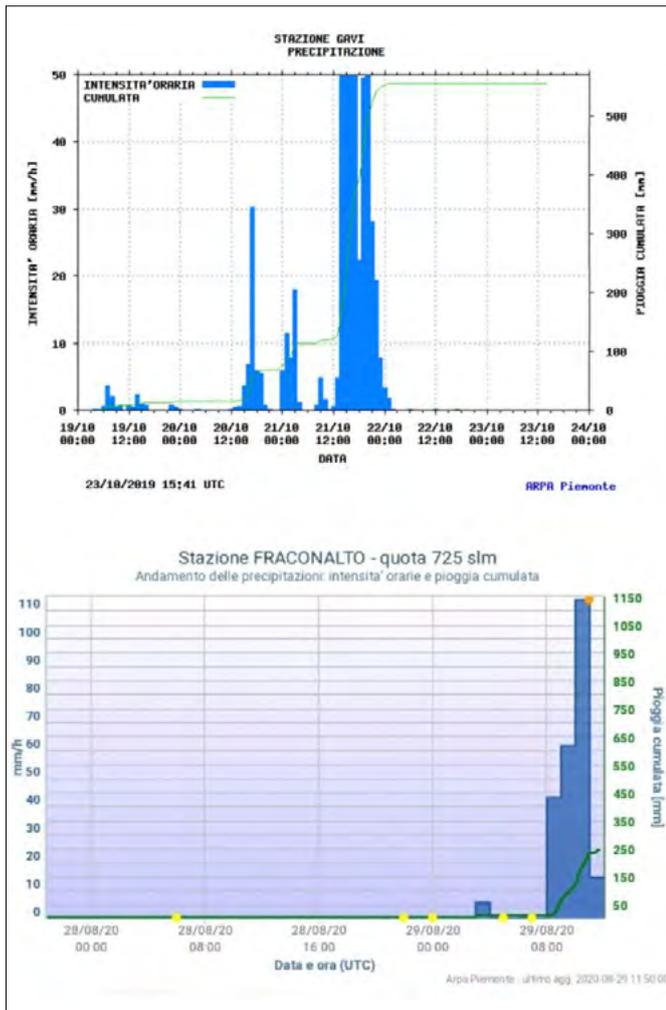


FIGURA 14. a) Dati pluviometrici del 21/10/2019 a Gavi e b) del 28/8/2020 a Franconalto - Fonte Arpa Piemonte.

Primi interventi in somma urgenza:

- *posizionamento sistema di osservazione e monitoraggio speditivi (picchettazioni) e delimitazione viabilità di accesso*
- Ripristino/realizzazione ex novo di viabilità alternativa verso Cascina Sciotra
- E' stato progettato ed eseguito di un sistema di contenimento strutturale (muro/cordolo su micropali tirantato) di consolidamento di Cascina Sciotra; sono state effettuate indagini geognostiche apposite a tale fine.
- protezione della nicchia di frana in corrispondenza di Cascina Sciotra (eseguite regimazione e manutenzione dei fossi esistenti)
- realizzazione di un provvisorio sistema di drenaggio delle acque meteoriche superficiali al fine di allontanarle dalla zona di nicchia

Tali opere sono state eseguite dai soggetti privati.

Ulteriori interventi urgenti necessari, di carattere pubblico, per minimizzazione del rischio geomorfologico e geoidrologico:

- Revisione dell'andamento dell'alveo attivo del Torrente Ardana al fine di allontanarne il corso dal piede corpo di frana; a tal fine si suggerisce in via d'urgenza di eseguire savanelle che orientino il deflusso verso i rami secondari posti a ovest dell'alveo, allontanando il deflusso attuale dal piede frana (per tale aspetto sono in fase di attuazione appositi interventi con finanziamento pubblico); contestualmente e' utile eseguire dei tagli della vegetazione ribaltata e schiantata per evitare future fluitazioni di tronchi. Particolare importanza ha l'operazione di rimozione del materiale schiantato presente sul fronte della frana e che interessa il Torrente Ardana, al fine di evitare la persistente erosione al piede ed imbibizione del corpo di frana da parte del corso d'acqua. L'alveo demaniale, come riportato nella allegate planimetrie catastali, comporta il rispetto del RD523/1904 e il Dlgs 42/2004 che vincolano l'area sotto il profilo idraulico e paesaggistico. Non risultano eseguibili movimenti terra con mezzi di scavo per la formazione di piste e savanelle; tali opere urgenti, programmate ed autorizzate dagli Enti competenti, risultano indispensabili per la tutela della sottostante Città di Gavi.
- a) Sistemazioni morfologiche e forestali preliminari della nicchia di distacco e a carico dei settori in frana immediatamente sottostanti al fine di agevolare il drenaggio superficiale delle acque di pioggia (tali interventi devono essere eseguiti conoscendo le direttrici di drenaggio ripristinabili in sicurezza al fine di evitare di indirizzare ulteriori acque meteoriche al fronte frana, si ritiene che prima occorra intervenire sul punto e) precedente)
 - b) Realizzazione di una efficace rete di drenaggio superficiale *complessiva* sul corpo di frana e aree contermini eventualmente coinvolgibili da una futura evoluzione del dissesto, preferendo soluzioni che evitino l'infiltrazione profonda delle meteoriche regimate e favoriscano il loro scorrimento secondo direttrici predefinite lungo gli impluvi morfologici formati nel postfrana.
 - c) Realizzazione di drenaggi profondi al fine di drenare il corpo di frana

- d) Esecuzione di inerbimenti e piantumazioni di settori della nicchia potenzialmente soggetti ad erosione per limitare il trasporto solido e l'asportazione di suolo durante i futuri eventi meteorici, limitando il piu' possibile la possibilità di colate

Occorre evidenziare che studi/interventi inerenti la regimazione del Torrente Ardana ai fini di evitare l'erosione al piede e consentire sui terreni demaniali l'accessibilità in sicurezza per l'esbosco, dovrebbero essere presi urgentemente in carico dall'Autorità competente con procedura d'urgenza, trattandosi di situazione di dissesto di eccezionali dimensioni e portata che è stata oggetto di dichiarazione di Stato di calamità naturale.

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La presente nota tecnica ha lo scopo di mettere in evidenza come, nel corso di oltre un decennio di studi ed osservazioni personalmente condotte sul territorio del Comune di Gavi e del bacino del T. Lemme si siano venute ad attuare progressive variazioni in aumento del regime pluviometrico, con successivi ripetuti record di eventi che hanno raggiunto piu' volte valori progressivamente in aumento con anche 500mm/giorno e circa 1500 mm/mese nel corso dell'autunno 2019.

La situazione oridrografica del territorio, lo vede sottoposto a fenomeni meteorologici influenzati dal crescente apporto di precipitazioni per perturbazioni a circolazione retrograda che si originano dal Golfo di Genova, in condizioni di temperature anomale del mare. I fenomeni meteorici autorigeneranti prolungati che riescono a superare il crinale appenninico, andando ad impegnare pesantemente le testate dei bacini del T. Erro, Lemme, le due Bormide, il T. Stura di Ovada, sono stati in grado di generare onde di piena anomale, oltre che condizioni di sempre maggiore predisposizione al dissesto geoidrologico specie sui terreni geologicamente piu' vulnerabili, segnatamente ascrivibili al bacino terziario ligure piemontese dell'Alto Monferrato.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'Azienda Agricola La Centuriona Scarl di Gavi per la gentile concessione all'uso dei dati; Elaborazioni grafiche Dr. Geol. Roberto Gamba.

BIBLIOGRAFIA

- ARPA PIEMONTE (2019). *Eventi idrometeorologici dal 19 al 24 ottobre 2019 – Parte 1*. Dip. Rischi naturali e ambientali, Novembre 2019.
- ARPA PIEMONTE (2019). *Eventi idrometeorologici dal 19 al 24 ottobre 2019 – Parte 2*. Dip. Rischi naturali e ambientali, Novembre 2019.
- ARPA PIEMONTE (2019). *Eventi idrometeorologici dal 22 al 25 novembre 2019*. Dip. Rischi naturali e ambientali, Novembre 2019.
- LORENZO BORSELLI (2020). Metodo SSAP - Slope Stability Analysis Program vers. 5/2020.
- PIANO REGOLATORE GENERALE DEL COMUNE DI GAVI (2010). *Elaborati geologici geomorfologici e sismici*, a cura dr. geol. Paolo Sassone, ined.

Gli invasi di Rocchetta Tanaro e Castell'Alfero (AT) per la mitigazione del rischio geoidrologico

The reservoirs of Rocchetta Tanaro and Castell'Alfero (AT) for geohydrological risk mitigation

MAURIZIO TOJA, LUCA DI MARTINO, LUCA ALCIATI, GIUSEPPE RICCA

Settore Tecnico Regionale Alessandria e Asti

E-mail: luca.dimartino@regione.piemonte.it

Parole chiave: piccoli invasi, rischio geoidrologico, Provincia di Asti

Key words: small reservoirs, geo-hydrological risk, Province of Asti

PREMESSA

Il territorio della Provincia di Asti, per la sua morfologia, risulta interessato molto frequentemente da fenomeni di allagamento che coinvolgono le aree di fondovalle degli impluvi collinari con conseguente coinvolgimento di infrastrutture viarie, aree urbanizzate ed insediamenti commerciali ed industriali. Il presente studio, proseguendo nella falsa riga di uno precedente degli stessi autori, (Toja et al. 2012) riguardante piccoli invasi realizzati o in progetto nei comuni di Nizza Monferrato, Castelnuovo Don Bosco ed Agliano Terme, analizza alcune soluzioni tecniche, adottate nei comuni di Rocchetta Tanaro e Castell'Alfero (Fig. 1), finalizzate alla riduzione dei fenomeni di trasporto solido e del valore al colmo delle portate originate da eventi piovosi di forte intensità e breve durata (tipici, del resto, dei cambiamenti climatici in atto), con l'obiettivo di migliorare l'efficienza idraulica della rete idrografica secondaria superficiale, portando così ad una riduzione dell'impatto sul territorio dei fenomeni di esondazione, direttamente conseguenti agli eventi meteorici sopraccitati. E' infatti in continua fase di sperimentazione e realizzazione l'utilizzo di invasi e vasche di laminazione/sedimentazione da inserire nella rete delle canalizzazioni esistenti, questo allo scopo di ottenere un temporaneo immagazzinamento delle acque con conseguente riduzione della portata al colmo ed allungamento dei tempi di formazione dell'idrogramma

di piena (Anselmo, 1998). Questa tipologia di interventi ha inoltre la funzione (in seguito all'accumulo idrico negli invasi) di aumentare, a scala prettamente locale, il tempo di corrivazione (in determinate sezioni di chiusura individuate nel corso dei vari studi) con il risultato di mitigare il rischio idraulico a valle delle predette sezioni; ciò comporterà un sicuro beneficio al reticolo idrografico recettore per la riduzione dei volumi idrici in arrivo con conseguente miglioramento sia per quanto concerne i dissesti lungo le infrastrutture ed i manufatti antropici, sia per quanto riguarda la pianificazione urbanistica territoriale a media e piccola scala. Vengono, in questo contributo, proposte due applicazioni riferite a contesti territoriali di differente dislocazione e geomorfologia, ma con simili caratteristiche idrologiche dei bacini e della tipologia del reticolo idrografico; le casistiche riportate sono riconducibili a criticità ricorrenti per le quali sono state previste soluzioni progettuali tipologicamente confrontabili, ma con specifiche differenze in funzione del contesto geologico e geomorfologico locale.

PRIMO CASO: REALIZZAZIONE DI UN MANUFATTO DI LAMINAZIONE DELLE PIENE NEL COMUNE DI CASTELL'ALFERO

1. Inquadramento territoriale – Caratteristiche morfometriche del bacino

L'area in oggetto è posizionata a monte della zona produttiva e residenziale di Loc. Stazione di Castell'Alfero (Fig. 2); dal punto di vista geomorfologico ci troviamo in un territorio prevalentemente pianeggiante, ai piedi dei rilievi collinari; la vallata del Rio della Valle, a partire dalla zona individuata per la realizzazione del manufatto fino alla confluenza nel Torrente Versa, si apre e presenta aree di fondovalle di dimensioni apprezzabili, mentre nei tratti a monte è relativamente incassata; inoltre a valle della vasca di espansione, quindi nella zona urbanizzata, si collocano numerosi ponti che ostacolano il deflusso della piena causa il loro dimensionamento presumibilmente inadeguato. Il manufatto più critico di questi, dal punto di vista idraulico, è quello ferroviario (linea Asti-Mortara). Questa situazio-

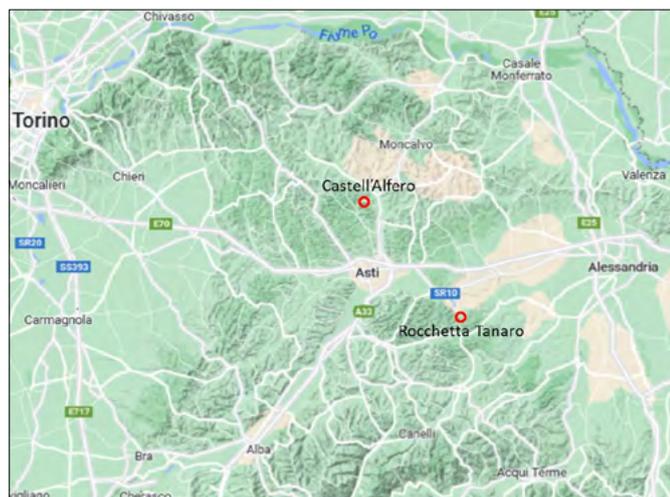


FIGURA 1. Inquadramento geografico.

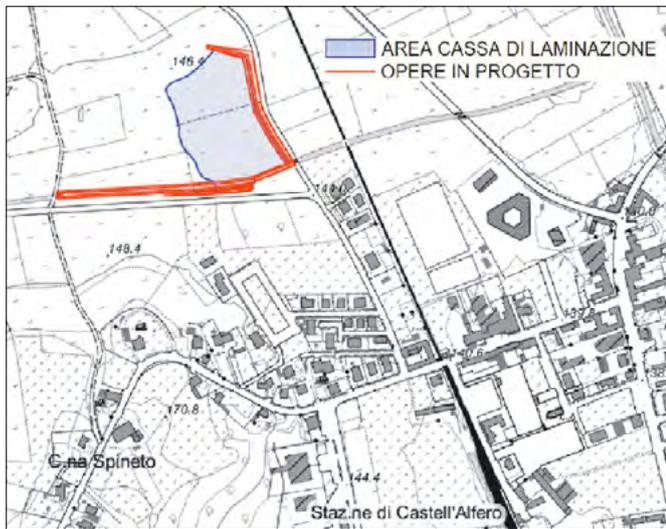


FIGURA 2. Ubicazione del bacino “Rio della Valle” nel territorio di Castell'Alfero.

ne determina condizioni di rischio di esondazione a carico delle residenze e delle attività presenti in Loc. Stazione. I dati fisiografici del bacino del “Rio della Valle” sono riassunti in Tabella 1.

Tabella 1. Dati fisiografici del bacino “Rio della Valle”.

Superficie del bacino (km ²)	3,41
Lunghezza asta principale	3,45
Altezza massima (m s.l.m.)	270
Altezza minima (m s.l.m.)	145
Altezza media (m s.l.m.)	194
Pendenza dei versanti	15-20%

2. Criticità e soluzione progettuale

Uno studio idrologico-idraulico (Sordo e Sperandio, 2018) ha messo in evidenza, in località Stazione di Castell'Alfero, l'insufficienza della sezione di deflusso del corso d'acqua suddetto (Fig. 3), in particolar modo sotto i manufatti di attraversamento; tale situazione potrebbe determinare l'esondazione del Rio della Valle già per portate con tempi di ritorno relativamente modesti. L'obiettivo principale dell'intervento è quindi quello di contenere le piene di assegnato tempo di ritorno all'interno dell'alveo naturale nelle zone urbanizzate di Loc. Stazione.

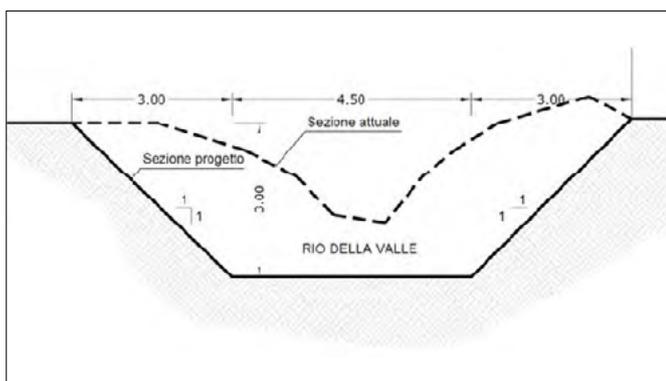


FIGURA 3. Sezione di progetto del Rio della Valle da realizzarsi a seguito dell'intervento di calibratura.

La cassa di espansione già realizzata (Fig. 4) ha un volume utile pari a circa 14500 mc e consente la riduzione della portata con tempo di ritorno 200 anni da 17,90 a 12,20 mc/sec. Il volume stimato, disponibile per la laminazione, è pari a 8000 mc (quota di regolazione pari a 144,50 m s.l.m.).



FIGURA 4. Vista dello sbarramento da stradina interpodereale adiacente.

Gli elementi principali sono i seguenti:

- Bocca tarata in cemento armato con luce sottobattente che lascia defluire la portata massima di 12,20 mc/sec; tale bocca tarata ha una larghezza di 3,75 m ed un'altezza di 0,95 m (Fig. 5); tale luce limita la portata defluente verso valle, con conseguente effetto di rigurgito verso monte, che consente il riempimento della cassa di espansione in progetto (per portate di piena con tempo di ritorno pari o superiore a 20 anni);

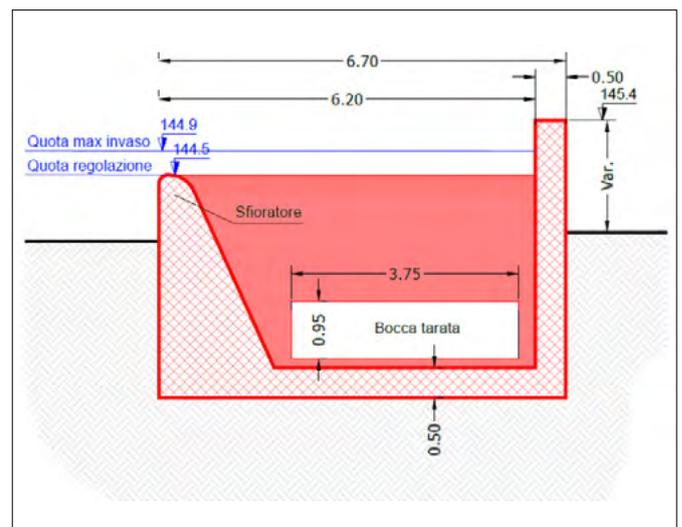


FIGURA 5. Sezione di progetto della bocca tarata che ha la funzione di luce sottobattente.

- Scolmatore laterale di sicurezza in cemento armato sagomato con un profilo del tipo Creager-Scimemi, ad asse rettilineo ed avente una lunghezza pari a 40,00 m; tale scarico di superficie della cassa di laminazione è costituito da uno sfioratore laterale a stramazzo, dimensionato

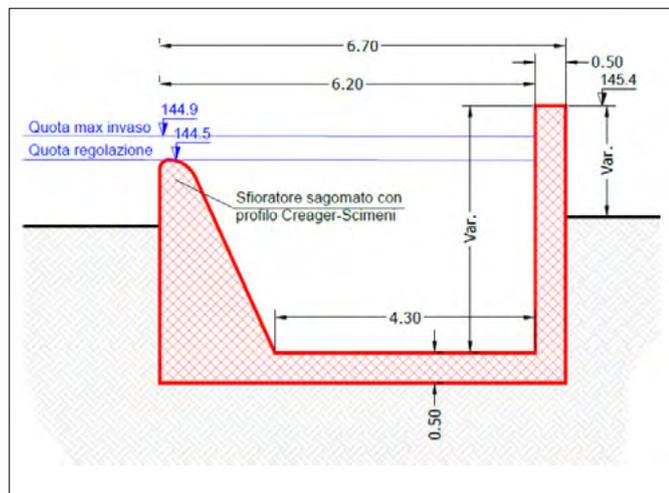


FIGURA 6. Sezione di progetto dello sfioratore laterale sagomato secondo un profilo di tipo Creager-Scimeni.

in modo da essere in grado di far defluire la portata con tempo di ritorno di 500 anni (pari a 20,10 mc/sec) con un carico idraulico pari a circa 0,40 m (Fig. 6);

- Canale di raccolta dello scolmatore a sezione aperta, realizzato in c.a. ed avente una lunghezza pari a 60,00 m;
- Muro di contenimento realizzato in cemento armato della tipologia a mensola, avente una lunghezza pari a circa 10,00 m;
- Argine di valle in terra avente una lunghezza pari a circa 217,00 m con quota di sommità avente 0,50 m di franco rispetto alla quota di sfioro con portata cinquecentennale (Fig. 7);

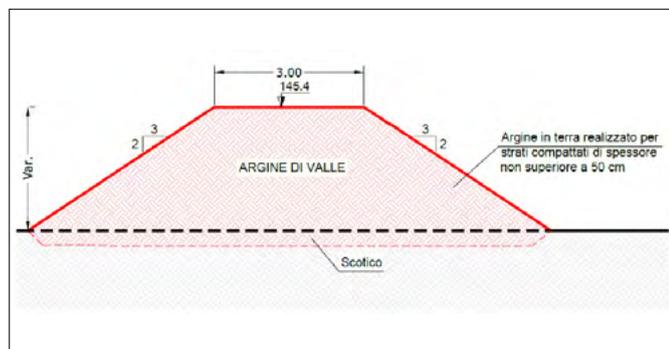


FIGURA 7. Sezione tipo argine di valle.

- Argine laterale in terra avente una lunghezza pari a circa 121,00 m con quota di sommità avente 0,50 m di franco rispetto alla quota di sfioro con portata cinquecentennale (Fig. 8).

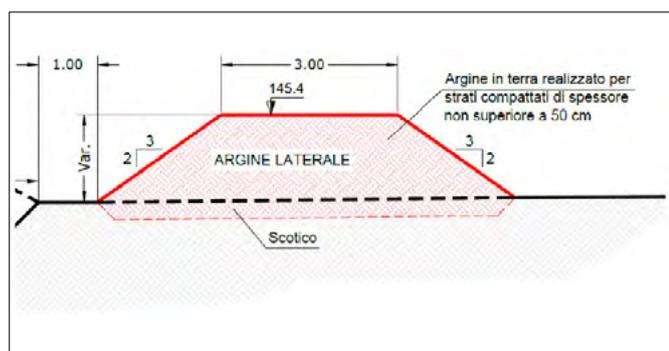


FIGURA 8. Sezione tipo argine laterale.

SECONDO CASO: REALIZZAZIONE DI TRE BACINI DI LAMINAZIONE IN SERIE NEL COMUNE DI ROCCHETTA TANARO.

3. Inquadramento territoriale – Caratteristiche morfometriche del bacino

Il Bacino imbrifero del Rio Vallescura si colloca nel versante destro del fiume Tanaro, e comprende l'area collinare a Sud-Ovest del comune di Rocchetta Tanaro.

La copertura superficiale nella porzione di monte del bacino è prevalentemente arborea, mentre procedendo verso valle le aree a bosco si alternano ad aree prevalentemente coltivate.

Un tratto del rio suddetto risulta intubato in corrispondenza della zona urbanizzata: ove possibile, è consigliabile riportare alla luce gli intubamenti esistenti (così come previsto dal Decreto Legislativo, n° 152/2006, *Norme in materia ambientale* e dalla Circolare Presidente Giunta Regione Piemonte dell'8 maggio 1996, n° 7/LAP, Legge Regionale 5 dicembre 1977, n° 56, e successive modifiche e integrazioni, *Specifiche tecniche per l'elaborazione degli studi geologici a supporto degli strumenti urbanistici*), nel caso del Rio Vallescura il grado di antropizzazione raggiunto e le notevoli difficoltà operative non consentono quella che sarebbe la soluzione ottimale, per cui si è dovuto valutare un procedimento alternativo di mitigazione del rischio idrogeologico.

Si è pertanto individuato un primo intervento, costituito dalla realizzazione di un sistema di laminazione formato da tre piccoli bacini distinti sul Rio Vallescura, ubicati immediatamente a monte dell'abitato (Fig. 9).

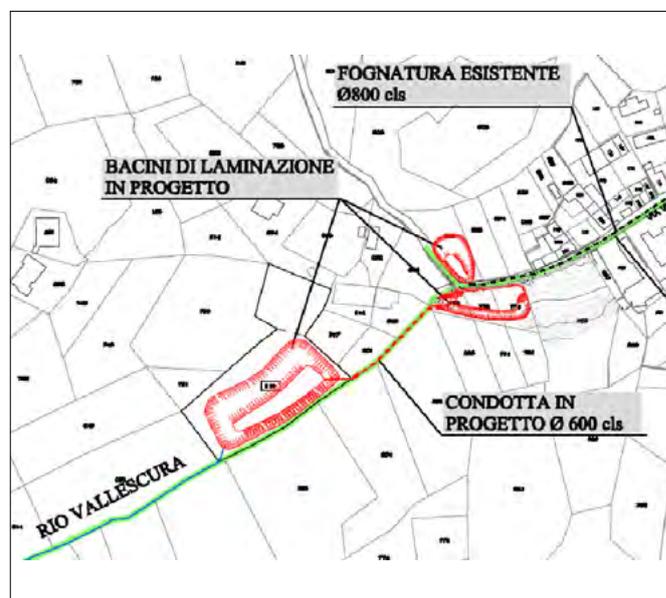


FIGURA 9. Ubicazione del bacino "Rio Vallescura" nel territorio di Rocchetta Tanaro.

4. Criticità e soluzione progettuale

Come detto il sistema di laminazione è formato da tre bacini distinti (denominati di seguito bacino 1, bacino 2, bacino 3) sul Rio Vallescura (progetto ing. Buzio, 2012); i dati fisiografici del bacino del Rio Vallescura sono riportati nella Tabella 2.

Tabella 2. Dati fisiografici del bacino “Rio Vallescura”.

Superficie del bacino (km ²)	0,445
Lunghezza asta principale	1,042
Altezza massima (m s.l.m.)	228
Altezza minima (m s.l.m.)	114
Altezza media (m s.l.m.)	150
Pendenza dei versanti	20%

Le opere realizzate si possono così dettagliare:

Bacino 1

Il bacino più a monte è preposto alla funzione di cassa di espansione del Rio Vallescura (Fig. 10). La lunghezza media è di circa 66,00 m, che si riduce a circa 50,00 m sul fondo del bacino (quota 113,90 m s.l.m.), mentre la larghezza media è di circa 28,00 m, che si riduce a 9,00 m sul fondo. Per ciò che concerne il tratto del rio che lambisce tale bacino è stata realizzata un displuvio avente inclinazione del 4,00% per consentire la raccolta delle acque all'interno dell'invaso; tale displuvio è costituito da una massicciata di lunghezza di circa 70,00 m, di larghezza pari a 3,50 m e di spessore pari a 20 cm; la massicciata è stata estesa fino all'incrocio con Via Vittorio Veneto, per una ulteriore lunghezza di circa 75,00 m, larghezza di 3,00 m e di spessore sempre pari a 20 cm.

La massicciata è costituita da misto granulare anidro per fondazioni stradali composto di sabbia grossolana e ciottoli di dimensioni non superiori ai 12 cm, scevro di materiali terrosi ed organici e con minime quantità di materiali limosi o argillosi. Per la sponda di raccordo del fondo lago con il Rio Vallescura è presente un rivestimento protettivo in materassi metallici tipo Reno riempiti con pietrame o ciottoli duri di dimensione idonea e uniforme; la lunghezza media della sponda è di 50,00 m, mentre la larghezza media è di 9,00 m. Tutte le sponde del bacino, comprese quelle rivestite, hanno un'inclinazione non superiore a 34°. All'estremo di valle del bacino è stata realizzata una briglia selettiva con la funzione di trattenimento dei solidi galleggianti e della vegetazione flottante; tale briglia è



FIGURA 10. Vista bacino 1 sul Rio Vallescura.

costituita da una serie di tubi di acciaio (diametro pari a 168 mm e spessore 8 mm) disposti con interasse pari a 30 cm. Immediatamente a valle della briglia è stato realizzato il rivestimento del fondo mediante materassi tipo Reno, opportunamente risvoltati sulla sponda per almeno 1,00 m per una superficie complessiva di almeno 20 mq. Sempre a valle della briglia si trova l'imbocco di una tubazione in cemento armato lunga 15,00 m e di diametro 400 mm che consente lo scarico dell'invaso nella condotta in cemento armato lunga 66,00 m e di diametro 600 mm. Mediante la suddetta condotta le acque meteoriche scaricate dal bacino 1 sono convogliate al bacino 2.

Per la realizzazione del bacino 1 è stato previsto uno scavo di sbancamento complessivo di circa 6345 mc. Il fondo del lago è stato previsto ad una quota altimetrica pari a 113,90 m s.l.m. e la capacità di invaso del bacino 1 è pari a circa 1800 mc.

Bacino 2

Anche tale bacino è preposto alla funzione di cassa di espansione del Rio Vallescura (Fig. 11). La lunghezza media è di circa 40,00 m, che si riduce a circa 28,00 m sul fondo del bacino (quota 112,65 m s.l.m.), mentre la larghezza media è di circa 16 m, che si riduce a 10,00 m sul fondo.



FIGURA 11. Vista bacino 2 sul Rio Vallescura.

Il tratto del rio che lambisce il bacino 2 è già intubato; per consentire la raccolta delle acque superficiali all'interno dell'invaso in progetto è stata prevista la realizzazione di un displuvio di lunghezza pari a circa 40,00 m e di larghezza pari a circa 3,00 m, avente inclinazione del 2% per consentire la raccolta delle acque all'interno dell'invaso in progetto; per la realizzazione del displuvio è stata demolita la pavimentazione in asfalto esistente, per una lunghezza di circa 40,00 m e per una larghezza di circa 3,00 m. La sponda dell'invaso è costituita da gabbioni metallici a doppia zincatura e a doppia torsione dimensionati 100 x 200 x h100 cm con maglia 10 x 8 cm riempiti con pietrame o ciottoli duri di dimensione idonea ed uniforme, da due a quattro volte superiore alle maglie della rete. Tutte le sponde del bacino, comprese quelle rivestite in materassi tipo Reno,

con la sola esclusione delle sponde protette da gabbionate, hanno una inclinazione non superiore a 34°. All'estremo di valle del bacino è stata realizzata una briglia selettiva con la funzione di trattenimento dei solidi galleggianti e della vegetazione flottante; tale briglia sarà costituita da una serie di tubi di acciaio (diametro pari a 114 mm, spessore 8 mm) disposti con interasse pari a 30 cm. Sia a monte che a valle della briglia è stato previsto il rivestimento del fondo lago mediante materassi tipo Reno, per una superficie complessiva di almeno 45,00 mq. Per la realizzazione del bacino 2 è stato previsto uno scavo di sbancamento complessivo di circa 1183 mc. Il fondo del lago è sito ad una quota altimetrica pari a 112,65 m s.l.m., e la capacità di invaso del bacino 2 è pari a circa 905 mc.

Bacino 3

Anche tale bacino è preposto alla funzione di cassa di espansione e di deposito del materiale solido del Rio Vallescura (Fig. 12). La lunghezza media è di circa 25,00 m, che si riduce a circa 16,00 m sul fondo del bacino (quota 113,03 m s.l.m.), mentre la larghezza media è di circa 14,00 m, che



FIGURA 12. Vista bacino 3 sul Rio Vallescura.

si riduce a 5,00 m sul fondo.

Il bacino 3 intercetterà le acque superficiali della strada vicinale San Bernardo-Anzino Morona, che rappresenta un affluente del Rio Vallescura. Per consentire la raccolta delle acque superficiali all'interno dell'invaso in progetto è stata prevista la realizzazione di un displuvio di lunghezza pari a circa 22,00 m e di larghezza pari a circa 3,00 m, avente inclinazione del 2%; tale displuvio è stato realizzato mediante una massicciata costituita da misto granulare anidro per fondazioni stradali composto digrossa sabbia e ciottoli di dimensioni non superiori ai 12 cm, assolutamente scervo di materiali terrosi ed organici e con minime quantità di materiali limosi o argillosi. Per le sponde di raccordo del fondo lago con la strada vicinale San Bernardo-Anzino Morona e con la Via Vittorio Veneto è stata realizzata una gabbionata, sulla quale poggia il cordolo avente la duplice funzione di raccordo alla quota stradale e di sostegno della barriera stradale in legno-acciaio, per una lunghezza di circa 17,00 m. La gabbionata è costituita da gabbioni metallici

a doppia zincatura ed a doppia torsione dimensionati 100 x 200 x h100, cm con maglia 10 x 8 cm riempiti con pietrame o ciottoli duri di dimensione idonea ed uniforme, da due a quattro volte superiore alle maglie della rete. Tutte le sponde del bacino, comprese quelle rivestite in materassi tipo Reno, con la sola esclusione delle sponde protette da gabbionate, hanno una inclinazione non superiore a 34°. All'estremo di valle del bacino è stata realizzata una briglia selettiva con la funzione di trattenimento dei solidi galleggianti e della vegetazione flottante; tale briglia sarà costituita da una serie di tubi di acciaio (diametro pari a 114,00 mm spessore 8 mm) disposti con interasse pari a 30 cm. Il fondo del lago è stato previsto ad una quota altimetrica pari a 113,03 m s.l.m., e lo scavo di sbancamento complessivo che è stato necessario per la realizzazione dell'invaso è pari a circa 915 mc.

CONCLUSIONI

Nel territorio astigiano prosegue la sperimentazione sulla capacità dei piccoli invasi di essere utilizzati come elementi mitigativi del potenziale dissesto idrogeologico sul territorio e le realizzazioni finora effettuate inducono a ritenere che questa strada può continuare ad essere perseguita soprattutto in un periodo di cambiamenti climatici in atto dove le precipitazioni di breve durata e forte intensità hanno ormai frequenze temporali ravvicinatissime e volumi di pioggia molto alti e concentrati. Altresì questi invasi possono essere utilizzati anche come immagazzinatori di risorsa idrica in periodi siccitosi (altro aspetto dei cambiamenti climatici) e pertanto anche su questo aspetto si focalizzeranno le prossime ricerche degli autori.

IN MEMORIA DI MAURIZIO TOJA

Mauri non c'è più, ma lo sentiamo presente ogni giorno, noi che abbiamo condiviso 20 anni di lavoro ma soprattutto di amicizia vera. Mauri era un turbine di energia positiva che trasmetteva il senso di pienezza nello stare in questo mondo. Ci manchi fratello.

BIBLIOGRAFIA

- ANSELMO V. (1998). *Dispositivi di invaso e laminazione a basso impatto ambientale*. Quaderni di idronomia montana, 17, 65-75, Editoriale Bios, Cosenza.
- BUZIO G. (2012). *Bacini di laminazione del Rio Vallescura*. Studio Tecnico Inedito
- SORDO S., SPERANDIO R. (2018). *Minimizzazione del rischio idraulico del Rio della Valle tramite realizzazione di un manufatto di laminazione delle piene*. Studio Tecnico. Inedito.
- TOJA M., DI MARTINO L., RICCA G., MASCIOTTO L., COLASUONNO A. (2012). *L'utilizzo di invasi per la mitigazione del rischio idrogeologico: applicazioni nel contesto collinare della Provincia di Asti. Atti del convegno nazionale "Dissesto Idrogeologico. Il pericolo geoidrologico e la gestione del territorio in Italia"*. Geologia dell'Ambiente. Periodico della SIGEA, Società Italiana di Geologia Ambientale, Supplemento al n. 2/2012, ISSN 1591-5352, 276-280.

Imparare a camminare, camminare per imparare: una nuova prospettiva educativa per riconnettersi con l'ambiente

Walk to learn, learn to walk: a new educational perspective to reconnect with environment

MARCO DAVIDE TONON¹, ANDREA CARETTO², ANDREA GERBAUDO³

¹ Dipartimento di Scienze della Terra di Torino

² Dipartimento di Filosofia e Scienze dell'Educazione di Torino

³ Dipartimento di Scienze della Terra di Torino

E-mail: marco.tonon@unito.it

Parole chiave: educazione alla sostenibilità, transdisciplinarietà, apprendimento trasformativo

Key words: education for sustainability, transdisciplinarity, transformative learning

LA GRADUALE E CONTINUA PERDITA DI NATURA

Oggi, sempre più spesso, si sente parlare di sostenibilità: sostenibilità ambientale, economica, sociale. Il grande problema che la società ha di fronte è però come tradurre i principi teorici in pratiche reali e quotidiane. Le persone hanno spesso difficoltà a sviluppare una forte sensibilità verso le tematiche ambientali e ad adottare in modo convinto atteggiamenti sostenibili nei confronti della società e dell'ambiente. L'atteggiamento che ciascuno di noi ha nei confronti dell'ambiente nasce dal tipo di educazione che, fin dalla prima infanzia, ci viene impartita. La riduzione di spazi naturali, l'allontanamento fisico dalla natura, le esperienze e le sollecitazioni sempre più virtuali e meno reali, le attività di gioco eccessivamente strutturate e precostituite, i sempre più scarsi momenti di reale socializzazione con genitori, insegnanti e compagni di scuola, sono alcuni esempi di ciò che la nostra società impone ad una gioventù sempre meno autonoma e capace di affrontare situazioni nuove, di valutare opportunità e rischi.

Tali condizioni odierne comportano diverse problematiche, come l'attuale condizione giovanile (con particolare riferimento ai ragazzi "urbanizzati") caratterizzata dalla solitudine e dalla reale socializzazione negata; il rapporto sfavorevole tra esperienze reali ed esperienze virtuali; l'autonomia perduta (organizzazione altrui dei tempi e degli spazi) e l'inaccettabilità del rischio da parte dei genitori e parenti (iperprotezione e assenza di avventura); la riduzione effettiva di natura e la conseguente perdita di identità ecologica come cornice entro la quale ricondurre le diverse esperienze; la mancata possibilità di fare esperienze di natura come modalità per ricostruire la propria identità ecologica; in ultimo le carenze di conoscenze naturalistiche come modalità per riflettere sulla propria posizione nel Pianeta. (Dodman, Camino, Barbiero, 2008)

Non si può negare, quindi, l'evidenza di tali condizioni; ciò fa nascere, in ambito educativo, la necessità di formare le future generazioni ai nuovi scenari di sostenibilità. In particolare, per l'educazione alle geoscienze è ormai ampiamente riconosciuta l'importanza del fieldwork come

uno dei metodi principali di apprendimento (Mondlane, Mapani 2002; Butler 2008), in grado anche di stabilire una connessione tra la parte emotiva degli studenti e quella cognitiva (Stokes, Boyle 2009)

I DISTURBI PSICO-FISICI GENERATI DALLA MANCANZA DI NATURA

La mancanza di esperienza diretta in natura ha notevoli ripercussioni psico-fisiche che potrebbero essere riassunte attraverso l'acronimo NDD (*Nature Deficit Disorder*), il quale racchiude nella sua definizione i disturbi che la mancanza di natura comporta sulla salute umana, e soprattutto nei bambini. Il *Nature Deficit Disorder* (NDD) definisce l'insieme di disturbi cognitivi e fisici riscontrabili nei bambini e negli adulti, provocati dall'attuale tendenza a passare sempre meno tempo nell'ambiente naturale (Louv, 2006). Già dieci anni fa la Commissione d'Educazione e Comunicazione (CEC) dell'Unione Internazionale per la Conservazione della Natura (IUCN) aveva definito che il NDD "non è una diagnosi medica, ma un modo di pensare a ciò che sta accadendo al nostro bambino e che racchiude i sintomi citati da Louv nel suo libro" (Lopoukhine et al., 2014). I sintomi maggiormente riscontrabili sono l'iperattività, l'incapacità di concentrazione, l'ansia e lo stress, stati di insicurezza, piccole fobie, depressione e difficoltà di socializzazione, tali da aumentare notevolmente la somministrazione di farmaci stimolanti contro la disattenzione e antidepressivi nei bambini più piccoli, finalizzati a combattere la loro perdita di interesse nei confronti della vita. Dalla fine degli anni '80, soprattutto negli Stati Uniti, si sono registrati aumenti nella prescrizione di psicofarmaci contro noia e stress, soprattutto in età prescolare (Delate et al., 2004). L'iperattività, caratteristica dell'*ADHD* (*Attention Deficit Hyperactivity Disorder*), è da correlare con lo stato di vita odierna dei nostri bambini. In un ambiente artificiale, l'iperstimolazione presente e ridondante, provoca un eccesso di impegno nella ricezione dei messaggi, un affaticamento dell'attenzione diretta e intenzionale, caratterizzata da atteggiamenti impulsivi, agitazione, irritazione e incapacità di concentrazione, che costringono il

bambino a reagire con comportamenti di distacco e di fuga (Keplan, 1995).

Oltre a disturbi più specifici dell'area psicologica, si possono osservare un rapido incremento di patologie fisiche, quali l'obesità, asma e allergie provocate dal vivere in ambienti chiusi e spesso inquinati. Nei bambini in sovrappeso aumenta, infatti, il rischio di essere soggetti ad asma e altre malattie respiratorie, oltre alla possibilità di avere problemi di salute polmonare e cardiopatie (Coghi *et al.*, 2010). Inoltre, il ridotto tempo trascorso all'aria aperta e alla luce solare comporta la mancanza di quantità adeguata di vitamina D nei bambini, anche se sarebbe sufficiente l'esposizione al sole per 10-15 minuti almeno due volte a settimana per produrre la quantità necessaria al corpo per le sue funzioni. Tale deficit può essere causa di rachitismo, malattia caratterizzata da deformità ossee e ritardo della crescita, e nel tempo trasformarsi in osteoporosi (Huh e Gordon, 2008). È, infine, presente una relazione tra lo svolgere attività a distanza ravvicinata al chiuso e la prevalenza di miopia nei bambini. Livelli alti di tempo speso all'aria aperta sono da associarsi a minori casi di miopia o ipermetropia, mentre i bambini che svolgono attività abituali al chiuso, a distanza ravvicinata e con un'intensità della luce inferiore a quella in ambiente naturale, hanno probabilità più alte di risultare miopi rispetto agli altri (Rose *et al.*, 2008).

Il distacco dall'ambiente naturale comporta infine conseguenze anche sull'identità ecologica nel bambino, sul come egli si percepisce in relazione alla natura, come essere vivente connesso ai ritmi e ai cicli biogeochimici della

Terra, alla complessità dei sistemi ecologici (Thomashow, 1996); i cambiamenti evolutivi e sociali degli ultimi anni hanno avuto ripercussioni negative sul nostro legame con la Terra e la conoscenza che abbiamo di essa (Pilgrim, Cullen, Smith, e Pretty, 2008).

È ora di interrogarsi, dunque, su quali sono i vantaggi dello stile di vita attuale e ciò che, invece, si è perso in termini di costi fisici, psicologici e sociali. L'integrazione tra studi di psicologia e l'ecologia, ha fatto nascere il nuovo termine di ecopsicologia, disciplina che ha l'obiettivo di studiare approfonditamente le relazioni Uomo e Ambiente (Roszak, 1992). Questo nuovo paradigma promuove una visione ecocentrica del rapporto uomo-natura, ove si pone l'accento sulle strette interrelazioni che si hanno con l'ambiente naturale e l'importanza, anche per il benessere psicologico individuale, di ritrovare il senso di appartenenza al pianeta Terra (Tambelli, 2017).

USCIRE FUORI PER EDUCARE CAMMINANDO

L'emergenza legata alla pandemia di Covid 19 ha reso evidente l'urgente bisogno di identificare metodologie differenti di insegnamento che utilizzino a scopo formativo ed educativo gli spazi esterni degli edifici scolastici. Questa deve essere l'occasione per riformare veramente la nostra scuola, in un'ottica di maggiore integrazione con il territorio e con la società esterna. Tale necessità emerge anche se si pensa che il termine "educare", facendo riferimento al significato latino, proviene dall'intensivo di *educere* "trarre



FIGURA 1. Sentiero nei pressi di Moncuco Torinese, Monferrato Occidentale.

fuori”, far uscire ciò che è dentro inteso come condurre, fare esperienza “*fuori*” nel mondo (Masschelein, 2010). Fare esperienza fuori significa essere in grado di scoprire un territorio con un approccio sensoriale, corporeo, immersivo (Fig. 1).

Se l'ambiente, inteso come spazio visivo intorno a noi, influisce profondamente sul benessere fisico e mentale (Louv, 2006) una delle forme più semplici di esplorazione di esso è proprio il cammino. Colui che cammina, infatti, percorrendo luoghi, incontrando persone e altri esseri viventi, procede lentamente, privo di protezioni e completamente esposto all'ambiente. Egli adotta una pratica che presta attenzione alle cose, nella quale le conoscenze si acquisiscono attraverso l'esperienza del corpo e non dal bisogno concettuale del farlo; ci si espone rispetto all'essere immunizzati (Ingold, 2017). A tal proposito, Ciabotti sostiene come “*noi adulti abbiamo definitivamente perso il piacere e la pratica della giusta lentezza, primo segreto del buon camminatore. I bambini invece lo conoscono, per fortuna, ancora bene e hanno difficoltà evidenti ad adattarsi ad un cammino che tende prevalentemente e rapidamente solo alla meta*” (Ciabotti, 2018, p. 129).

Il camminare è inteso come un bisogno, un atto esplorativo, conoscitivo, ludico e creativo da vivere in tutti i suoi aspetti, fin da bambini, per poter poi apprezzarlo e goderne anche da grandi (Guerra, 2018). Si tratta di una connessione tra percezione, pensiero e linguaggio. Infatti, camminare aiuta a pensare, a ragionare, a riflettere in silenzio e, allo stesso tempo, permette di osservare ciò che ci circonda, di fare ipotesi su ciò che percepiamo, di essere curiosi e ricercare, in quelle curiosità, delle risposte (Hanscom, 2017; Zavalloni, 2019).

GEOLOGIA (E NON SOLO) IN CAMMINO

Varie sono le attività formative che si possono proporre agli alunni in termini di osservazione del paesaggio e ricostruzione del medesimo, partendo dagli elementi che hanno catturato l'attenzione. Innanzitutto, è necessario individuare a livello visivo le forme presenti partendo dal riconoscimento delle componenti morfostrutturali, idrologiche, vegetazionali e antropologiche, per poi passare ad individuare il sistema di forze che, interagendo tra loro, hanno modellato il paesaggio stesso (Ferrero, Provera e Tonon, 2004).

Questa analisi così dettagliata del paesaggio circostante può essere fatta per scoprire e comprendere quali sono le caratteristiche di un ambiente e come il medesimo può cambiare a seconda delle variazioni climatiche. Un esempio potrebbe essere notare la diversità del paesaggio al mutare delle stagioni. Un'attività da proporre potrebbe essere quella di fotografare lo stesso albero a distanza di un mese per un anno intero e notare come quell'albero è cambiato. La stessa cosa può essere fatta fotografando il versante di una montagna e notando i cambiamenti in un lasso di tempo maggiore. Osservare, toccare le rocce e raccoglierne alcuni campioni, può aiutare a comprendere quali tipi di rocce sono presenti, come hanno assunto quell'aspetto grazie agli agenti in gioco, a ricostruire la storia geologica di

quel territorio. Inoltre, è possibile osservare l'azione dinamica di evoluzione continua del paesaggio attraverso l'analisi di foto storiche e il confronto con il paesaggio odierno: presenza di disboscamenti, aree più o meno verdi a seconda della stagione, fusione dei ghiacci, reperti storici identificabili, ecc. (Ferrero, Provera e Tonon, 2004), i quali pongono domande e alle quali si può cercare insieme, per ipotesi, di trovare delle risposte, individuando le forze agenti esogene ed endogene e provando addirittura a prevedere cosa quell'ambiente potrebbe diventare in futuro.

Un'altra strategia educativa applicabile durante una camminata è quella della raccolta. Il ritrovamento di cose (rocce, fossili, manufatti, ecc.) durante una camminata esplorativa può essere un motivo di analisi geomorfologica, storica e sociale del territorio; si può intrecciare una rete di connessioni tra i vari oggetti trovati e/o fotografati che evidenzia gli intrecci (*meshwork*) delle relazioni in divenire che hanno portato temporaneamente l'oggetto ad assumere quella forma (Ingold, 2007). Inoltre l'assemblaggio delle cose ritrovate secondo criteri estetici, con la creazione di installazioni che si potrebbero definire di *land-art*, si presta bene a momenti di riflessione anche di gruppo sui significati che gli esseri umani danno agli elementi naturali e sulle nostre modalità di interazione con essi, spesso ridotte ad una visione utilitaristica ed antropocentrica.

È possibile anche utilizzare la strategia del silenzio per cogliere suoni, rumori, e ricreare un'atmosfera di quel luogo ancora diversa dal semplice osservare (Guerra, 2018). Il silenzio può avere un valore positivo, di ascolto e di sviluppo dell'attenzione, considerata fondamentale per ridurre il disturbo da deficit di natura (Louv, 2006): imparare ad ascoltare ciò che ci circonda sviluppa anche abilità sociali (Consiglio dell'Unione Europea, 2018). Camminare, infatti, “è soprattutto un piacere, diritto naturale da coltivare insieme” (Guerra, 2018, p. 138).

Dal silenzio, o meglio dal predisporre all'ascolto, nascono le storie. Secondo Macfarlane “*una passeggiata può facilmente diventare una storia, e non c'è sentiero che non abbia qualcosa da raccontare*” (Macfarlane, 2020). Un'impronta sul terreno o una particolare formazione geologica diventano motivo di esplorazione, di racconto di un'esperienza o di una storia lontana nel tempo e genera subito conoscenza (Ingold e Vergunst, 2016). L'analisi geomorfologica di un territorio può dunque intrecciarsi e sfociare in un'attività di storytelling, che nasca spontaneamente dall'esperienza fatta sul campo oppure che rifletta e si confronti con modelli narrativi e poetici già esistenti. In questo senso il camminare apre naturalmente ad un approccio educativo inter o transdisciplinare, in cui è difficile limitarsi alle conoscenze e alle nozioni di un solo campo di indagine: più spontaneo e più efficace è invece predisporre ad una esplorazione aperta, di stampo olistico, che non escluda aprioristicamente determinati settori di indagine e che non abbia paura di superare i confini tra le discipline. Si tratta di esplorare il territorio, la natura, anche con uno sguardo storico, sociale e culturale che porta al tramandarsi dell'esperienza e a notare i futuri cambiamenti nel tempo, in un'ottica di sostenibilità.



FIGURA 2. Salendo verso la cappella di S.Michele Arcangelo, Castelnovo don Bosco (TO).

Camminare attraverso un paesaggio ci offre dunque una serie di stimoli e di percezioni che si colgono attraverso l'attenzione e l'utilizzo dei sensi, offrendo così diverse opportunità di apprendimento (Fig. 2).

LE ESPERIENZE DEL *WALKING PIANALTO* PER ADULTI E PER BAMBINI

Nell'ottobre del 2017 è stato realizzato un progetto artistico denominato *Iperpianalto*, ideato da due artisti torinesi Caretto e Spagna (2018). Tale progetto nato da una sinergia tra la Fondazione per l'Arte di Poirino Spinola-Banna, La Galleria di Arte Moderna di Torino (GAM) e l'Ecomuseo dell'argilla di Cambiano (MunLab) includeva un'azione collettiva di percorrenza dell'Altopiano di Poirino: il *Walking Pianalto*. Tale azione collettiva di attraversamento del territorio denominato Pianalto è consistita in un trekking lungo un percorso di quasi 50 Km che è a partito da Cambiano (dalla sede dell'Ecomuseo dell'argilla MunLab) per arrivare fino al margine meridionale dell'altopiano sul terrazzo di Montà d'Alba che si affaccia sulle colline del Roero (Fig. 3).

Il *Walking Pianalto* è nato dal desiderio di sperimentare un percorso di conoscenza di un territorio attraverso un'esperienza estetica, vissuta collettivamente da un gruppo eterogeneo di persone che ha camminato insieme lungo tutto il percorso. Un gruppo di 25 persone, molto diversificato sia per età sia per background culturale, ciascuno con le proprie esperienze e di competenze: artisti di arte contemporanea,

ceramiste dell'Ecomuseo, studenti universitari, insegnanti di scuola primaria del territorio, studenti di un istituto superiore di agraria con i loro docenti, professori universitari geologi ed esperti di didattica ed educazione ambientale, esperti agronomi e naturalisti. Tutti sono stati invitati a condividere tre giorni di cammino lungo un itinerario studiato in precedenza che percorresse per lo più strade sterrate e antichi sentieri dimenticati, condividendo tempo ed esperienze lungo il percorso alla conoscenza di questo territorio. La scoperta del Pianalto è stata un'esperienza multisensoriale coinvolgente, la sperimentazione di un possibile modello alternativo di educazione, dalla quale è nata poi l'idea riproporre, nella primavera 2019, un'esperienza analoga a 35 bambini di due classi quarte di una scuola primaria di Poirino nel contesto di una ricerca di didattica sperimentale. Il *Walking Pianalto Mini*, così nominato, è stato un progetto didattico a carattere transdisciplinare poiché l'approccio sistemico al mondo è una scoperta di insiemi di interazioni, di flussi di materia e di energia connessi, non rigidamente separabili in compartimenti stagni di oggetti e fenomeni studiati da discipline differenti. Anche in questo caso si è riproposta una camminata collettiva della durata di due giorni per un totale di 27 Km, partendo dall'ingresso della scuola a Poirino e arrivando fino al Lago della Spina nel comune di Pralormo. L'osservazione delle dinamiche all'interno del gruppo di 35 bambini e di quattro maestre ha dimostrato come quest'esperienza abbia rafforzato la socializzazione tra pari e tra i loro insegnanti, abbia stimolato alla curio-



FIGURA 3. Attraversamento del Pianto di Poirino

sità e al senso di scoperta e abbia educato ad un'attenzione per i particolari. Il carattere transdisciplinare dell'esperienza condivisa ha inoltre stimolato le diverse intelligenze multiple dei singoli, come evidenziato da Gardner (2005), facendo emergere competenze e abilità cognitive e psicofisiche anche in quegli allievi che in aula apparivano spesso stanchi, annoiati e distratti. Alcune affermazioni di bambini, al termine dell'esperienza, dimostrano, più di ogni altra cosa, le potenzialità educative di questa esperienza vissuta. Alla richiesta di identificare quali materie avessimo trattato durante il cammino, un bambino rispose: *“abbiamo fatto scienze, matematica, geografia, storia, arte, motoria e italiano ... non separate ma tutte insieme!”*, seguita una bambina che ha affermato: *“è stato faticoso ma è stato molto divertente. Imparare in questo modo e non mi sono mai annoiata”*. Quando uno di noi ha chiesto: *“cosa pensate di aver imparato?”* le risposte sono state: *“moltissime cose che non sapevo e non avevo mai pensato si potessero imparare camminando”* oppure *“ho imparato la resistenza!”* o ancora: *“ho imparato che si può imparare insieme aiutandosi a vicenda e che tutti abbiamo qualcosa da insegnare agli altri”*... *“ho imparato più cose in questi due giorni che in tanti mesi di scuola”*.

WALKING HILLS: TRA GEOLOGIA, ARTE E LETTERATURA

Nel maggio 2021 è stato proposto agli studenti di Scienze della Formazione Primaria dell'Università di Torino frequentanti il corso integrato di Fondamenti e didattica

delle Scienze Naturali un laboratorio dal titolo *Walking Hills*, costituito da due camminate con percorso ad anello. La prima, effettuata venerdì 21 maggio, prevedeva la partenza dalla chiesa di Madonna del Pilone, la salita per un itinerario storico (Sentiero 22) fino a Pino Torinese, il proseguimento su sentiero adiacente alla strada provinciale “Panoramica” fino alla Basilica di Superga, quindi la discesa fino al lungo Po tramite sentiero.

Il giorno successivo l'anello proposto esplorava il territorio del Monferrato occidentale: dopo la partenza nel comune di Moriondo Torinese, il gruppo ha raggiunto e attraversato gli abitati di Moncuoco e di Pogliano per poi scendere all'Abbazia romanica di Vezzolano, posta nel comune di Albugnano. Da qui, usando i sentieri del cosiddetto Cammino di Don Bosco, si è fatto ritorno al punto di partenza. Hanno partecipato al laboratorio 27 studenti. La scelta degli itinerari è stata effettuata anche sulla base delle caratteristiche geomorfologiche, geologiche e paleontologiche del territorio: l'idea era quella di fare un viaggio, oltre che nello spazio, anche nel tempo, partendo dall'osservazione degli affioramenti e delle caratteristiche sedimentologiche e litologiche delle rocce presenti: della Collina di Torino (su tutti, quello delle torbiditi bioclastiche mioceniche del Monte Aman) per giungere a osservazioni su formazioni più recenti del Monferrato, come i gessi e le peliti messiniane della cava abbandonata di Moncuoco o le sabbie plioceniche dell'Astiano, ricche di resti fossili di Molluschi e di bioturbazioni osservate durante l'itinerario.



FIGURA 4. Tra grano e canneti nei pressi dell'abbazia di Vezzolano, Albugnano (TO).

Anche in questo caso si è scelto però un approccio transdisciplinare, per cui l'osservazione geologica è andato di pari passo con una riflessione ad un'analisi del territorio più complessa, che ha fatto propri spunti storici ed architettonici, artistici e letterari. Tra le attività proposte agli studenti, vi sono state esperienze sensoriali (camminare bendati, oppure procedere senza fare il minimo rumore nel bosco); attività di osservazione e disegno di elementi naturali (dividendo gli studenti in gruppo e dando ad ogni gruppo una consegna in particolare: ad uno i colori, ad un altro le forme, ecc.); attività di raccolta e di manipolazione (raccolta di campioni d'argilla durante l'itinerario e realizzazione di piccoli manufatti); scrittura di un breve testo narrativo e di uno poetico, partendo dagli esempi di due scrittori legati ai territori attraversati, Emilio Salgari (dalla cui casa simbolicamente partiva l'anello del primo giorno) e Cesare Pavese (in particolare la sua raccolta poetica *La terra e la morte*, 1945) (Fig. 4).

CONCLUSIONI

La realizzazione di queste due esperienze è stata importante per analizzare le possibilità educative dell'esplorazione di un territorio, sia in senso più prettamente geomorfologico che cercando le connessioni tra l'educazione alle geoscienze e altre chiavi di lettura del paesaggio, in ottica transdisciplinare. inoltre

Nel caso di Walking Hills, la somministrazione di questionari agli studenti prima e dopo il laboratorio ha permes-

so di evidenziare l'efficacia di tale approccio educativo. In particolare i partecipanti hanno sottolineato come l'esperienza sia stata importante per una riflessione ecologica sulle relazioni tra i vari elementi del paesaggio, compreso quello antropico. Tra gli obiettivi raggiunti di questo laboratorio c'è dunque l'aver fornito spunti a futuri insegnanti della scuola primaria per ripensare a una didattica delle scienze che abbia un approccio sistemico e aperto ad una visione del sapere che sappia superare i confini tra le discipline, tra i concetti di natura e cultura, infine tra corpo e mente.

BIBLIOGRAFIA

- BARTON J., PRETTY J. (2010). *A walk a day keeps the doctor at bay*, The American Journal, Environmental Science and Technology, University of Essex, Essex.
- BERTOLINO F., GRAND BLANC L. (2011) *Agrinido: una nuova realtà per crescere in fattoria*, L'informatore Agricolo, 1, pp. 44-47.
- BUTLER, R. W. H. (2008). *Teaching geoscience through fieldwork*. (GEES Learning and Teaching Guides). University of Plymouth.
- CARVER A., TIMPERIO A., CRAWFORD D. (2008). *Playing it safe: The influence of neighbourhood safety on children's physical activity - A review*, Centre for Physical Activity and Nutrition Research, School of Exercise and Nutrition Sciences, Deakin University of Australia.
- CARETTO A., SPAGNA R. (a cura di) (2018). *Iperpianalto*, Viaindustria publishing, Foligno.

- CASTIGLIONI B., CISANI M., PICCOLO M. (2020). *Camminare nel paesaggio come pratica educativa: prospettive geografiche*, Studium Educationis, XXI-1, 65-81.
- CHARLES C. (2009). *The ecology of hope: natural guides to building a children and nature movement*, Journal of Science Education and Technology, 18 (6), pp. 467-475.
- CIABOTTI F. (2018). *Cammino*. In Guerra (a cura di), *Fuori. Suggestioni nell'incontro tra educazione e natura*, Franco Angeli, Milano, p. 128-138.
- COGHI A., OLIVIERI F., MELOTTI G., PERONI D. (2010). *Asma e obesità: più di un'associazione causale?* Rivista di Immunologia e Allergologia Pediatrica, 2, pp. 4-13.
- DELATE T., GELENBERG A. J., SIMMONS V. A., MOTHERAL B. R. (2004). *Trend in the use of antidepressant in a national sample of commercially insured pediatric patient, 1998 to 2002*, Psychiatric Services, 55, pp. 387-391.
- DODMAN M., CAMINO E., BARBIERO G. (2008). *Language and Science: products and processes of signification in the educational dialogue*. Journal of Science Communication, 7 (3).
- FARNÉ R., AGOSTINI F. (2014). *Outdoor Education. L'educazione si-cura all'aperto*, Edizioni junior-Spaggiari edizioni srl, Parma.
- FARNÉ R., BORTOLOTTI A., TERRUSI M. (2018). *Outdoor Education: prospettive teoriche e buone pratiche*, Carrocci editore, Roma.
- FERRERO E., PROVERA A., TONON M. (2004). *Le Scienze della Terra: la scoperta dell'ambiente fisico*, edizioni libreria Cortina, Torino.
- GARDNER H. (2005). *Educazione e sviluppo della mente. Intelligenze multiple e apprendimento*, Erickson, Trento.
- GUERRA M. (2018). *Fuori. Suggestioni nell'incontro tra educazione e natura*, Franco Angeli, Milano.
- HANSCOM A. J. (2017). *Giocate all'aria aperta! Perché il gioco libero nella natura rende i bambini intelligenti, forti e sicuri*, Edizioni Il leone verde, Torino.
- HUH S., GORDON C. (2008). *Vitamin D deficiency in children and adolescents: Epidemiology, impact and treatment*, Reviews in endocrine e metabolic disorders, 9 (2), pp. 161- 170.
- INGOLD T., VERGUNST J. L. (2016). *Ways of walking. Ethnography and practice on foot*, Routledge Taylor & Francis group, New York.
- INGOLD T. (2002). *The perception of the environment. Essays on livelihood, dwelling and skill*, Routledge Taylor & Francis group, London and New York.
- INGOLD T. (2007). *Lines: a brief History*, Routledge, New York.
- INGOLD T. (2017). *Anthropology and/as education*, Routledge, New York.
- KELLER S. R (2005). *Nature and childhood development, Building for life: designing and understanding the human-nature connection*, Island Press, Washington.
- KEPLAN S. (1995). *The restorative benefits of nature: Toward an integrative framework*, Journal of Environmental Psychology, 15 (3), 169-182.
- LABBUCCI A. (2011). *Camminare, una rivoluzione*, Saggine-Donzelli editore, Roma.
- LE BRETON D. (2013). *Il mondo a piedi. Elogio alla marcia*, Feltrinelli, Milano.
- LOPOUKHINE N., WHEELER K., KEENLEYSIDE K., CHARLES C., KOSS R., NICOLL R. (2014). *Empowering the next generation to connect with nature: a global movement*, Parks, 20.2, pp. 49-60.
- LOUV R. (2006). *L'ultimo bambino nei boschi*, Rizzoli, Milano.
- MACFARLANE R. (2020). *Le antiche vie: un elogio del camminare*, Frontiere Einaudi, Bologna.
- MASSCHELEIN J. (2010). *E-ducating the gaze: the idea of a poor pedagogy*, Ethics and Education, 5 (1), 43-53.
- MENEGUZZI M. (2010). *Agrinido e agriasilo, ovvero come educare i bambini "servendosi" della campagna*, Vita in Campagna, 12, pp. 58- 61.
- MONDLANE S. AND MAPANI B. (2002). *The role of fieldwork in undergraduate geoscience education: approaches and constraints*. Teaching Earth Sciences, 27 (4): 129-131.
- MOORE R. C. (1997). *The need for nature: a childhood right*, Journal Article Social Justice, 24 (3), p. 203.
- MORTON T. (2018). *Iperoggetti. filosofia ed ecologia dopo la fine del mondo*, Nero edizioni, Roma.
- NÆSS A. (2015). *Introduzione all'ecologia*, Edizioni ETS, Pisa.
- OLIVERIO FERRARIS A., OLIVERIO A. (2011). *A piedi nudi nel verde*, Giunti Editore, Firenze.
- ORR D. (1991). *What is education for? Six months about the foundation of modern education, and six new principles to replace them*, Santa Clara University, Santa Clara.
- PERSI R. (2005). *Didattica e ricerca ambientale*, Carrocci, Roma.
- PERULLO N. (2017). *Ecologia della vita come corrispondenza. Frammenti per la spoliazione del senso*, Mimesis, Milano.
- PILGRIM S., CULLEN L., SMITH D., PRETTY J. (2008). *Ecological knowledge is lost in wealthier communities and countries*, Environmental Sci e Tech, 42, University of Essex, Essex.
- ROSE K. A., MORGAN, I. G., IP, J., KIFLEY, A., HUYNH, S., SMITH, W. (2008). *Outdoor activity reduces the prevalence of myopia in children*, Ophthalmology, 115 (8), pp. 1279-1285.
- ROSZAK T. (1992). *The voice of the Earth*, Simon e Schuster, New York.
- STOKES A., BOYLE P. (2009). *The undergraduate geoscience fieldwork experiences: influencing factors and implications for learning*, The Geological Society of America, Special Paper 461
- TAMBELLI R. (2017). *Manuale di psicopatologia dell'infanzia*, il Mulino, Bologna.
- TOMASHOW M. (1996). *Ecological identity*, The MIT Press, Cambridge (USA).
- ZAVALLONI G. (2019). *Pedagogia della lumaca. Per una scuola lenta e non violenta*, EMI Editrice Missionaria Italiana, Verona.

Uno streamer sismo-elettrico innovativo per misure geofisiche in movimento lungo argini fluviali

An innovative seismic-electrical streamer for mobile geophysical measurements along river embankments

FEDERICO VAGNON¹, CESARE COMINA¹, ALESSANDRO ARATO², MARIO NALDI²

¹ Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli studi di Torino, Torino, Italy

² Techgea S.r.l., Torino, Italy

E-mail: federico.vagnon@unito.it

Parole chiave: streamer sismo-elettrico, tomografia elettrica resistiva, MASW, argini fluviali

Key words: seismic-electric streamer, electrical resistivity tomography, MASW, river embankments

ABSTRACT

Le strutture lineari in terra (ad es. argini fluviali e dighe in terra di dimensioni moderate) richiedono specifici strumenti di caratterizzazione per valutare in modo efficiente le loro condizioni di stabilità. A tal fine, le indagini geofisiche, sia sismiche che geoelettriche, sono comunemente utilizzate e considerate complementari alle indagini geotecniche, fornendo immagini della variazione dei parametri di interesse lungo l'intera struttura. La rapidità ed applicabilità delle indagini geofisiche può essere tuttavia altamente migliorata tramite l'impiego di streamer innovativi da utilizzare in movimento lungo le strutture. A tal fine in questo articolo è presentata l'applicazione di uno streamer sismico e di uno elettrico di nuova concezione per la caratterizzazione di due argini fluviali nella provincia di Torino. I due streamer consentono l'acquisizione contemporanea di dati sismici (V_S) e di resistività elettrica (R) durante il loro trascinarsi lungo la struttura indagata. I risultati ottenuti con questo nuovo sistema sono paragonabili agli strumenti di indagine standard, e consentono di ottenere tempi di rilievo ridotti e maggiore efficienza.

1. INTRODUZIONE

Argini fluviali e dighe in terra sono strutture geotecniche lineari utilizzate per la protezione di aree densamente popolate dal rischio di alluvioni o per il contenimento di riserve d'acque utili per l'approvvigionamento idrico, per l'agricoltura o per la distribuzione di acqua potabile. La loro altezza è generalmente compresa tra 1 e 10 m, e nella maggioranza dei casi non supera i 4-5 m (Guadagni 2010, Colleselli 2015).

Dal punto di vista geotecnico, la loro caratterizzazione, ai fini della stabilità e dello stato di conservazione, è limitata e approssimativa a causa del gran numero di prove dirette e perforazioni che sarebbero necessarie per ottenere parametri rappresentativi del loro stato di salute. Inoltre, le prove geotecniche dirette risultano inadeguate per monitorare l'evoluzione temporale di eventuali fenomeni di instabilità, come per esempio erosione interna, processi di filtrazione e sifonamento.

I metodi geofisici non invasivi sono considerati validi strumenti alternativi per la caratterizzazione di vaste aree con costi contenuti e ridotte tempistiche. Questi metodi offrono infatti un buon compromesso tra la velocità, la profondità e la lunghezza di indagine e l'affidabilità dei risultati ottenuti.

Tra i metodi non invasivi, quelli elettrici e quelli sismici sono i più indicati per la caratterizzazione poiché la velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio (V_S) è direttamente collegata alla rigidità del materiale e la resistività elettrica (R) al contenuto d'acqua e d'argilla.

La V_S è un parametro importante per la definizione stratigrafica ed esistono numerose correlazioni tra essa e parametri geotecniche (porosità, indice di plasticità, modulo di taglio) ottenuti mediante prove penetrometriche e dilatometriche (Kramer 1996, Foti et al. 2014). Le prove MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) sono sicuramente le più utilizzate per la stima di V_S in quanto permettono di ottenere profili di V_S , per una mappatura 2D degli andamenti di velocità nel terreno. Tale metodologia è stata applicata recentemente su streamer, trainati da un veicolo, specialmente su strutture lineari in terra, quali argini e dighe (Comina et al. 2020a, Comina et al. 2020b e referenze in essi contenute), con una notevole riduzione dei tempi di esecuzione rispetto all'esecuzione di MASW tradizionali.

Per quanto riguarda la resistività elettrica (R), essa permette una localizzazione più precisa degli orizzonti argillosi (Uhlemann et al. 2017) ed una definizione del grado di saturazione dei materiali e della loro porosità (Archie 1942). Le tomografie elettriche, ERT (Electric Resistivity Tomography), sono il metodo più efficace per l'identificazione degli orizzonti resistivi del terreno o la presenza di anomalie dovute a detensionamento o erosione delle strutture arginali.

Contrariamente alle misure sismiche, l'esecuzione di misure di resistività elettrica per grandi estensioni di indagine richiede ancora un notevole dispendio di tempo ed energie per l'infissione di elettrodi e l'acquisizione delle misure per una copertura spaziale efficace dei dati. I metodi

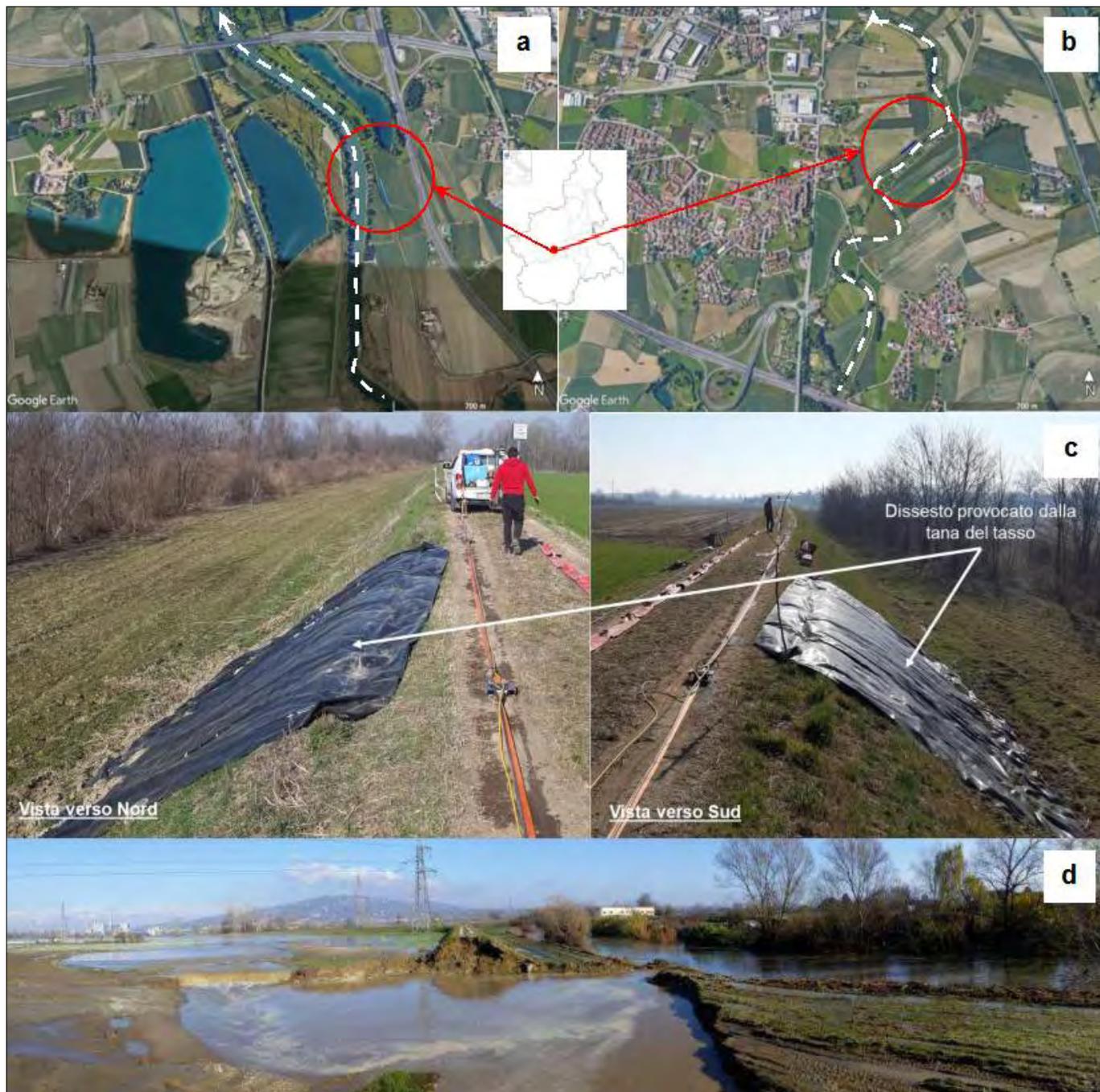


FIGURA 1. Ubicazione dei tratti arginali indagati lungo a) il fiume Po (km 0.975) e b) il fiume Chisola. c) Dettagli del dissesto provocato dai cunicoli scavati dai tassi lungo l'argine del Po e d) foto della rotta arginale in seguito all'evento del novembre 2016 lungo l'argine del Chisola.

elettrici non hanno visto lo sviluppo di adeguati streamer che facilitino l'esecuzione delle misure e l'acquisizione dei dati. Alcuni sistemi sono stati sviluppati in passato usando metodi capacitivi accoppiati con antenne elettromagnetiche, a frequenze operative nel campo quasi statico, trascinate sulla superficie del terreno (es. CCR (Capacitive Coupled Resistivity), OhmMapper e CRI (Capacitive Resistivity Imaging), Kuras et al. 2007). Tuttavia, in terreni a bassa resistività elettrica, come argille o limi saturi, comunemente usati per costruire argini fluviali, barriere idrauliche e dighe di terra, i sistemi ad accoppiamento capacitivo possono incontrare limitazioni nell'iniettare corrente nel terreno.

Per questi motivi, i più recenti sviluppi relativi agli streamer elettrici sono stati orientati verso l'utilizzo di un accoppiamento galvanico tra elettrodi e terreno. Un esempio

di ciò è l'ARP (Automatic Resistivity Profiling, sviluppato da Geocharta), che prevede l'uso di elettrodi a ruota rotolati lungo la superficie. Tuttavia, questo sistema adotta separazioni degli elettrodi ridotte, con conseguente limitata profondità di indagine (Dabas 2008). Un altro sistema che utilizza elettrodi trascinati da un veicolo è il PACEP (Pulled Array Continuous Electrical Profiling, Sorensen 1996). Quest'ultimo è stato di ispirazione per lo sviluppo dello streamer geoelettrico presentato in questa nota, sempre basato sull'accoppiamento galvanico, ma con un nuovissimo design degli elettrodi e ulteriori dettagli tecnologici specifici.

La possibilità di accoppiare lo streamer geoelettrico con quello sismico, permette inoltre la simultanea acquisizione di tali dati su un'unica sezione durante il traino del sistema sulla struttura investigata. I risultati presentati in questa

nota, riassumono le analisi effettuate durante le indagini su due differenti argini fluviali in Piemonte, affetti da instabilità localizzate e ripristino in seguito a rotta arginale. I dati sono confrontabili con quelli ottenuti da indagini geoelettriche standard, con notevoli vantaggi in termini di tempo di esecuzione delle prove e di efficienza del sistema, e consentono di effettuare interpretazioni accoppiate in modo da aumentare l'affidabilità interpretativa.

2. CASI DI STUDIO

2.1 Argine lungo il fiume Po (km 0.975)

Il primo caso di studio si trova lungo il fiume Po, in sponda destra, al confine tra il comune di Moncalieri e il comune di La Loggia (TO), alla progressiva chilometrica km 0.975, ad Est dell'Autostrada Torino-Savona all'altezza della Borgata Bauducchi (Fig. 1a).

L'argine ha una forma trapezoidale con un'altezza di circa 2 m dal livello del terreno ed è stato costruito per proteggere l'autostrada che da Torino collega le regioni a sud. Il materiale costituente il corpo arginale è composto da sabbia e ghiaia prelevate dalle cave circostanti o direttamente dal greto del fiume.

L'argine è caratterizzato da un'instabilità in sponda (lato fiume), presso un tratto di lunghezza pari a circa 8 m (Fig. 1c), legata alla presenza di una tana di tasso (o una rete di cunicoli scavati da tali animali). L'instabilità è stata temporaneamente stabilizzata con il posizionamento di un telo impermeabile di copertura in HDPE a protezione dell'argine.

L'Agenzia Interregionale per il Fiume PO (AIPO) ha richiesto di identificare se l'estensione di tali cunicoli fosse limitata al fenomeno di dissesto o si estendesse anche in aree circostanti, generando potenziali canali di filtrazione e di erosione interna.

2.2 Argine lungo il fiume Chisola

Il secondo caso di studio è l'argine sinistro sul fiume Chisola, ubicato a sud di Torino, nel comune di Moncalieri (TO) (Fig. 1b). L'argine ha una forma trapezoidale con un'altezza media di 3 m, con una base di circa 9 m e di 4 m alla sommità ed è costituito da limi e sabbia provenienti dalla piana alluvionale. L'argine protegge dal rischio di esondazioni i campi, le attività industriali e le aree residenziali circostanti.

Il territorio attraversato dal fiume Chisola è stato interessato da numerosi eventi di piena; l'ultimo, del novembre 2016 ha causato una rottura dell'argine con conseguente inondazione dei campi circostanti (Fig. 1d). L'argine è stato successivamente riparato, realizzando uno scavo di circa 8 m per circa 40 m di lunghezza, posizionando dei diaframmi metallici sul lato di fiume per prevenire moti di filtrazione e ricostruendo la porzione di argine con materiale limo-argilloso (65% limo - 15% argilla), opportunamente compattato, ricoperto sul lato di fiume da blocchi e cemento.

Ovviamente l'eterogeneità laterale che si è venuta a creare potrebbe potenzialmente generare dei canali prefe-

renziali di filtrazione al contatto tra zona riparata e argine. L'AIPO ha quindi richiesto una valutazione dello stato arginale a seguito della riparazione.

3. METODOLOGIA

I dati sismici ed elettrici sono stati acquisiti simultaneamente sul coronamento degli argini usando i due differenti streamer (Arato et al. 2020, Comina et al. 2020a, Comina et al. 2020b) ed effettuando una ERT standard di confronto e validazione.

Lo streamer geoelettrico è composto da 12 elettrodi distanziati simmetricamente, progettati in modo tale da garantire un adeguato accoppiamento elettrico tra i sensori e il terreno (Fig. 2a). Un sistema di irrigazione, composto da un serbatoio posto sul veicolo e una serie di ugelli in corrispondenza degli elettrodi (Fig. 2b), permette di ridurre le resistenze di contatto tra questi ultimi e il terreno. Lo streamer elettrico ha una lunghezza totale di 46 m. Gli elettrodi possono essere utilizzati sia come elettrodi di corrente che di potenziale: per cui è possibile eseguire diverse sequenze di misura, centrate nel punto medio dello streamer, per garantire una copertura dei dati acquisiti ottimale sia longitudinalmente che in profondità. La sequenza di misura utilizzata si basa sul quadrupolo Wenner-Schlumberger e ha permesso di raggiungere una profondità di circa 10 m. Gli elettrodi sono stati collegati al sistema di acquisizione (Syscal-Pro, Iris Instruments, georesistivimetro) mediante un cavo multipolare.

Accanto allo streamer geoelettrico è stato dispiegato uno streamer sismico, costituito da 24 geofoni verticali a 4,5 Hz distanziati di 1 m (Fig. 2a). Come sorgente sismica è stata utilizzata una massa accelerata da 40 kg montata sul retro del veicolo; nelle acquisizioni è stato adottato un offset della sorgente di 6 m. I sismogrammi sono stati acquisiti da un sismografo DAQ-Link IV (Seismic Source) con un intervallo di campionamento di 0,5 ms, pretrigger di -50 ms e una lunghezza di registrazione totale di 1.024 ms.

I valori di resistività elettrica, R , sono stati processati e invertiti con il software commerciale Res2DInv (Loke e Barker 1996). Per l'analisi delle curve di dispersione (DC) dei modi fondamentali delle onde di Rayleigh è stata usata la procedura W/D proposta da Socco et al. (2017) al fine di ottenere i profili di velocità delle onde di taglio (V_S) ad ogni acquisizione dello streamer sismico. I valori di R e V_S sono stati interpolati con il software Surfer (Golden software) con una maglia di 2 m (orizzontalmente) x 0.25 m (verticalmente).

4. RISULTATI

In Figura 3 sono riportati i risultati della caratterizzazione sismica ed elettrica dei due argini analizzati. Il confronto tra le differenti analisi geofisiche evidenzia in modo soddisfacente le principali variazioni laterali e verticali lungo le sezioni studiate degli argini.

Per quanto riguarda le analisi effettuate sull'argine del fiume Po, l'orizzonte che divide il corpo arginale e il terreno di fondazione è caratterizzato da un aumento delle velocità sismiche, da valori di circa 120-140 m/s (corpo arginale)

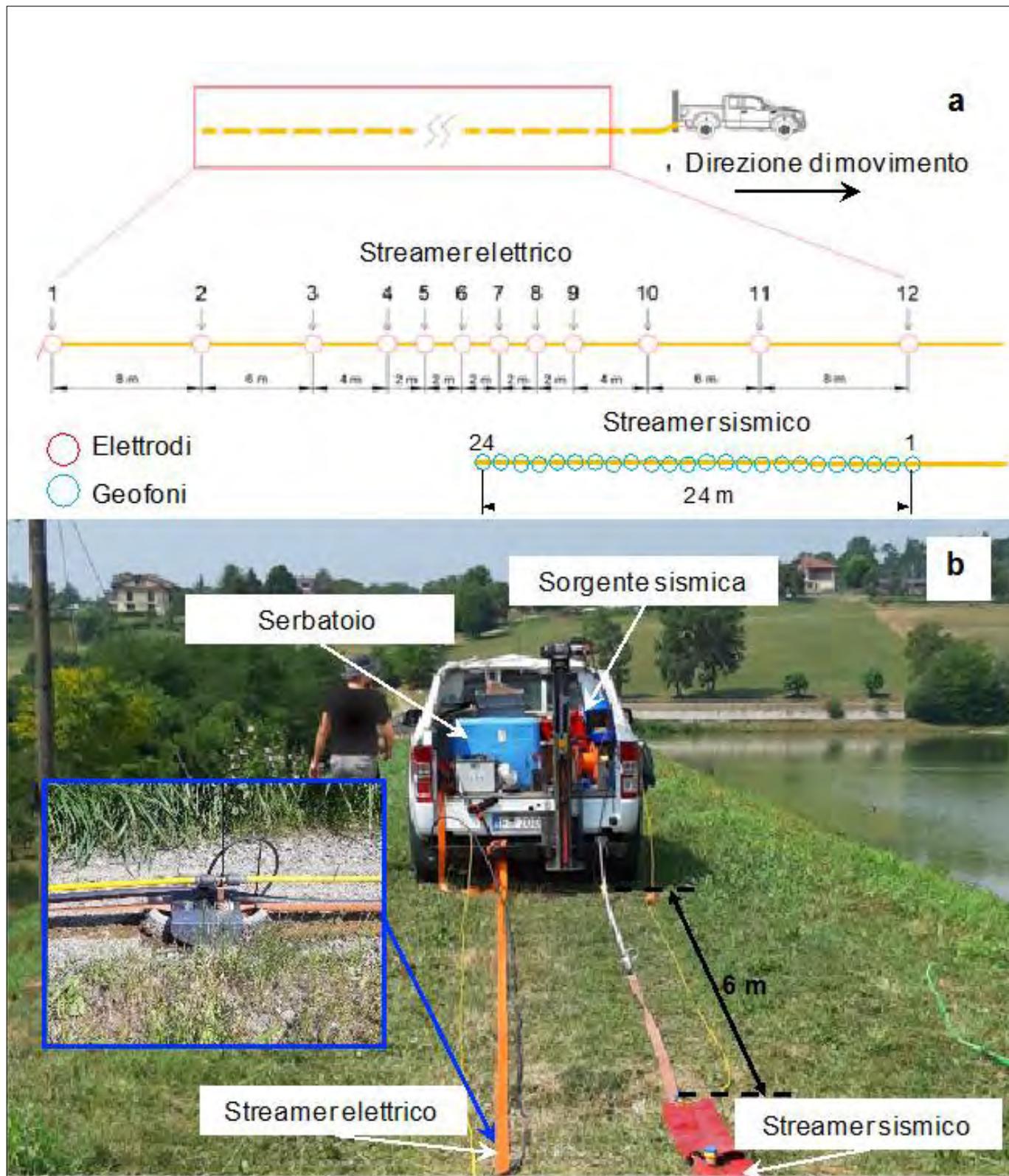


FIGURA 2. a) Schema degli streamer elettrici e sismici trascinati dietro il veicolo. b) Particolare della sorgente sismica e delle apparecchiature di acquisizione.

a valori di 200-220 m/s (fondazione), riconducibile ad effetti di compattazione per effetto del peso proprio e delle operazioni di costruzione dell'argine. Le tomografie elettriche evidenziano una certa omogeneità del corpo arginale con la presenza di alcune anomalie resistive, riconducibili a detensionamento del terreno o, nei livelli più superficiali, alla presenza del massetto stradale. In particolare, il dissesto superficiale è ben evidenziato e localizzato tra le progressive 32 e 40 m; non è da escludere una rete di

cunicoli sotterranei dovuti all'attività dei tassi anche in aree limitrofe (cerchi tratteggiati in Fig. 3). Il terreno di fondazione risulta più eterogeneo con valori di resistività riconducibili ad orizzonti di sabbie fini e/o limose (60-100 Ω m), intervallate da depositi di ghiaia (500-1500 Ω m). Questa variazione di resistività elettrica è confermata da una lieve variazione delle caratteristiche sismiche con V_S pari a 140-160 m/s per le sabbie fini/limose fino a valori di 200-220 m/s per le ghiaie.

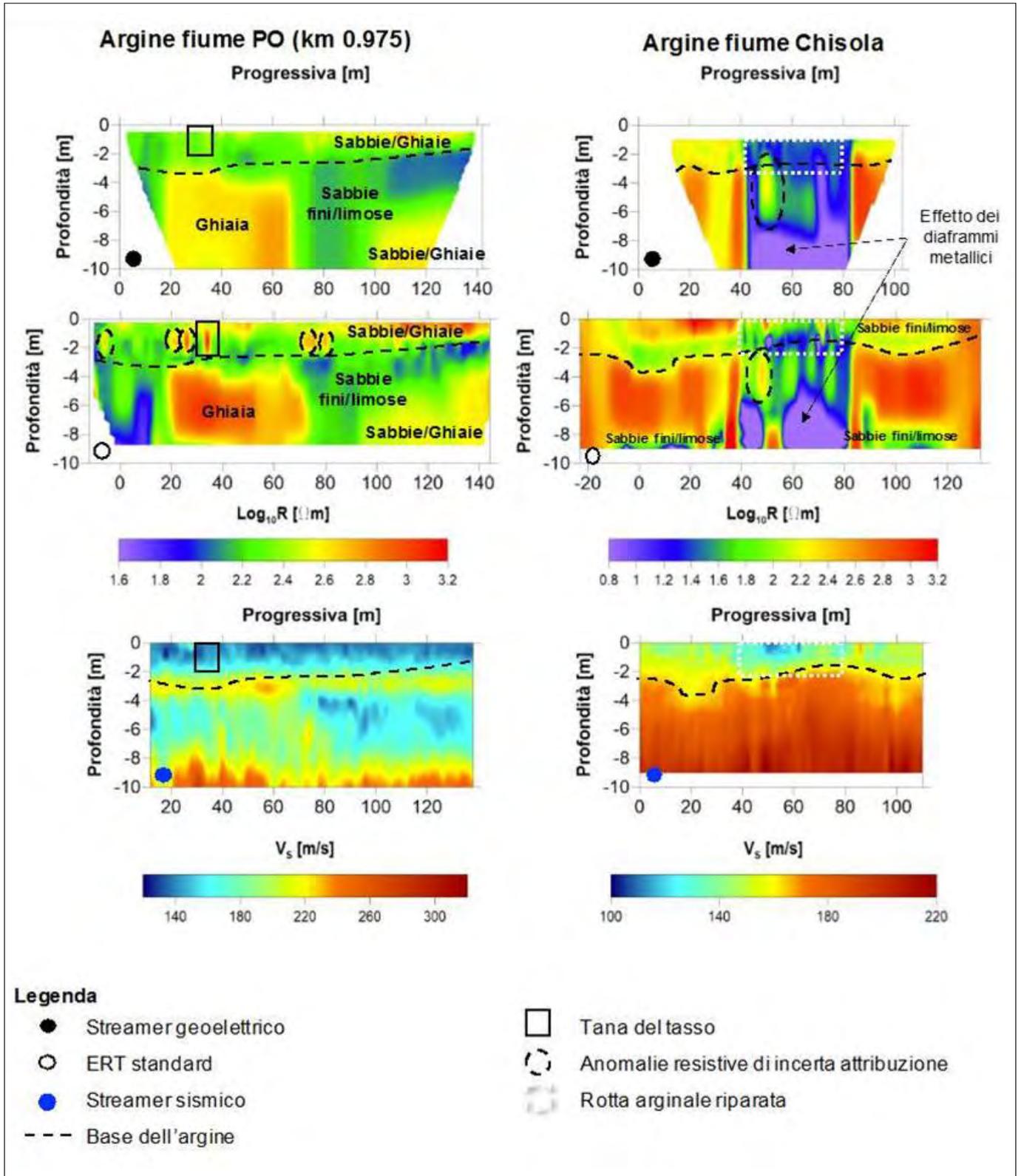


FIGURA 3. Modelli tomografici di resistività elettrica ottenuti mediante standard ERT (cerchio nero) e streamer geoelettrico (cerchio bianco) e profili sismici in onde S (cerchio blu) per i due casi studio analizzati.

L'analisi dell'argine sul fiume Chisola evidenzia il differente comportamento fisico-meccanico tra la zona riparata, caratterizzata da argille e limi, e la struttura arginale composta da sabbia limosa. Il rilevato arginale (al di fuori della zona riparata) è caratterizzato da uno strato con moderata velocità delle onde di taglio (circa 140 m/s) e resistività elettrica (circa 160 Ωm) con profondità non costante in quanto sembra approfondirsi fino a circa 4 m nella porzione sinistra. Questo andamento irregolare è pro-

tabilmente correlato ad una diversa rimozione del suolo di fondo al momento della sua costruzione. Il terreno di fondazione mostra un aumento delle VS (circa 200 m/s) e delle resistività (circa 550 Ωm) che riflette la sua natura sabbioso-ghiaiosa.

All'interno della zona interessata dai lavori di ripristino della rotta arginale, si evidenzia invece una netta variazione sia della velocità delle onde di taglio che della resistività. Nella sezione sismica, lo strato di rilevato superficiale risul-

ta caratterizzato da onde di taglio con V_s di circa 100 m/s. La zona riparata è caratterizzata da un'anomalia di bassa resistività elettrica (circa 40 Ω m) che si estende fino alla massima profondità di indagine. L'origine di questa ampia anomalia di bassa resistività può essere correlata, per la porzione superficiale, al diverso materiale di riempimento limo argilloso mentre, per la porzione più profonda, alla presenza di diaframmi metallici. In questa zona sono presenti anche anomalie locali ad alta resistività, attribuibili alla presenza di massi rocciosi utilizzati per la stabilizzazione dell'argine.

In entrambi i casi di studio indagati si osserva un'ottima corrispondenza tra i risultati ottenuti dalle ERT standard e quelli dalle ERT con streamer geoelettrico. Le indagini eseguite con lo streamer geoelettrico hanno però il grande vantaggio di una maggior copertura spaziale dei dati acquisiti e una notevole riduzione dei tempi di indagine. L'acquisizione dei dati sia sismici che geoelettrici tramite l'utilizzo degli streamer ha infatti richiesto circa mezza giornata lavorativa per le lunghezze indagate di entrambi gli argini.

5. CONCLUSIONI

Uno streamer sismico e uno elettrico sono stati sviluppati e utilizzati per la rapida ed efficiente caratterizzazione di strutture lineari in terra come gli argini fluviali. I risultati ottenuti dal nuovo streamer geoelettrico sono comparabili con quelli ricavati da metodi standard con il vantaggio di minori tempi di acquisizione e una maggior copertura spaziale dei dati.

Il sistema di misura adottato è versatile, in quanto la disposizione e spaziatura degli elettrodi e dei geofoni può essere adattata alle esigenze di indagine.

Inoltre, la simultanea acquisizione di dati sismici ed elettrici permette di ridurre le incertezze interpretative di un singolo metodo geofisico e potrebbe essere utilizzata per la stima di parametri geotecnici rilevanti quali la conducibilità idraulica o la porosità.

Infine, affidabilità interpretativa e tempistiche di indagine sono prerogative indispensabili per la localizzazione di anomalie idrauliche e possibili processi di instabilità in seguito ad eventi alluvionali per un'efficace gestione del rischio.

Ovviamente questa tipologia di analisi in movimento può essere adottata compatibilmente con le seguenti caratteristiche strutturali: i) presenza di tratti rettilinei o con elevati raggi di curvatura, ii) assenza o ridotto spessore del massetto stradale di copertura in materiale sciolto o cementato, iii) ridotto inerbimento della coltre superficiale dell'argine. Questi fattori potrebbero comportare errori di posizionamento e interpretazione dei risultati e aumentare le resistenze di contatto tra elettrodi e terreno con elevate incertezze di misura.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato finanziato da FINPIEMONTE all'interno dei POR FESR 14/20 "Poli di innovazione – Agenda Strategica di Ricerca 2016 – Linea B" per il progetto Mon.A.L.I.S.A.

REFERENZE

- ARATO A., NALDI M., VAI L., CHIAPPONE A., VAGNON F., COMINA C. (2020). *Towards a Seismo-Electric land streamer*. ISC2020-179, in: Proceedings of the 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Budapest, 7–11 September 2020.
- ARCHIE G.E. (2003). *The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics*, SPE Reprint Series n.55, pp. 9–16.
- COLLESELLI F. (2015). *Valutazione della stabilità e della sicurezza degli argini fluviali*, Proceedings Giornata della ricerca DICATAM.
- COMINA C., VAGNON F., ARATO A., FANTINI F., NALDI M. (2020). *A new electric streamer for the characterization of river embankments*, Engineering Geology n. 276.
- COMINA C., VAGNON F., ARATO A., ANTONIETTI A. (2020b). *Effective V_s and V_p characterization from Surface Waves streamer data along river embankments*, Journal of Applied Geophysics n. 183.
- DABAS M. (2008). *Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP*, 2011, Seeing the Unseen - Geo-physics and Landscape Archaeology, pp. 105-126.
- FOTI S., LAI C.G., RIX G.J., STROBBIA C. (2014). *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*, CRC Press.
- GUADAGNI A. (2010). *Prontuario dell'ingegnere (Nuova edizione riveduta e aggiornata)*: ISBN 978-88-203-4407-8
- KRAMER S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall.
- KURAS O., MELLDRUM P.I., BEAMISH D., OGILVY R.D., LALA D. (2007). *Capacitive resistivity imaging with towed arrays*, Journal of Environmental and Engineering Geophysics n. 12 (3), pp. 562 267-279.
- LOKE M.H., BARKER R.D. (1996). *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method*, Geophysical Prospecting n. 44(1): 131–152.
- SOCCO L.V., COMINA C., ANJOM F.K. (2017). *Time-average velocity estimation through surface-wave analysis: Part 1-s-wave velocity*, Geophysics n. 82(3): U49–U59.
- SORENSEN K. (1996). *Pulled array continuous electrical profiling*, First Break n. 14, pp. 85–90.
- UHELMANN S., KURAS O., RICHARDS L., NADEN E., POLYA D.A. (2017). *Electrical resistivity tomography determines the spatial distribution of clay layer thickness and aquifer vulnerability, Kandal Province, Cambodia*, Journal of Asian Earth Sciences n. 147, pp. 402-414.

INDICE DEGLI AUTORI

- A**
Acquaotta Fiorella 76
Agostoni Alberto 124
Alciati Luca 170
Arato Alessandro 11, 182
- B**
Bacenetti Marco 11
Barale Luca 25, 124
Barbero Diego 11
Barbero Secondo 17
Piera Benna 106
Davide Bernasconi 158
Bertok Carlo 25
Bonadio C. 17
Bona Francesca 33
Bonasera Mauro 38, 45, 86
Bonetto Sabrina 56, 106, 124
Borghi Alessandro 124, 151
Bormioli D. 17
Bosco F. 17
Bove Annalisa 10, 45, 62, 142
- C**
Campus Adele 76
Capodaglio Pietro 82
Capurso Nicolò 86
Caretto Andrea 175
Caselle Chiara 56
Caviglia Caterina 158
Chicco Jessica Maria 94
Colombero Chiara 101
Comina Cesare 56, 94, 101, 182
Coppola Diego 76
Corno Alberto 124
Costa Emanuele 106
Cozzula S. 17
Cucchi A. 17
- D**
d'Attri Anna 25, 151
De Bernardi Stefano 33
Deodato Angela 151
Destefanis Enrico 158
Di Martino Luca 170
Dino Giovanna Antonella 106
Doretto Alberto 33
- F**
Falasco Elisa 33
Faletto M. 17
Falletti P. 17
Favre Sara 115
Fenoglio Stefano 33
Ferrero Anna Maria 45, 118
Fossa Valeria 33
Fubelli Giandomenico 38, 45, 86
- G**
Gambino Francesca 124
Gerbaudo Andrea 175
Gianotti Franco 33
Giansetto Annalisa 33
Giardino Marco 33
Godio Alberto 101
Grisoli Massimo 33
Guglielmone Laura 33
- L**
Laiolo Marco 76
Lanteri L. 17
Lanza P. 17
Lasagna Manuela 33
Licata Michele 45
- M**
Mandrone Giuseppe 38, 94
Mariniello Annapaola 33
Martire Luca 25
Masciocco Luciano 10, 33, 45, 62, 129, 142
Miccolis Vito 33
Migliazza Maria Rita 118
Mingozzi Loïc Maurice 33
Moletta G. 17
Morino Luca 33
Mosca Pietro 124
Motta Luigi 135
Motta Michele 135
- N**
Naldi Mario 11, 182
Novello Marika 142
- P**
Palomba Mauro 33, 151
Parmeggiani Giorgia 33, 151
Paro Luca 17
Paschetto Arianna 106
Pastero Linda 158
Pavese Alessandro 9, 158
Perotti Luigi 33, 151
Piana Fabrizio 25
Prinzi Ilaria 17
- R**
Re Fiorentin G. 17
Ricca Giuseppe 170
- S**
Sassone Paolo 10, 162
Scalenghe S. 17
Simonetto Fulvio 82
Siniscalco Maria Consolata 33
Solero E. 17
Storta Elena 151
- T**
Taboni Battista 45
Tarabra M. 17
Targhetta Dur Diego 33
Tiranti Davide 17
Toja Maurizio 170
Tonon Marco Davide 175
- U**
Umili Gessica 45, 118
- V**
Vacha Damiano 38
Vagnon Federico 182
Varese Cristina 33
Vico Andrea 33
Viglietti D. 17
Vinciguerra Sergio Carmelo 101

La professione

Il geologo studia il pianeta Terra e i complessi fenomeni che regolano la sua evoluzione.

Queste competenze sono indispensabili non solo per affrontare correttamente lo studio dei problemi di gestione dell'ambiente e delle sue risorse, ma anche per prevedere e mitigare gli effetti dei rischi naturali.

Sbocchi lavorativi

Studiare Scienze Geologiche permette di diventare i "professionisti del Pianeta Terra", in grado di:

- ▶ reperire, caratterizzare e utilizzare nel modo corretto le risorse idriche, energetiche e minerarie;
- ▶ prevedere i rischi derivanti da eventi naturali (frane, inondazioni, eruzioni vulcaniche, terremoti) e da cause antropiche;
- ▶ collaborare alla progettazione delle grandi opere (strade, ferrovie, dighe, ponti, gallerie, ecc.) ed alla realizzazione degli interventi di bonifica e di difesa del territorio;
- ▶ effettuare indagini in sito e prove di laboratorio, realizzare cartografia geologica-tecnica a supporto della progettazione di opere civili e infrastrutture.

Il geologo può svolgere queste attività sia in società private o studi geologici e geologico-ingegneristici professionali, sia presso Enti pubblici e di Ricerca.

Info utili

📍 Dipartimento di Scienze della Terra
Via Valperga Caluso, 35 | Torino

- 🌐 geologia.campusnet.unito.it
- 🌐 www.scienzedellanatura.unito.it
- 🌐 www.dst.unito.it

✉ orientamento.scienzedellanatura@unito.it



f DstUniTo

📷 dst.unito

Università degli studi di Torino



Corso di Studi in Scienze Geologiche

LAUREA TRIENNALE 180 CFU

Le modalità di accesso sono descritte nel sito web del corso di laurea

1° ANNO = 60 CFU			
I semestre		II semestre	
Matematica	10	Fisica	10
Chimica	10	Paleontologia	9
Geografia fisica e geomorfologia	8	Geologia con laboratorio	10
Inglese	3		
	31		29

2° ANNO = 63 CFU			
I semestre		II semestre	
Geologia del sedimentario	8	Petrografia con laboratorio	11
Geologia strutturale	7	Geochimica	7
Informatica e GIS	5	Rilevamento geologico I	8
Mineralogia con laboratorio	11	Tettonica e geologia regionale	6
	31		32

3° ANNO = 56 CFU			
I semestre		II semestre	
Fisica terrestre	9	Rilevamento geologico II	7
Geologia applicata e principi di geotecnica	10	Insegnamento a scelta	6
Idrogeologia	6	Insegnamento a scelta	6
Geologia del Quaternario	6	Stage/altre attività	4
		Prova finale	3
	31		26

Insegnamenti a scelta proposti dal Corso di Laurea:

- ▶ Laboratorio di petrografia - 6 CFU
- ▶ Vulcanologia ed el. di geotermia - 6 CFU
- ▶ Lab. di micropaleontologia - 6 CFU
- ▶ Crescita cristallina - 6 CFU
- ▶ Lab. di geologia ambientale - 6 CFU
- ▶ Laboratorio di geomatica e GIS - 6 CFU
- ▶ Orogenesi - 6 CFU
- ▶ Laboratorio Mineralogia - 6 CFU

LAUREA MAGISTRALE 120 CFU

SCIENZE GEOLOGICHE APPLICATE

Sono previsti due indirizzi dove lo studente ha la possibilità di disegnare il percorso a lui più congeniale con grande libertà di scelta:

1. Georisorse e territorio (GT)

finalizzato a formare figure professionali che si occupano di cartografia geologica ed indagini geologiche connesse alla realizzazione di grandi opere, alla valorizzazione e alla gestione dei beni naturalistici e al reperimento delle georisorse non rinnovabili e dei geomateriali di interesse industriale e commerciale.

2. Geologia applicata all'ingegneria e all'ambiente (GAIA)

finalizzato a formare figure professionali che intendano operare nelle diverse applicazioni della Geologia e nell'analisi delle relazioni fra Ambiente e Uomo con capacità di intervenire per salvaguardare le risorse del nostro Pianeta, per prevedere e prevenire i rischi naturali e l'inquinamento, per pianificare il territorio, anche attraverso l'applicazione di Sistemi Informativi Territoriali e tecniche di telerilevamento.

Università degli studi di Torino



Corso di Studi in Scienze Geologiche

Sbocchi professionali

Al termine del biennio di studi, il Laureato Magistrale in 'MATER' disporrà di prospettive di impiego, espletando compiti ad elevato impatto decisionale nella valutazione, tutela e ripristino dei sistemi ambientali. Nel settore pubblico, egli potrà operare presso Ministeri (Ambiente, Sanità, Beni e Attività Culturali, Infrastrutture, Istruzione, Università e Ricerca), enti ed organismi nazionali/internazionali (Ag. per la Protezione dell'Ambiente e del Territorio e per i Servizi Tecnici, Ag. di Protezione Civile, Ag. Regionali per la Protezione dell'Ambiente, Istituto Superiore di Sanità, Stazioni Sperimentali) o enti territoriali (Regioni, Comuni e loro aggregazioni, Comunità Montane ed altri Enti Pubblici, in settori di gestione delle realtà ambientali complesse).



Nel settore privato, potrà trovare impiego presso aziende con compiti di organizzazione, valutazione, gestione e responsabilità su problematiche che comportino l'interazione tra le attività produttive ed i sistemi ambientali. Potrà, inoltre, avere accesso, secondo le vigenti modalità, alle procedure di abilitazione e concorsuali per l'insegnamento delle discipline scientifiche nelle

scuole medie e superiori. Infine, la Laurea Magistrale 'MATER' consente l'accesso al dottorato di ricerca, ai Master di secondo livello e alla libera professione. Per informazioni e contatti: Prof. Roberto GIUSTETTO (Presidente) Tel. 011 670.5122/roberto.giustetto@unito.it <https://www.monitoraggioambientale.unito.it/do/home.pl> SCIENZE INFORMA Corso Massimo d'Azeglio, 60/H Torino tel: 011 670.7921 Orario: Lunedì - Venerdì 9-12 e 13-16

Piano di studi

I ANNO	ORE	CFU	SSD
Chimica ambientale	48	6	CHIM/12
Sociologia dell'ambiente	56	6	SPS/10
Biomonitoraggio e gestione delle acque interne	56	6	BIO/07
Rischio geologico-ambientale e tutela delle acque sotterranee	116	12	GEO/04 GEO/05
Applicazioni micropaleontologiche al monitoraggio ambientale	60	6	GEO/01
Pedologia applicata	80	6	AGR/14
Mineralogia e geochimica ambientale	104	12	GEO/08 GEO/06 GEO/09
II ANNO	ORE	CFU	SSD
Piante e microorganismi per la sostenibilità ambientale e dei cicli produttivi	100	12	BIO/01 BIO/02
Fisica dell'ambiente atmosferico	48	6	FIS/07
Geomateriali e ambiente	48	6	GEO/07 GEO/09 GEO/04 GEO/05
GIS con laboratorio e impiego sostenibile delle fonti energetiche rinnovabili	104	10	GEO/04 GEO/05 BIO/03
Piante e ripristino ambientale	64	6	BIO/03
Corsi a scelta dello studente	8		
Tesi e tirocinio		24	

Il percorso formativo fornirà una solida preparazione scientifica nelle discipline fisiche, chimiche, geologiche e biologiche, finalizzata ad un'approfondita conoscenza delle problematiche inerenti la tutela ed il ripristino ambientale.




Corso di Laurea Magistrale in Monitoraggio Ambientale Tutela e Ripristino MATER



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TORINO**

IL LAUREATO MATeR: ESPERTO ANALISTA per la TUTELA E IL RIPRISTINO AMBIENTALE

L'elevato impatto che le attività antropiche esercitano sui sistemi naturali determina, nel tempo, profonde alterazioni, con conseguenze sulla gestione e produzione di beni/servizi e sui processi che ne controllano il funzionamento e l'efficienza. La 'sostenibilità ambientale' diventa quindi obiettivo fondamentale, derivante dall'adozione di un attento modello di gestione dell'ambiente e delle risorse, in una prospettiva di conservazione degli equilibri del sistema naturale. La figura di un Esperto Analista per la Tutela, Gestione e Ripristino Ambientale si rende necessaria nel quadro geografico italiano, caratterizzato da svariati contesti naturali (marino, costiero, pianeggiante, collinare, montuoso) cui si accompagna un'intensa attività di carattere rurale, urbanistica ed industriale. Il Corso di Laurea Magistrale 'MATER' si propone di formare lo studente nell'analisi sistemica degli ambienti naturali, con particolare attenzione alle complesse interazioni funzionali tra le diverse componenti abiotiche, biotiche ed antropiche. Le attività della Laurea Magistrale 'MATER' si concen-



treranno sull'acquisizione e sviluppo, da parte dello studente, di quelle conoscenze specifiche relative alle problematiche della gestione e ripristino della qualità dell'ambiente e della sostenibilità dell'utilizzo delle risorse naturali, quali: **a) analisi e gestione delle risorse ambientali e del territorio; b) controllo strumentale della qualità dell'ambiente; c) conservazione e valorizzazione del patrimonio naturale; d) recupero e ripristino delle funzionalità sistemiche dell'ambiente; e) ottimizzazione della gestione dei processi e dell'uso delle risorse.**

Come si accede?



L'ammissione al Corso di Laurea Magistrale 'MATER' richiede il possesso di idonee competenze disciplinari, declinate in funzione degli obiettivi formativi specifici. Tali competenze attengono agli ambiti delle discipline matematiche, fisiche, chimiche, informatiche e statistiche, biologiche, ecologiche e geologiche caratteristiche dei Corsi di Laurea Triennale delle classi L-32 (ex D.M. 270/04) o L-27 (Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e la Natura; ex D.M. 509/1999). Qualora in possesso di altro titolo di Laurea Triennale, il candidato dovrà acquisire i necessari requisiti prima di effettuare l'iscrizione.

Competenze acquisite

Il Laureato Magistrale in 'MATER' sarà in grado di:

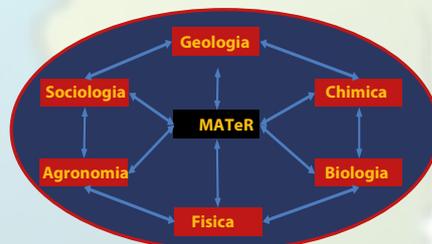
- elaborare un approccio sistemico nella osservazione di problematiche di degrado e ripristino ambien-

tale e gestione del territorio, che prenda in considerazione le diverse componenti del sistema (biotiche, abiotiche, antropiche) e le complesse interazioni che le caratterizzano;

- valutare e mitigare i rischi connessi a fenomeni geologici, quali terremoti, frane e alluvioni, al fine di una corretta pianificazione territoriale;
- riconoscere e valutare l'impatto degli agenti inquinanti, minerali e chimici, in diversi contesti ambientali (marino, continentale, atmosferico);

- valutare il grado di aree sottoposte a degrado ambientale e suggerirne le modalità di ripristino;

- comprendere l'impatto e le conseguenze ambientali dei cambiamenti climatici;



- suggerire scelte operative riguardo la gestione sostenibile delle risorse necessarie allo sviluppo economico (materiali, acque sotterranee e superficiali, suolo, rinnovabili);

- conoscere e operare all'interno del quadro normativo ambientale;

- comprendere l'impatto delle tematiche ambientali sulla società e sulle dinamiche economiche.

Dissesti geologici, frane, crepe, cedimenti e problemi strutturali di edifici o terreni ?

GE.AR. con oltre sessant'anni di esperienza e migliaia di interventi effettuati e garantiti **indaga, consiglia e, se necessario, consolida** fabbricati, opere edili e terreni con competenza certificata e adottando i migliori sistemi e mezzi all'avanguardia.

Collaboriamo, ci confrontiamo e aiutiamo i tecnici nella risoluzione di problematiche geologico-tecniche; numerosi sono i geologi che ci affidano le loro indagini geognostiche e geofisiche.

Facciamo anche il Noleggio a caldo di perforatrici, penetrometri e apparecchiature per indagini geognostiche e geofisiche.

SETTORE GEOGNOSTICA-GEOTECNICA-IDROGEOLOGIA

Siamo in grado di effettuare ogni tipologia di indagini dirette ed indirette:

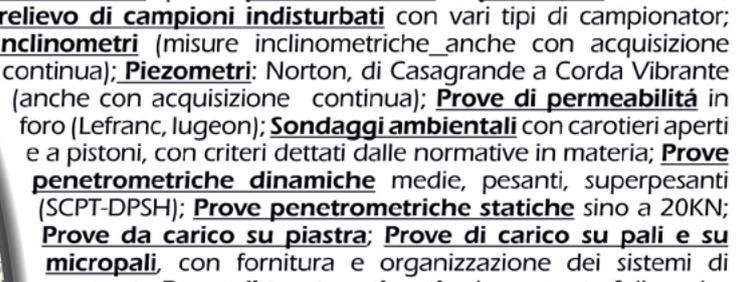
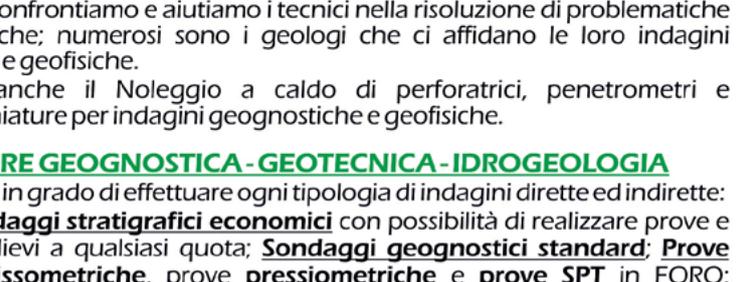
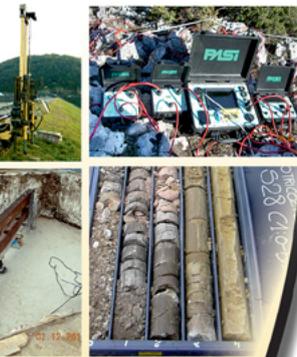
Sondaggi stratigrafici economici con possibilità di realizzare prove e prelievi a qualsiasi quota; **Sondaggi geognostici standard**; **Prove scissometriche**, prove **pressiometriche** e **prove SPT** in FORO; **Prelievo di campioni indisturbati** con vari tipi di campionatori; **Inclinometri** (misure inclinometriche anche con acquisizione continua); **Piezometri**: Norton, di Casagrande a Corda Vibrante (anche con acquisizione continua); **Prove di permeabilità** in foro (Lefranc, lugeon); **Sondaggi ambientali** con carotieri aperti e a pistoni, con criteri dettati dalle normative in materia; **Prove penetrometriche dinamiche** medie, pesanti, superpesanti (SCPT-DPSH); **Prove penetrometriche statiche** sino a 20KN; **Prove da carico su piastra**; **Prove di carico su pali e su micropali**, con fornitura e organizzazione dei sistemi di contrasto **Prove di tesatura tiranti**, a barre e a trefoli, anche con celle carico; **Prove di pompaggio su pozzi** acquiferi.

SETTORE GEOFISICA: **Indagini Geoelettriche** 2d e 3d tomografie elettriche; **Prove Sismiche** a rifrazione; **Down hole**; **Cross hole**; **Tomografie sismiche**; **MASW**.

SETTORE CONSOLIDAMENTO EDIFICI E TERRENI INGEGNERIA NATURALISTICA

Consolidamenti di opere murarie, strutture lesionate e pareti di roccia degradata. Specialisti nell'esecuzione e messa in opera di PALI di medio e grande diametro all'interno degli edifici ed in siti molto angusti. **Iniezioni di RESINE** e **MALTE CEMENTIZIE**, **GUNITI**, **SPRITZ BETON** per consolidamenti e impermeabilizzazioni. Interventi di INGEGNERIA NATURALISTICA.

PALI da Ø250mm a 1.200mm; **MICROPALI** da Ø60mm a 300mm; **Paratie tirantate**; **TIRANTI**, a trefoli e a barre; **CATENE**; **Chiodature Carotaggi** e tiranti nelle murature con **carotatrici al diamante** sino a 25metri prof.; **Perforazioni orizzontali**; **Dreni** verticali e sub-orizzontali; **Gabbionate**; **Reti antierosione**; **Reti strutturali**; **Geostuie**; **Idrosemine**.



European Foundations Members



Cat. SOA: - OS21 - OS20-B



ACCREDITA



kiwa



Sistema di Gestione Qualità UNI EN ISO 9001:2015



ASSOCIAZIONE IMPRESE E FONDAZIONI centrali/territoriali indagini nel sottosuolo

Strada Calvese, 20 - 05035 NARNI (TR)

Tel. **0744 79.68.84** Fax **0744 03.46.00**

e-mail: **info@ge-ar.it** - sito web: **www.ge-ar.it**

GE.AR. sas

Consolidamenti
di **ARCANGELI Giorgio**

grafica Stefano Arcangeli



Via Bulgarini 125, 00019 Tivoli (Roma)

+39 340 5236660

info@fralerighe.it

www.fralerighe.it

FRALERIGHE BOOK FARM

EDITORIA | WEB | MULTIMEDIA

Fralerighe Book Farm è un service editoriale che mette competenza e professionalità al servizio di chi pubblica e scrive. Per gli editori e per gli autori, **Fralerighe Book Farm** è specializzato nella cura redazionale dei testi, con l'obiettivo di mettere la tecnologia a disposizione del libro, seguendo tutta la filiera di lavorazione testuale e grafica della stampa e del digitale sfruttando al meglio le potenzialità di ciascun supporto, dall'editing all'impaginazione, senza tralasciare la correzione di bozze e la traduzione.

La **redazione** e l'**ufficio grafico** offrono i seguenti servizi sia per volumi sia per riviste:



Progettazione e impaginazione di libri, riviste, cataloghi di qualsiasi formato e tipologia. Servizi per le case editrici, definizione linea editoriale, estensioni multimediali di libri cartacei, ideazione e impostazione grafica, redazione dei contenuti



Realizzazione ebook professionali pronti per essere pubblicati, acquistati e letti



Web design, sviluppo siti internet, portali, blog, e-commerce



Creazione di logo/branding, corporate identity, restyling di loghi e siti internet, creazione di layout landing page



Soluzioni web, consulenza tecnica, gestione dominio



Creazione e gestione di newsletter



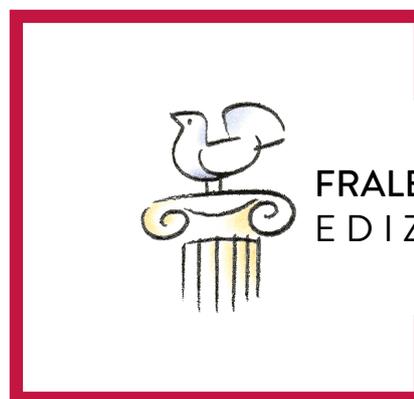
Ideazione e realizzazione di campagne promozionali, email marketing, banner, brochure, flyers, spot pubblicitari



Comunicazione digitale e Social Media Strategy per la creazione, la crescita e la cura della community e del pubblico di riferimento dell'azienda



Servizi SEO, posizionamento nei motori di ricerca



FRALERIGHE
EDIZIONI

“LA MACCHINA TECNOLOGICAMENTE PIÙ EFFICIENTE CHE L'UOMO ABBA MAI INVENTATO È IL LIBRO”
[NORTHROP FRYE]

Fralerighe Edizioni è una casa editrice indipendente, interculturale e sociale che vuole essere laboratorio di incontri e di sperimentazione per contribuire alla costruzione di una società plurale equa e positiva. Nasce valorizzando le nuove forme di pubblicazione tra la carta e il digitale, dal libro tradizionale a quello formativo denominato mediabook. La linea editoriale è caratterizzata da argomenti di rilevanza sociale attraverso le collane dedicate:

- Fralerighe eBook
- GiraMondo
- LabCult
- Luoghi Tradizioni Relazioni
- MeltingPot
- Poesia
- Narrativa
- Teatro
- Guide Geoaologiche d'Italia

Il secondo volume che la Società Italiana di Geologia Ambientale (SIGEA) – APS pubblica nella collana “Monografie di Geologia Ambientale” è stato realizzato in vista della prossima costituzione della nuova Sezione interregionale Piemonte – Valle d’Aosta e pertanto è stato opportunamente intitolato *Geologia Ambientale in Piemonte e Valle d’Aosta*. In linea generale, si è cercato di coprire, con esempi presi nelle due regioni, gli argomenti contemplati nelle Aree tematiche della SIGEA – APS: Geoarcheologia, Rischio geo-idrologico, Patrimonio geologico e geodiversità, Bonifica siti inquinati, Educazione Ambientale, Aree protette ed ecoregioni, Rischio climatico, Contratti di fiume, Sviluppo sostenibile. È stato comunque accettato per il referaggio qualsiasi altro tema riguardante la Geologia Ambientale. Ad esempio, in uno degli articoli pubblicati si descrive il progetto di Public Engagement di UniTO “Percorsi sostenibili”, che ha finanziato anche la pubblicazione del presente volume. Per la presentazione ufficiale del volume, si sta organizzando un convegno a Torino in collaborazione col Dipartimento di Scienze della Terra dell’Università di Torino e con gli Ordini Regionali dei Geologi del Piemonte e della Valle d’Aosta, in occasione del quale ci sarà la costituzione della Sezione interregionale Piemonte – Valle d’Aosta della SIGEA – APS.

ANNALISA BOVE. Nata a Bra (CN) il 31/01/1975. Geologo libero professionista, con Studio in Alba (CN), dopo avere conseguito la Laurea in Scienze Geologiche presso l’Università di Torino, si occupa principalmente di Geologia Ambientale, Geologia Applicata e Geotecnica. È membro di commissioni tecnico-edilizie comunali e Consigliere Generale della Fondazione Cassa di Risparmio di Cuneo. Svolge attività di ricerca sulla pericolosità geo-idrologica, tutela e valorizzazione del paesaggio, gestione delle risorse ambientali e sviluppo sostenibile-ambientale, riassunte in oltre 30 pubblicazioni scientifiche.

LUCIANO MASCIOTTO. Nato a Roma il 12/12/1957. Laureato con lode in Scienze Geologiche presso l’Università di Torino. Ricercatore confermato e Professore Aggregato di Geologia Ambientale presso l’Università di Torino, svolge attività di ricerca sulla pericolosità geomorfologica e sulla salvaguardia delle risorse idriche. I risultati della ricerca sono sintetizzati in oltre 160 pubblicazioni. Per la SIGEA – APS ricopre attualmente i ruoli di Consigliere Nazionale nonché Referente dell’Area tematica Rischio geo-idrologico.

PAOLO SASSONE. Nato a Casale Monferrato (AL) il 13/10/1964. Laureato all’università di Torino con tesi di Rilevamento geologico e Geologia del Quaternario dell’Alta valle Tanaro; diplomato presso l’Istituto Marconi per Periti minerari di Domodossola e specializzato in ingegneria mineraria presso il Politecnico di Torino. Libero professionista e geologo applicato autore di numerose pubblicazioni su temi di pianificazione, idrogeologia, geologia del Quaternario, cave e miniere, geoturismo. È stato designato da SIGEA – APS come Referente per l’area Piemonte e Valle d’Aosta.

