

Università degli Studi dell'Insubria
Sede di Como
Dottorato di Ricerca in Scienze Ambientali, XXV ciclo

**Analisi e modellazione dei fattori geologico –
ambientali nella localizzazione dei siti industriali:
il caso del bacino Padano**

Candidata: Dott.ssa M. Francesca Ferrario
Relatore: Prof. Alessandro M. Michetti
Correlatore: Dott. Fabio Brunamonte

Gennaio 2013

A mia madre

Indice

1. Introduzione.....	1
2. Inquadramento metodologico e concettuale.....	4
3. Obiettivi della ricerca	8
3.1. Metodi di indagine	8
3.2. Aree di studio.....	8
3.3. Fasi della ricerca.....	11
4. Inquadramento regionale.....	15
4.1. Il sistema Alpi Meridionali – Appennino Settentrionale	15
4.2. Sismotettonica.....	18
4.3. Evoluzione ambientale recente: variazioni climatiche e reticolo idrografico.....	19
5. Impianto “La Filippa”	22
5.1. Tipo di impianto e contesto ambientale	22
5.1.1. Inquadramento territoriale.....	24
5.1.1.1. Elementi meteo-climatici	27
5.1.1.2. Inquadramento geologico e strutturale	29
5.1.1.3. Inquadramento sismotettonico.....	30
5.1.1.4. Geomorfologia ed evoluzione ambientale recente	32
5.1.1.5. Idrologia e idrogeologia.....	34
5.2. Dati sperimentali: verifica sitologica	37
5.2.1. Rilevamenti in campo.....	37
5.2.2. Campagna geognostica	40
5.2.3. Indagine geofisica.....	44
5.2.4. Assetto idrogeologico locale.....	45
5.2.5. Monitoraggio strumentale	49
5.2.5.1. Monitoraggio piezometrico.....	49
5.2.5.2. Monitoraggio inclinometrico e stabilità dei versanti	51
5.3. Dati sperimentali: caratterizzazione proprietà rifiuti.....	54
5.3.1. Classificazione e analisi dei flussi di rifiuti.....	55
5.3.2. Caratterizzazione dei materiali in ingresso.....	59
5.3.2.1. Peso di volume	60
5.3.2.2. Contenuto in acqua	62
5.3.2.3. Analisi granulometriche	64
5.3.3. Rifiuti depositati in cumulo.....	66
5.3.3.1. Modalità di abbancamento e compattazione	66
5.3.3.2. Verifica dell’addensamento raggiunto nel cumulo	67
5.3.3.3. Prove di carico su piastra.....	69

5.3.4. Evoluzione del cumulo dei rifiuti	71
5.3.4.1. Verifiche di stabilità	73
5.3.4.2. Cedimenti del cumulo dei rifiuti.....	74
5.4. Risultati	83
5.4.1. Evoluzione geologica dell'area	83
5.4.2. Valutazione sitologica	85
6. Area urbana di Como.....	88
6.1. Tipo di impianto e contesto ambientale	88
6.1.1. Inquadramento territoriale.....	91
6.1.1.1. Elementi meteo-climatici	92
6.1.1.2. Inquadramento geologico e strutturale	96
6.1.1.3. Inquadramento sismotettonico ed evidenze paleosismiche.....	98
6.1.1.4. Geomorfologia ed evoluzione ambientale recente	101
6.1.1.5. Idrologia, idrogeologia e regolazione del Lago	102
6.2. La convalle di Como	104
6.2.1. Stratigrafia.....	104
6.2.2. Idrogeologia	106
6.2.3. Il fenomeno della subsidenza.....	107
6.3. Dati sperimentali	109
6.3.1. Dati stratigrafici e geotecnici	109
6.3.1.1. I sondaggi di Piazza Verdi: risultati delle analisi multidisciplinari	111
6.3.1.2. Profili stratigrafici e geologico-tecnici	117
6.3.2. Dati idrogeologici.....	124
6.3.3. Interazioni tra le opere di difesa dalle esondazioni e l'ambiente naturale ed urbano.....	131
6.4. Evoluzione paleo-ambientale.....	137
6.4.1. Datazioni radiometriche e tassi di sedimentazione.....	137
6.4.2. Definizione degli ambienti deposizionali ed elaborazione dei dati stratigrafici	142
6.4.3. Ricostruzione dell'evoluzione ambientale tardo-quadernaria dell'area comasca	147
7. Conclusioni.....	150
8. Bibliografia	154
Allegati.....	167
Ringraziamenti	168

1. Introduzione

Il presente progetto di ricerca nasce dalla collaborazione tra Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia dell'Università dell'Insubria e LPL (Ligure Piemontese Laterizi S.p.A.), un'azienda operante nella produzione di laterizi e nella gestione di una discarica di rifiuti non pericolosi (impianto "La Filippa") nel comune di Cairo Montenotte (Sv).

La collaborazione tecnico-scientifica tra i due soggetti è iniziata nella fase di realizzazione dell'impianto, tramite l'esecuzione, da parte dell'Università, di analisi geositologiche ed ambientali. Le ricerche si sono poi indirizzate verso lo sviluppo di indagini finalizzate ad esaminare gli aspetti metodologici ed operativi per assicurare la corretta localizzazione e gestione di attività industriali ed antropiche in un contesto ambientale complesso come quello della Pianura Padana; a tale scopo è stato attivato il presente progetto di Dottorato di ricerca triennale, volto ad individuare approcci innovativi e sempre più accurati per la gestione di impianti industriali e aree metropolitane.

Si è quindi deciso di operare un confronto tra due aree campione con caratteristiche differenti ma entrambe appartenenti al bacino padano, applicando le medesime metodologie analitiche in contesti naturali e antropici diversi. Le aree di studio (cfr. § 3.2) sono rappresentate dall'impianto "La Filippa", con ricerche concentrate su un singolo impianto industriale, nello specifico costituito da una discarica di rifiuti non pericolosi, e l'area urbana di Como, dove si è operata una valutazione estesa ad un'intera città di elevata valenza storico-artistica; inoltre, nell'area di Como, già da tempo oggetto di studio da parte dell'Università dell'Insubria, sono in corso di realizzazione delle opere per la difesa dalle esondazioni del Lario.

L'approccio metodologico adottato è quello della sitologia, utilizzato ad esempio per la localizzazione di impianti nucleari e codificato in una serie di guide per la sicurezza, che valuta tutte le componenti coinvolte nella localizzazione di un impianto, comprendendo indagini sull'ambiente fisico e considerazioni di ordine demografico, socio-culturale ed economico. La presente trattazione si limita alla valutazione delle componenti ambientali, mirando quindi ad identificare e caratterizzare le interazioni tra impianto e ambiente naturale.

Ogni impianto o opera antropica, qualunque sia la sua tipologia e funzionalità, si innesta necessariamente in un contesto ambientale preesistente, plasmato essenzialmente dagli eventi naturali "estremi" avvenuti nel passato. Gli eventi naturali qui indicati come estremi sono quelli relativamente rari, caratterizzati da tempi di ritorno su scala secolare, ma che sono in grado di modificare la geografia e la fisionomia di intere regioni, e quindi di modellare l'evoluzione recente del paesaggio. Lo studio e la conoscenza dettagliata dell'ambiente naturale e del contesto territoriale in cui si inserisce un'attività antropica sono presupposti indispensabili per valutare l'entità degli episodi "critici", che corrispondono ai massimi livelli attendibili e sono caratterizzati da lunghi tempi di ritorno. In queste valutazioni, deve essere adottata una logica di anticipazione degli eventi, in modo da poterli adeguatamente affrontare, scegliendo le soluzioni progettuali più opportune per annullare o mitigare al massimo le criticità.

L'analisi preventiva delle possibili interazioni tra opera e ambiente geologico, e quindi il processo che porta alla scelta della localizzazione di un impianto industriale, è un percorso complesso, che richiede la valutazione di molti fattori afferenti a diverse discipline e interessi: oltre alle tematiche ambientali, sono infatti da tenere in considerazione aspetti sociali, economici e industriali. In tale processo, i fattori geologici e ambientali giocano un ruolo determinante, ad esempio per quanto riguarda le problematiche relative alla

sicurezza dell'impianto e alla prevenzione dei fenomeni di contaminazione che possono potenzialmente ricadere sul territorio; il livello di approfondimento degli studi sito-specifici è quindi definito in base alla tipologia di impianto e all'entità del rischio, ricordando che i requisiti di sicurezza richiesti dagli impianti industriali implicano l'adozione di ipotesi cautelative.

Il carattere irrimediabilmente limitato della conoscenza dei processi naturali è frutto della loro variabilità intrinseca: spesso, i parametri che descrivono i fenomeni naturali variano di oltre 10 ordini di grandezza, consentendo di fatto soltanto una stima approssimata dell'entità dei rischi e rendendo pertanto estremamente difficile una definizione in termini ingegneristici dei parametri di progetto. Idealmente, il rischio non dovrebbe tuttavia essere né sottostimato, perché questo causerebbe carenze nelle misure di preparazione e mitigazione, né sovrastimato, portando allo spreco di risorse.

Inoltre, è necessario valutare anche il nesso di causalità e l'effetto domino che si può stabilire tra diversi eventi e che ne amplifica le conseguenze: uno degli esempi più evidenti è rappresentato dagli *tsunami* che si generano in seguito a terremoti.

Mentre la variabilità ordinaria dei parametri ambientali può essere descritta mediante i valori medi, nel caso degli eventi critici, e quindi per la definizione delle sollecitazioni massime attese nel sito, è invece indispensabile identificare i valori estremi; pertanto, è necessario analizzare un intervallo temporale rappresentativo e quindi adeguatamente esteso e continuo.

I rischi geologici fanno parte della categoria dei rischi naturali e sono definiti dalla ISDR (*International Strategy for Disaster Reduction*, ufficio delle Nazioni Unite per la riduzione dei rischi derivanti da fenomeni naturali; <http://www.unisdr.org/we/inform/terminology>) come quei processi o fenomeni geologici che possono causare perdita di vite, impatti sulla salute e danni di natura economica, sociale e ambientale; essi includono processi di origine tettonica interni alla Terra (terremoti, attività ed emissioni vulcaniche) e processi superficiali correlati quali frane e *debris flow*.

Il rischio è definito dal prodotto della pericolosità per la vulnerabilità e per il valore esposto. La stima di questi parametri implica un'analisi delle sorgenti di rischio (localizzazione, intensità, tempi di ritorno) e dell'esposizione, includendo considerazioni su uso del territorio, strutture degli edifici, risposta della popolazione agli eventi estremi e considerazioni di tipo culturale, religioso e politico in senso lato.

La gestione del rischio, ed in particolare di quello relativo ai processi naturali, si pone l'obiettivo di implementare le strategie e le capacità della società di ridurre l'impatto dei fattori di rischio; tale scopo viene perseguito mediante misure, strutturali e non, volte ad evitare (prevenzione) o limitare (mitigazione) gli effetti avversi. Il livello di rischio accettabile rappresenta un parametro estremamente significativo nella localizzazione degli impianti industriali e delle attività antropiche, in quanto orienta, dal punto di vista ingegneristico, l'adozione delle misure atte alla diminuzione dei possibili danni a persone, proprietà e beni, fino ad un livello considerato tollerabile. Tale valore, necessariamente maggiore di zero, poiché nessuna area è sicura "in assoluto" rispetto a qualsiasi fenomeno naturale, è frutto della situazione sociale ed ambientale locale, e varia fortemente nello spazio e nel tempo. Il grado di sicurezza a cui deve essere soggetto un edificio è funzione dell'attività svolta: costruzioni generiche hanno un tempo di vita quantificabile in circa $50 \div 100$ anni, invece nel caso di impianti ad alto rischio tale parametro deve essere aumentato di un ordine di grandezza.

La possibilità di ridurre il rischio complessivo è legata alla diminuzione della vulnerabilità e del valore esposto, fattori che sono direttamente nella sfera di controllo umana; invece, la pericolosità può in alcuni casi

essere predetta, ma non diminuita mediante la riduzione della probabilità di accadimento di un evento naturale. Non si può tuttavia dimenticare che nei processi naturali sia endogeni che esogeni il passaggio da uno stato ordinario a condizioni estreme avviene frequentemente con notevole rapidità, rendendo quindi problematica, se non impossibile, l'adozione di provvedimenti di riduzione della vulnerabilità nel corso dell'evento.

Di conseguenza, comprendere e gestire la vulnerabilità rappresenta la chiave per esercitare una forma, seppur parziale, di controllo sull'ambiente e sul costruito e per ridurre gli impatti degli eventi ambientali estremi. Questo obiettivo deve essere raggiunto mediante l'educazione della popolazione, la costruzione di una diffusa consapevolezza sulle caratteristiche dell'ambiente naturale e l'aumento della resilienza (IGOS, 2004). Tuttavia, l'aumento dell'urbanizzazione e il sovrappopolamento causano l'esposizione di una sempre maggior quantità di persone, impianti industriali e infrastrutture ai rischi naturali, in particolare nei Paesi in via di sviluppo, spesso poco attrezzati per affrontare tali emergenze.

Secondo la stima fornita dal CRED (*Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*) nel database EM-DAT, nel periodo 1900 ÷ 2012 si sono registrati circa 11 milioni di decessi a causa di eventi naturali di origine geofisica, idrologica e meteorologica (EM-DAT, 2012); questo dato rafforza ulteriormente la necessità di sviluppare una gestione del rischio il più accurata possibile.

2. Inquadramento metodologico e concettuale

La geositologia è quella scienza che si occupa della localizzazione geografica di impianti e attività economiche; storicamente, uno dei contributi fondamentali per lo sviluppo della materia deriva da Alfred Weber (Weber, 1909), che per primo costruì un modello matematico per identificare la localizzazione ottimale di impianti manifatturieri. In generale, l'approccio geositologico è utile per la localizzazione di qualunque tipologia di impianto o attività antropica; tuttavia, particolare attenzione viene posta nel caso di impianti critici e grandi opere ad alto rischio. Per impianto critico si intende una struttura o impianto tecnologico essenziale per il funzionamento della società, sia in condizioni ordinarie che in circostanze di emergenza; fanno parte di questa categoria centrali di produzione di energia elettrica, grandi vie di comunicazione e stazioni delle forze dell'ordine (ISDR). Le opere ad elevato rischio invece comprendono raffinerie, impianti di stoccaggio di materiali radioattivi o pericolosi, dighe, discariche.

L'approccio geositologico può essere esteso anche a intere città o aree urbane, viste come l'unione di più impianti o attività di interesse economico localizzate all'interno dello stesso contesto territoriale; in questo caso non si ha a che fare con la realizzazione di un impianto *ex-novo*, come usualmente accade negli studi sitologici, ma con l'analisi dei caratteri ambientali peculiari di una data zona, al fine di identificare le potenziali criticità e suggerire gli accorgimenti più opportuni per limitarne i danni. Infatti, una pianificazione, progettazione e gestione sostenibile delle regioni urbane è legata alla comprensione di cause, tempi e impatti dei fattori ambientali e del processo stesso di urbanizzazione.

La localizzazione di un nuovo impianto tra altri già esistenti è un problema strategico che solitamente coinvolge numerosi soggetti e obiettivi, non sempre facilmente quantificabili. La soluzione ideale, che ottimizza contemporaneamente tutti gli obiettivi, generalmente non è raggiungibile; la scelta finale rappresenta una soluzione efficiente, in cui nessun obiettivo può essere migliorato senza un simultaneo peggioramento di altri obiettivi. Nel corso del tempo, sono stati proposti e sviluppati numerosi modelli e algoritmi (per una recente sintesi, si veda la revisione di Faharani *et al.*, 2010); tali modelli, inizialmente focalizzati su criteri economici, hanno poi coinvolto anche fattori ambientali e sociali, quali costo energetico, uso del suolo, qualità della vita o inquinamento. In questo caso, l'obiettivo ideale è quello di integrare nello stesso processo decisionale considerazioni di ordine ambientale, sociale ed economico.

Le analisi sitologiche sono essenziali per la localizzazione di impianti nucleari: la IAEA (*International Atomic Energy Agency*), ente preposto a stabilire standard di sicurezza per tali impianti e a valutarne l'applicazione, ha redatto una serie di guide in cui vengono fornite le indicazioni necessarie per assicurare che la combinazione sito-impianto non costituisca un rischio inaccettabile per tutta la durata di vita dell'impianto. Lo stesso approccio metodologico può essere applicato anche in caso di impianti meno sofisticati e pericolosi rispetto a quelli nucleari, con l'unica differenza che i requisiti minimi saranno meno stringenti.

Il processo di valutazione per la localizzazione di un sito può essere suddiviso in tre fasi (IAEA, 2002):

- analisi regionale e identificazione di siti potenziali;
- valutazione dei siti e selezione dei siti candidati;
- comparazione dei siti candidati.

In ciascuna di queste fasi possono essere identificate caratteristiche peculiari che portano all'esclusione dei siti, in genere poiché non esistono soluzioni ingegneristiche adeguate per contenere i potenziali effetti negativi o queste hanno costi proibitivi.

La valutazione delle condizioni locali e dei fattori non esclusivi, che vengono soppesati sulla base della loro importanza relativa, permette di comparare i siti candidati e di classificarli per stabilire la localizzazione reale dell'impianto.

L'analisi geositologica si sviluppa a partire da un modello concettuale della realtà fisica, a sua volta basato su alcuni assiomi, e permette di definire i caratteri peculiari del territorio e i fenomeni naturali connessi.

Postulati epistemologici basilari per l'analisi geositologica sono la diretta connessione tra attività tettonica e sismica e la stabilità dell'assetto geologico e delle dinamiche tettoniche regionali, per un tempo almeno equivalente alla durata di esercizio e post-gestione dell'impianto (Serva, 1990); l'accettazione di questa ipotesi risulta ragionevole poiché i tempi di vita di un impianto industriale sono decisamente limitati se confrontati con le scale dei tempi che tipicamente caratterizzano le variazioni dell'assetto strutturale o del reticolo idrografico di una regione. Il concetto di stabilità sottintende il fatto che non esistano problemi o effetti conseguenti all'assetto geologico o al verificarsi di fenomeni naturali o indotti dall'antropizzazione, oppure che questi siano risolvibili con soluzioni ingegneristiche.

Le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (Decreto Ministero Infrastrutture, NTC, 2008) richiedono la *“caratterizzazione e modellazione geologica del sito”*, ovvero di definire un modello geologico di riferimento, strumento indispensabile per una corretta valutazione delle interazioni tra sito ed opera. Questo modello, che deriva dall'acquisizione ed elaborazione di dati geomorfologici, geologici, geognostici, geofisici ed idrogeologici, rappresenta la ricostruzione concettuale della configurazione spaziale e della successione temporale dei processi che improntano l'assetto e l'evoluzione, in atto o potenziale, del tratto di ambiente fisico in esame. L'analisi integrata del complesso dei dati emersi, finalizzata all'elaborazione di uno schema interpretativo del territorio, consente di inserire in un unico quadro conoscitivo tutti gli elementi geognostici, geotecnici ed idrogeologici di interesse progettuale. Questo quadro costituisce il modello geotecnico di riferimento, in grado di descrivere in modo adeguato la struttura dell'area di progetto con riferimento specifico alle condizioni al contorno di interesse per il mantenimento in sicurezza dell'impianto. Infatti, in accordo alle NTC, la progettazione di un'opera deve essere condotta in relazione agli stati limite che si possono verificare durante la sua vita nominale, cioè le condizioni superate le quali l'opera non soddisfa più le esigenze per le quali è stata progettata; è quindi necessario valutare innanzitutto le criticità associate alle diverse tipologie di stati limite.

Le ricerche per la definizione del modello di riferimento vengono condotte su varie scale spaziali, partendo da un inquadramento regionale di area vasta e aumentando sempre più il dettaglio delle informazioni fino ad arrivare alla scala del sito. Un esempio della variabilità di scala di approccio è fornito, con riferimento alla pericolosità derivante dal possibile verificarsi di fagliazione superficiale nell'intorno significativo del sito, dalle linee guida della IAEA (2002; 2010) elaborate per la localizzazione degli impianti nucleari, che definiscono le seguenti aree di indagine:

- **Regional:** area di circa 150 km di raggio intorno all'impianto; indagini finalizzate all'acquisizione delle conoscenze rispetto all'assetto geodinamico della regione e alla caratterizzazione delle strutture geologiche che possono influenzare il rischio sismico del sito.

- **Near regional:** 25 km di raggio dal sito; indagini mirate a definire più in dettaglio i caratteri sismologici e neotettonici, identificandone natura ed entità.
- **Site vicinity:** 5 km dal sito; analisi della storia neotettonica, valutando il potenziale di fagliazione superficiale e ogni altro fattore in grado di causare instabilità geologica.
- **Site area:** estensione di circa 1 km²; zona in cui vengono condotte le analisi più dettagliate, per valutare la possibilità di deformazioni permanenti e le proprietà meccaniche dei terreni di fondazione.

La costruzione del modello concettuale di riferimento si basa spesso sull'integrazione di dati a carattere spazialmente puntuale, che devono quindi essere interpretati ed interpolati, operazione questa che necessariamente implica un certo margine di errore, frutto della qualità dei dati di ingresso e della comprensione teorica dei fenomeni in atto. Infatti, i processi evolutivi che si verificano nel sottosuolo vengono generalmente inquadrati attraverso schemi concettuali che presentano alcune criticità, a causa del fatto che sono in gioco scale di tempi geologici e che i dati sono generalmente frammentari o non omogenei. Un esempio particolarmente significativo, e che verrà trattato in dettaglio nei capitoli seguenti, riguarda le indagini finalizzate specificatamente al rilievo dei movimenti della superficie topografica: questo tipo di monitoraggio è indispensabile per comprendere fenomeni complessi, sia di origine naturale, come subsidenza e deformazioni di versante, che indotti o influenzati dall'attività antropica, come il costipamento di materiali di riporto o di masse di rifiuti.

Le misure strumentali di tipo topografico e geodetico disponibili hanno un'estensione temporale relativamente limitata: per avere un quadro completo e significativo delle variazioni di livello del suolo sarebbero necessarie serie di misure condotte ripetutamente con stesse strumentazioni e metodologie per periodi almeno decennali. L'integrazione di questi dati, caratterizzati da precisione elevatissima e valenza cronologica "istantanea", con misure dalla precisione minore di vari ordini di grandezza, ma coprenti intervalli temporali pluriennali, consente di ricostruire le tendenze evolutive dei movimenti del piano campagna e le interazioni tra le varie componenti in gioco.

L'attendibilità del modello interpretativo cresce esponenzialmente con la possibilità di sottoporre il modello stesso (ottenuto sulla base dei dati di terreno, di sottosuolo, di laboratorio) a controllo e quindi a verifica del tutto indipendente, mediante un confronto con dati sempre sperimentali, ma di tutt'altra natura. È questo il caso, ad esempio, della subsidenza, che può essere valutata sulla base della stratigrafia dei depositi recenti, delle caratteristiche geotecniche e delle prove di laboratorio. Il complesso di assunzioni così elaborato può essere verificato sulla base delle precise ma rade misure di livellazione. Con modalità del tutto indipendenti, ma altrettanto significative, l'evoluzione dei fenomeni di abbassamento della superficie topografica a scala dei tempi quasi secolare può essere valutata sulla base delle serie idrometriche. A scala temporale ancora maggiore, seppure con minore definizione, l'evoluzione della subsidenza può essere in alcuni casi stimata sulla base della localizzazione di opere architettoniche e di resti archeologici significativi. La rilevante diffusione di tali elementi consente di estendere l'intervallo temporale di osservazione da vari secoli sino ad almeno 1 ÷ 2 millenni su gran parte del territorio italiano e più in generale nel bacino mediterraneo.

Inoltre, per una corretta analisi dei processi in atto è indispensabile separare i fenomeni naturali dagli effetti indotti dalle attività dell'uomo: ad esempio, nel caso di una discarica di rifiuti, si devono distinguere i cedimenti propri dell'ammasso dei rifiuti dagli eventuali movimenti dei versanti circostanti.

Dal punto di vista della valutazione del rischio sismico, che rappresenta una delle sfide principali nella valutazione del rischio complessivo (Allen, 1975), è necessario identificare i caratteri del paesaggio sismico,

cioè le evidenze geomorfologiche e stratigrafiche risultanti dalla ripetizione in una finestra temporale recente (Pleistocene superiore – Olocene) dei massimi sismi che caratterizzano l'area in esame (Michetti *et al.*, 2005). Tale nozione rappresenta un'informazione fondamentale sia per la progettazione di strutture critiche che per la formulazione di codici costruttivi adeguatamente conservativi ed economicamente realistici.

Nel caso di eventi intensi ($M > 6$), gli effetti cosismici sull'ambiente naturale (deformazioni o dislocazioni tettoniche, liquefazioni, frane e variazioni nella portata delle sorgenti e nel reticolo idrografico) sono sufficientemente chiari e diffusi da permettere di essere facilmente riconosciuti sul terreno. L'individuazione e l'analisi di questi parametri consente di caratterizzare il terremoto di riferimento, di costruire un modello sismotettonico per l'area in esame e di stimare il massimo terremoto potenziale per ogni singola sorgente sismogenetica.

Il catalogo dei terremoti storici rappresenta un *database* fondamentale per la definizione del rischio sismico, ma, soprattutto in aree a sismicità bassa o moderata, copre una finestra temporale troppo breve per stabilire le caratteristiche spaziali e temporali della ricorrenza dei sismi. Gli studi di paleosismologia, essendo in grado di estendere le indagini a ritroso nel tempo, consentono il riconoscimento delle strutture capaci o potenzialmente capaci (in grado cioè di generare dislocazione superficiale; IAEA 2002, 2010) con tempi di ritorno dell'ordine delle migliaia di anni, permettendo quindi una caratterizzazione più esaustiva del rischio sismico.

La valutazione del rischio spesso si basa sull'uso di mappe di pericolosità, elaborate quantificando la probabilità di eccedimento dell'occorrenza di un evento di data intensità in una data area; la realizzazione di mappe realistiche rappresenta un'impresa estremamente delicata e che implica molte scelte soggettive, poiché la realtà naturale è molto più complessa ed eterogenea rispetto ai modelli con cui si generano le mappe e i dati storici e strumentali sono spesso non sufficientemente estesi. In campo sismologico, si dibatte aspramente sull'utilità di tali mappe, poiché alcuni dei maggiori eventi sismici registrati negli ultimi anni in varie zone del mondo (Christchurch 2011, Tohoku 2011, Haiti 2010, Wenchuan 2008) ed anche nelle vicinanze della zona oggetto del presente studio (sequenza sismica dell'Emilia Romagna, 2012) hanno mostrato l'inadeguatezza delle mappe stesse (Stein *et al.*, 2012).

Nella legislazione italiana, l'entrata in vigore delle nuove normative (Decreto Ministero Infrastrutture, NTC, 2008; Regione Liguria, 2010) comporta una sostanziale innovazione nelle modalità della stima della pericolosità sismica, definita non più mediante un criterio "zona dipendente", ma attraverso un approccio "sito dipendente". Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende quindi necessario valutare a livello puntuale, in funzione della precisa localizzazione del sito, la possibile sollecitazione sismica unitamente agli effetti della risposta sismica locale per mezzo di specifiche analisi sull'assetto del volume di sottosuolo significativo e la caratterizzazione sismica dei terreni presenti.

Per la valutazione del rischio complessivo, oltre ai fenomeni connessi o indotti dalla sismicità, sono da considerare aspetti legati ad altri fattori di carattere geologico o ambientale, quali vulcanismo, eventi meteo-idrologici estremi, alluvioni e rischi di natura geotecnica. L'approccio, del tutto analogo a quello riassunto in precedenza, è mirato alla costruzione di uno scenario di riferimento per definire i potenziali effetti sull'impianto. Nei successivi capitoli 5 e 6 verranno descritti in dettaglio i casi relativi alle due aree di studio indagate nel corso della presente ricerca.

3. Obiettivi della ricerca

3.1. Metodi di indagine

Da quanto esposto nei capitoli precedenti, si evince che per localizzare un'attività antropica di interesse economico è necessario comprendere le caratteristiche attuali di un sito; questo obiettivo può essere perseguito soltanto mediante la ricostruzione della sua storia evolutiva e dei tempi in cui si è sviluppata.

Gli aspetti da valutare in tale processo interessano due fronti: da un lato, devono essere caratterizzati gli effetti potenziali che l'ambiente può indurre sull'impianto a causa di eventi naturali di elevata intensità; d'altra parte, è necessario considerare anche le modificazioni che l'impianto provoca sull'ambiente, valutando le prospettive sia in fase di gestione che a fine opera, se possibile in un'ottica di conservazione o riqualificazione del territorio.

La definizione delle interazioni tra impianto e ambiente geologico richiede un approccio multidisciplinare, in grado di integrare in una visione unitaria dati e informazioni afferenti a varie discipline delle Scienze della Terra, che consentano di superare i limiti di precisione delle tecniche di monitoraggio su tempi storici o geologici, e la ridotta copertura temporale delle tecniche di maggiore sensibilità.

In generale, le indagini necessarie per localizzare un impianto non possono prescindere da alcuni presupposti, quali la definizione dell'assetto geologico-strutturale, geomorfologico ed idrogeologico dell'area in esame, un'analisi sismotettonica di area vasta corredata dalla valutazione del potenziale di fagliazione di ogni struttura sismogenetica e un inquadramento meteo-climatico.

Inoltre, devono essere condotti studi specifici in funzione del tipo di impianto e dei caratteri peculiari dell'ambiente in cui si inserisce. Ad esempio, nel caso di una discarica è necessario definire nel dettaglio i parametri fisici e meccanici dei rifiuti e l'evoluzione dei cedimenti nel tempo.

Per ogni singolo parametro o processo devono essere identificati gli eventuali aspetti affetti da indeterminazione e, di conseguenza, condotte le analisi e le indagini appropriate per definirli nel modo migliore possibile.

3.2. Aree di studio

Il bacino della Pianura Padana rappresenta una delle aree più densamente popolate e industrializzate dell'intera Europa, ed ospita una parte sostanziale della produzione industriale italiana, molte infrastrutture e impianti ad alto rischio. Pur essendo un'area estremamente vulnerabile, spesso il rischio non è percepito in modo adeguato e, di conseguenza, le azioni di mitigazione sono, in molti casi, insufficienti.

Nel corso del presente studio sono state prese in considerazione due situazioni territoriali molto diverse tra loro, ma che rappresentano casi "tipici" nel contesto ambientale dell'Italia Settentrionale, sia dal punto di vista naturalistico che antropico (Figura 1):

- un impianto industriale ubicato nel Comune di Cairo Montenotte (Sv), costituito da una discarica di rifiuti non pericolosi ("La Filippa");
- l'area urbana della città di Como, in particolare in relazione alla progettazione delle opere di difesa idraulica dalle esondazioni del Lago, attualmente in fase di realizzazione lungo la sponda del Lario che lambisce il centro storico della città.

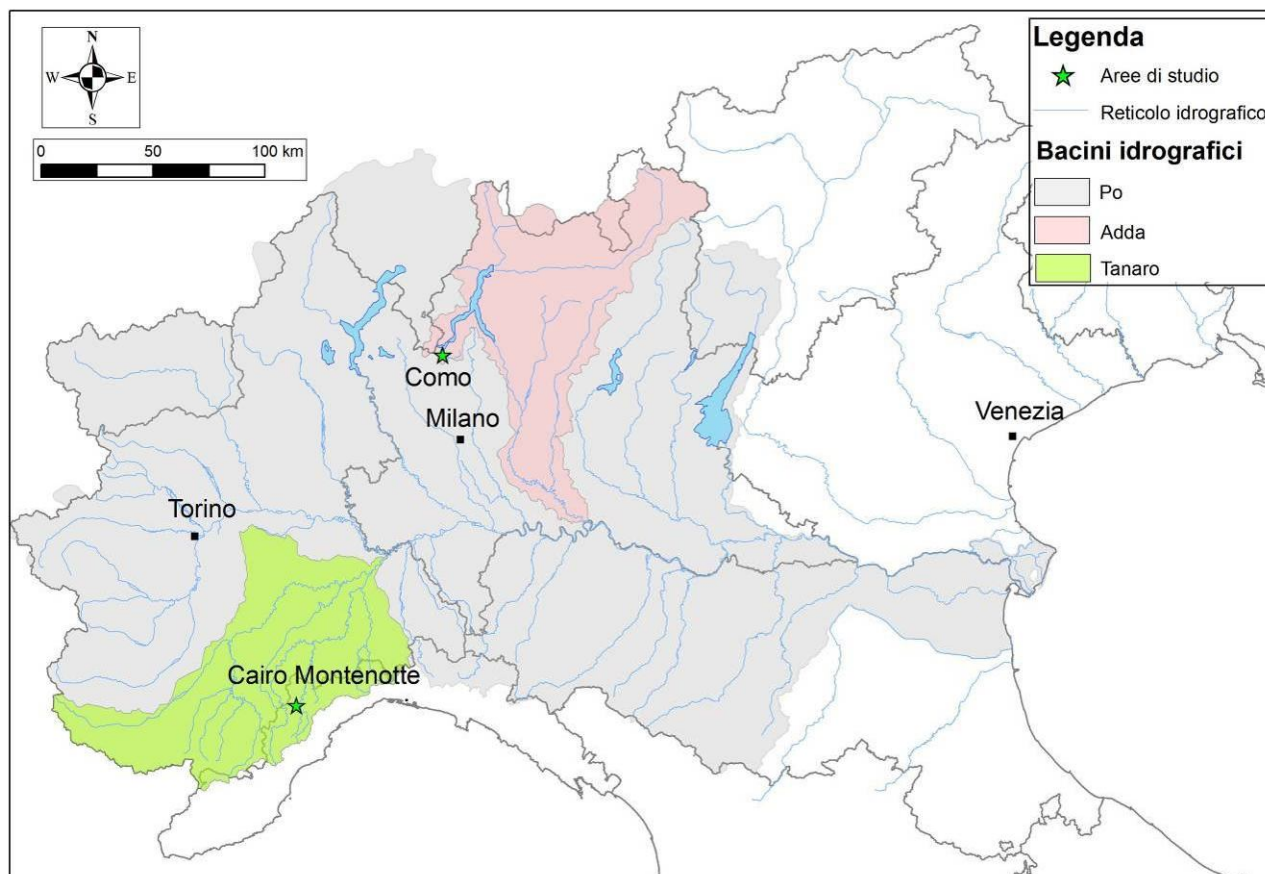


Figura 1 : Localizzazione dei siti di studio; sono evidenziati i due siti di studio e i bacini idrografici dei Fiumi Po, Tanaro e Adda.

La scelta dell'areale di indagine risulta di fondamentale importanza per un corretto inquadramento dei processi geomorfologici regionali. Ad esempio, è facile intuire come non sia possibile comprendere l'evoluzione del reticolato idrografico nel sito "La Filippa" senza tenere in considerazione le notevoli modificazioni subite dal reticolato fluviale ligure e piemontese durante il Quaternario, con la "recente" diversione di Tanaro, Po e Dora Baltea, da alcuni Autori attribuita addirittura ad un intervallo temporale compreso tra 100.000 e 50.000 anni fa (Carraro, 1976; Carraro *et al.*, 1980; 1995; Alessio *et al.*, 1982; Garzanti *et al.*, 2011; Vezzoli *et al.*, 2010).

La decisione di indagare i due siti indicati in precedenza si basa in primo luogo sul fatto che entrambi afferiscono allo stesso bacino idrografico, quello del Po, pur presentando caratteri molto differenti tra loro (Tabella 1); lo studio di contesti geomorfologici diversi consente di individuare un'ampia gamma di fenomeni naturali e di sviluppare in modo articolato l'approccio metodologico descritto nel capitolo 2.

In particolare, l'area dell'Appennino Ligure – Piemontese è caratterizzata da processi quali erosione regressiva su morfologie a *cuestas* impostate in litotipi marnosi, e fenomeni di incisione e deposizione lungo piccole vallecole ad elevata pendenza; nell'area urbana di Como è invece storicamente rilevante il fenomeno della subsidenza.

	Cairo Montenotte	Como
Delimitazione area per inquadramento regionale	Bacino Tanaro – Po	Bacino Adda – Lago di Como
Finestra temporale da investigare	Quaternario medio-superiore – Olocene	Tardo Pleistocene, essenzialmente post-UMG, e Olocene
Variazioni assetto reticolo fluviale	Po – Tanaro; cause tettoniche e climatiche	Cosia – Valduce; cause climatiche e antropiche
Classe sismica	4	4
Processi geomorfologici tipici del sito	Erosione regressiva su valleciole ad elevata pendenza	Subsidenza, processi lacustri costieri, processi alluvionali, fagliazione superficiale?
Criticità ambientali del sito	Stabilità versanti, <i>debris flow</i>	Subsidenza, esondazioni Lago, stabilità edifici
Inizio influenza antropica rilevante sul sito	1950 circa (attività estrattiva)	Età Romana
Contesto territoriale	Rurale; versante collinare e fondovalle di un corso d'acqua relativo al reticolo locale	Altamente urbanizzato; area urbana impostata in corrispondenza della terminazione di un bacino molto esteso (Adda)
Caratteri idrogeologici del sito	Substrato impermeabile subaffiorante, falda profonda	Interazione Lago-falda, falda profonda in pressione
Caratteristiche sottosuolo	Substrato terziario con scarsa copertura	Sedimenti comprimibili tardo pleistocenici e olocenici per spessore totale > 100 m
Proprietà meccaniche sottosuolo	Buone	Scadenti
Precedenti studi scientifici	Studi per la Carta geologica d'Italia (1969) a scala 1:100.000	Commissione per lo Studio della Subsidenza, 1980

Tabella 1 : Sintesi delle principali caratteristiche geografiche ed ambientali dei due siti analizzati nel presente studio.

Impianto “La Filippa”:

L'attività pratica di ricerca si focalizza sull'impianto “La Filippa”, gestito da LPL e localizzato nel bacino secondario del Rio Filippa, tributario del Fiume Bormida di Spigno, a sua volta affluente del Fiume Tanaro. I materiali raccolti nell'impianto di smaltimento in esame comprendono rifiuti non pericolosi e fondamentalmente non biodegradabili.

Le indagini condotte si sono focalizzate da un lato sulla valutazione di dettaglio del contesto ambientale in cui si inserisce l'impianto, basata su rilievi di terreno e campagne sperimentali di tipo stratigrafico, geotecnico ed idrogeologico; d'altro canto, sono stati sviluppati studi per caratterizzare le proprietà fisiche e meccaniche dei rifiuti e la loro evoluzione nel tempo. Per la descrizione delle indagini svolte si rimanda al successivo capitolo 5.

Area urbana della città di Como:

L'area urbana della città di Como è caratterizzata da una situazione stratigrafica, geotecnica e idrogeologica molto peculiare: nel sottosuolo cittadino si riscontra infatti la presenza di sedimenti comprimibili in *facies* lacustre, molto recenti (Pleistocene Superiore – Olocene), con spessori che superano il centinaio di metri e

storicamente soggetti a fenomeni di abbassamento del suolo, che si sono manifestati in modo particolarmente intenso nel corso degli Anni '60 – '70 del Novecento. Quest'area, peraltro, corrisponde all'impronta della città urbana, per cui qualsiasi processo di variazione nello stato del sottosuolo si riflette nelle strutture edilizie e comporta delle ripercussioni più o meno rilevanti nell'assetto dell'insediamento urbano.

Nell'area più prossima alla sponda lacustre è in corso la realizzazione di un'imponente opera di protezione dalle esondazioni del Lago, che comporta la costruzione di paratie antiesondazione in un tratto di costa di oltre 500 metri di lunghezza. Sebbene la valutazione tecnica degli studi che hanno portato alla progettazione delle opere esuli dagli obiettivi della presente tesi, questi sono stati presi in considerazione come caso di studio per valutare l'approccio metodologico alla base della localizzazione di un impianto strategico. L'inserimento di un'opera così importante in una situazione ambientale dall'equilibrio particolarmente sensibile, quale quello della città di Como, necessita infatti di dettagliati studi di carattere idraulico ed idrogeologico, poiché necessariamente altera la naturale dinamica di deflusso delle acque superficiali e sotterranee.

Va inoltre osservato che le oscillazioni freatiche e idrometriche sono legate alla dinamica dell'intero bacino del Lago di Como, per cui la delimitazione dell'area di studio ha tenuto in considerazione l'entità dell'interazione con il bacino lacustre, e quindi in alcuni casi la raccolta dei dati è stata opportunamente estesa a tutta l'area di interesse per il bilancio idrologico del Lario, cioè a buona parte della Lombardia e del Ticino; a titolo di esempio, ciò è stato fatto per quanto riguarda i dati relativi all'idrometria, idrologia e andamento delle precipitazioni.

Nel contesto appena descritto, assume particolare interesse uno studio di dettaglio della geologia e idrogeologia dell'ambiente urbano della città, al fine di ricostruire la storia deposizionale del bacino, definire un modello del comportamento meccanico del sottosuolo nel tempo, ed analizzare l'influenza delle opere antiesondazione sui parametri idrogeologici e sui fenomeni di subsidenza. Per la descrizione delle indagini svolte si rimanda al successivo capitolo 6.

3.3. Fasi della ricerca

La ricerca è stata svolta secondo le fasi seguenti:

- *analisi bibliografica*: reperimento ed analisi della bibliografia scientifica recente di carattere geologico, idrogeologico, sismotettonico e geomorfologico disponibile per l'area di studio, analisi della cartografia storica e delle riprese aerofotografiche;
- *analisi dei dati relativi alle campagne di indagine pregresse*: raccolta di stratigrafie di sondaggio e di dati geotecnici, successiva realizzazione di una banca dati, informatizzata in ambiente Gis ed elaborazione e rappresentazione cartografica di carte e profili geologici ed idrogeologici;
- *definizione dell'assetto strutturale*: consultazione di cataloghi sismici per la realizzazione di un inquadramento sismotettonico e di mappe della sismicità storica;
- *inquadramento meteo-climatico*: raccolta di dati meteo-idrologici estesi nello spazio e nel tempo, confronto con le serie storiche e analisi dei dati in corrispondenza di eventi meteorologici intensi;
- *elaborazione del modello geologico e geotecnico di riferimento*: definizione stratigrafica e geotecnica del volume di sottosuolo significativo, da ricostruire mediante indagini geologiche e

geofisiche, rilevamenti in sito, esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo, prove in sito e di laboratorio, monitoraggio strumentale;

- *definizione assetto idrogeologico*: caratterizzazione della circolazione idrica sotterranea, definizione della geometria e delle proprietà fisico-chimiche degli acquiferi;
- *rilevamenti in campo*: caratterizzazione di dettaglio della successione litostratigrafica delle formazioni quaternarie e del substrato locale;
- *monitoraggio strumentale*: rilevamenti periodici sulla rete di monitoraggio strumentale (piezometri, assestimetri, inclinometri), verifica dell'efficienza degli strumenti, comparazione dei dati ed analisi dei *trend* evolutivi;
- *ricostruzione dell'evoluzione ambientale recente*: definizione dei processi e delle modalità evolutive dell'ambiente in esame per un periodo di tempo significativo (Tardo Pleistocene – Olocene) per mezzo dell'integrazione di dati multidisciplinari. Esecuzione di indagini specifiche, datazioni, analisi delle trasformazioni del reticolo idrico principale e stima delle tendenze evolutive dei fenomeni ambientali in atto.

Le indagini e gli approfondimenti specifici per i due siti di studio hanno comportato, nel caso di Cairo Montenotte (impianto "La Filippa"):

- Valutazione dell'influenza dell'ambiente geologico sull'impianto:
 - o analisi della cartografia disponibile e adeguamento del modello geologico di riferimento alla recente revisione scientifica operata per la redazione della nuova Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000 (Servizio Geologico d'Italia, 2011);
 - o esecuzione di una nuova campagna geognostica e geofisica corredata da prove *in situ* e di laboratorio per l'acquisizione degli elementi puntuali necessari ad una completa ricostruzione del volume di sottosuolo, installazione di strumentazione di monitoraggio (piezometri impostati nell'orizzonte acquifero principale, tubi inclinometrici per la valutazione della stabilità dei versanti);
 - o analisi dei processi geomorfologici in atto o potenziali mediante valutazione dell'assetto dei versanti attraverso rilevamenti di dettaglio in sito e installazione di strumentazione di monitoraggio;
 - o elaborazione di analisi di stabilità riferite alla configurazione iniziale del sito, al funzionamento della discarica ed alla sua sistemazione finale;
 - o ricostruzione dell'andamento del reticolo di solchi di erosione sepolti e di possibili scenari evolutivi sulla base dell'analisi delle trasformazioni storiche del reticolo idrico principale e dei maggiori eventi meteo-idrologici recenti;
 - o sviluppo di un programma di indagine radiometrica e dendrocronologica per lo studio dei tronchi fossili rinvenuti all'interno dell'impianto;
 - o impostazione di un'analisi geomorfologica del reticolo idrografico secondario attuale e sepolto, nell'ottica della definizione di vincoli morfo-cronologici per l'evoluzione del bacino padano connessi alla presenza del deposito vegetale rinvenuto nel sito.
- Valutazione dell'impatto dell'impianto sull'ambiente:

- o raccolta e analisi critica della letteratura scientifica relativamente alla merceologia dei rifiuti e sviluppo di una classificazione merceologica per l'analisi dei flussi di rifiuti conferiti nell'impianto;
- o predisposizione di una *Scheda descrittiva del carico e delle condizioni dei materiali al momento del conferimento*, appositamente creata per raccogliere le informazioni macroscopiche più significative e facilmente individuabili;
- o analisi della documentazione amministrativa relativa ai materiali conferiti negli ultimi 3 anni, per la valutazione del bacino di utenza dell'impianto, della tipologia e dei rapporti composizionali effettivi dei materiali conferiti;
- o identificazione delle esigenze conoscitive di base e selezione di carichi di materiali significativi per lo svolgimento delle analisi di laboratorio e di campo;
- o esame dei metodi di abbancamento e delle procedure di compattazione;
- o campionamento rappresentativo di varie tipologie di rifiuti;
- o determinazione in laboratorio delle proprietà indice dei rifiuti mediante svolgimento di analisi granulometriche e del contenuto di umidità su campioni significativi;
- o misura in campo della densità dei campioni, mediante pesatura di un volume noto di materiale tramite l'utilizzo di un'apposita fustella, creata *ad hoc* per l'analisi;
- o esecuzione di prove di carico su piastra in vari settori dell'abbancamento, rappresentativi di diverse età di deposito, per verificare il comportamento dei rifiuti a seguito dell'applicazione di notevoli carichi;
- o verifica del comportamento a scala complessiva dell'accumulo, sulla base dei monitoraggi svolti periodicamente sull'impianto;
- o analisi dei cedimenti del cumulo di rifiuti nell'ottica di una valutazione della prospettiva a fine opera e confronto con i dati disponibili in letteratura;
- o elaborazione del *database* complessivo ottenuto e ricostruzione delle trasformazioni intervenute nelle principali proprietà indice dei rifiuti;
- o definizione dei parametri rappresentativi del comportamento geotecnico dei materiali a scala dell'accumulo.

Nel caso dell'area urbana di Como, le attività condotte comprendono:

- rilievi piezometrici periodici sistematici e in occasione di eventi meteorici intensi, per valutare l'andamento della falda freatica nel sottosuolo e i tempi di risposta della falda a ingenti apporti meteorici;
- analisi congiunta di precipitazioni, livello del Lago e superficie piezometrica per caratterizzare le oscillazioni della falda freatica in funzione delle condizioni meteorologiche e delle caratteristiche dei terreni;
- valutazione dell'incidenza delle variazioni piezometriche, naturali ed antropiche, sui fenomeni di abbassamento del suolo;
- analisi del regime idrologico per un periodo significativo e dell'influenza del bacino lacustre sui depositi del sottosuolo cittadino, anche in relazione all'esecuzione delle opere di regimazione dalle esondazioni del Lago;

- ricognizione presso i nuovi cantieri per la realizzazione di edifici aperti nell'area cittadina con rilevamento delle serie litologico-stratigrafiche e acquisizione di nuovi dati geognostici;
- realizzazione di profili stratigrafici e geologico-tecnici a scala di dettaglio (1:1.000);
- analisi della documentazione relativa alle prove geotecniche *in situ* e di laboratorio condotte in varie zone della città;
- valutazione delle datazioni radiometriche effettuate sui depositi del sondaggio di Piazza Verdi;
- impostazione di profili piezometrici relativi a stati significativi della circolazione idrica sotterranea;
- analisi dei recenti monitoraggi strumentali per la valutazione delle variazioni plano-altimetriche (livellazioni geometriche di precisione, dati interferometrici) e dei monitoraggi clinometrici sugli edifici, in relazione alle lavorazioni condotte per la realizzazione delle opere di difesa dalle esondazioni;
- analisi spaziale estesa all'intera convalle di tutte le stratigrafie presenti in archivio finalizzata alla ricostruzione di estensione e spessore delle unità stratigrafiche presenti nel sottosuolo.

4. Inquadramento regionale

I due siti oggetto della presente ricerca si localizzano all'interno del bacino Padano (cfr. Figura 1), che dal punto di vista geologico – strutturale rappresenta l'avanfossa delle due principali catene montuose italiane, Alpi e Appennino; le due catene sono il frutto dell'orogenesi causata dalla convergenza e collisione delle placche Europea ed Africana. Alpi e Appennino, pur essendo caratterizzati da tempi di formazione e architetture diverse (e.g.: CNR, 1992; Castellarin *et al.*, 1992; § 4.1.), costituiscono un sistema unitario, in quanto i fronti strutturali più esterni convergono al di sotto della pianura, fino a toccarsi.

A dispetto della bassa sismicità e bassa energia del rilievo, tipiche di un bacino alluvionale, nell'area della Pianura Padana si registrano processi tettonici tuttora attivi: i movimenti compressivi in atto producono un complesso sistema di pieghe e sovrascorrimenti che giungono ad interessare la sequenza sedimentaria plio-quadernaria. Evidenze di tali processi sono la sismicità storica e strumentale (§ 4.2.), i movimenti verticali recenti del suolo e i fenomeni di deviazione fluviale che hanno interessato l'intero bacino padano (§ 4.3.).

4.1. Il sistema Alpi Meridionali – Appennino Settentrionale

Le Alpi sono una catena a doppia vergenza, originatasi in varie fasi a partire dal Cretaceo in seguito alla subduzione dell'Oceano Ligure – Piemontese e del margine continentale europeo al di sotto della placca Adriatica (Roure *et al.*, 1996). Le Alpi vengono formalmente suddivise in due catene e in vari domini paleogeografici (Figura 2):

- la catena alpina settentrionale, composta dai Domini Elvetico, Pennidico ed Austroalpino, derivanti dalla deformazione della litosfera europea e adriatica;
- le Alpi Meridionali, di formazione più recente e costituite dal Dominio Sudalpino, di pertinenza adriatica.

La separazione tra le due catene avviene in corrispondenza della Linea Insubrica, un complesso sistema di faglie di importanza regionale che taglia in senso E-O l'intera catena.

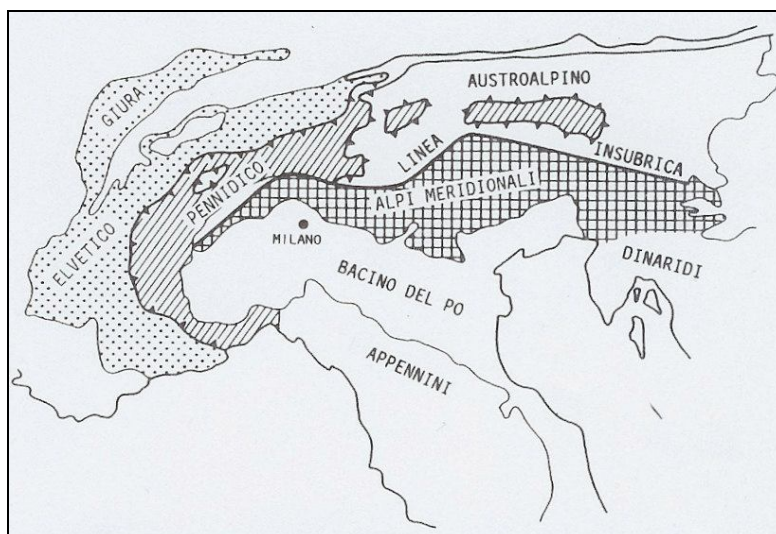


Figura 2 : Distribuzione dei domini paleogeografico – strutturali nelle Alpi (da Winterer & Bosellini, 1981).

Le Alpi Meridionali (Figura 3) sono formate da un basamento cristallino, affiorante esclusivamente ad ovest della Linea delle Giudicarie, ricoperto da una potente sequenza sedimentaria.

Nel Mesozoico il basamento Sudalpino costituiva un frammento del margine continentale passivo della placca Adriatica, posto a sud dell'oceano Ligure – Piemontese; l'evoluzione durante le fasi distensive mesozoiche è dominata dalla presenza di bacini di piattaforma tipici di mare poco profondo, localmente intercalati a bacini di intrapiattaforma e separati tra di loro da strutture tettoniche.

Durante il Cretaceo ha luogo l'inversione del moto relativo tra le due placche: la subduzione della placca Europea al di sotto di quella Adriatica porta, nella fase Eo-Alpina, alla chiusura dell'oceano mesozoico; nella fase Meso-Alpina si ha la collisione continentale tra le due placche, che prosegue anche durante il Neogene (fase Neo-Alpina; Laubscher, 1985; Laubscher *et al.*, 1992; Castellarin & Cantelli, 2000; Dal Piaz *et al.*, 2003). Il rapido sviluppo della catena in quest'ultima fase è legato alla riattivazione in inversione tettonica di strutture estensionali mesozoiche (Bertotti *et al.*, 1993; Castellarin *et al.*, 1992).

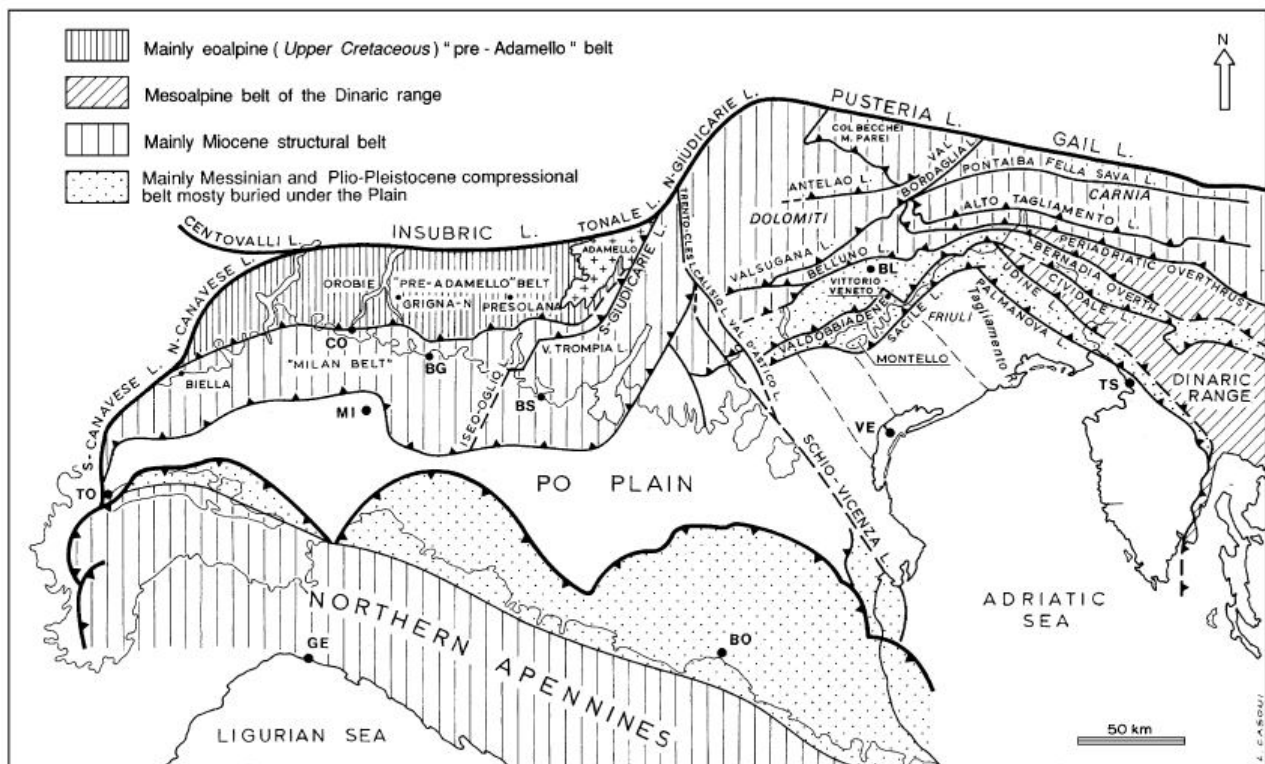


Figura 3 : Schema strutturale semplificato delle Alpi Meridionali, da Castellarin et al., 2006.

L'Appennino invece è una catena a singola vergenza, generata dalla subduzione della placca Adriatica al di sotto di quella Europea. La sua formazione si è verificata a partire dall'Oligocene ed è tuttora in atto: l'arco appenninico tende infatti a migrare verso est, seguendo l'arretramento della cerniera della subduzione e provocando anche la rotazione antioraria della parte settentrionale della catena.

L'Appennino Settentrionale (Figura 4) è strutturato in falde N-NE vergenti i cui fronti più esterni sono organizzati in tre archi. L'Arco del Monferrato, più occidentale, presenta strutture e fronti superficiali nella zona compresa tra la Collina di Torino e Alessandria ma si spinge, sepolto, fino all'altezza di Tortona. L'Arco Emiliano giunge, all'altezza della fascia delle Strutture Centro-Padane (Fantoni *et al.*, 2004) a scontrarsi con i fronti strutturali sepolti più esterni delle Alpi Meridionali. L'Arco Ferrarese, più orientale,

rappresenta un sistema distinto in due fronti concentrici: quello Romagnolo, più interno, e quello Ferrarese propriamente detto, costituito dalle strutture e dai fronti sepolti più esterni (Pieri & Groppi, 1981; Castellarin & Vai, 1986).

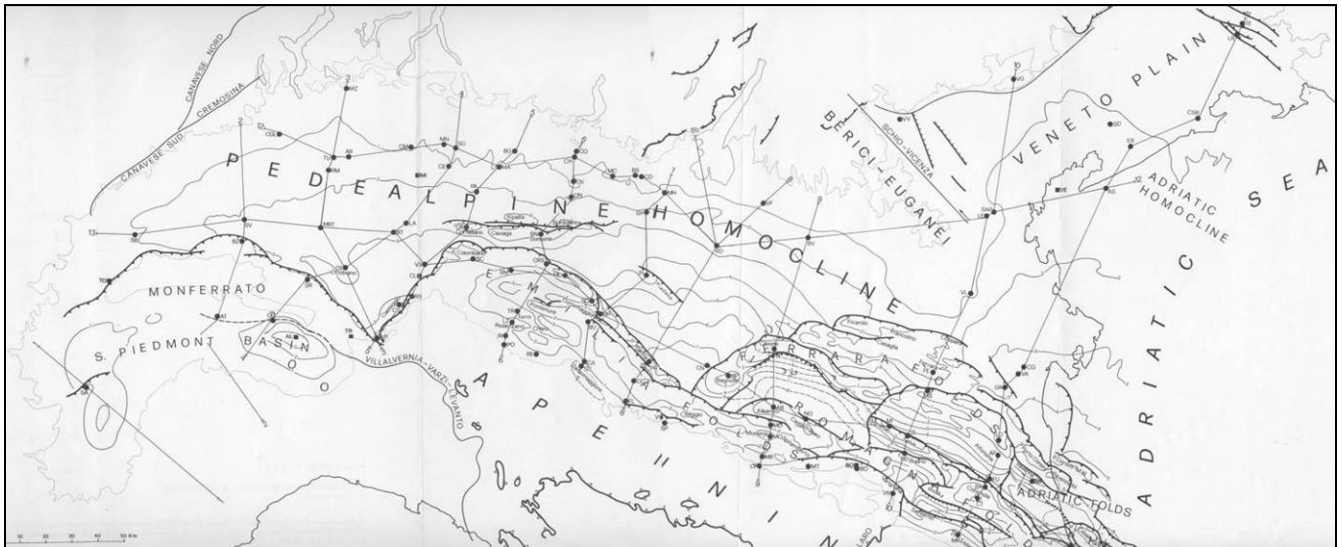


Figura 4 : Carta strutturale dell'Appennino Settentrionale e dell'avanfossa padano-adriatica (modificato da Pieri e Groppi, 1981).

Nell'area del bacino Padano si sviluppa l'interazione tra Alpi Meridionali e Appennino Settentrionale; i fronti strutturali delle due catene, infatti, non coincidono con i limiti orografici, ma risultano sepolti al di sotto delle coperture quaternarie della Pianura Padana.

L'interazione tra le due catene avviene, in modo particolare, nel settore delle Alpi Meridionali ad occidente della Linea delle Giudicarie dove l'evoluzione Plio-Quaternaria è strettamente legata all'interazione con l'avanfossa appenninica. A partire dalla fine del Miocene la crescita dei fronti più avanzati della catena Sudalpina occidentale subisce un notevole rallentamento; al contrario, nel settore orientale si sviluppano numerose strutture, emergenti in superficie o dalla chiara espressione superficiale (Castellarin *et al.*, 1992; 2006; Galadini *et al.*, 2005). Gli studi più recenti mostrano in realtà come anche il settore lombardo del margine Sudalpino abbia subito significativi raccorciamenti quaternari (Sileo *et al.*, 2007).

La zona di giunzione strutturale tra la catena alpina e l'Appennino Settentrionale, localizzata al margine tra Piemonte e Liguria, si caratterizza per la presenza al di sopra del basamento metamorfico di una potente sequenza di depositi marini terziari, appartenenti al Bacino Terziario Piemontese (BTP), per uno spessore massimo di circa 5 ÷ 6.000 m nel settore occidentale. La strutturazione del BTP avviene a partire dall'Eocene, quando si individuano una serie di bacini di sedimentazione in ambiente dapprima continentale, evolvente poi in marino, separati da alti strutturali. La graduale migrazione verso nord delle aree depocentrali, attualmente rappresentate dai bacini di Savigliano e di Alessandria, provoca una variazione nella configurazione del BTP (Mosca, 2006); le aree più vicine al margine settentrionale delle Alpi Liguri, invece, subiscono un'inversione tettonica che determina a scala regionale un *tilting* delle successioni sedimentarie e l'estensione dei settori sottoposti all'erosione (Servizio Geologico d'Italia, 2011).

4.2. Sismotettonica

L'attività tettonica lungo le catene alpina e appenninica produce deformazioni che influenzano l'andamento del rilievo topografico, e che si manifestano attraverso attività sismica (Figura 5). I tassi di deformazione quaternaria nei fronti appenninici diminuiscono procedendo da est verso ovest, in accordo con il relativo abbassamento dei tassi di sismicità lungo i tre archi; i terremoti più forti, di entità tipicamente compresa fra Mw 5.5 e 6.0 (CPTI, 2004), diminuiscono infatti di frequenza spostandosi da E (Emilia) verso O (Monferrato).

Pur tenendo conto delle ovvie differenze nell'evoluzione strutturale delle due catene, che determina stili sismici diversi in termini di massima magnitudo attesa e intervalli di ricorrenza, un quadro simile si riscontra anche nel settore Sudalpino, dove i tassi di deformazione e la sismicità diminuiscono dal Friuli verso il Piemonte. Basandosi sui cataloghi di sismicità storica e strumentale (Postpischl, 1985; Boschi *et al.*, 2000; CPTI, 2004), i terremoti "caratteristici" del Sudalpino (ad esempio, gli eventi del 1776 e del 1976 in Friuli, e quelli del 1117 e del 1222 nell'area del Garda), presentano Intensità/Magnitudo significativamente maggiori di quelli appenninici (Mw 6.5 – 7.0; e.g. Livio *et al.*, 2009b).

Il regime di compressione crostale che caratterizza la tettonica recente del Dominio Sudalpino é rilevato anche da misure GPS (Serpelloni *et al.*, 2005; Michetti *et al.*, 2012), che indicano valori di raccorciamento di circa 1,1 mm all'anno nel settore lombardo, che crescono sino ai 2,2 mm/anno nel settore friulano.

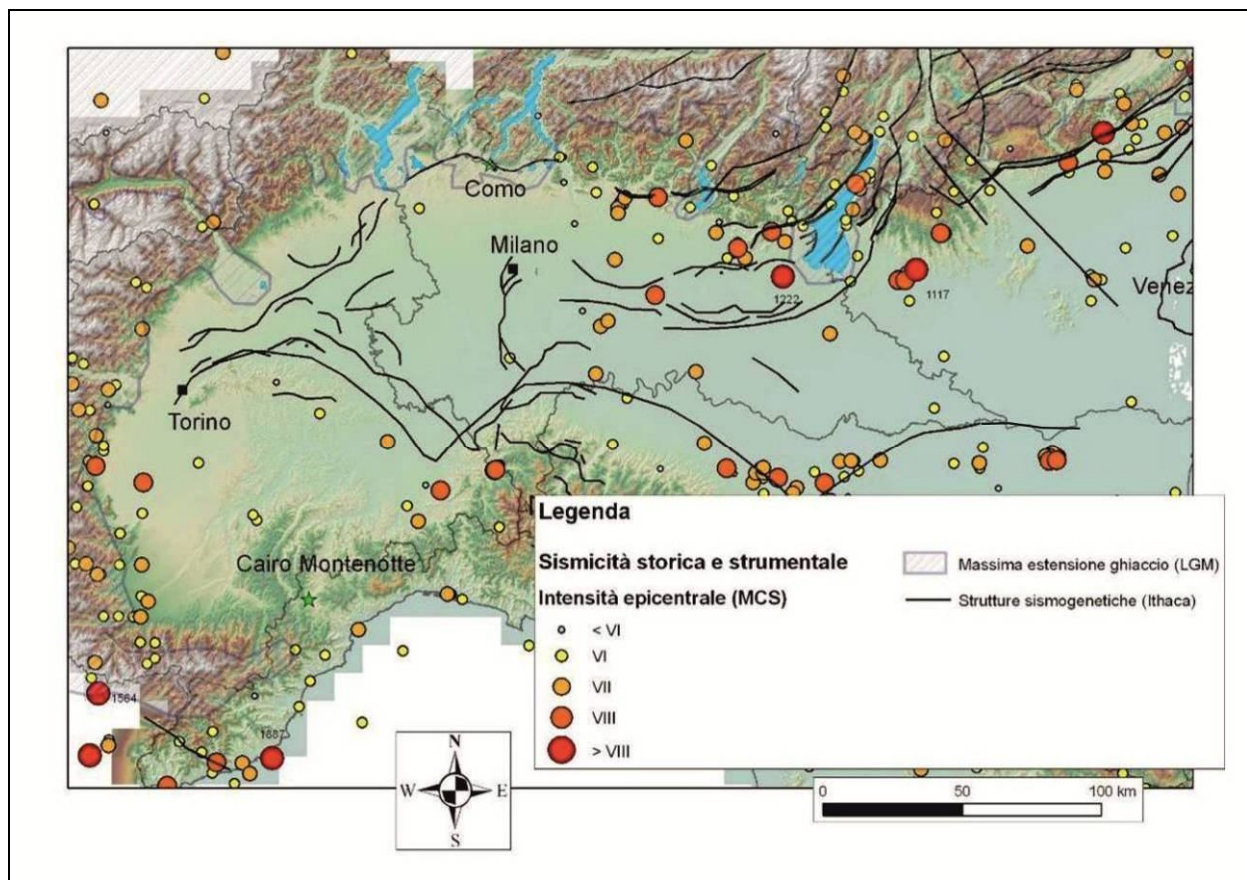


Figura 5 : Sismicità storica e strumentale in Italia Settentrionale (CPTI04), localizzazione delle strutture potenzialmente sismogenetiche (ITHACA, Catalogo delle faglie capaci) e massima estensione dei ghiacciai durante l'Ultimo Massimo Glaciale (modificato da Ehlers & Gibbard, 2004).

Evidenze di tettonica quaternaria sono state segnalate in letteratura lungo tutto il fronte pedemontano tra il Lago di Garda ed il Maggiore, sia nella fascia di pianura che lungo il margine prealpino insubrico; tali indizi comprendono evidenze geomorfologiche (i “colli isolati” di Superga, Ciliverghe, Castenedolo, San Colombano), alti strutturali sepolti (Soncino, Mirandola) e anomalie del drenaggio (Desio, 1965; Orombelli, 1976; Bini *et al.*, 1992; Zanchi *et al.*, 1997; Carraro *et al.*, 1980; 1995; Burrato *et al.*, 2003). Fenomeni di fagliazione superficiale e *creep* sono segnalati anche lungo l’Arco Ferrarese, a Correggio e Massa Finalese (Pellegrini & Vezzani, 1978).

I dati sulla tettonica attiva e sul potenziale sismico nel settore Sudalpino accumulati nell’ultimo decennio consentono di comprendere sempre meglio meccanismi e processi attraverso i quali viene modellato il paesaggio della Pianura Padana e delle fasce pedemontane contermini, e il ruolo che giocano i terremoti in tal senso. In particolare, sono state analizzate alcune strutture tettoniche capaci (*sensu* IAEA, 2002; 2010) che caratterizzano i margini dell’Avanfossa in Piemonte, Lombardia ed Emilia, sia nel settore sudalpino che in quello appenninico (Arco del Monferrato, Retroscorrimento della Gonfolite, zona di Brescia e del Garda, Arco Ferrarese). Particolare rilevanza assume il sito di Monte Netto di Capriano del Colle (Brescia), che risulta essere il primo sito paleosismico identificato nella Pianura Padana; qui sono stati riconosciuti 3 eventi paleosismici avvenuti negli ultimi 40.000 anni e caratterizzati da magnitudo analoga a quella del terremoto del Natale 1222 (Livio *et al.*, 2009b).

I dati disponibili hanno consentito di elaborare nuovi modelli di paesaggio sismico per l’intero bacino Padano (e.g. Bonadeo *et al.*, 2012; Sileo *et al.*, 2007; Livio *et al.*, 2011; Michetti *et al.*, 2010; Berlusconi *et al.*, 2012); dalle ricerche emerge come lo stile di deformazione, seppur manifestandosi attraverso modalità differenziate nelle varie zone, sia proprio di tutta l’area della Pianura Padana. Allo stato attuale delle conoscenze, in un’ottica conservativa non è possibile discriminare tra strutture potenzialmente in grado di provocare significativa deformazione e fagliazione superficiale e strutture incapaci di produrre tali effetti. L’evento sismico del 25 Dicembre 1222 con epicentro nel Bresciano deve quindi essere assunto come terremoto di riferimento per tutto il dominio strutturale Sudalpino Occidentale: eventi analoghi devono essere considerati credibili, seppur improbabili, lungo tutta l’avanfossa padana (Michetti *et al.*, 2012; Allen, 1975).

4.3. Evoluzione ambientale recente: variazioni climatiche e reticolo idrografico

L’assetto attuale del bacino padano deriva sostanzialmente dai processi erosivi/deposizionali sviluppatasi nel corso del Quaternario, frutto dell’interazione tra l’evoluzione dell’assetto strutturale e l’alternarsi di fasi climatiche differenti con il susseguirsi di processi di modellamento areale e lineare (ovvero glaciale e fluviale). Il reticolo idrografico ne costituisce l’aspetto più peculiare, perchè se da un lato costituisce uno dei principali fattori di modellamento, dall’altro il suo continuo riadeguarsi sottolinea proprio la “mobilità” e la rilevanza delle deformazioni derivanti dalla “vitalità” delle strutture tettoniche.

L’evoluzione plio-quaternaria del reticolo idrografico in tutto il bacino padano è profondamente condizionata da una serie di importanti fenomeni di deviazione fluviale, derivanti dall’interazione tra la mobilità tettonica recente, la situazione morfologica al contorno e l’elevata erodibilità delle formazioni presenti (Biancotti 1981 a, b, c; Biancotti & Cortemiglia 1982; Biancotti *et al.*, 1999; Vezzoli *et al.*, 2010).

Fino al Pliocene l'attuale Pianura Padana costituiva un golfo marino, che nel Pleistocene viene progressivamente riempito, da ovest verso est, dalla progradazione dei depositi di origine fluviale, particolarmente intensa nei periodi glaciali (Garzanti *et al.*, 2011).

Nell'area ligure – piemontese l'attività tettonica ha causato l'inclinazione di alcuni terrazzi marini plio-pleistocenici nella zona tra Genova e Savona (Ferraris *et al.*, 2012) e una diversione regionale del reticolo idrografico (Figura 6); inoltre, sono diffuse le testimonianze di fenomeni di cattura fluviale per erosione regressiva.

Fino al Pleistocene superiore, i collettori principali del bacino piemontese meridionale (paleo-Po, paleo-Tanaro) scorrevano a sud della Collina di Torino, da ovest verso est. Il paleo-Po subisce una diversione nei pressi di Villastellone, che porta all'individuazione del corso dell'attuale Po; questa diversione si origina a causa della crescita dell'anticlinale di Torino e della sinclinale di Asti, che a sua volta provoca un *tilting* verso ovest dell'Altopiano di Poirino (Bonadeo *et al.*, 2012).

La datazione del processo di deviazione risulta tuttora dibattuta: secondo Boano *et al.* (2004) avverrebbe nel Pleistocene medio, in base al coevo sollevamento della Collina di Torino; la datazione di un affioramento fluviale relativo ad un affluente del Paleo-Po nei pressi di Moncucco Torinese indicherebbe invece che il fenomeno sia avvenuto circa 45 ÷ 40 mila anni fa (Alessio *et al.*, 1982).

Come conseguenza, il F. Tanaro, principale affluente del paleo-Po, erodendo lateralmente verso est tracima in un precedente alveo del Po, poco a sud delle Colline di Asti. Il nuovo corso fluviale del Tanaro, impostato su un livello di base posto ad una quota di circa 150 m inferiore alla precedente, comporta l'innescio di un processo di ringiovanimento morfologico generale del bacino tuttora in atto. Secondo la stessa dinamica i corsi d'acqua affluenti deviarono il loro percorso verso il nuovo livello di base, spostando i deflussi dalla piana cuneese alla piana alessandrina. La situazione è tuttora riscontrabile nel loro assetto attuale, dove è presente dapprima un tratto diretto verso NO a cui fa seguito, a valle di un gomito pronunciato, un ramo defluente a NE (Carraro, 1976; Forno, 1982; Boano *et al.*, 2004).

Il progressivo approfondimento del reticolo idrografico connesso all'ultima fase evolutiva comporta la formazione di una serie di superfici di modellamento fluviale impostate nelle litologie del substrato locale, poste a quote progressivamente decrescenti procedendo dalla più antica alla più recente. Nel bacino del F. Bormida i terrazzi fluviali più antichi, posti sino a 120 ÷ 130 m al di sopra della quota degli alvei attuali, sono riferibili al tetto deposizionale del Subsistema di Spigno Monferrato, la cui formazione è attribuita dubitativamente alla fine del Pleistocene medio (Servizio Geologico d'Italia, 2011).

Anche in questo caso, la distribuzione delle forme e dei depositi è compatibile con un sollevamento generalizzato dell'area. L'assenza di componenti differenziali significative nell'esumazione quaternaria dei rilievi del BTP è inoltre in accordo con i risultati forniti da Arca e Beretta (1985) relativi all'analisi dei movimenti recenti del suolo nell'Italia settentrionale nel periodo 1897 ÷ 1957, effettuata su base geodetica.

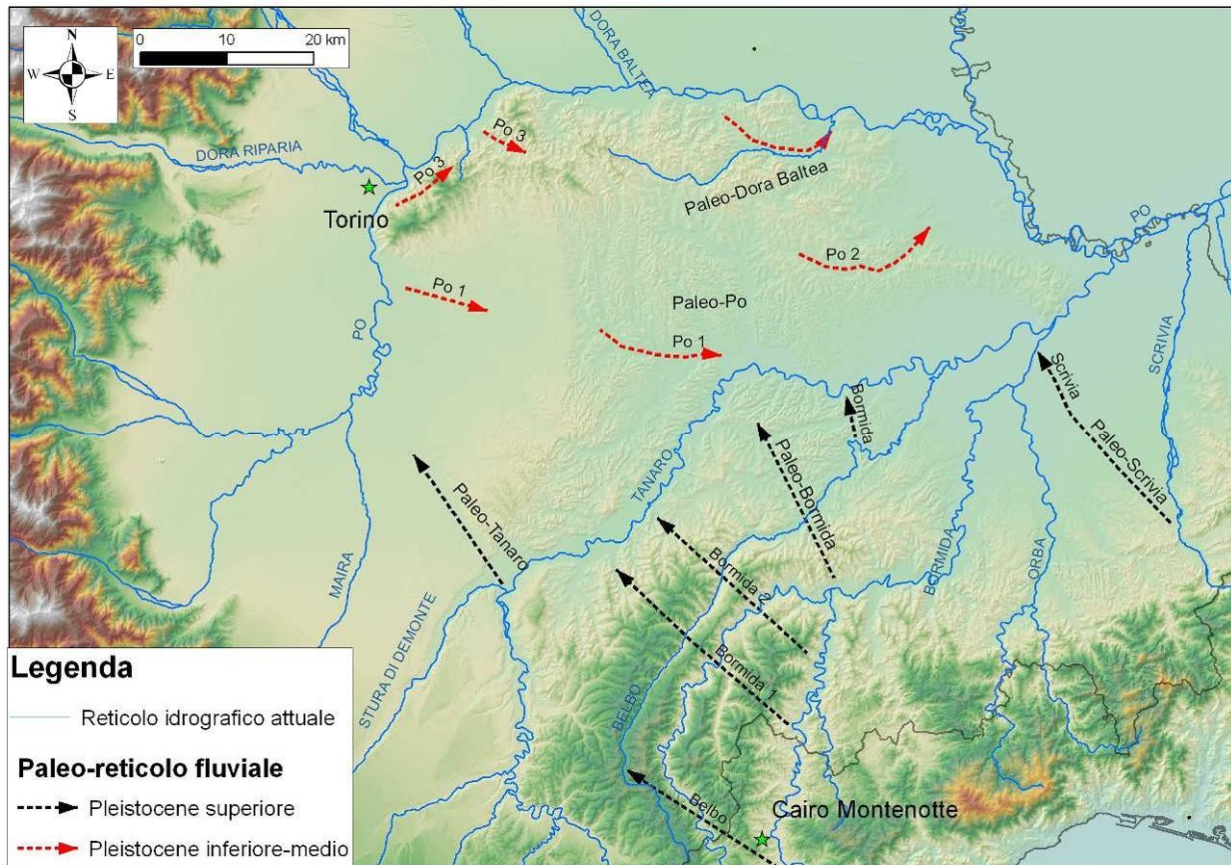


Figura 6 : Evoluzione del sistema idrografico del Piemonte meridionale e della Liguria. È indicato l'attuale reticolo idrico e la direzione del paleo-drenaggio.

L'attuale fisiografia del territorio deriva anche dai numerosi cicli glaciali che si sono susseguiti nel Quaternario; tutta l'area alpina e pedemontana ha infatti subito varie avanzate e ritiri glaciali, oggi testimoniati sia da forme erosive che di accumulo (Ehlers & Gibbard, 2004; Orombelli, 1984). Per quanto riguarda i due siti oggetto del presente studio, va notato come la città di Como sia stata interessata dall'ultima glaciazione, che, al contrario, non ha raggiunto il sito di Cairo Montenotte (cfr. Figura 5). Da questo deriva un differente assetto delle due zone: a Cairo prevale l'azione fluviale, con alvei incisi nel substrato locale; nell'area comasca, invece, sono ad esempio presenti colline moreniche e depositi di origine fluvioglaciale.

5. Impianto “La Filippa”

5.1. Tipo di impianto e contesto ambientale

Il primo dei siti esaminati è costituito da una discarica di rifiuti (impianto “La Filippa”), localizzata nel Comune di Cairo Montenotte (Sv). L’impianto “La Filippa” è stato progettato per raccogliere esclusivamente rifiuti non pericolosi ed è inserito in un contesto ambientale ampiamente rimaneggiato dall’uomo, a seguito di oltre 50 anni di attività di cava.

La collaborazione tra LPL e Università degli Studi dell’Insubria nasce dall’esigenza di definire e verificare le condizioni di potenziale pericolosità geologica e idraulica del bacino del Rio Filippa (tributario del F. Bormida di Spigno, a sua volta affluente del Fiume Tanaro), nel cui ambito si localizzano gli impianti sopra citati. Le attività, svolte a partire dal 2005, sono state impostate sulla base delle osservazioni formulate dagli Enti tecnici di controllo (Documento della Provincia di Savona, Prot. Gen. n. 65095 del 20.9.2005, Resoconto della riunione APAT/ARPAL del 7 settembre 2005, ecc.) ed hanno portato alla caratterizzazione d’insieme dell’ambiente fisico in cui si localizza l’impianto, identificando i fattori naturali che lo rendono potenzialmente vulnerabile (stabilità dei versanti, mobilitazione di *debris flow*, precipitazioni intense) e le migliori strategie per fronteggiare queste criticità.

Il progetto di completamento della discarica e di ricomposizione ambientale di un’area adiacente, già inclusa nel comprensorio di cava per la produzione di laterizi, ha comportato, a partire dal 2010, lo svolgimento di ulteriori indagini e ricerche, tra cui la verifica geologica e idrogeologica puntuale dei nuovi settori di stoccaggio, la caratterizzazione sperimentale dell’ammasso dei materiali posti a discarica e l’analisi delle condizioni di stabilità dell’areale significativo coinvolto.

Le attività condotte nel corso del presente Dottorato si sviluppano nel contesto ora delineato e sono riferite principalmente alla valutazione delle interazioni esistenti tra ambiente fisico e impianto industriale, allo scopo di rispondere ad alcune esigenze conoscitive emerse nell’ambito della valutazione del sito, raggiungere un’adeguata ottimizzazione delle fasi di lavorazione e conseguire elevate condizioni di stabilità negli accumuli.

La scelta fatta da LPL è infatti quella di inserire la realizzazione e l’attività operativa dell’impianto in un’ottica di gestione integrata del territorio, che tenga conto dei processi morfogenetici in atto o potenziali in una vasta area. Si è quindi proceduto ad un’analisi sitologica multidisciplinare, volta alla definizione di un modello evolutivo del paesaggio nell’Olocene, valutando le caratteristiche geomorfologiche, idrogeologiche, sismotettoniche e climatiche dell’area.

Dal punto di vista concettuale, una discarica di rifiuti costituisce, a tutti gli effetti, una costruzione in elementi sciolti (quale un rilevato o un argine), dove al posto dei terreni naturali si impiegano materiali di origine artificiale o terre derivanti da processi di trattamento di vario tipo. Il processo di valutazione sitologica di un impianto di discarica è quindi del tutto comparabile ad altri tipi di impianti industriali, come descritto nel capitolo 2; tuttavia, per una corretta valutazione del comportamento dei materiali in esame sono necessari tecniche e strumenti analitici specifici e spesso non standardizzati.

Il programma di studio condotto, sin dalla sua impostazione è stato tarato in ottemperanza alla normativa attualmente vigente per i vari settori disciplinari interessati. In particolare, le nuove NTC definiscono i principi per il progetto, l’esecuzione e il collaudo delle costruzioni nei riguardi dei requisiti essenziali di resistenza meccanica e stabilità, anche in presenza di fattori in grado di svolgere azioni destabilizzanti. Il Cap. 6.11 delle NTC è dedicato nello specifico alle “*Discariche controllate di rifiuti e depositi di inerti*”.

Le indagini condotte comprendono una parte di verifica sitologica (§ 5.2.), mirata alla valutazione delle caratteristiche stratigrafiche, geotecniche e idrogeologiche del substrato e delle coperture quaternarie e una parte di caratterizzazione delle proprietà fisiche e meccaniche dei rifiuti, sia in fase di conferimento che dopo l’abbancamento (§ 5.3.). Nel primo caso, la stabilità dell’opera e dei terreni è stata valutata mediante specifiche analisi geotecniche; i parametri di riferimento sono stati ricavati da indagini geognostiche e geofisiche. Per quanto riguarda invece la determinazione dei parametri indice e del comportamento dei rifiuti si è proceduto sia all’elaborazione critica dei dati acquisiti ordinariamente dall’impianto, sia allo svolgimento di prove sperimentali in sito e di laboratorio.

Il programma di attività realizzato ha finalità prettamente scientifiche, e come tale sviluppa un approccio multidisciplinare condotto con i metodi e le tecniche della ricerca ambientale. L’utilizzo di criteri e prescrizioni riconosciuti in campo scientifico e tecnico-amministrativo comporta però anche la possibilità di rendere successivamente fruibili le nuove conoscenze acquisite, e quindi apportare un significativo contributo in campo scientifico e produttivo.

Nella legislazione italiana, le norme in materia di gestione dei rifiuti e di bonifica dei siti inquinati sono contenute nella Parte Quarta del Decreto Legislativo n. 152 del 3 aprile 2006, “*Norme in materia ambientale*”, modificato dal successivo Decreto Legislativo n. 4 del 16 gennaio 2008. Si definisce rifiuto qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l’obbligo di disfarsi e che rientra nelle categorie riportate nell’Allegato A del D. Lgs. 152/06. La normativa definisce inoltre i criteri di priorità nella gestione dei rifiuti e alcuni principi fondamentali, in particolare quello della prevenzione della produzione dei rifiuti. Lo smaltimento dei rifiuti, da effettuare in condizioni di sicurezza, costituisce infatti la fase residuale della gestione dei rifiuti e coinvolge soltanto i materiali per cui non esistono tecniche di recupero, o queste siano economicamente non sostenibili. Inoltre, i rifiuti sono classificati, secondo l’origine, in rifiuti urbani e rifiuti speciali e, secondo le caratteristiche di pericolosità, in rifiuti pericolosi e non pericolosi (D. Lgs. 152/06). Lo smaltimento dei rifiuti tramite collocazione in discarica è regolamentato, nello specifico, dal Decreto Legislativo n. 36 del 13 gennaio 2003 “*Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti*”.

In relazione alla specifica tipologia di impianto in esame, è opportuno sottolineare che la localizzazione di una discarica deve essere basata sull’integrazione di numerosi aspetti di carattere ambientale e sociale (Bertakis *et al.*, 1995); molti sforzi sono stati fatti negli ultimi anni per ottimizzare i processi decisionali che portano alla localizzazione di un impianto di questo genere (e.g. Chang *et al.*, 2008; Sharifi *et al.*, 2009; Sumathi *et al.*, 2008). Le tendenze attuali nella gestione dei rifiuti conferiti in discarica sembrano indirizzarsi verso una diminuzione del numero di impianti, a dispetto di quantità di materiali conferiti in continuo aumento; una delle cause principali di questo fatto risiede nella necessità di porre in atto controlli e vincoli stringenti per un efficiente monitoraggio ambientale, che non può essere perseguito in modo efficace in impianti molto piccoli e dispersi sul territorio (Eiselt, 2007). Il caso di studio qui presentato si propone come modello di gestione per la caratterizzazione geositologica di un impianto, a partire dalla fase di localizzazione e nelle successive fasi di gestione e post-esercizio, fino ad un adeguato recupero dell’ambiente a seguito della chiusura dell’impianto.

5.1.1. Inquadramento territoriale

Il sito “La Filippa” si trova nel settore a nord-ovest del Comune di Cairo Montenotte (Figura 7), in una zona collinare a vocazione agricola; a valle dell’area della discarica è collocato lo stabilimento di produzione dei laterizi. Le aree urbane più prossime distano circa 1,5 km dall’impianto (IGM, 1961).

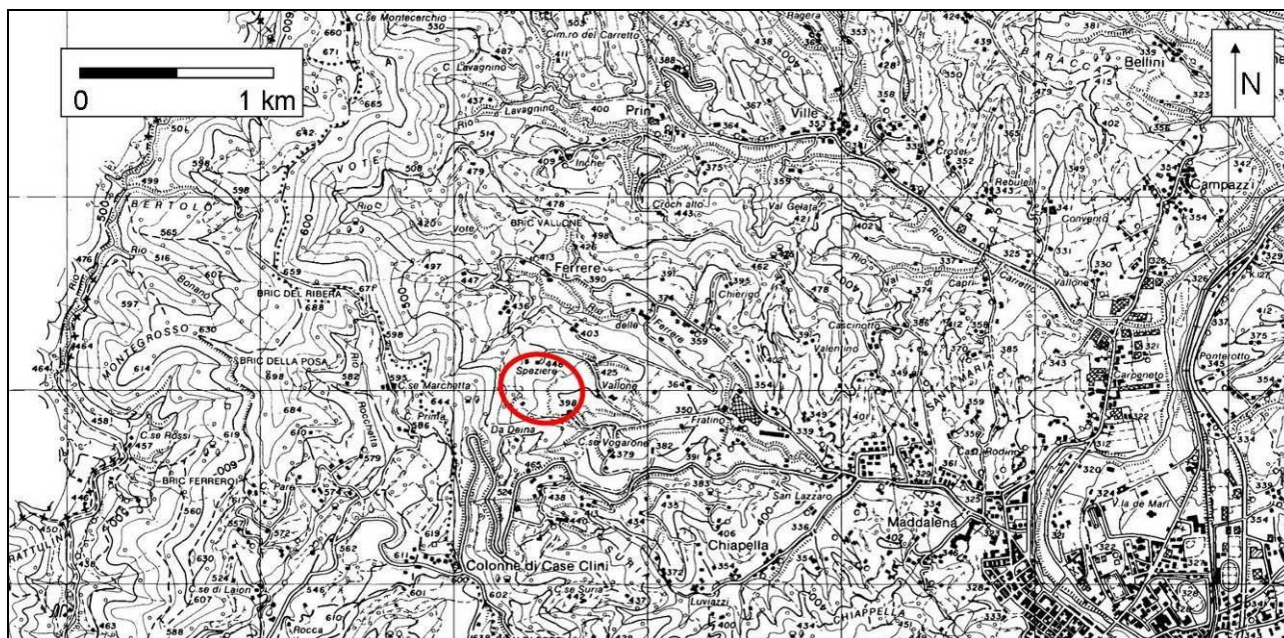


Figura 7 : Localizzazione dell’area di studio, indicata dal cerchio rosso, nell’ambito del territorio comunale di Cairo Montenotte. CTR Liguria, stralcio Tavoleta 211 – 2 Dego.

Il territorio su cui sorge l’impianto si localizza all’interno di un esteso comprensorio individuato quale area destinata all’attività di cava (www.cartografiarl.regione.liguria.it/CartoWebNET; Comune di Cairo Montenotte, 1998), sfruttata per decine di anni per la produzione di laterizi. La zona ha quindi già subito in passato importanti modificazioni antropiche, che ne hanno inevitabilmente modificato il paesaggio. L’impianto “La Filippa” si inserisce pertanto in un contesto non più naturale, ma pesantemente modificato dalla mano dell’uomo. L’obiettivo finale del progetto di completamento dell’impianto e di ricomposizione ambientale è quello di riportare l’area in condizioni analoghe alle morfologie originarie precedenti alle lavorazioni di cava.

L’area di intervento non è sottoposta ad alcun vincolo o limitazione all’uso del territorio, come verificato sulla base delle classificazioni aventi valenza normativa (PRG, Piano per l’assetto Idrogeologico, criteri per l’identificazione delle zone sismiche). La Tabella 2 presenta i dati relativi alla configurazione ambientale e ai principali fattori morfogenetici caratterizzanti l’assetto territoriale e l’evoluzione del sito “La Filippa”:

		Principali criticità relative a fattori predisponenti processi di instabilità in atto o potenziali	Indagini e approfondimenti specifici necessari alla valutazione dell'idoneità del sito	
			Dati pregressi	Ricerche condotte nel presente studio
Piano topografico	380 ÷ 690 m s.l.m.	Energia del rilievo con valori localmente elevati in relazione alla sequenza lito-stratigrafica	Rilievo cartografico con CTR 1:5.000; rilievo topografico <i>ex-novo</i> in scala 1:500	Verifica delle variazioni topografiche conseguenti all'attività estrattiva
Ambito meteo-climatico	Piemonte meridionale, in prossimità dello spartiacque ligure-padano	Altezze di precipitazione rilevanti su periodi 1 mese ÷ 1 anno; eventi di precipitazione elevata (durata 1 ÷ 5 giorni); precipitazione di elevata intensità (< ora ÷ 24 ore); elevato manto nevoso (1 ÷ 4 m)	Verifica delle serie pluviometriche (Mercadante, 2007); adeguato dimensionamento rete di raccolta acque di superficie; valutazione infiltrazione in discarica per produzione percolato (Università dell'Insubria, 2006, 2007)	Correlazione eventi di precipitazione con monitoraggio piezometrico e deformazioni versanti
Dominio morfologico	Collinare, fascia di raccordo tra pendio e fondovalle bacino secondario	Erosione versanti, <i>soil slip</i> , frane, DGPV	Analisi geomorfologica regionale e puntuale da terreno e telerilevamento (Università dell'Insubria, 2006, 2007)	Rilievi puntuali di terreno
Ambito idrologico	Corso d'acqua secondario (Rio Filippa), tributario reticolo del 2° ordine (F. Bormida)	Regime deflusso effimero con portate molto variabili; eventi di trasporto solido in massa in ambito di conoide; eventi di piena di breve durata e limitata energia nel fondovalle, insufficienza sezioni deflusso	Analisi regime dei deflussi, impostazione sezioni di misura, mancando dati diretti esame assetto geomorfologico; definizione ambito attività conoide, modellizzazione dei possibili fenomeni di trasporto solido in massa (Politecnico di Milano, 2007)	
Assetto idrogeologico	Substrato impermeabile; ridotta circolazione di acqua nelle coperture superficiali	Possibile infiltrazione di acque sotterranee all'interno della vasca dei rifiuti	Rilevamento puntuale di sorgenti e affioramenti idrici; esecuzione di prove di permeabilità in sito (campagne di indagine 2000-2001, 2005, 2006)	Esecuzione di 14 prove di permeabilità del tipo Lugeon, monitoraggio piezometrico

Assetto litologico-stratigrafico	Ridotti depositi di coperture sovrapposti sui termini inferiori della sequenza del BTP	Individuazione spessore e distribuzione depositi coperture per ricostruzione paleomorfologia	Rilevamento sezioni di scavo della cava; sondaggi a carotaggio (campagne di indagine 2000-2001, 2005, 2006)	Esecuzione di 7 sondaggi a carotaggio continuo per verifiche puntuali e taratura perforazioni a distruzione; esecuzione 28 sondaggi a distruzione; monitoraggio inclinometrico
Caratteristiche geotecniche	Coperture: terreni incoerenti a granulometria fine; substrato lapideo con comportamento da roccia tenera	Coperture a comportamento coesivo, normalmente consolidato, compressibile con limitata resistenza al taglio. Substrato lapideo compatto, soggetto ad alterazione. Comportamento influenzato da minerali rigonfianti e stato di fratturazione	Determinazioni speditive sui carotaggi; prove in sito; prelievo campioni per prove di laboratorio (campagne di indagine 2000-2001, 2005, 2006)	Prove SPT in sito, prelievo di 15 campioni di roccia per prove di laboratorio (verifica caratteristiche fisiche e meccaniche, presenza fratturazione, carbonati, minerali rigonfianti)
Sismicità	Classe sismica 4	Effetti diretti e secondari (frane, mobilizzazione sedimenti)	Prospezioni geofisiche (campagna di indagine 2000-2001)	Consultazione bibliografia e cataloghi sismici, realizzazione inquadramento sismotettonico; esecuzione di indagini geofisiche (3 profili MASW e 1 profilo sismico a rifrazione)
Tipologia rifiuti conferiti	Materiali inerti a granulometria eterogenea, scarti lavorazione; fanghi, cascami plastica, ecc.	Comportamento eterogeneo ammasso; assenza di casistiche descrittive in bibliografia		Analisi dei rifiuti conferiti sulla base dei documenti autorizzativi; campionamenti rifiuti conferiti tal quali; determinazioni speditive densità varie tipologie materiali; esecuzione prove di carico con piastra grande diametro; determinazione proprietà indice dei materiali in entrata

Tabella 2 : Configurazione ambientale e principali fattori morfogenetici caratterizzanti l'assetto territoriale e l'evoluzione del sito “La Filippa”.

5.1.1.1. Elementi meteo-climatici

Il clima ligure è di tipo mediterraneo, con caratteristiche variabili in funzione dell’orografia locale, legate in particolare alla presenza del Mar Ligure da un lato e della dorsale montuosa dall’altro; tale dorsale risulta morfologicamente discontinua ed è caratterizzata da massici particolarmente elevati (Gruppo dell’Argentera), alternati a tratti in cui la barriera montuosa è poco elevata e profondamente incisa da valli trasversali. La complessa morfologia del territorio genera condizioni microclimatiche diverse nei due versanti, con rimarcabili differenze nei regimi termici e pluviometrici.

Nel caso dell’area in esame, assume particolare rilevanza un’analisi dettagliata dell’entità e della distribuzione pluviometrica: infatti, questi parametri rivestono un ruolo primario per la valutazione delle condizioni al contorno che improntano sia le modalità dello scorrimento idrico superficiale e della circolazione idrica sotterranea, sia l’evoluzione dei processi morfogenetici di interesse per la configurazione complessiva e la stabilità del sito. La determinazione in loco dei principali parametri meteorologici risulta fondamentale, inoltre, per la caratterizzazione ambientale del sito e la corretta gestione dell’impianto di discarica, poiché le precipitazioni influenzano in modo sostanziale il tasso di infiltrazione e quindi la quantità di percolato prodotta.

Con l’entrata in funzione della discarica attuale, il monitoraggio pluviometrico è assicurato dalla stazione meteorologica installata nell’impianto; per il periodo precedente, sono state acquisite le misure pluviometriche significative per la definizione della serie storica di riferimento nel bacino del F. Bormida di Spigno (Mercadante, 2007; SIMN). L’integrazione dei dati rilevati da 3 stazioni, alcune delle quali tuttora in funzione, localizzate nell’abitato di Cairo Montenotte e in corrispondenza dell’impianto “La Filippa”, consentono di ricostruire una serie idrologica continua relativa agli ultimi 60 anni (1950 ÷ 2011; Tabella 3).

Stazione	Cairo Montenotte	Cairo Montenotte	“La Filippa”
Rete monitoraggio	Ex Servizio Idrografico Nazionale	ARPA Piemonte (cod.399)	LPL Discarica “La Filippa”
Bacino idrografico	F. Bormida di Spigno	F. Bormida di Spigno	Rio Filippa (F. Bormida di Spigno)
Localizzazione	Cairo Montenotte	Cairo Montenotte. Sponda F. Bormida presso ponte pedonale G. Milano	Area impianto attuale, presso C. Vallone
Quota (m s.l.m.)	328 m 335 m	388 m	401 m
Distanza da impianto discarica (km)	3,0	2,8	0,0
Strumentazione	Pluviometro, termometro	Pluviometro, termometro	Anemometro, barometro, energia radiante, evaporimetro, igrometro, pluviometro, termometro

Periodo funzionamento	01/09/1949 ÷ 2002 (?)	01/10/2001 ÷ attuale	2006 ÷ attuale
Disponibilità dati giornalieri pioggia	1950 ÷ 1991 serie completa; periodo successivo in modo parziale	01/01/04 ÷ 30/06/11 aggiornati periodicamente	- dal Settembre 2006 con interruzioni; - dal Settembre 2009 serie completa
Precipitazione annua media	1081,3 mm	872,6 mm	1047,3 mm
Precipitazione max 1 giorno	246,8 mm (anno 1991)	212,4 mm (set 2006)	166,0 mm (nov 2011)
Precipitazione max 2 giorni consecutivi	289,2 mm (anno 1991)	236,6 mm (set 2006)	227,8 mm (nov 2011)
Precipitazione max 3 giorni consecutivi	302,2 mm (anno 1972)	243,8 mm (set 2006)	255,2 mm (nov 2011)
Precipitazione max 4 giorni consecutivi	359,0 mm (anno 1972)	245,0 mm (set 2006)	264,2 mm (nov 2011)
Precipitazione max 5 giorni consecutivi	377,0 mm (anno 1972)	245,0 mm (set 2006)	317,2 mm (nov 2011)

Tabella 3 : Stazioni di monitoraggio utilizzate per la caratterizzazione pluviometrica dell'area e parametri caratteristici rilevati.

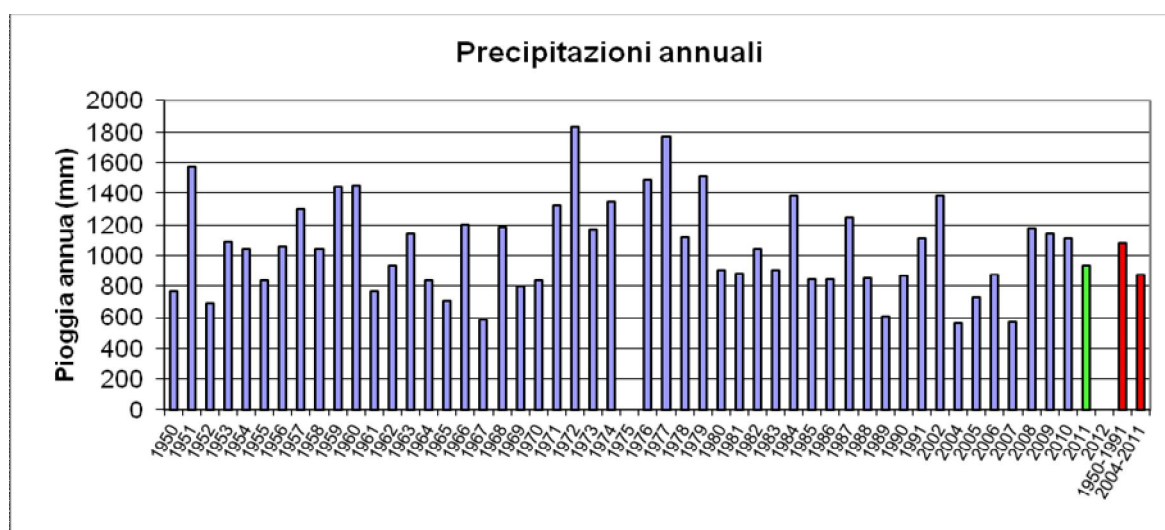


Figura 8 : Precipitazioni annuali rilevate a Cairo Montenotte nel periodo 1950 ÷ 1991 e 2002 ÷ 2011 (grafico blu); in rosso sono rappresentate le medie di vari intervalli temporali e in verde le precipitazioni del 2011.

I dati disponibili consentono di caratterizzare su un intervallo temporale significativo e praticamente continuo il regime delle precipitazioni, sia in termini di parametri medi rappresentativi di condizioni idrologiche ordinarie, sia di parametri estremi relativi al verificarsi di eventi pluviometrici di rilevante intensità (Mercadante, 2007).

L'analisi della distribuzione delle precipitazioni condotta su una scala temporale media, quale in particolare l'ultimo decennio, evidenzia il succedersi di due configurazioni idrologiche significativamente diverse. Successivamente ai grandi eventi alluvionali del novembre 1994 e dell'ottobre 2000, la Valle Bormida, come

la quasi totalità del settore ligure-piemontese del Bacino Padano, è stata caratterizzata da precipitazioni generalmente ridotte. Gli apporti pluviometrici considerati nel loro insieme (piogge e neve), infatti, nonostante il verificarsi di eventi idrologici significativi (2002, settembre 2006, novembre 2011, ecc.), risultano sensibilmente inferiori rispetto ai valori ordinari. A Cairo Montenotte nel periodo 2003 ÷ 2010 la precipitazione media annua è di soli 875 mm, ovvero circa il 20% in meno del quarantennio precedente (Figura 8).

Nel triennio 2008 ÷ 2010, tuttavia, si registra un sensibile incremento delle precipitazioni che, per ogni anno considerato, risultano ben superiori non solo alla media degli anni precedenti, ma alla stessa media del quarantennio 1950 ÷ 1991. Negli anni 2003 ÷ 2007, particolarmente asciutti, la precipitazione media annua è di soli 710 mm, mentre nel triennio 2008 ÷ 2010 raggiunge 1143 mm, che corrisponde al 160% del valore precedente.

Nel 2011 si sono avuti 935 mm di pioggia, valore inferiore rispetto agli anni 2008 ÷ 2010; tuttavia, nel novembre 2011 si è verificato un evento pluviometrico particolarmente intenso, che ha provocato ingenti danni in varie località della Liguria e dell’Appennino toscano (e.g. Arpal, 2011; Arpa Piemonte, 2011).

Il verificarsi di questa nuova configurazione meteo-climatica comporta l’afflusso di elevati apporti meteorici, sia nel corso di eventi idrologici prolungati, sia di episodi di minore durata ma elevata intensità. Attraverso la disponibilità di grandi quantitativi idrici sul suolo, si determinano così condizioni particolarmente favorevoli all’instaurarsi o all’alimentazione di circuiti idrici sotterranei, all’imbibizione del terreno e alla mobilitazione di fenomeni franosi.

La presenza di questo particolare regime idrologico determina per l’area in esame condizioni al contorno particolarmente “severe”; i monitoraggi piezometrici e inclinometrici assumono, quindi, notevole significato per la verifica della circolazione idrica sotterranea e della stabilità del sito, in un’area peraltro storicamente soggetta a fenomeni alluvionali (Regione Piemonte, 1998 a; Tropeano, 1989; Tropeano *et al.*, 1993; 1995; 1999; Arpa Piemonte, 2006). Per quanto riguarda l’ultimo evento pluviometrico significativo, del novembre 2011, in corrispondenza dell’impianto “La Filippa”, pur avendo registrato oltre 300 mm di pioggia in 5 giorni, non si sono verificati particolari problemi nella gestione dei deflussi idrici, a testimonianza dell’efficacia delle misure di regimazione e controllo dei deflussi.

5.1.1.2. Inquadramento geologico e strutturale

L’impianto si localizza nell’ambito del paesaggio collinare relativo allo spartiacque tra i medi bacini dei F. Bormida di Spigno e di Millesimo, alcuni chilometri a O – NO di Cairo Montenotte.

Il settore, appartenente al dominio strutturale delle Alpi Liguri, si caratterizza per la presenza al di sopra del basamento metamorfico di una potente sequenza di depositi marini di età terziaria, riferibili al cosiddetto Bacino Terziario Piemontese (BTP), comprendenti litologie terrigene prevalentemente a granulometria fine (cfr. § 4.1.). Il BTP affiora nella zona di giunzione strutturale tra la catena alpina e l’Appennino settentrionale, alla terminazione sud-occidentale della Pianura Padana; queste unità a composizione marnosa e marnoso-arenacea, presenti con continuità lungo l’intero settore compreso tra i due rami del Bormida, costituiscono il substrato locale del sito e di un suo ampio areale circostante (Società Geologica Italiana, 1992; Boccaletti *et al.*, 1990; Carrapa *et al.*, 2003; Dalla *et al.*, 1992; Sacco, 1889-1890).

Nell’insieme, le formazioni del BTP derivano principalmente dalla sedimentazione ad opera di correnti di torbida (Gelati, 1976; Gelati & Gnaccolini, 1987/88; 2003; Gnaccolini *et al.*, 1990; Giammarino, 1984;

Pasquare *et al.*, 1992) e sono costituite da una monoclinale con giacitura NE – SO ed immersione verso NO, generalmente con pendenze comprese tra $7 \div 15^\circ$.

Per l'area in esame riveste specifico interesse la porzione basale della sequenza, comprendente secondo lo schema stratigrafico classico (Gelati, 1968; Serv. Geol. d'It., 1969) le unità seguenti elencate a partire dal basso:

- **Formazione di Molare:** conglomerati poligenici con intercalazioni arenaceo-sabbiose e marnoso-sabbiose; Oligocene inferiore.
- **Formazione di Rocchetta:** marne siltoso-sabbiose con alternanze di arenarie e sabbie; Oligocene inferiore – Burdigaliano.
- **Formazione di Monesiglio:** sabbie e arenarie, livelli conglomeratici, con intercalazioni marnose. Oligocene inferiore – Burdigaliano.

Nella cartografia recente, le Formazioni di Rocchetta e di Monesiglio sono state unite in un'unica unità (F.ne di Rocchetta-Monesiglio), in quanto le formazioni non sono separabili a causa della distribuzione irregolare e discontinua dei corpi arenacei intercalati alle peliti (Gelati & Gnaccolini, 1998; Servizio Geologico d'Italia, 2011).

5.1.1.3. Inquadramento sismotettonico

Il territorio comunale di Cairo Montenotte è inserito, sulla base dei “*Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e la formazione e l'aggiornamento degli elenchi e delle medesime zone*” conseguente all'O.P.C.M. n. 3274 del 2003, nella Zona 4 (aree a bassa sismicità). In ottemperanza alle NTC, è stata eseguita una valutazione delle strutture sismogenetiche i cui effetti possono potenzialmente influenzare il sito. Nell'ambito dell'Italia nord – occidentale è possibile riconoscere una serie di grandi aree tettonicamente e sismicamente attive, distinte sulla base della distribuzione dell'attività sismica, dei fuochi sismici e dei lineamenti geostrutturali (Eva *et al.*, 1992). L'arco delle Alpi Occidentali, nella sua terminazione meridionale (Alpi Marittime e Mar Ligure), è caratterizzato da un'attività sismica ben documentata. Le strutture potenzialmente in grado di generare eventi di magnitudo moderata sono limitate, per quanto riguarda specificatamente l'area di interesse, alla linea Saorge – Taggia e al complesso di faglie sottomarine presenti all'interno del Mar Ligure (cfr. § 4.2.).

L'attività delle Alpi Marittime tende ad aumentare spostandosi da Genova verso ovest, raggiungendo i suoi massimi valori nelle zone dell'Imperiese e del Nizzardo. Di particolare rilevanza appare la linea Saorge – Taggia, che si è dimostrata costantemente attiva ed è costituita da un complesso fascio di faglie a trascorrenza destra, con orientazione NO – SE; si estende dal Mar Ligure sino ad intersecare, verso nord, la faglia Breil-Sospel-Monaco, con trascorrenza sinistra, considerata lo svincolo orientale dell'arco di Nizza. La sismicità storica dell'area tende a concentrarsi nella parte meridionale della linea Saorge – Taggia in prossimità del Mar Ligure. I valori di intensità sono ridotti nella parte centrale e tendono ad aumentare nella parte più a sud, gli ipocentri sono generalmente molto superficiali (Servizio Geologico d'Italia, 2010; Boni, 1984).

Il Mar Ligure appare nettamente diviso in due settori, quello orientale quasi completamente asismico, e la porzione occidentale in cui si localizzano i principali terremoti che hanno interessato l'Italia nord – occidentale. Le caratteristiche morfologiche e morfotettoniche del bacino e del suo margine continentale

sono state studiate tramite rilievi sismici eseguiti durante campagne oceanografiche italiane e francesi. I profili sismici mettono in evidenza che il sistema di faglie più significativo è quello legato al piede del margine continentale (Eva *et al.*, 1999).

La sismicità attuale della Liguria mostra, sulla base dei dati rilevati nel periodo 1981 ÷ 2006 dalla rete sismica regionale (Eva *et al.*, 1992, <http://www.dipteris.unige.it/geofisica/>; INGV – Catalogo sismico strumentale), magnitudo comprese tra 1,5 e 5,0 M_l . Le localizzazioni indicano una maggiore superficialità degli eventi in terra (mediamente $h < 7$ km), mentre mostrano degli approfondimenti sino a 15 ÷ 20 km in prossimità del margine continentale (Cattaneo *et al.*, 1999).

Per quanto riguarda la sismicità storica, i cataloghi (Postpischl, 1985; Boschi *et al.*, 2000; CPTI, 2004), mostrano che i principali eventi risentiti sulla costa ligure sono legati a terremoti marini, spesso di incerta localizzazione, mentre gli eventi localizzati a terra sono molto limitati e distribuiti lungo la fascia costiera (Tabella 4).

Data	Epicentro	Intensità epicentrale (scala MCS)	Ms	Distanza dall'impianto (km)	Risentimento documentato a Cairo M. (I MCS)
22/10/1541	Valle Scrivia	VIII	5,27	65	
20/07/1564	Alpi Marittime	VIII ÷ IX	5,73	90	
15/02/1644	Alpi Marittime	VIII ÷ IX	5,85	90	
28/12/1703	Villafranca	VII ÷ VIII	5,10	80	
02/04/1808	Valle del Pellice	VIII	5,55	95	
23/02/1818	Liguria occidentale	VII ÷ VIII	5,37	55	
08/01/1819	Liguria occidentale	VII ÷ VIII	5,06	40	
09/10/1828	Valle dello Staffora	VII ÷ VIII	5,55	70	
26/05/1831	Liguria occidentale	VIII	5,35	70	
29/12/1854	Liguria occidentale	VII ÷ VIII	5,69	85	
23/02/1887	Liguria occidentale	IX	6,29	55	VI
26/10/1914	Tavernette	VII	5,08	105	

Tabella 4 : Principali terremoti storici e strumentali (intensità epicentrale > VII MCS) rilevati nell'area compresa tra il Piemonte centro-meridionale, la Liguria e il margine ligure-emiliano (Fonte: CPTI04). Note: intensità espresse secondo la scala MCS; Ms: magnitudo relativa ai terremoti storici stimata attraverso correlazioni intensità/magnitudo elaborate per il territorio italiano.

Il principale evento è rappresentato dal sisma del 23 Febbraio 1887, che può essere ritenuto rappresentativo del massimo evento attendibile per l'area ($M_s = 6,29$; Catalogo parametrico CPTI04). La sua localizzazione, seppure affetta da margini di incertezza data la limitata rete di registrazione strumentale dell'epoca, è da collocare nei pressi di Bussana (Sanremo) ad una distanza di 55 km da Cairo Montenotte. Il sisma, con epicentro in mare, ebbe un'intensità massima valutata nel IX grado della scala MCS, causando la distruzione di interi paesi nell'area epicentrale. Risentimenti al suolo significativi furono registrati sul litorale sino all'altezza di Vado. Come si rilevò già subito dopo l'evento, nonostante la magnitudo significativa raggiunta dal sisma, gli effetti sul territorio e sul tessuto urbanistico si concentrarono lungo una fascia relativamente

estesa nella lunghezza, ma di ampiezza ridotta, localizzata in corrispondenza della costa. Nelle zone interne, al contrario, già a distanze limitate non si rilevarono distruzioni significative o cospicui effetti sul territorio. Un altro evento storico di notevole importanza risulta essere il terremoto delle Alpi Marittime del 1564 ($M_s = 5,73$), associato al tratto terminale della linea Saorge – Taggia, ma posto a distanza ancora maggiore dall'area di Cairo Montenotte (circa 90 km).

In generale, ai fini della valutazione della pericolosità sismica del territorio di Cairo Montenotte, è possibile affermare che nessuna struttura presenta potenziale sismico significativo e che i terremoti di maggiore rilevanza si localizzano sempre a distanze superiori ai $40 \div 50$ km, in domini strutturali diversi da quello proprio dell'impianto in esame (Scandone & Stucchi, 2000). Per gli eventi maggiori associati alla terminazione delle Alpi Marittime e al margine costiero occidentale, inoltre, la collocazione e l'assetto strutturale delle strutture sismogenetiche comportano una distribuzione del risentimento sismico che non coinvolge significativamente la Valle Bormida.

5.1.1.4. Geomorfologia ed evoluzione ambientale recente

Il bacino del Rio Filippa si localizza all'interno della valle del F. Bormida di Spigno, in corrispondenza del passaggio tra unità morfologiche riferibili a paesaggi ben differenziabili (Figura 9; Gabert, 1962). Il carattere dominante nel paesaggio è dato dalla tipica morfologia a *cuestas*: i versanti esposti a SE, con rocce immergenti a reggipoggio, sono molto acclivi ed evolvono per arretramento parallelo; al contrario, i versanti esposti a NO sono debolmente inclinati e la loro evoluzione è controllata dall'assetto monoclinale delle superfici di strato. Localmente si verificano fenomeni di erosione regressiva e, in corrispondenza delle porzioni più marnose del substrato, i versanti sviluppano morfologie calanchiformi con profonde incisioni (CNR, 1983; Motta & Motta, 1995; Regione Piemonte, 1998b).

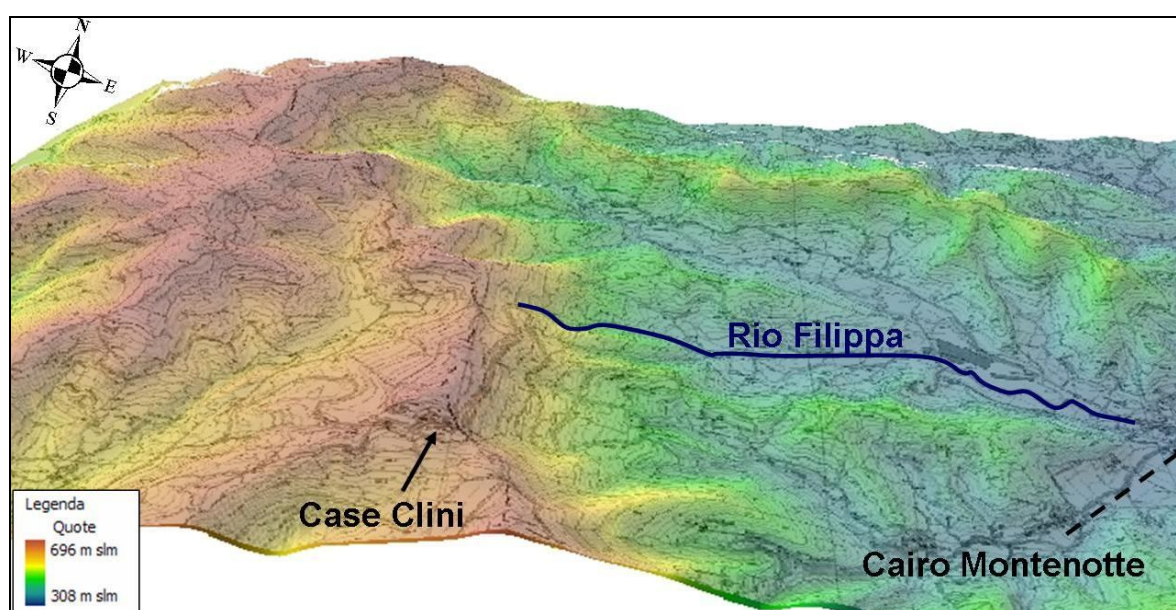


Figura 9 : Modello tridimensionale del bacino del Rio Filippa. Risalta la differenza di morfologie e di quote tra i versanti posti sui due lati dello spartiacque delimitante il bacino del F. Bormida di Spigno ad E (lato destro del modello) da quello del F. Bormida di Millesimo ad O (lato sinistro). Ben evidente risulta anche la disposizione allungata N - S, quasi lineare, del crinale locale passante per Case Clini, che determina la particolare configurazione della testata del bacino del Rio Filippa.

Lo spartiacque si sviluppa in modo lineare in direzione N-S a quote piuttosto omogenee; tale configurazione, controllata dall'assetto giaciturale del substrato disposto a monoclinale, è direttamente riferibile all'evoluzione recente dello spartiacque ligure – piemontese ed ha improntato il modellamento del paesaggio collinare e l'evoluzione del bacino imbrifero.

La zona di transizione tra i due settori è identificata da una scarpata netta, con altezze di $200 \div 250$ m, attraverso la quale si realizza il dislivello topografico; nell'insieme le acclività sono rilevanti, con valori medi superiori ai 30° e localmente dell'ordine dei 45° .

I due settori individuati drenano rispettivamente verso il Bormida di Millesimo e il Bormida di Spigno, corsi d'acqua afferenti attualmente allo stesso collettore fluviale. La configurazione complessiva del rilievo evidenzia, tuttavia, un modellamento differenziale riferibile molto probabilmente a diversi livelli di base.

Il settore occidentale, afferente al F. Bormida di Millesimo, è impostato nei termini prevalentemente arenaceo-marnosi (RTM, *litofacies* 3) della Formazione di Rocchetta-Monesiglio, con quote sommitali che raggiungono frequentemente i $600 \div 700$ m s.l.m.. Il paesaggio nel complesso presenta i caratteri tipici del rilievo collinare delle Langhe, con profili dei versanti nettamente asimmetrici e morfologia dei crinali piuttosto articolata.

Nel settore orientale, il bacino del Rio Filippa nel suo insieme risulta quasi interamente modellato nell'ambito dell'unità marnoso-arenacea (RTM, *litofacies* 2) della Formazione di Rocchetta-Monesiglio; il rilievo presenta un insieme di crinali minori riferibili al rimodellamento di un'antica superficie morfologica posta a quote decisamente inferiori rispetto al paesaggio delle Langhe; parte di questa paleosuperficie è stata riconosciuta attraverso le indagini di terreno appena a monte della testata del Rio Filippa. Il tratto superiore del bacino del Rio Filippa, con il suo andamento nell'insieme rettilineo, conferisce al Rio un assetto apparentemente anomalo, poiché privo di testata.

Nell'ambito del bacino la sommità dei crinali si sviluppa tra i 400 e i 500 m s.l.m., mentre il fondovalle dei Rii Filippa – Ferrere si dispone a $330 \div 340$ m s.l.m. e la piana alluvionale del F. Bormida si trova attorno ai 320 m s.l.m..

Sviluppo e inclinazione media dei pendii, entità dei dislivelli e periodo temporale di modellamento (presumibilmente nell'ordine delle centinaia di migliaia di anni) suggeriscono discrete caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso e condizioni di sostanziale equilibrio complessivo nei confronti dei processi di modellamento tipici della regione.

L'impianto “La Filippa” è situato alla base della dorsale principale di Case Clini, in corrispondenza di una sorta di “anfiteatro” naturale delimitato, ad est e nord, dal rilievo secondario di C. Vallone – C. Speziere, a ovest dalle balze degradanti dal costone di Nadina, mentre il lato verso sud, appena oltre il corso del Rio Filippa, è chiuso dalla dorsale minore di Da Deina.

Su due lati (E e N), quindi, gli apporti dello scorrimento superficiale proveniente da monte risultano praticamente trascurabili. Verso ovest, la posizione distaccata dal versante principale, analogamente, comporta un contributo solo parziale da parte del versante a monte.

Le aree poste alla base della dorsale evidenziano a scala complessiva un andamento abbastanza omogeneo, con superfici più o meno ampie, degradanti nel fondovalle della vallecchia del Rio Filippa. Tale andamento risulta evidentemente improntato in misura rilevante dallo sviluppo assunto dall'attività di cava che ha portato alla rimozione delle morfologie articolate e dei crinali secondari che dovevano necessariamente costituire la prosecuzione delle forme relitte ancora rilevabili nella parte alta del versante.

5.1.1.5. Idrologia e idrogeologia

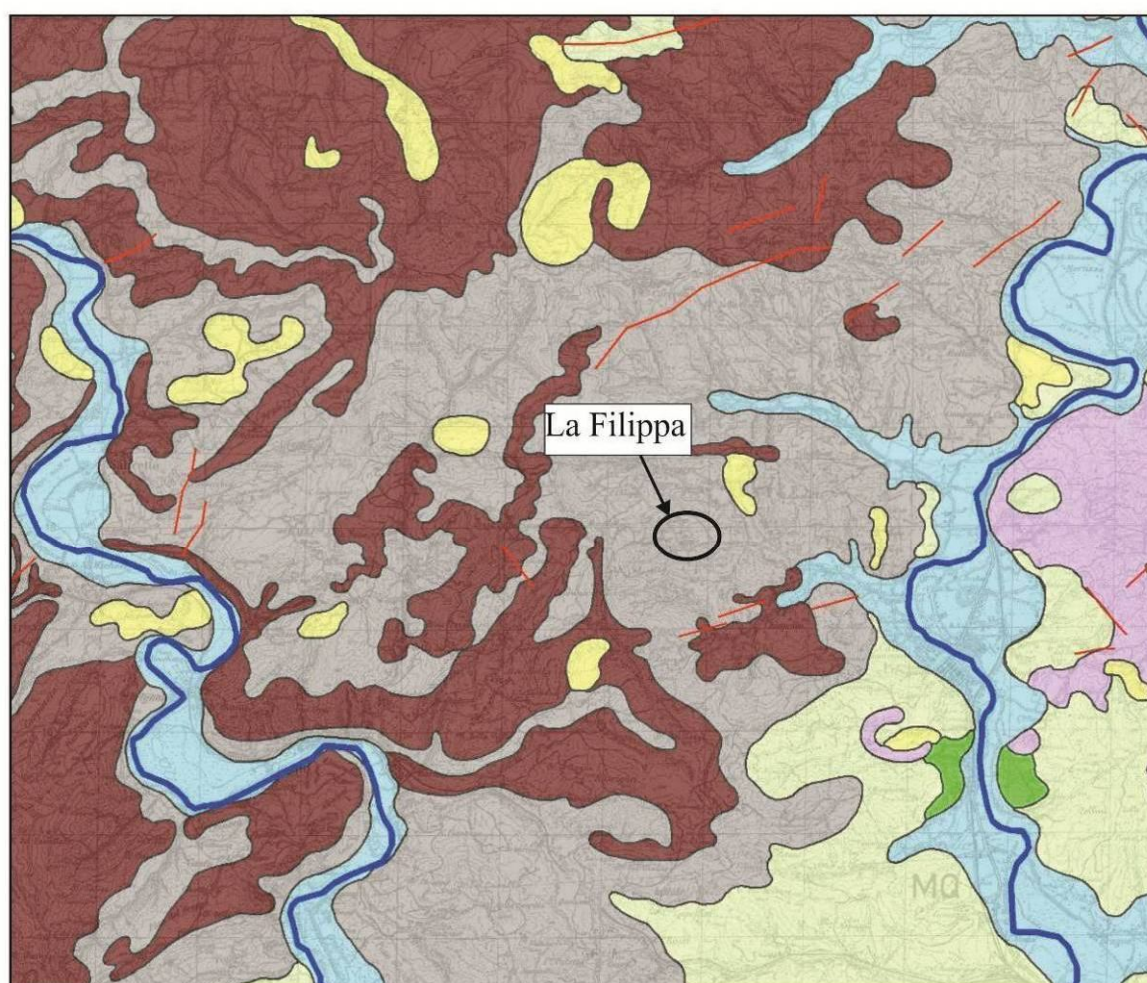
La zona oggetto del presente studio si situa sul versante in destra idrografica del F. Bormida di Spigno; in questo ambito il reticolo idrografico, in relazione all’assetto morfo-topografico e ai caratteri meteo-climatici, presenta uno sviluppo limitato con una serie di impluvi scolanti bacini con superficie di pochi chilometri quadrati e assenza di corsi d’acqua di rilievo.

L’impianto si localizza nel sottobacino del Rio Filippa, la cui asta principale dopo un percorso di circa 1,5 km confluisce nel Rio delle Ferrere. Il bacino considerato nel suo complesso raggiunge la quota massima di 688 m s.l.m., mentre il punto di recapito finale, nel F. Bormida al margine settentrionale dell’abitato di Cairo Montenotte, è posto a circa 320 m s.l.m..

Nell’area di diretto interesse per l’impianto l’unica asta drenante significativa è rappresentata dal Rio Filippa. Il regime, strettamente connesso alla distribuzione degli apporti meteorici, risulta fortemente variabile e solo nella parte inferiore dell’alveo si riscontrano deflussi, sia pure molto limitati, per gran parte dell’anno. Nel suo sottobacino non sono presenti sorgenti. L’alimentazione allo scorrimento deriva in parte prevalente dalle precipitazioni dirette; nei settori di fondovalle prossimi al livello di base, un modesto apporto proviene anche dallo scorrimento idrico sotterraneo ospitato nei depositi delle coperture. Tale contributo è praticamente inesistente nella parte alta del bacino, dove l’alveo è modellato direttamente nelle marne del substrato.

Gli impluvi maggiori confluenti nel Rio Filippa (lunghezza nell’ordine dei 500 m) costituiscono aste drenanti con deflussi occasionali durante i periodi di prolungate precipitazioni, mentre la maggior parte delle incisioni secondarie rappresentano solo dei solchi di erosione lineare sede saltuariamente di deflussi liquidi per brevissimi periodi (ore – pochi giorni), a seguito di apporti meteorici particolarmente rilevanti.

La carta di inquadramento idrogeologico regionale, redatta in scala 1:25.000 (Figura 10), consente di visualizzare l’estensione regionale dei complessi idrogeologici (Celico, 1986-1988; Civita, 2005 a,b) scarsamente permeabili costituenti la struttura del rilievo, la sporadica presenza dei complessi a maggiore permeabilità relativi ai terreni delle coperture e i rapporti tra circuiti idrici sotterranei e corpi idrici superficiali. L’ampiezza dell’areale considerato consente di localizzare cartograficamente anche le litologie relative al basamento alpino e alle sequenze carbonatiche, i cui affioramenti si collocano a distanza rilevante e sempre idrogeologicamente isolati dalle unità litologiche dell’area di studio.



Legenda

Serie delle coperture quaternarie

- Complesso detritico-colluviale
- Complesso alluvionale

Serie idrogeologiche del substrato locale

- Complesso arenaceo-marnoso
- Complesso argilloso-marnoso
- Complesso arenaceo-conglomeratico

Serie Triassica

- Complesso calcareo-dolomitico

Serie del basamento alpino

- Complesso basale indifferenziato



Elementi strutturali

- Limite tettonico

Simboli convenzionali

- Alveo del Fiume Bormida

Figura 10 : Inquadramento idrogeologico regionale di area vasta. Riduzione dell'elaborato originale in scala 1:25.000.

Nell’ambito territoriale di riferimento sono state individuate, sulla base dell’assetto geologico-strutturale, 4 principali serie idrogeologiche ed i relativi complessi:

Serie idrogeologiche del substrato locale

- Serie del basamento alpino:
 - o *Complesso basale indifferenziato*: Calcescisti, micascisti, filladi, serpentiniti e metagabbri, generalmente a debole grado di fessurazione. Permeabilità di tipo secondario per fessurazione. Valori relativi da bassi a bassissimi, localmente maggiori in corrispondenza degli orizzonti a maggiore grado di fessurazione. Presenza di acquiferi di estensione limitatissima coincidente con le principali zone di disturbo tettonico.
- Serie Triassica:
 - o *Complesso calcareo-dolomitico*: Calcari, calcari dolomitici e dolomie. Permeabilità prevalente per fessurazione e carsismo. Valori relativi variabili da medio-bassi ad elevati. I litosomi in continuità idraulica e correlati a bacini di alimentazione sufficientemente estesi ospitano una rilevante circolazione sotterranea.
- Serie Oligo-Miocenica:
 - o *Complesso arenaceo-conglomeratico*: Corrisponde alla Formazione di Molare. Arenarie, sabbie e conglomerati. Spessore variabile da alcune decine di metri a circa 150 m. Permeabilità per porosità e subordinata fessurazione. Valori relativi da medi a bassi. La presenza di piccoli acquiferi a sviluppo locale è subordinata agli intervalli con minore cementazione e scarsa matrice limosa. Le potenzialità idriche non sono rilevanti.
 - o *Complesso argilloso-marnoso*: Comprende la sequenza tipica della Formazione di Rocchetta-Monesiglio (RTM). Marne e marne argillose con intercalazioni arenacee nettamente subordinate. Permeabilità per porosità e, localmente, fessurazione, con valori relativi molto bassi. A scala del rilievo collinare il complesso è privo di circolazione idrica sotterranea. La quasi totalità dell’intero bacino del Rio Filippa risulta compresa nell’areale di affioramento di questo complesso.
 - o *Complesso arenaceo-marnoso*: Corrisponde ai corpi lenticolari arenacei e arenaceo-conglomeratici di maggiore importanza intercalati nella sequenza marnosa tipica. Fitte alternanze arenaceo-marnose con netta prevalenza della componente granulare, intervallate ad orizzonti arenacei di spessore plurimetrico. Permeabilità prevalente per fessurazione, nell’insieme con valori relativi bassi o, localmente, medio-bassi. Lo stato di fratturazione e lo spessore degli intervalli arenacei determina una certa variabilità nella permeabilità, con l’esistenza di piccoli corpi idrici con sviluppo locale.

Serie idrogeologiche delle coperture

- Serie idrogeologica Quaternaria:
 - o *Complesso alluvionale*: Depositi fluviali relativi al reticolo principale incentrato sui corsi del F. Bormida di Spigno e di Millesimo. Sabbie e ghiaie con ciottoli, limi sabbiosi. Costituiscono con spessori variabili da 4 ÷ 5 m a 8 ÷ 9 m il colmamento dei fondovalle maggiori. Permeabilità di tipo primario per porosità, con valori variabili da medi a elevati. Ospitano una falda libera superficiale in connessione idraulica con l’alveo e costituiscono il recapito finale dei circuiti ospitati nei lembi del complesso detritico-colluviale in continuità giaciturale.
 - o *Complesso detritico-colluviale*: Accumuli di frana, depositi torrentizi relativi al reticolo idrico minore, coperture detritico-colluviali. Sabbie limose, limi argillosi, ciottoli e blocchi di marne e arenarie inglobati in sabbie argillose. Assortimento granulometrico fortemente variabile e,

generalmente, con rilevante presenza di una matrice fine. Spessori variabili, compresi generalmente nell'ordine di pochi metri, ma che possono superare la decina di metri negli accumuli di frana di maggiori dimensioni o in corrispondenza dei corpi di conoide. Permeabilità di tipo primario per porosità con valori relativi variabili da medi o elevati (accumuli di frana, depositi torrentizi) a medio-bassi (coperture detritico-colluviali). Presenza di circuiti idrici prettamente locali, spesso a deflusso stagionale; per la posizione morfo-stratigrafica del complesso, la circolazione sotterranea costituisce piccoli circuiti idrici sospesi al di sopra dei complessi del substrato locale.

5.2. *Dati sperimentali: verifica sitologica*

Le indagini e gli studi condotti nel presente lavoro di tesi si inseriscono, come anticipato in fase di premessa, all'interno della realizzazione del progetto di completamento dell'impianto “La Filippa”; le ricerche condotte, basate su rilevamenti in campo, indagini di superficie e di sottosuolo e monitoraggio strumentale, hanno permesso di validare e sviluppare ulteriormente il modello geologico di riferimento definito nel corso degli studi pregressi (Università dell'Insubria, 2006, 2007; Mercadante, 2007).

5.2.1. *Rilevamenti in campo*

L'esecuzione di rilevamenti geologico-geomorfologici di terreno, unita all'analisi puntuale dei dati già disponibili, ha consentito di acquisire il quadro geologico di base necessario alla caratterizzazione geologico-tecnica e alla modellizzazione idrogeologica. I rilievi hanno costituito la base per la realizzazione di elaborati geologici di inquadramento (Carta e profilo geologico in scala 1:5.000) e di dettaglio (Carta geologica e geomorfologica in scala 1:1.000). La base cartografica utilizzata per l'area vasta è rappresentata dalle sezioni a scala 1:5.000 della Carta Tecnica Regionale; per l'elaborazione dei dati di dettaglio, ci si è avvalsi di un rilievo topografico originale a scala 1:500, svolto da terra e condotto completamente *ex-novo* per l'intero areale a cura della struttura tecnica LPL.

I rilievi hanno permesso di definire la sequenza litologico-stratigrafica di riferimento per l'area in esame, coerentemente al Foglio 211 – Dego della nuova Carta Geologica d'Italia (Servizio Geologico d'Italia, 2011). L'impianto “La Filippa” sorge al margine sud-orientale del Bacino Terziario Piemontese (BTP); il substrato locale risulta interamente costituito dalla porzione basale della successione del BTP e, nello specifico, dalla Formazione di Rocchetta-Monesiglio (RTM).

La giacitura generale è a monoclinale immergente verso NO con un'inclinazione media di $7 \div 15^\circ$. In relazione a questo assetto, in corrispondenza dell'impianto la stratificazione assume una giacitura a reggipoggio o traversopoggio.

La sequenza marina è ricoperta direttamente da sedimenti incoerenti, originatisi in ambiente continentale, relativi alle coperture quaternarie. Si tratta per lo più di coltri detritico-colluviali presenti localmente lungo i versanti e di depositi torrentizi connessi allo sviluppo del reticolo idrico locale. L'assetto topografico del sito e l'evoluzione morfo-climatica del bacino, a scala d'insieme improntata dal reticolo incentrato sul corso del F. Bormida di Spigno, hanno comportato un limitato sviluppo delle coperture, sia in termini di continuità areale che di spessori.

Il rilevamento di superficie non ha evidenziato, nonostante l'ampia esposizione di affioramenti in corrispondenza degli sbancamenti di cava, la presenza di zone di fratturazione né di faglie.

L'Allegato 1 presenta l'ubicazione delle indagini e della strumentazione di monitoraggio installata nell'area dell'impianto; nell'Allegato 2 sono invece riportati la carta geologica e i principali elementi geomorfologici.

Nell'insieme la successione individuata comprende, a partire dai termini più antichi:

Substrato locale

Formazione di Rocchetta-Monesiglio (RTM)

È costituita da una “massa di fondo” prevalentemente pelitica con intercalazioni sporadiche di arenarie fini in strati di spessore centimetrico. Le peliti sono rappresentate da marne siltoso-argillose stratificate di colore grigio. Il loro modellamento dà luogo localmente a forme calanchive particolarmente sviluppate come si riscontra ad esempio lungo il versante sinistro della valle del F. Bormida di Spigno.

La formazione è presente in un'ampia fascia, disposta in direzione SO-NE, dal corso del F. Bormida di Spigno sino alla valle del T. Belbo. La potenza complessiva può raggiungere i 1200 m. Oligocene inferiore – Burdigaliano.

Nell'area oggetto dei rilevamenti, sono state distinte 3 *litofacies* sulla base del rapporto marna/arenaria, tendente ad aumentare procedendo verso l'alto della successione:

- *litofacies* 1: Marne. Marne argilloso-siltose e marne argillose grigie in strati con spessore da centimetrico a decimetrico. Stratificazione non sempre ben distinta.
- *litofacies* 2: Marne con sporadiche intercalazioni arenacee. Marne argillose grigie in strati e banchi di spessore sino al metro, con rare intercalazioni di sottili livelli di arenaria (spessore medio = 1 dm).
- *litofacies* 3: Arenarie con intercalazioni marnose. Alternanza di arenarie ben cementate in strati di spessore decimetrico e marne argillose in livelli centimetrici.

La presenza nel sottosuolo della Formazione di Rocchetta è stata riscontrata direttamente tramite perforazioni sino alla profondità di almeno 40 m; l'analisi stratimetrica condotta sulla base dell'estensione dell'unità in affioramento e della sua giacitura porta a valutare in almeno 200 m la sua potenza al di sotto del sito.

All'interno della sequenza marnosa relativa alla Formazione RTM sono contenute intercalazioni lenticolari di arenarie di spessore e continuità laterale variabile. I corpi più spessi, datati in base al contenuto in Foraminiferi planctonici, sono stati elevati al rango di membri; risultano di interesse per l'area in esame il Membro delle arenarie di Chiappella (RTM3) e il Membro delle arenarie di Cengio (RTM4):

Membro delle arenarie di Chiappella (RTM3)

È costituito in prevalenza da lenti arenacee e arenaceo-conglomeratiche giustapposte, gradate o di aspetto massivo. Definìto da Cazzola *et al.* (1981), si rileva in un'area molto limitata ad ovest di Cairo Montenotte, nei pressi della località Chiappella. Nel corso del lavoro sono state riscontrate soltanto al margine SE del settore interessato dal rilevamento di area vasta. Qui sono rappresentate da arenarie grigie ben cementate in bancate giustapposte, gradate o di aspetto massivo, con intercalazioni di marne in livelli decimetrici. Lo spessore complessivo è di alcune decine di metri. Oligocene inferiore.

Nella precedente cartografia ufficiale (F. 81 – Ceva, Serv. Geol. d'It, 1969; 1971) questo corpo arenaceo, nonostante la sua posizione interposta all'interno della successione marnosa tipica della Formazione di Rocchetta, era stato attribuito erroneamente alla sottostante Formazione di Molare.

Membro delle arenarie di Cengio (RTM4)

Comprende corpi lenticolari formati da strati e banchi arenacei di spessore sino a più di 1 m, con gradazione normale più o meno evidente o di aspetto massivo, talora anche con laminazione parallela. Si presentano amalgamati o alternati a sottili letti pelitici. Il termine, definito da Gelati & Gnaccolini (1980) si rileva con maggiore continuità nella valle del F. Bormida di Millesimo verso Cengio, giungendo ad affiorare sino allo spartiacque lungo il crinale di Case Clini. Nell’ambito del rilevamento di area vasta si rinvencono esclusivamente lungo il margine ovest, nel tratto sommitale del versante, dove costituiscono una sequenza di arenarie in strati e banchi di colore grigio-giallastro con spessore da decimetrico a superiore al metro, alternati a livelli marnoso-argillosi generalmente di spessore limitato. Lo spessore complessivo nell’area esaminata è di varie decine di metri. Oligocene superiore.

Coperture quaternarie**Deposito di conoide detritico alluvionale (co)**

Accumulo derivante da episodi di dinamica torrentizia a carattere impulsivo, di breve durata, con attivazione di fenomeni di trasporto detritico in massa (colate detritiche). La frazione grossolana, subordinata, comprende blocchi, ciottoli e ghiaie a composizione arenaceo-marnosa. La granulometria della matrice, presente in proporzioni fortemente variabili, varia da limoso-argillosa a sabbioso-limosa. Colore d’insieme da marrone chiaro a grigio scuro in funzione della frazione prevalente. Struttura del deposito variabile da clino-stratificata a caotica. L’accumulo più significativo occupa parte del tratto superiore dell’incisione del Rio Filippa, con spessore massimo accertato tramite sondaggio di 15 m. Pleistocene superiore – Olocene antico.

Deposito di versante (dt)

Sedimenti di origine detritico-colluviale derivanti dal rimaneggiamento e limitato trasporto ad opera della gravità e delle acque di ruscellamento superficiale dei terreni originati dalla degradazione in posto delle unità del substrato. Limi e limi argillosi inglobanti scaglie di marne alterate o, subordinatamente, di arenarie di dimensione centimetrica. Colore d’insieme da grigio chiaro a giallo-rossiccio bruno. Struttura del deposito di tipo massivo, localmente con lenti e intercalazioni a giacitura cuneiforme. Spessore generalmente compreso tra 1 ÷ 3 m, accumuli di potenza maggiore sono presenti localmente in corrispondenza del colmamento di paleo-incisioni sepolte. Terreno con comportamento di tipo coesivo, improntato dalla frazione fine. Stato del deposito da poco a moderatamente consistente. La permeabilità, di tipo primario per porosità, è caratterizzata da valori relativi medi. Pleistocene superiore – Olocene.

Deposito di frana (fr)

Accumulo derivante dall’attivazione di movimenti prevalentemente di tipo superficiale coinvolgenti le coperture e l’orizzonte alterato del substrato in posto. Limi argillosi inglobanti clasti e scaglie eterometriche composte prevalentemente da litotipi marnoso-argillosi a vario grado di alterazione. Negli accumuli relativi alle piccole frane mobilizzatesi nel settore superiore del rilievo (crinale Case Clini – Nadina), a questi termini si associano ciottoli e blocchi di arenaria provenienti dagli affioramenti dei membri arenacei della Formazione di Rocchetta-Monesiglio. Deposito a struttura caotica. Lo spessore, generalmente compreso tra 2 ÷ 5 m, raggiunge negli accumuli maggiori la decina di metri. Pleistocene superiore – attuale.

Deposito torrentizio (to)

Sedimenti relativi alla dinamica evolutiva attuale delle aste di fondovalle del reticolo locale, costituito principalmente da linee di drenaggio con limitato sviluppo, portate idriche modeste e deflussi idrici con regime temporaneo. Limi e limi argillosi inglobanti scaglie di marna alterata e clasti di arenaria poco elaborati con dimensioni sino a decimetriche. Localmente sottili intercalazioni di sabbie e ghiaie a composizione prevalentemente arenacea. Colore da grigio chiaro a giallo avana. Architettura deposizionale lentiforme o in corpi di limitata continuità laterale in contatto tra loro tramite superfici di tipo erosivo. Spessore 1 ÷ 5 m, nell'insieme aumentante procedendo verso la valle del F. Bormida. Olocene – attuale.

5.2.2. Campagna geognostica

Le attività di rilevamento ed elaborazione degli elementi geologici ricavati fondamentalmente dalle analisi di superficie sono state integrate con una cospicua serie di verticali di indagine, sia di tipo meccanico (sondaggi), che geofisico, allo scopo di giungere ad una completa e rappresentativa modellizzazione della geologia del sito. In relazione al precedente utilizzo dell'area, sede di estese attività di cava, alla realizzazione dell'impianto di discarica esistente e agli studi integrativi condotti per la definizione dell'assetto del bacino del Rio Filippa, numerose indagini geognostiche, geotecniche e idrogeologiche di tipo diretto sono state condotte negli ultimi anni. A queste si sono affiancate le nuove indagini condotte nel 2010 ÷ 2011, allo scopo di verificare a scala generale l'assetto del rilievo e integrare le verticali di controllo nelle zone maggiormente significative, coerentemente alle prescrizioni contenute nelle NTC 2008. Oltre alla perforazione di sondaggi e all'esecuzione di prove geotecniche *in situ* (Cestari, 1990; 2005; Ciria, 1995; Tornaghi, 1981) e di laboratorio, sono state condotte prospezioni geofisiche finalizzate alla valutazione dei terreni in condizioni dinamiche e, nello specifico, alla misura diretta della velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s).

Nel complesso, le indagini già disponibili per l'area in esame sono riferibili a:

- Campagna geognostica 2000 ÷ 2001 per la progettazione dell'impianto di discarica, comprendente sondaggi a carotaggio continuo, installazione di 10 piezometri, prelievo di campioni di roccia, esecuzione di determinazioni di laboratorio e svolgimento di prospezioni geofisiche con il metodo della sismica a rifrazione;
- Campagna geognostica integrativa 2005 per la verifica di alcuni aspetti relativi all'impianto, comprendente la realizzazione di sondaggi a carotaggio continuo e l'installazione di 2 piezometri;
- Campagna 2005 per l'installazione di strumentazione di monitoraggio piezometrico per la costituzione di una rete di monitoraggio (6 piezometri);
- Campagna geognostica integrativa 2006 e installazione di strumentazione di monitoraggio; condotta con la supervisione dell'Università dell'Insubria – sede di Como, in ottemperanza alle Integrazioni conoscitive richieste dalla Provincia di Savona (2005). Tale campagna di indagine ha comportato l'esecuzione di 10 sondaggi a carotaggio continuo, l'installazione di 9 piezometri e 2 inclinometri, l'esecuzione in foro di 11 prove penetrometriche dinamiche (SPT), di 15 prove di permeabilità (del tipo Lefranc) e di 3 prospezioni geofisiche.

Nel corso del 2010 è stata condotta un'esplorazione preliminare del sottosuolo finalizzata all'attività di cava e in particolare alla valutazione dello spessore dello strato della copertura sterile sovrapposta al banco coltivabile. Le indagini, condotte in 2 distinte fasi (febbraio 2010 e giugno 2010), hanno comportato la realizzazione di 28 perforazioni a distruzione di nucleo. Pur non potendo sostituire i dati dei sondaggi a carotaggio, l'integrazione dei due tipi di indagine, previa verifica della congruenza dei diversi dati, consente di infittire significativamente i punti di indagine e, quindi, la rappresentatività puntuale del modello geologico di riferimento.

La nuova campagna di indagine predisposta e condotta in relazione al progetto di completamento dell'impianto ha comportato (Tabella 5):

- realizzazione di 7 sondaggi a carotaggio continuo spinti a profondità comprese tra 30 e 40 m dal p.c.;
- installazione di 2 tubi inclinometrici in alluminio (diametro 86 mm);
- installazione di 5 piezometri a tubo aperto con diametro 4”;
- esecuzione di 1 prova penetrometrica dinamica (SPT) in foro. La presenza ridotta o spesso nulla delle coperture ha impedito l'esecuzione di un maggior numero di prove;
- prelievo di 1 campione indisturbato di terreno. Anche in questo caso è stato possibile prendere un solo campione in corrispondenza del deposito detritico-colluviale di maggiore spessore;
- prelievo di 15 campioni di roccia di buona qualità;
- esecuzione di 14 prove di permeabilità del tipo Lugeon a profondità comprese tra 9 e 40 m dal p.c.;
- realizzazione di prove di laboratorio su terreni con determinazione delle caratteristiche fisiche (peso di volume, contenuto in acqua, granulometria, plasticità) e di resistenza al taglio;
- realizzazione di prove di laboratorio su 11 campioni di roccia con determinazione delle caratteristiche fisiche (peso di volume, carbonati, valore del blu di metilene) e meccaniche (prove di espansione laterale libera con misura delle deformazioni).

Sigla	Quota p.c. originario (m s.l.m.)	Profondità dal p.c. (m)	Prove SPT	Prove di permeabilità Lugeon	Strumentazione installata	Campioni prelevati (profondità)
SA1	436	40		25,0 ÷ 30,0 35,1 ÷ 40,1	Tubo inclinometrico	5,7 ÷ 6,1 36,7 ÷ 37,0
SA2	438	40		20,8 ÷ 25,8 35,8 ÷ 40,8	Piezometro a tubo aperto 4”	7,38 ÷ 7,73 22,62 ÷ 22,92 39,0 ÷ 39,3
SA3	435	35	6 m	9,0 ÷ 14,0 25,4 ÷ 30,4	Tubo inclinometrico	3,1 ÷ 3,7 (terreno) 9,15 ÷ 9,45 24,0 ÷ 24,4
SA4	431	30		10,3 ÷ 15,3 25,2 ÷ 30,2	Piezometro a tubo aperto 4”	10,35 ÷ 10,6 25,7 ÷ 26,0
SA5	416	30		10,3 ÷ 15,3 25,6 ÷ 30,6	Piezometro a tubo aperto 4”	10,7 ÷ 11,0 28,0 ÷ 28,3
SA6	425	30		9,9 ÷ 14,9 25,4 ÷ 30,4	Piezometro a tubo aperto 4”	15,4 ÷ 15,7 27,7 ÷ 28,0
SA7	425,5	30		10,15 ÷ 15,15 25,3 ÷ 30,3	Piezometro a tubo aperto 4”	17,55 ÷ 17,85 28,7 ÷ 29,0

Tabella 5 : Prospetto riassuntivo delle perforazioni, della strumentazione installata e delle prove in foro condotte nel corso della campagna di indagine 2010.

La campagna ha evidenziato che l'unità marnoso-argillosa appartenente alla Formazione di Rocchetta-Monesiglio (*litofacies* 1 e 2), affiorante diffusamente lungo tutto il tratto inferiore e medio del bacino del Rio Filippa tra le quote 330 ÷ 500 m circa s.l.m., è presente nel sottosuolo con caratteristiche litologiche e meccaniche riscontrate direttamente in sondaggio sino a profondità di almeno 40 m. L'orizzonte alterato e degradato che caratterizza la porzione superiore della sequenza marnoso-siltosa-argillosa del substrato in prossimità della superficie topografica assume spessore ridotto, risultando compreso generalmente in 1 ÷ 3 m, come verificato sulla base delle perforazioni eseguite e dall'esame di numerose sezioni di cava (Figura 11). Ad eccezione dell'orizzonte alterato, lo stato di fratturazione della roccia è sempre estremamente ridotto, i giunti rilevabili in affioramento o nei carotaggi sono riferibili quasi esclusivamente alle superfici di stratificazione, disposte sempre a basso angolo o sub-orizzontali. Solo sporadicamente si riscontrano superfici di frattura con angolo di 45 ÷ 60°, serrate, impostate direttamente nella roccia integra, prive di riempimenti o alterazione, e con limitata continuità.

Inoltre, sulla base degli oltre 30 sondaggi a disposizione (a carotaggio continuo e a distruzione di nucleo), si è verificato che i terreni delle coperture recenti presentano spessore limitato, generalmente inferiore a 3 m e solo localmente dell'ordine di 5 ÷ 7 m, in corrispondenza del colmamento di paleo-solchi di incisione modellati nelle unità del substrato.



Figura 11 : a) Fasi di perforazione di un sondaggio a carotaggio continuo; b) Cassetta contenente la parte più superficiale del sondaggio SA4; si noti la presenza, a partire dal p.c. e fino a circa 60 cm di profondità, della copertura superficiale e del substrato alterato.

Le prove di laboratorio eseguite sui campioni di roccia sono state mirate alla valutazione dei parametri fisico-composizionali (peso di volume, contenuto in carbonati) e della resistenza a compressione uniassiale della roccia e alla classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso (Hoek, 1994; Hoek & Brown, 1980 a,b; Hoek *et al.*, 1995; 2002). I risultati confermano la sostanziale omogeneità della sequenza marnoso-argillosa costituente il substrato locale sino alle profondità indagate (Tabella 6). L'ammasso, pur rientrando nel campo delle rocce tenere, risulta compatto, con elevato peso di volume, discreto contenuto in carbonati, privo di minerali argillosi di tipo rigonfiante e dotato di buone caratteristiche di resistenza meccanica. La trattazione statistica dei dati indica che la deviazione standard è piuttosto limitata in relazione alla tipologia e alla natura dei dati, confermando la rappresentatività della caratterizzazione svolta.

	Coperture	Orizzonte di alterazione del substrato	Marne argillose
Indice RQD (%)		60 ÷ 80 (localmente 20 ÷ 40)	90 ÷ 100 (localmente 70 ÷ 90)
Resistenza alla penetrazione (SPT) (colpi / 30 cm)	20 ÷ 30	80 – 100	> 100
Resistenza alla punta (<i>pocket penetrometer</i>) (MPa)	0,1 ÷ 0,3	> 2	> 2
Velocità onde sismiche da rilievi in sito (m/s)		$V_p = 1200 \div 2300$	$V_p = 3800 \div 5500$ $V_s = 800 \div 1300$
Peso di volume naturale (kN/m ³)	18 ÷ 19	22 ÷ 24	24,83 (dev std = 0,31)
Contenuto in carbonato di calcio (%)			18,31 (dev std = 0,81)
Valore del blu di metilene MBA (g/100g)			< LOD
Carico di rottura a compressione monoassiale (MPa)			29,79 (dev std = 8,39)
Modulo tangente 50% (MPa)			5780 (dev std = 1037)
Modulo secante 50% (MPa)			4832 (dev std = 1082)
Coefficiente di Poisson 50%			0,18 (dev std = 0,06)
Angolo di attrito φ' (°)	24 ÷ 28	$\varphi'_p = 22 \div 25$ $\varphi'_r = 15$	$\varphi'_p = 28 \div 30$
Coesione c' (kPa)	0 ÷ 10	150	200 ÷ 300
Coefficiente di permeabilità k (m/s)	$10^{-5} \div 10^{-6}$	$10^{-5} \div 10^{-8}$	$10^{-8} \div 10^{-9}$

Tabella 6 : Parametri rappresentativi delle caratteristiche fisiche e meccaniche delle coperture e del substrato in posto e alterato. I dati derivano dall'integrazione delle analisi svolte nella campagna di indagine 2010 con le campagne precedenti.

I dati derivanti dalle indagini geognostiche, dalle determinazioni di laboratorio e dal comportamento a scala dell'ammasso risultano complementari e perfettamente coerenti tra loro. Inoltre, la rappresentatività dei parametri di laboratorio ottenuti a livello puntuale su singoli campioni è confermata dai risultati delle indagini geofisiche (§ 5.2.3.); il contenuto in carbonato di calcio è in linea con i valori delle litologie analoghe presenti nel Bacino Terziario Piemontese.

L'assenza di minerali rigonfianti nel sito in esame, accertata tramite le prove di assorbimento del Blu di metilene (Chiappone & Scavia, 1999; Lautrin, 1987; 1989; Meisina, 2005), conferma le buone caratteristiche

meccaniche della sequenza marnosa-argillosa; è infatti da sottolineare che la presenza di minerali argillosi a comportamento rigonfiante comporta una maggiore predisposizione all’innescio di peculiari fenomeni gravitativi, quali le frane di scivolamento planare (e.g. Castelli *et al.*, 2006).

5.2.3. Indagine geofisica

Le indagini geognostiche sono state integrate con prospezioni geofisiche comprendenti 3 profili di velocità delle onde di taglio basati sulla tecnica MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), spinti sino alla profondità di 30 m dal p.c. e 1 profilo sismico a rifrazione con uno stendimento di 70 m con successiva elaborazione del modello tomografico e calcolo dei moduli di deformabilità dinamici. L’indagine geofisica è stata condotta al fine di caratterizzare in condizioni dinamiche il sottosuolo a scala del versante, in modo da definire la categoria sismica di appartenenza e valutare su base fisica e sperimentale i parametri di deformabilità, verificando nel contempo l’omogeneità dell’assetto litologico-stratigrafico o l’eventuale presenza di zone di disturbo e/o discontinuità, potenzialmente associate alla presenza di porzioni di ammasso intensamente fratturato e con degrado delle caratteristiche meccaniche.

La Figura 12 presenta il modello tomografico ricavato dalla sezione sismica a rifrazione; la traccia della sezione è riportata nell’Allegato 1. La sezione riporta la suddivisione in isotache (curve di uguale velocità di compressione, V_p) ottenuta dall’elaborazione tomografica dei primi arrivi delle onde V_p ; si osserva che la velocità delle onde è compresa tra 3.800 e 5.500 m/s, caratteristiche di un ammasso litoide, compatto, con fratturazione assente o molto limitata. La distribuzione delle velocità definisce una sorta di “stratificazione” sub-orizzontale, coerente con l’assetto giaciturale dell’ammasso; le differenze di velocità sono quindi presumibilmente legate a variazioni composizionali nell’ambito dei litotipi marnosi, piuttosto che a differente grado di fratturazione.

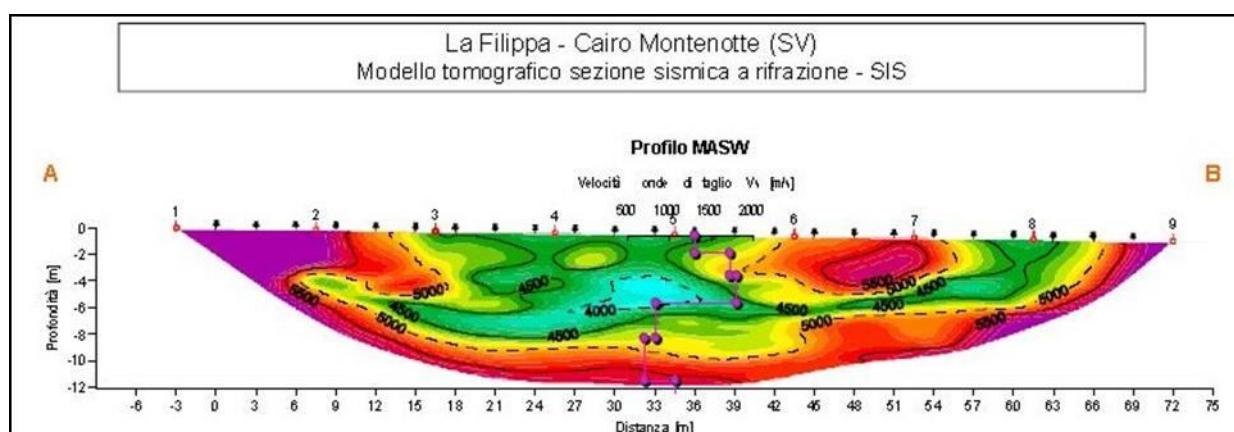


Figura 12 : Modello tomografico ricavato dalla sezione sismica a rifrazione. La velocità delle onde è compresa tra i 3.800 e i 5.500 m/s, ad indicare la presenza di un ammasso roccioso con fratturazione assente o molto limitata.

Il confronto tra le velocità delle onde P (profilo sismico a rifrazione) e delle onde S (profili MASW) mostra una buona correlazione, con valori tipici del substrato lapideo e alternanze coerenti con variazioni composizionali del substrato.

La stima del peso di volume della roccia a partire da V_p (Gardner *et al.*, 1974) fornisce valori di $24,5 \div 26,2$ kN/m³, del tutto coerenti con quanto desunto dalle prove di laboratorio sui campioni di roccia.

In ottemperanza alle NTC è stata determinata, per i 3 profili MASW, la velocità equivalente $V_{s,30}$ (velocità di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità), allo scopo di definire la categoria di sottosuolo per la valutazione della risposta sismica locale in occasione di un terremoto. I valori ottenuti, compresi tra 1.091 e 1.186 m/s, consentono di attribuire al sottosuolo la categoria A (ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione con spessore massimo pari a 3 m; NTC, 2008). La presenza di un terreno di fondazione classificato in Categoria A assicura il non verificarsi di fenomeni di amplificazione dovuti all’assetto stratigrafico locale.

I valori dei parametri ottenuti, sempre molto elevati ed uniformi, evidenziano la presenza di un ammasso compatto, con caratteristiche di roccia litoide non fratturata ed elevati parametri dinamici di deformazione. Inoltre le caratteristiche di consistenza e compattezza dell’ammasso aumentano progressivamente con la profondità.

5.2.4. Assetto idrogeologico locale

Le caratteristiche idrogeologiche dei terreni e del substrato sono state analizzate mediante rilevamenti in campo e prove di permeabilità in foro, che hanno consentito di definire il modello idrogeologico di riferimento; sono state valutate tipologia e distribuzione dei complessi idrogeologici presenti, prestando particolare attenzione alla verifica dei corpi potenzialmente sede di circolazione e degli eventuali flussi di acqua convogliabili verso la vasca dei rifiuti.

I dati sono stati elaborati e restituiti graficamente in una Carta idrogeologica in scala 1:2.500 (Figura 13). Pur considerando un’areale relativamente esteso, le unità del substrato risultano riferibili alla sola sequenza sedimentaria del Bacino Terziario Piemontese, comprendente gli stessi complessi considerati per l’inquadramento regionale (§ 5.1.1.5.), a cui si rimanda per la descrizione.

La scala di maggiore dettaglio, d’altra parte, consente una trattazione più precisa delle coperture recenti, e in particolare dei depositi che per spessori, continuità di affioramento e caratteristiche di permeabilità, possono ospitare una circolazione sotterranea, seppure discontinua e di tipo epidermico. Seguendo l’approccio utilizzato per l’inquadramento di area vasta, nell’ambito territoriale di interesse progettuale si individuano 2 principali serie idrogeologiche, relative rispettivamente al substrato e alle coperture, con i relativi complessi:

Serie idrogeologiche del substrato locale

- Serie Oligo-Miocenica:
 - o *Complesso argilloso-marnoso*: è rappresentato dalle *litofacies* 1 e 2 della Formazione di Rocchetta-Monesiglio e risulta delimitato inferiormente e superiormente dal complesso arenaceo-marnoso. La sequenza litologica rappresenta il substrato locale su cui poggiano, tramite superfici di tipo erosivo, i terreni incoerenti delle coperture (depositi detritico-colluviali, di frana, di conoide, torrentizi). Il complesso argilloso-marnoso costituisce, quindi, il termine di appoggio basale a bassissima permeabilità che delimita inferiormente i circuiti idrici presenti nelle coperture e ne condiziona le modalità di deflusso.
 - o *Complesso arenaceo-marnoso*: presente solo alla sommità dello spartiacque nella zona di testata del Rio Filippa, dove si dispone a reggipoggio; a causa dell’assetto giaciturale, i

contributi di infiltrazione che si riscontrano nella parte superiore del rilievo defluiscono verso l'esterno del bacino.

Serie idrogeologiche delle coperture

- Serie idrogeologica Quaternaria:
 - o *Complesso di conoide*: corrisponde ai depositi dell'apparato di conoide accumulati dal Rio Filippa allo sbocco del suo breve e ripido tratto collinare. È costituito in prevalenza da terreni a granulometria grossolana nella porzione centrale e da depositi a granulometria più fine nelle zone laterali e distali del conoide. L'unità affiora lungo il tratto superiore del Rio Filippa, nella zona più acclive e incassata della vallecchia, in corrispondenza dell'alveo del corso d'acqua sino allo sbocco nel fondovalle (quota 420 m s.l.m. circa) e nei tratti di versante adiacenti l'incisione. Gli spessori variano da 2 ÷ 4 m nel tratto superiore dell'incisione a circa 15 m nel settore basale del conoide. Permeabilità di tipo primario per porosità, con valori relativi variabili in funzione della granulometria. La presenza prevalente in affioramento della frazione detritica grossolana favorisce l'infiltrazione degli apporti meteorici diretti. Tuttavia, la limitata estensione del complesso, la rilevante inclinazione della superficie di appoggio basale costituente un limite di permeabilità e l'elevata permeabilità complessiva favoriscono il rapido deflusso delle acque immagazzinate, impedendo la formazione di un circuito idrico significativo. Anche a seguito di elevate precipitazioni, la fase di scarico dei volumi idrici immagazzinati si verifica in pochi giorni, come confermato dai rilievi piezometrici. Il recapito finale della circolazione è costituito dai depositi del complesso torrentizio presenti con continuità subito a valle lungo la vallecchia del Rio Filippa; gli apporti idrici risultano comunque occasionali e assumono rilevanza soltanto a seguito di prolungati periodi di precipitazione.
 - o *Complesso torrentizio-alluvionale*: depositi relativi alla dinamica evolutiva attuale del Rio Filippa a valle dell'apparato di conoide. Ghiaie e sabbie argillose, limi argillosi e argille inglobanti clasti di arenaria poco elaborati e scaglie di marna alterata. La frazione più grossolana si riduce progressivamente procedendo verso valle. L'architettura deposizionale è di tipo lentiforme o in corpi di limitata continuità in contatto tramite superfici erosive. L'unità occupa il solco erosivo del Rio, modellato nel complesso argilloso-marnoso, con spessori generalmente limitati (3 ÷ 5 m). Permeabilità di tipo primario per porosità, con valori relativi variabili da medi a medio-bassi. In relazione all'estensione in affioramento, alla posizione morfologica sul fondo della vallecchia del Rio dai limitati gradienti topografici, e ai rapporti geometrici con le altre unità delle coperture, il complesso torrentizio costituisce l'unico l'acquifero significativo, dalla potenzialità comunque molto limitata. La circolazione idrica sotterranea risulta in continuità idraulica con l'alveo del Rio, determinando la presenza di una falda libera con superficie piezometrica a limitata profondità, alimentata dai complessi idrogeologici circostanti, dagli apporti per ruscellamento diretto e, in misura ridotta, dagli apporti meteorici diretti.
 - o *Complesso detritico-colluviale*: coperture detritico-colluviali e accumuli di frana. Assortimento granulometrico fortemente variabile e, generalmente, con rilevante presenza di una matrice fine. Spessori variabili, con valori massimi accertati di 5 ÷ 8 m nell'ambito del bacino del Rio Filippa. La giacitura e l'andamento della base degli accumuli si configurano

in relazione all’assetto delle morfologie erosive direttamente modellate nelle unità del substrato. La permeabilità è di tipo primario per porosità con valori relativi variabili da medi (accumuli a granulometria grossolana presenti nel tratto superiore della dorsale di Case Clini) a medio-bassi (coperture detritico-colluviali vere e proprie). Presenza di circuiti idrici prettamente locali, spesso a deflusso stagionale, con potenzialità idriche controllate dall’estensione e dallo spessore comunque limitato dei depositi. Per la posizione morfo-stratigrafica del complesso, la circolazione sotterranea presente costituisce piccoli circuiti idrici sospesi al di sopra dei complessi del substrato locale. Le potenzialità idriche sono sempre di modestissima entità. Gli accumuli maggiori costituiscono il riempimento di antichi solchi di erosione, approfonditi ma di ridotta ampiezza, pertanto la loro rilevanza ai fini idrogeologici è molto limitata, in quanto lo sviluppo laterale è ridotto a poche decine di metri. Sulla base delle misure piezometriche, lo spessore dell’orizzonte saturo del complesso è piuttosto limitato ($1 \div 3$ m) con una certa variabilità in funzione dell’alimentazione da parte delle precipitazioni dirette.

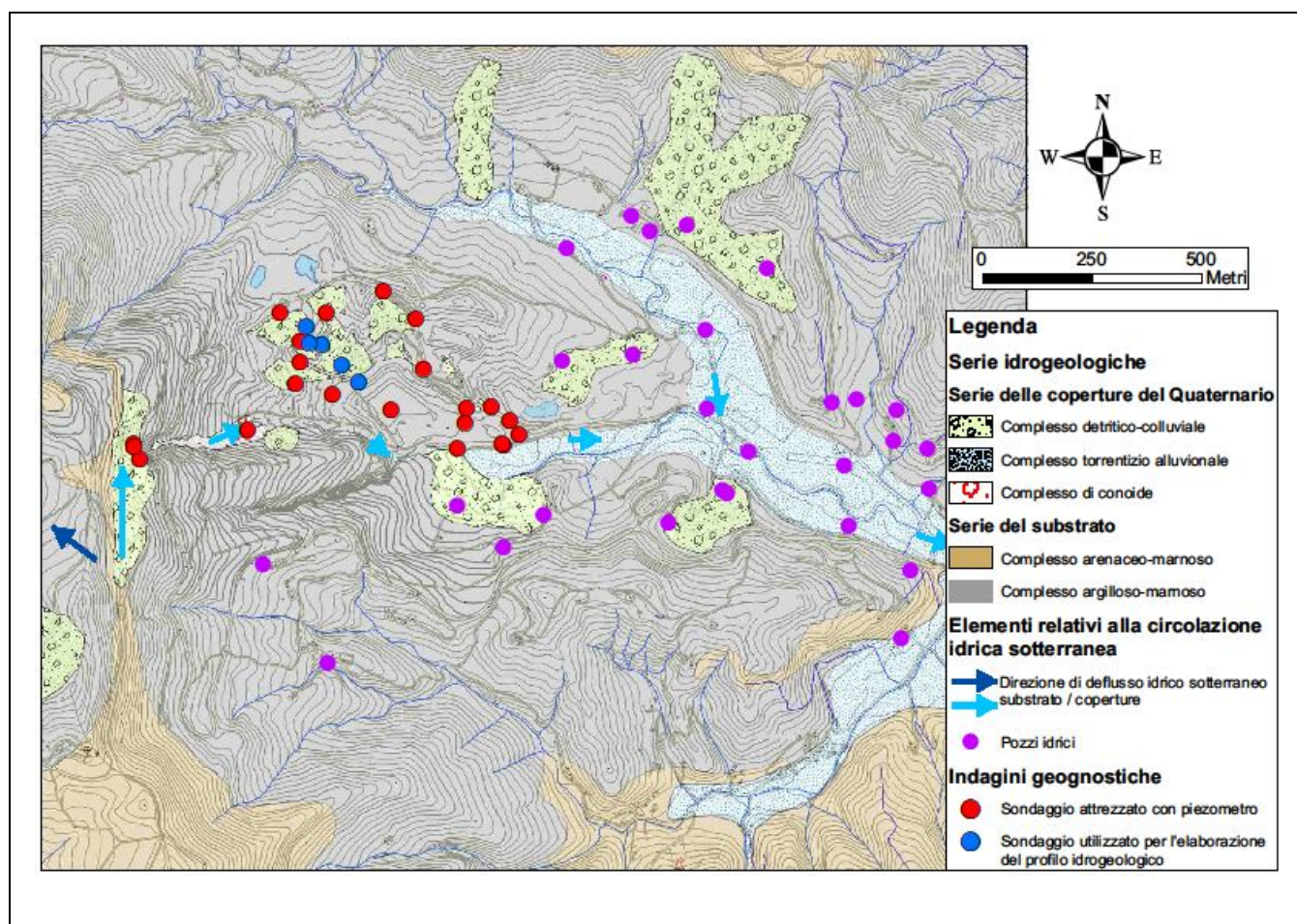


Figura 13 : Carta idrogeologica; sono riportati i vari complessi idrogeologici e i punti di monitoraggio. Riduzione dell’elaborato originale in scala 1:2.500.

Lo svolgimento di un numero significativo di prove in foro, integrandosi ai dati rilevati direttamente in campo, consente di valutare sperimentalmente e in modo adeguatamente rappresentativo le caratteristiche

idrogeologiche dei vari complessi e le potenzialità idriche della circolazione sotterranea individuata. Il campo di variabilità della permeabilità delle varie unità idrogeologiche è stato definito sulla base di dati sperimentali diretti, e in particolare di 15 prove di permeabilità del tipo Lefranc a carico variabile e di 24 prove del tipo Lugeon, condotte nel corso delle varie campagne di indagine a partire dal 2001.

La Tabella 7 riassume i risultati ottenuti nei terreni e nelle rocce mediante le prove in sito, che costituiscono anche la base conoscitiva per la caratterizzazione delle unità geotecniche.

Un’ulteriore conferma delle ridottissime potenzialità idriche dei complessi della serie Quaternaria deriva dall’impossibilità, verificata in campo, di eseguire prove speditive di pompaggio anche in corrispondenza dei livelli caratterizzati da una permeabilità relativa maggiore.

Unità	Permeabilità d’insieme (coefficiente k in m/s)	Spessore	Note
Serie delle coperture			
Complesso detritico-colluviale	$10^{-5} \div 10^{-6}$	generalmente < 3 m, localmente 5 ÷ 7 m, (massimo accertato 8,2 m, sond. SD1)	Valutazione sulla base di n. 3 prove Lefranc
Complesso torrentizio-alluvionale	$10^{-5} \div 10^{-6}$	3 ÷ 5 m	Valutazione sulla base dei test eseguiti nel 2006 nei piezometri Pz5 e Pz6
Complesso di conoide	depositi grossolani: $10^{-1} \div 10^{-4}$; depositi fini: $10^{-5} \div 10^{-6}$, localmente 10^{-8}	da 2 ÷ 4 m a circa 16 m (spessore massimo accertato con SI 5)	Valutazione sulla base di n. 3 prove Lefranc
Serie del substrato			
Orizzonte alterato unità marnoso-arenacea	$10^{-5} \div 10^{-8}$	1 ÷ 3 m	Valutazione sulla base di n. 7 prove Lefranc
Complesso marnoso-argilloso	$10^{-8} \div 10^{-9}$	> 500 m in generale > 200 m con riferimento alla base della vasca dell’impianto attuale e dell’area interessata dall’intervento di completamento	Valutazione sulla base di n. 24 prove Lugeon, eseguite a profondità comprese tra 2 e 40 m dal p.c.
Complesso arenaceo-marnoso	$10^{-4} \div 10^{-5}$	> 150 m nel settore delimitante la valle Bormida di Millesimo	Valutazione sulla base di n. 2 prove Lefranc

Tabella 7 : Campi di permeabilità e spessori caratteristici delle unità idrogeologiche accertati per il bacino del Rio Filippa sulla base delle indagini geognostiche condotte; le prove Lugeon sono state interpretate mediante il metodo messo a punto da Houlby (Lugeon, 1933; Houlby, 1977; Tanzini, 2002).

5.2.5. Monitoraggio strumentale

La rete strumentale presente nell'intorno del sito consente l'acquisizione diretta dei parametri meteorologici, dei livelli piezometrici e dell'assetto del sottosuolo. È così possibile verificare la variabilità nel tempo dei fattori fisici condizionanti l'assetto del sito, con specifico riferimento alla circolazione idrica sotterranea e alla stabilità dell'area. La posizione piano-altimetrica di tutti i punti di misurazione è stata rilevata strumentalmente; l'ubicazione degli strumenti è riportata nell'Allegato 1. L'estensione dei rilievi a finestre temporali significative rende possibile la definizione sperimentale dell'intervallo di variabilità atteso per le condizioni al contorno, e di conseguenza l'impostazione su base fisica del modello di riferimento geotecnico.

5.2.5.1. Monitoraggio piezometrico

La rete piezometrica nell'intorno dell'impianto consta di 21 strumenti (Tabella 8) e consente di caratterizzare gli eventuali circuiti idrici contenuti nel substrato e nelle coperture; tale indagine risulta fondamentale nel contesto litologico-stratigrafico del Rio Filippa e in relazione alla tipologia di impianto in esame. Considerate le scarsissime potenzialità idriche, è quindi essenziale la corretta realizzazione e manutenzione degli strumenti, che devono essere rigorosamente impostati nell'orizzonte di interesse e isolati da altri apporti idrici o da infiltrazioni accidentali dalla superficie topografica.

L'arco temporale coperto dai rilievi piezometrici varia in funzione del periodo di installazione dei singoli strumenti; le prime rilevazioni risalgono al febbraio 2008, i rilievi sono condotti ordinariamente con frequenza quindicinale o mensile.

Sigla	Tratto fenestrato (m da p.c.)	Unità litologica di impostazione del tratto fenestrato	Complesso sede di circolazione idrica	Anni di rilevazione
PZ 1	5 ÷ 15	RTM, <i>litofacies</i> 1	*	Febbr 2008 ÷ 2012
PZ 2	5 ÷ 15	RTM, <i>litofacies</i> 1	*	Febbr 2008 ÷ 2012
PZ 3	5 ÷ 15	RTM, <i>litofacies</i> 1	*	Febbr 2008 ÷ 2012
PZ 4	5 ÷ 15	RTM, <i>litofacies</i> 1	*	Febbr 2008 ÷ 2012
PZ 5	5 ÷ 15	Depositi alluvionali (to)	Torrentizio	Febbr 2008 ÷ 2012
PZ 6	5 ÷ 15	Depositi alluvionali (to)	Torrentizio	Febbr 2008 ÷ 2012
S 101	2 ÷ 20	Depositi frana (fr) – RTM, <i>litofacies</i> 3	Detritico-colluviale e livelli arenacei substrato	Genn 2010 ÷ 2012
SI 1	12 ÷ 24	RTM, <i>litofacies</i> 1	*	Genn 2010 ÷ 2012
SI 2	5,8 ÷ 28,8	RTM, <i>litofacies</i> 1	*	Genn 2010 ÷ 2012
SI 3	6 ÷ 24	RTM, <i>litofacies</i> 1	*	Genn 2010 ÷ 2012
SI 4	7 ÷ 19	RTM, <i>litofacies</i> 1	*	Genn 2010 ÷ 2012
SI 5	6 ÷ 14	Depositi di conoide	Conoide	Genn 2010 ÷ 2012

		(co)		
SI 7bis	1 ÷ 4	Depositi di frana (fr)	Detritico-colluviale	Genn 2010 ÷ 2012
SI 8bis	8,6 ÷ 14,6	Depositi frana (fr) – RTM, <i>litofacies</i> 3	Detritico-colluviale e livelli arenacei substrato	Genn 2010 ÷ 2012
SI 9	2 ÷ 9	Depositi versante (dt) – RTM, <i>litofacies</i> 3	Detritico-colluviale	Genn 2010 ÷ 2012
SI 10	7 ÷ 29	RTM, <i>litofacies</i> 1	Detritico-colluviale e livelli arenacei substrato	Genn 2010 ÷ 2012
PZ 7 (ex SA5)	9 ÷ 30	RTM, <i>litofacies</i> 1	*	Ott 2010 ÷ 2012
PZ 8 (ex SA4)	9 ÷ 30	RTM, <i>litofacies</i> 1	*	Ott 2010 ÷ 2012
PZ 9 (ex SA2)	12 ÷ 40	RTM, <i>litofacies</i> 1,2	*	Ott 2010 ÷ 2012
PZ 10 (ex SA7)	9 ÷ 30	RTM, <i>litofacies</i> 1	*	Ott 2010 ÷ 2012
PZ 11 (ex SA6)	9 ÷ 30	RTM, <i>litofacies</i> 1	*	Ott 2010 ÷ 2012

Tabella 8 : Quadro di sintesi relativo alla configurazione attuale della rete di monitoraggio piezometrica; principali caratteristiche della strumentazione e unità indagate. Tutti i piezometri sono del tipo a tubo aperto. *: assenza di circolazione idrica.

La disponibilità di serie di rilievi piezometrici significativamente estese nel tempo (per alcuni strumenti, oltre 4 anni) consente di verificare l'andamento stagionale dei livelli idrici riscontrati. Gli strumenti localizzati nell'ambito dei depositi delle coperture, per la permeabilità relativa di questi terreni, limitata ma comunque superiore a quella del substrato marnoso, individuano localmente la presenza di modesti circuiti generalmente a carattere effimero e riconducibili essenzialmente a circolazioni di subalveo o a deflussi conseguenti a rilevanti e prolungati apporti meteorici.

Allo scopo di verificare le modalità di alimentazione della circolazione idrica sotterranea da parte degli afflussi meteorici è stata svolta una correlazione sistematica tra i livelli idrici rilevati nei piezometri e la distribuzione delle precipitazioni. Gli strumenti installati, rappresentativi di diversi contesti litologico-idrogeologici, hanno una risposta ben differenziabile in termini di posizione e variabilità dei livelli idrici: si possono infatti identificare 3 modalità di comportamento, relative rispettivamente al substrato, ai depositi torrentizi e ai depositi di conoide del Rio Filippa (Figura 14):

- *substrato*: le misure pressoché costanti e sempre prossime a fondo foro, nonostante le rilevanti precipitazioni del periodo coperto dai rilievi, evidenziano la mancanza di afflussi idrici nel foro e quindi l'assenza totale di circolazione idrica nel substrato marnoso; una volta effettuate le operazioni di lavaggio e spurgo i livelli si dispongono e permangono costantemente in prossimità del fondo del piezometro. Si riporta come esempio PZ1.
- *depositi torrentizi*: le misure relative alla falda superficiale ospitata nei depositi alluvionali evidenziano una certa variabilità in funzione dell'alimentazione da parte delle precipitazioni (PZ6).
- *depositi di conoide*: si evidenzia una notevole variabilità, direttamente riferibile all'alimentazione da parte delle precipitazioni (SI5): il carattere ciclico delle oscillazioni riscontrate è tipico di falde superficiali di limitato spessore e alimentate in misura preponderante dalle piogge.

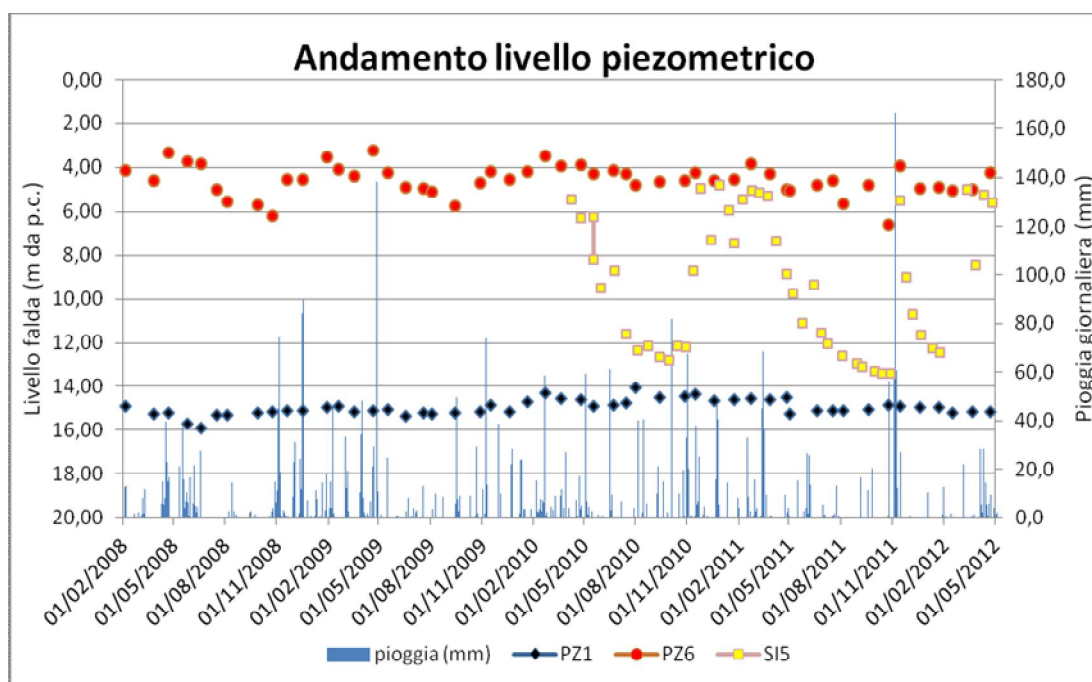


Figura 14 : Correlazione tra la pioggia giornaliera (barre verticali) e i livelli piezometrici a partire dal 2008 in PZ 1, PZ 6 e SI 5. Gli andamenti rappresentano tre differenti modalità di circolazione idrica, legate rispettivamente al substrato, ai depositi torrentizi e di conoide. La scala della profondità corrisponde alla lunghezza del piezometro.

5.2.5.2. Monitoraggio inclinometrico e stabilità dei versanti

I tubi inclinometrici sono tra gli strumenti più diffusi per l'analisi e il controllo della stabilità dei pendii e consentono di monitorare con ottimo dettaglio le eventuali deformazioni nel sottosuolo (Tommasi, 1986; Lollino *et al.*, 1999; 2001; Maugeri *et al.*, 1981; Organizzazione Tecnici Riuniti, 1987; Sappa & Sappa, 1995). Nel caso dell'impianto “La Filippa”, la rete strumentale è composta da 4 tubi inclinometrici (Tabella 9); due di questi sono stati installati a seguito degli approfondimenti conoscitivi richiesti dalla Provincia di Savona per l'impianto già in esercizio (Università dell'Insubria, 2006; 2007), gli altri due sono stati installati nell'ambito della campagna di indagini 2010. Nel primo caso, gli strumenti sono collocati nella zona di testata del bacino del Rio Filippa, dove sono presenti versanti particolarmente acclivi. Nel secondo caso, la localizzazione degli strumenti è stata definita sulla base dell'analisi della configurazione morfo-topografica dell'area, dell'evoluzione geomorfologica del bacino del Rio Filippa, e delle ipotesi progettuali per il completamento dell'impianto di discarica controllata di rifiuti. Si è pertanto deciso di verificare le condizioni dei pendii caratterizzati da maggiori dislivelli.

Sigla	Quota (m s.l.m.)	Lunghezza tubo inclinometrico (m)	Data realizzazione
SA 1	436,0	40,0	2010
SA 3	435,0	35,0	2010
SI 7	552,0	25,0	2006
SI 8	555,0	30,0	2006

Tabella 9 : Localizzazione e caratteristiche dei tubi inclinometrici installati in foro di sondaggio per l'esecuzione di misure con sonda inclinometrica mobile.

Successivamente al completamento dell’installazione, si è provveduto all’esecuzione delle misure di “zero” e ai successivi rilevamenti periodici delle misure di esercizio, previsti a cadenza trimestrale e tuttora in corso; in aggiunta, si prevedono rilievi integrativi in occasione dell’eventuale verificarsi di significativi fattori destabilizzanti (eventi meteo-idrologici di rilievo, evidenze di deformazioni sul pendio, ecc.).

La corretta installazione della strumentazione è stata verificata tramite le misure di zero: lo spostamento dalla verticale risulta in tutti i casi inferiore all’1,5%, che rappresenta il margine di tolleranza per questa tipologia di strumenti (Collotta *et al.*, 1987). In generale, si può affermare che il monitoraggio inclinometrico non ha rilevato sinora evidenze di alcun elemento deformativo significativo, nonostante il verificarsi di prolungati e intensi apporti meteorici. L’unica evidenza di deformazione di modesta entità rilevata, derivante da una perturbazione accidentale connessa ad uno scavo eseguito nelle immediate vicinanze dello strumento SA3, ha consentito altresì di verificare l’efficacia della strumentazione, delle modalità di rilievo e della procedura elaborativa nel rilevare fenomeni deformativi anche di modestissima entità (nell’ordine di $1 \div 2$ mm).

Nel dettaglio l’analisi dei dati raccolti consente di evidenziare:

Inclinometro SA 1

- la curva risultante integrale rappresentante la deformata inclinometrica presenta per quasi tutto il suo sviluppo, e sino in prossimità della superficie, un andamento nell’insieme rettilineo molto prossimo al riferimento di zero, ovvero alla misura origine di riferimento. Lo scostamento da questo è inferiore a 1 mm. Tale andamento rappresenta l’oscillazione casuale delle misure dovute alle sia pur minime, ma inevitabili, oscillazioni del sistema di misura;
- solo nel tratto terminale del tubo inclinometrico (ultimo metro circa), oramai in prossimità della superficie topografica, si rileva uno spostamento maggiore, nell’ordine di 2 mm. Tale deviazione è riferibile a locali perturbazioni accidentali subite della testa del tubo, soggetto comunque alle deformazioni ad opera degli agenti naturali (variazioni di temperatura e stato umidità del terreno, gelo-disgelo, ecc.).

Inclinometro SA 3

- analogamente allo strumento precedente, la curva risultante integrale rappresentante la deformata inclinometrica presenta per la maggior parte del suo sviluppo, a partire dal fondo (35 m dal p.c.) e sino alla profondità di circa 7 m dal p.c., uno scostamento limitato dalla misura origine;
- nel tratto superiore il tubo rileva un piccolo spostamento (massimo circa 4 mm alla profondità di 1 m dal p.c.). Lo spostamento si esplica interamente nell’ambito dei primi 6,5 m di profondità, corrispondenti ai terreni delle coperture. Il carattere peculiare e atipico dell’andamento della deformazione (diminuzione della deformata procedendo verso la superficie topografica, direzione verso monte) fa ipotizzare che lo strumento rilevi una deformazione sviluppatasi interamente nell’ambito delle coperture ed evidentemente non riferibile ad un fenomeno di instabilità gravitativa. La verifica in sito condotta subito dopo il rilievo inclinometrico ha rilevato infatti lo scavo eseguito nell’ambito dei lavori di cava di una profonda trincea ($5 \div 6$ m) posta pochi metri a monte (N-NO) della posizione di SA 3. La deformazione registrata dallo strumento risulta così interamente riferibile al rilassamento subito dalla parete libera dello scavo impostato nei depositi incoerenti delle coperture.

Inclinometro SI 7

- per la quasi totalità dello sviluppo del tubo la risultante dello spostamento è inferiore ai 2 mm complessivi, soltanto nel tratto presso la superficie (profondità 0 ÷ 2 m) assume valori lievemente superiori;
- le curve della risultante spostamento relative alle diverse misure si intersecano ripetutamente, ovvero evidenziano un andamento alterno nel tempo dei “possibili” spostamenti. In altre parole, misure successive riscontrano movimenti minori delle precedenti;
- la deformata relativa alle diverse misure assume, per gran parte dello sviluppo dell’inclinometro, direzioni fortemente variabili (con oscillazioni comprese tra 90° e oltre 180°). Ovvero la risultante dello spostamento oltre a variare in valore assoluto nel tempo, cambierebbe sensibilmente anche la direzione, assumendo anche orientazioni non compatibili con la configurazione del rilievo (direzione di movimento verso monte);
- gli spostamenti rilevati nel tratto superficiale dell’inclinometro potrebbero essere riferibili a deformazioni reali o a locali perturbazioni subite della testa del tubo.

Inclinometro SI 8

- le curve della risultante spostamento raggiungono in superficie i 2 ÷ 4 mm totali, con direzioni e orientazioni decisamente variabili nei diversi rilievi, ovvero in occasione di ogni misura lo spostamento avrebbe seguito una direzione diversa;
- le varie orientazioni di un ipotetico movimento si dispongono sempre nel settore S-SO, ovvero da valle verso monte, risultando chiaramente incompatibili con l’andamento del versante.

La stabilità dei versanti è stata monitorata sia attraverso rilievi puntuali con strumenti e metodologie adeguate (inclinometri), sia attraverso valutazioni con modelli di calcolo su scala areale più vasta.

Tale valutazione, condotta contestualmente alla campagna di indagine del 2006, si è resa necessaria a seguito di alcuni risultati dei rilevamenti geologici in campo, che hanno evidenziato la possibilità di trasporto in massa di volumi solidi. Infatti, è stato individuato un deposito di conoide presumibilmente tardo-pleistocenico, alla quota di 450 m s.l.m., che può essere considerato come l’accumulo, in tempi successivi, di una serie di eventi di mobilitazione di volumi solidi lungo l’alveo del Rio Filippa; questo ritrovamento ha confermato che i processi di *debris flow* sono propri della zona in esame, evidenziando la possibilità che una simile dinamica possa riproporsi in futuro.

I carotaggi hanno permesso di riferire i depositi a più eventi successivi occorsi negli ultimi 20.000 anni, ma allo stesso tempo hanno dimostrato che tutti i volumi di detrito non hanno subito ulteriori rimobilizzazioni.

In primo luogo, sono stati individuati sul campo tutti i volumi potenzialmente disponibili per alimentare una colata rapida, per poi definire uno scenario in cui, operando in via cautelativa, si è ipotizzata una mobilitazione contemporanea di tutti i depositi, un livello piezometrico massimo e parametri geomeccanici peggiori rispetto a quelli riscontrati in realtà; inoltre, la simulazione è stata svolta in condizioni estreme, in concomitanza di un evento sismico del massimo grado ragionevolmente attendibile; si ricorda che, nell’attuale catalogo sismico nazionale, il Comune di Cairo Montenotte è in classe 4, cioè quella con pericolosità sismica più bassa.

La modellizzazione dei fenomeni di *debris flow* è stata condotta dal Prof. R. Rosso e dalla D.ssa M. C. Rulli del Politecnico di Milano applicando il programma Seneca – Augusto; i risultati dello scenario ipotizzato coincidono con la distribuzione dei sedimenti di conoide alluvionale come effettivamente cartografata sul terreno (Politecnico di Milano, 2007).

Dal momento che l’impianto “La Filippa” è collocato all’esterno del limite deposizionale del conoide, si può dedurre che eventuali *debris flow* non costituiscono un rischio per l’impianto stesso.

A scopo cautelativo, è stato creato un bacino di accumulo controllato dei sedimenti, per evitare che, nel caso di movimenti di massa altamente improbabili o non previsti dalla modellazione a causa di variazioni ambientali, i sedimenti arrivino fino al sito occupato dalla discarica. In termini concreti, le opere di protezione sono costituite dal riassetto morfologico del terreno nel settore immediatamente a valle dell’unglia del conoide alluvionale, dalla creazione di due vasche di accumulo e dalla costruzione di adeguate opere idrauliche trasversali di invito e restituzione del materiale.

Infine, su richiesta della Provincia di Savona, si è provveduto a posizionare una rete di capisaldi per il monitoraggio geodetico dei versanti. Tale aspetto risulta particolarmente importante in relazione alla tipologia di impianto in esame, in quanto i rifiuti subiscono un processo di compattazione che genera cedimenti nel cumulo dei materiali abbancati (cfr. § 5.3.4.2.): è pertanto fondamentale poter distinguere i movimenti dovuti all’evoluzione dell’impianto dagli eventuali abbassamenti dei versanti circostanti.

5.3. Dati sperimentali: caratterizzazione proprietà rifiuti

Gli studi per la caratterizzazione dei rifiuti a discarica sono stati condotti partendo da un dettagliato esame della letteratura scientifica, al fine di giungere ad una classificazione merceologica rappresentativa dei conferimenti per l’impianto in esame; in seguito, si sono realizzati campionamenti e determinazioni di laboratorio sui materiali tal quali e sui cumuli di abbancamento, correlando le caratteristiche originarie con i parametri d’ammasso rilevabili sui depositi e infine sono state condotte prove di carico nel corpo della discarica attuale. In relazione alla natura dei materiali ammessi all’impianto, particolare attenzione è stata prestata alla caratterizzazione delle principali tipologie di rifiuti, in modo da poter acquisire parametri rappresentativi delle diverse macrocategorie di materiali. Sotto l’aspetto della tipologia di sistemazione, analogamente, determinazioni di laboratorio e prove in sito sono state condotte nell’ambito dell’attuale impianto in contesti rappresentativi di diversi periodi di deposito, modalità di lavorazione e tipologie di rifiuti.

L’acquisizione di elementi conoscitivi significativi (ad esempio, i parametri geotecnici operativi per i rifiuti stoccati o l’individuazione di modalità di abbancamento in grado di conseguire condizioni di maggiore addensamento e minore deformabilità nell’accumulo) consente, insieme al raggiungimento di migliori condizioni di stabilità e alla diminuzione dei cedimenti nel tempo, la messa a deposito di volumi di rifiuti significativamente maggiori, con un’evidente ottimizzazione tecnico – economica dell’impianto.

L’impianto in esercizio ha consentito di disporre di un modello fisico a grandezza reale per l’analisi di tutti gli aspetti di interesse, dalle tipologie composizionali, al campionamento diretto dei materiali allo stato di conferimento, al controllo delle operazioni di accumulo e compattazione, al rilevamento degli assestamenti sull’accumulo complessivo, allo svolgimento di determinazioni sperimentali sui materiali in diverse condizioni di abbancamento. I risultati ottenuti risultano, quindi, particolarmente rappresentativi in quanto basati, sia nelle attività di elaborazione che sperimentali, non sulla composizione di un generico rifiuto, ma sui materiali effettivamente conferiti e nelle condizioni di lavorazione e abbancamento specifiche di un impianto già attivo e in esercizio da circa 4 anni.

L’analisi bibliografica ha evidenziato notevoli carenze conoscitive, a partire dalla classificazione merceologica dei rifiuti, fino alla loro caratterizzazione fisica e meccanica e all’evoluzione del

comportamento nel tempo; il superamento di tali carenze costituisce, pertanto, un’azione indispensabile per una corretta e razionale impostazione della progettazione e della conduzione dei siti di discarica.

5.3.1. Classificazione e analisi dei flussi di rifiuti

Per assicurare la stabilità di una costruzione, le proprietà fisiche dei suoi componenti devono essere ben conosciute. In una discarica, i rifiuti costituiscono il principale elemento strutturale, rappresentando la quasi totalità del volume, improntando la stabilità dell’accumulo complessivo e condizionando spesso anche la stabilità e l’integrità dei sistemi di copertura e isolamento. Tuttavia, a dispetto di questo ruolo cruciale, la conoscenza del comportamento meccanico dei rifiuti, sia di quelli urbani che degli inerti, è molto scarsa (si veda ad es. la recente revisione dello stato dell’arte in Dixon & Langer, 2006).

Un aspetto di fondamentale importanza per lo studio del comportamento dei rifiuti risulta essere la conoscenza della tipologia di materiali coltivati in discarica. Le caratteristiche meccaniche risultano infatti fortemente influenzate dalla merceologia degli elementi contenuti.

Rispetto alle terre naturali, la determinazione di tali proprietà è tutt’altro che semplice, a causa di numerosi fattori (eterogeneità composizionale, assenza di procedure standardizzate, variabilità delle proprietà nel tempo, impossibilità di ricostruire in laboratorio le condizioni reali osservabili in sito). La stessa applicazione dei principi e dei metodi dell’indagine geotecnica ai rifiuti comporta diversi problemi poiché, in questo caso, l’attendibilità delle correlazioni di più frequente utilizzo nelle caratterizzazioni ordinarie di terreni naturali non è stata ancora verificata.

In letteratura sono state proposte numerose modalità di classificazione (Dixon & Langer, 2006), soprattutto per quanto riguarda i rifiuti solidi urbani (RSU), con diversi gradi di approfondimento; la mancanza di una classificazione univoca e condivisa è sintomatica della difficoltà di raggruppare in modo omogeneo i materiali.

Una delle classificazioni più usate è quella proposta da Grisolia *et al.* (1993, 1995 a, 1995 b), che suddivide i componenti che costituiscono la fase solida in tre gruppi elementari e classifica i rifiuti inserendo in un diagramma ternario le percentuali delle tre classi:

- materiali inerti stabili (terre, ceramica, metalli, legno, ecc.);
- materiali molto deformabili (plastica, carta, tessili, ecc.);
- materiali organici biodegradabili (scarti alimentari, vegetali, ecc.).

Questi tre tipi di materiali contribuiscono in modo diverso alle caratteristiche meccaniche complessive: ad esempio, i materiali inerti stabili hanno un comportamento meccanico che può essere assimilato a quello di un materiale granulare di medie – grandi dimensioni.

La presenza di materiali molto deformabili, in particolare le plastiche, complica notevolmente il modello meccanico, poiché tali materiali possono incapsulare aria o altri fluidi. Inoltre essi tendono a modificare le proprietà meccaniche del rifiuto al variare dei carichi applicati e del tempo, inducendo un comportamento meccanico fortemente anisotropo.

La presenza di materiali organici biodegradabili, infine, causa significative trasformazioni fisico-chimiche nei rifiuti, anche in tempi brevi (Grisolia & Napoleoni, 2004).

Nel caso specifico dell’impianto “La Filippa”, la frazione biodegradabile è del tutto assente, e la maggior parte dei rifiuti conferiti appartiene alla categoria degli inerti stabili. L’unica frazione potenzialmente deformabile è data dai rifiuti assimilabili a RSU, che tuttavia sono quantitativamente limitati e vengono conferiti in balle compresse caratterizzate da un peso specifico apparente di $3 \div 5 \text{ kN/m}^3$. La densità relativamente elevata del materiale confezionato in balle, e di conseguenza la sua compressibilità significativamente inferiore a quella dei tipici RSU sciolti, impedisce di considerare la frazione assimilabile a RSU in esame come tipicamente deformabile.

Per questi motivi, con specifico riferimento a “La Filippa”, anche la classificazione di Grisolia *et al.* (1995) evidenzia forti limitazioni e non appare come la più adeguata, in quanto lascia ampi margini di indeterminazione nella definizione delle caratteristiche e del comportamento dei materiali.

L’approccio per una completa caratterizzazione meccanica dei rifiuti, secondo quanto riportato in letteratura (e.g., Dixon & Jones, 2005; Zekkos, 2005) deve tener conto di alcuni aspetti fondamentali, improntati sia dalla composizione originaria, che dalle trasformazioni connesse all’accumulo e ai fattori ambientali esterni, di seguito riassunti:

- caratteristiche composizionali del rifiuto al momento del suo recapito in discarica;
- modalità di messa a deposito;
- trasformazioni indotte dall’accumulo sovrastante;
- variazioni connesse ai parametri ambientali esterni (agenti meteorologici, sisma, ecc.);
- modifiche a medio e lungo termine che presiedono all’evoluzione dello stato dell’impianto, con riferimento anche al periodo successivo al termine dell’esercizio.

In generale, il ruolo dei fattori elencati è ben riconoscibile sia per i rifiuti contenenti sostanze decomponibili (quali gli RSU), sia con riferimento a composizioni prive della frazione putrescibile. In quest’ultimo caso l’assenza della componente organica decomponibile, e di conseguenza la molto minore incidenza dei fenomeni di natura chimica, può consentire un approccio alla caratterizzazione dei materiali basato principalmente sulla definizione delle caratteristiche fisico-meccaniche.

Tra i fattori da considerare nell’analisi della composizione merceologica dei rifiuti vi sono l’eterogeneità dei rifiuti stessi e la variabilità dei materiali conferiti nel corso della vita utile dell’impianto, valutabile nell’ordine della decina di anni: oltre a differenze regionali e stagionali, vanno tenute in considerazione variazioni nello stile di vita, l’introduzione di nuove legislazioni (quali la Direttiva Europea n° 31 del 1999, che impone una drastica riduzione nei rifiuti biodegradabili da conferire in discarica) o di innovativi sistemi di pretrattamento.

In linea con questi criteri, uno studio complessivo deve comprendere:

- definizione delle principali proprietà fisiche (composizione, densità, granulometria, contenuto d’acqua iniziale, ecc.). Per un’analisi completa dell’incidenza delle modalità di lavorazione dei materiali e degli effetti conseguenti “all’invecchiamento” del deposito, la determinazione di questi parametri deve essere condotta sia precedentemente alla messa a deposito dei rifiuti, sia nel corpo dell’accumulo già realizzato;
- prove di laboratorio per la stima delle caratteristiche meccaniche (compressibilità, resistenza al taglio, deformabilità, ecc.);
- prove in sito per la valutazione dei parametri di comportamento dell’ammasso posto in discarica;
- monitoraggio dell’evoluzione complessiva del deposito nel tempo e suo raffronto con l’andamento delle condizioni ambientali e antropiche al contorno.

La ricognizione sistematica dei registri di scarico per il periodo 2008 ÷ 2012 ha fornito gli elementi conoscitivi fondamentali per la definizione della tipologia di materiali conferiti e dell'incidenza delle varie classi composizionali. Sulla base della natura, origine e processo di trattamento dei materiali è possibile definire sotto l'aspetto geotecnico, ovvero dal punto di vista dei caratteri fisici e meccanici che improntano l'assetto dell'accumulo, 5 categorie principali di rifiuti, ognuna delle quali comprendenti materiali eterogenei, ma con comportamento nell'insieme relativamente analogo. I parametri medi rappresentativi di ciascuna categoria sono stati definiti mediante l'esame dei caratteri composizionali e delle proprietà indice effettive verificate in discarica durante le operazioni di conferimento.

- **Terreni e rifiuti analoghi da bonifica (T):** sono costituiti da terre e rocce che possono provenire anche da scavi di bonifica di siti industriali, a granulometria variabile in funzione del sito di produzione (limo sabbioso, sabbia, ghiaia, ciottoli). In fase di conferimento questi materiali sono caratterizzati da valori del peso di volume di $10 \div 13 \text{ kN/m}^3$, e umidità dell'ordine del $10 \div 20\%$. In alcuni casi la granulometria risulta relativamente omogenea in quanto il materiale è costituito da frazioni derivanti da operazioni di vagliatura (frazione sottovaglio $0 \div 2 \text{ cm}$).
- **Rifiuti solidi (S):** comprendono scarti solidi di processi produttivi (lavorazione ferro, ghisa, ecc.) o di rifiuti provenienti da processi di solidificazione/stabilizzazione di rifiuti industriali o di ceneri. Sono caratterizzati prevalentemente da un aspetto sabbioso – terroso e possono contenere solidi granulari di dimensioni variabili ($0,2 \div 10 \text{ cm}$). I materiali in entrata all'impianto hanno peso di volume di $10 \div 14 \text{ kN/m}^3$, mentre il tenore di umidità varia dal 5 al 35%.
- **Fanghi disidratati da depurazione acque (F):** sono derivati da fanghi provenienti dal trattamento chimico-fisico di acque reflue industriali disidratati meccanicamente. Il loro peso di volume è generalmente di $9 \div 12 \text{ kN/m}^3$, con una percentuale di umidità variabile tra il 40 e il 65%.
- **Rifiuti solidi assimilabili agli urbani (SR):** scarti solidi di processi di selezione delle frazioni recuperabili di scarti di imballaggi e simili; hanno una composizione merceologica costituita, in percentuali diverse, da plastica, gomma, carta, legno, inerti. Il rifiuto è costituito prevalentemente da elementi a geometria bidimensionale (fogli, nastri) con peso specifico apparente di circa $3 \div 5 \text{ kN/m}^3$. I materiali in genere sono conferiti pressati in balle reggettate di dimensioni $0,8 \times 0,8 \times 1,2 \text{ m}$, con volume pari a circa 1 m^3 . Il peso di volume di una singola balla è di circa $8 \div 9 \text{ kN/m}^3$.
- **Rifiuti solidi da selezione meccanica (SL):** scarti solidi di processi di selezione meccanica di frazioni recuperabili. La composizione merceologica comprende, in percentuali diverse, plastica, gomma, carta, legno e inerti. Il rifiuto è costituito, con riferimento a ogni singolo carico, da elementi con dimensioni relativamente omogenee, variabili da $10 \div 20 \text{ cm}$ a $0 \div 2 \text{ cm}$ in funzione del tipo di processo di vagliatura di provenienza. Il peso di volume è compreso tra $3 \div 6 \text{ kN/m}^3$.

La Tabella 10 e la Figura 15 presentano i rapporti composizionali nei singoli anni tra le varie categorie; dall'analisi dei dati è possibile ottenere una valutazione adeguatamente rappresentativa della composizione dei materiali e attribuire, quindi, al comportamento d'insieme dell'accumulo parametri derivati dal monitoraggio a scala dell'impianto e dallo svolgimento di prove sperimentali in contesti rappresentativi.

L'anno 2011 è stato suddiviso nei due semestri poiché a partire da luglio è stata introdotta una rilevante modifica nelle modalità di abbancamento, che consiste nella compattazione del materiale abbancato con un rullo (cfr. § 5.3.3.1).

Categoria	Incidenza percentuale (%)								Dens. in ingresso (kN/m ³)
	2008	2009	2010	2011 totale	2011 1° sem.	2011 2° sem.	2012 1° sem.	Media 2008 ÷ 2011	
T	54,46	40,37	27,00	21,32	24,91	17,85	17,25	35,79	12
S	16,93	26,60	16,52	24,91	16,65	32,90	45,92	21,24	10
F	19,10	23,36	26,63	19,00	18,81	19,19	23,69	22,02	10
SR	9,51	7,60	17,02	17,42	21,23	13,74	5,23	12,89	5
SL	-	2,08	12,83	17,35	18,40	16,33	7,92	8,06	4
Quantitativi conferiti (kN)	450.118	963.965	762.773	970.166	477.150	493.016	447.870	786.755	

Tabella 10 : Incidenza percentuale dei rifiuti conferiti nell’impianto “La Filippa”, classificati in base alla categoria compositiva; si segnala che a partire dal secondo semestre del 2011 è stata introdotta la compattazione del materiale abbancato con un rullo.

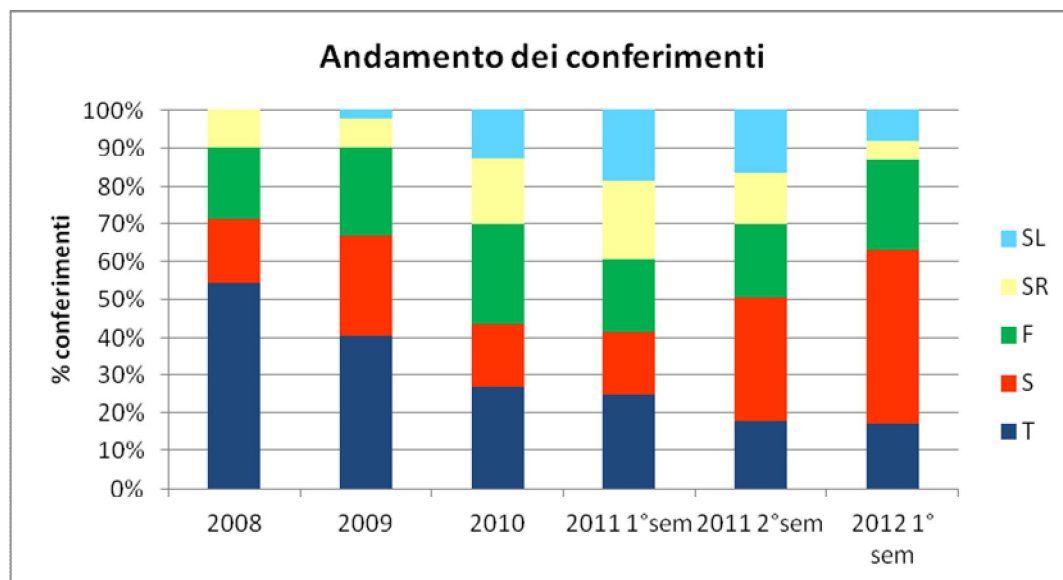


Figura 15 : Andamento del flusso dei conferimenti in funzione dell’incidenza percentuale della tipologia di rifiuti nel periodo 2008 ÷ 2012. SL: rifiuti da selezione meccanica, SR: assimilabili agli urbani, F: fanghi da depurazione acque, S: rifiuti solidi, T: terreni e rifiuti da bonifica.

Tenendo conto della composizione generale relativa ad ogni categoria, nonostante le oscillazioni nei rapporti reciproci, è immediato rilevare che:

- la maggior parte dei rifiuti è costituita da materiali solidi comprendenti la totalità dei materiali relativi alle categorie T, S, F, che in alcuni anni hanno costituito la quasi totalità delle volumetrie abbancate; questi materiali, di tipo granulare, possono essere assimilati sotto l’aspetto fisico a terreni naturali incoerenti, ovvero a un aggregato di particelle solide sciolte o tenute insieme da deboli legami di tipo coesivo;
- nell’ambito dei materiali solidi, prendendo in considerazione i soli gruppi T e S, la maggior parte è costituita da elementi a granulometria medio-grossolana compresa nel campo delle sabbie e delle

ghiaie. Con riferimento alla composizione media tale aliquota corrisponde quasi al 60% del peso totale scaricato, ma nelle singole annate può giungere a superare il 70%;

- gli elementi deformabili comprendono esclusivamente plastica, gomma, fibre tessili, imballaggi;
- non sono presenti materiali facilmente biodegradabili, quali vegetali, sostanze alimentari, ecc.;
- nel complesso, si rileva una progressiva diminuzione dell’incidenza della categoria T, che passa da valori superiori al 50% nel 2008 al 17% nel 2012;
- nel 2010 e 2011 si registra un aumento delle categorie con minor peso di volume (SR, SL), che raggiungono circa il 30% della totalità dei rifiuti abbancati, a dispetto di una percentuale di circa il 10% nelle altre annate.

5.3.2. Caratterizzazione dei materiali in ingresso

L’impostazione del piano di studio per la caratterizzazione dei rifiuti deriva dall’analisi del quadro conoscitivo attualmente disponibile, così come ricavato dalla rassegna della bibliografia scientifica italiana e internazionale. Nella definizione del programma delle attività si è tenuto conto direttamente delle esperienze, peraltro molto limitate, condotte su materiali analoghi a quelli conferiti nell’impianto in esame, e nello specifico del lavoro di Cevasco *et al.* (2008), elaborato sulla base delle indagini condotte nella discarica di Bossarino (Sv).

In questo contesto l’aspetto del tutto innovativo, caratterizzante l’approccio conoscitivo a “La Filippa”, è rappresentato dalla possibilità di verificare, contemporaneamente, sia le caratteristiche dei materiali in entrata e i risultati immediati delle modalità di abbancamento, sia il comportamento del deposito nel suo insieme e la sua evoluzione fisica e meccanica nel tempo.

Nel quadro appena esposto, l’acquisizione di parametri adeguatamente rappresentativi del comportamento fisico-meccanico dei rifiuti comporta necessariamente lo svolgimento di determinazioni sperimentali in sito, unitamente all’analisi sistematica dei materiali già scaricati o potenzialmente conferibili.

In questa fase, dovendo operare con svariate tipologie merceologiche nonché, nell’ambito dello stesso rifiuto, con materiali dalle caratteristiche significativamente diverse in funzione di numerosi fattori, quali l’area di provenienza o l’impianto di pretrattamento, si è ritenuto opportuno seguire un approccio di tipo “puntuale”, piuttosto che basato sull’acquisizione di dati medi relativi a campioni significativi, ma di composizione approssimata o incerta.

In relazione alla netta prevalenza di materiali solidi, di tipo granulare e in pratica non deformabili, le prove sono state finalizzate alla determinazione del peso di volume, dell’umidità e della composizione granulometrica dei materiali nello stato di conferimento. Con tali parametri, oltre a seguire l’evoluzione nella fase di abbancamento, è possibile ricavare, o stimare in modo indiretto, le principali grandezze (resistenza al taglio, deformabilità) necessarie per impostare su base fisica la progettazione e la verifica geotecnica della discarica.

La prima fase, finalizzata alla raccolta delle informazioni macroscopiche più significative e facilmente individuabili, avviene mediante la compilazione della *Scheda descrittiva del carico e delle condizioni dei materiali al momento del conferimento*, appositamente creata per fornire una classificazione preliminare dei materiali. In seguito, si procede all’esecuzione diretta delle prove e al prelievo dei campioni per le analisi di laboratorio sui carichi maggiormente rappresentativi; le determinazioni sono state svolte per lo più

all'interno dell'impianto e i campionamenti possono essere considerati di tipo puntuale, in quanto i provini hanno assunto normalmente dimensioni di alcuni chilogrammi.

Una delle principali criticità da affrontare riguarda la composizione eterogenea dei rifiuti a discarica, con presenza anche di materiali grossolani o fibrosi, che può costituire una limitazione allo svolgimento delle prove o alla loro completa riuscita. In letteratura si registra la difficoltà di campionamento e analisi per questo tipo di materiali, poiché spesso le dimensioni dei campioni di laboratorio sono troppo limitate e non consentono una valutazione attendibile delle proprietà dei materiali (Chen *et al.*, 2009).

L'adozione di particolari accorgimenti in fase di campionamento (ad esempio la creazione di una fustella *ad hoc* per il peso di volume) e la ripetizione della singola determinazione per alcune decine di volte (tipicamente in numero di 40 per le misure del peso di volume), ha permesso di superare le eventuali anomalie nei risultati conseguenti alle limitate dimensioni del campione, come verificato anche tramite l'analisi statistica dei valori ottenuti.

Le determinazioni sono state finalizzate all'ottenimento di parametri rappresentativi dei materiali nelle condizioni ordinarie di conferimento, ovvero allo stato sciolto se i rifiuti sono trasportati sfusi mediante cassoni o autocarri coperti; questa situazione si verifica per tutte le tipologie di materiali, ad eccezione della categoria SR, dove i materiali sono conferiti in balle.

Di seguito vengono presentate le modalità analitiche per la determinazione di peso di volume, contenuto di acqua e granulometria, con i relativi risultati.

5.3.2.1. Peso di volume

L'analisi viene condotta mediante pesatura di un volume noto di materiale tramite l'utilizzo di apposite fustelle cilindriche in acciaio a parete sottile (Figura 16), costruite *ad hoc* presso l'Azienda per l'analisi; le caratteristiche della fustella sono riportate in Tabella 11. Data l'eterogeneità composizionale dei materiali da analizzare, le dimensioni dello strumento sono significativamente maggiori rispetto alle fustelle standard utilizzate in geotecnica.

Diametro (cm)	10
Altezza (cm)	50
Volume (cm³)	3927
Tara (kg)	2,577

Tabella 11 : Caratteristiche tipo della fustella utilizzata per la determinazione del peso di volume sui materiali al momento dell'abbancamento.

Il campionamento viene eseguito nel bacino della discarica, dal materiale scaricato dal camion; prima di iniziare le misure, la fustella viene pesata, poi si procede all'infissione della fustella nel cumulo e alla rasatura con una spatola dell'estremità aperta; la fustella viene poi pesata mediante una bilancia tecnica con precisione di 0,5 g. L'operazione viene ripetuta per 40 volte, in modo da ottenere una serie di dati significativa, che viene poi analizzata statisticamente.



Figura 16 : Strumentazione utilizzata per la determinazione del peso di volume sui materiali al momento dell’abbancamento. La fustella, creata ad hoc per le analisi, ha un volume di 3,927 L.

Per ogni materiale esaminato, la rappresentazione grafica della distribuzione dei valori del peso di volume ottenuti consente di valutare direttamente la rappresentatività della prova (in Figura 17, si riporta ad esempio il grafico per il campione T2). In tutti i campionamenti, l’istogramma rappresentativo assume un andamento simmetrico, assimilabile ad una distribuzione di frequenza di tipo gaussiano, indice sotto l’aspetto statistico di un campionamento rappresentativo della popolazione di dati in esame. Dal punto di vista dell’indagine, questo conferma la bontà delle misure condotte e la possibilità di assumere il valore medio ottenuto, con la relativa deviazione standard, quale parametro effettivamente rappresentativo del materiale esaminato.

Va tuttavia precisato che alcuni valori, soprattutto relativi ai materiali con frammenti di grosse dimensioni (*fluff*) o conferiti in blocchi (alcune tipologie di fanghi), possono essere sottostimati, poiché durante le misurazioni potrebbero restare degli spazi vuoti nella fustella. Tale limitazione appare comunque inficiare esclusivamente le rilevazioni condotte sul *fluff* e non quelle sui fanghi, come testimonia il peso di volume relativamente elevato misurato per questi materiali (cfr. Figura 18); di conseguenza, questa problematica risulta riferita a quantitativi estremamente limitati rispetto al totale dei materiali abbancati e può pertanto essere considerata trascurabile.

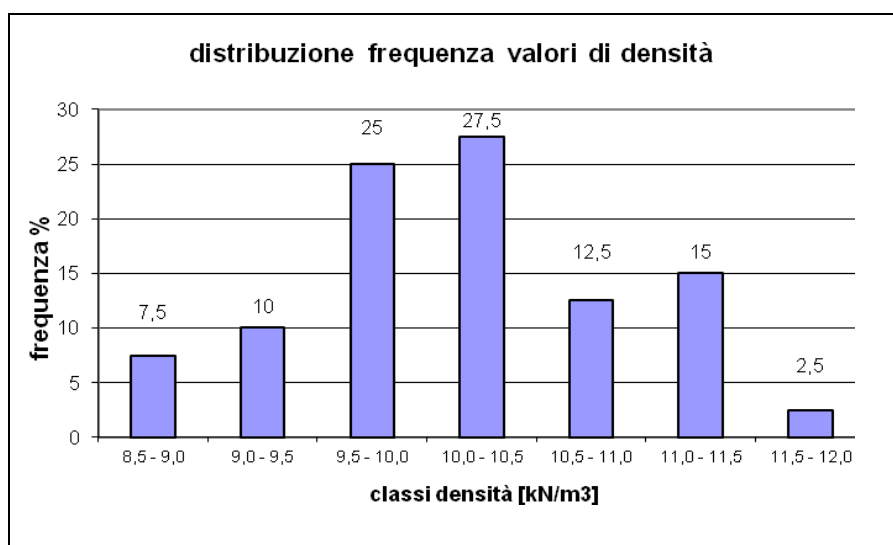


Figura 17 : Distribuzione della frequenza dei 40 valori di densità per un campione di rifiuti appartenente alla categoria T (terreni e rifiuti da bonifica).

La Figura 18 presenta i risultati ottenuti per le varie categorie composizionali; le barre verticali indicano la deviazione standard moltiplicata per 3.

Si evidenzia che la categoria T presenta valori di densità elevati, dell'ordine di $11 \div 13 \text{ kN/m}^3$. Per la categoria F, i valori generalmente oscillano tra 6 e 10 kN/m^3 , con densità massime dell'ordine di $12 \div 13 \text{ kN/m}^3$ (campioni F1 e F2). La categoria SL mostra le densità più basse, comprese tra 1 e 6 kN/m^3 .

Nel caso del campione SL2, il valore estremamente basso della densità è da attribuire da un lato alla composizione merceologica (*fluff*), e dall'altro lato alla scarsa rappresentatività della misurazione: infatti, il materiale è costituito da frammenti eterogenei e di varia composizione, spesso in pezzatura grossolana fino a 20 cm, e quindi non adatti alla misurazione con fustella.

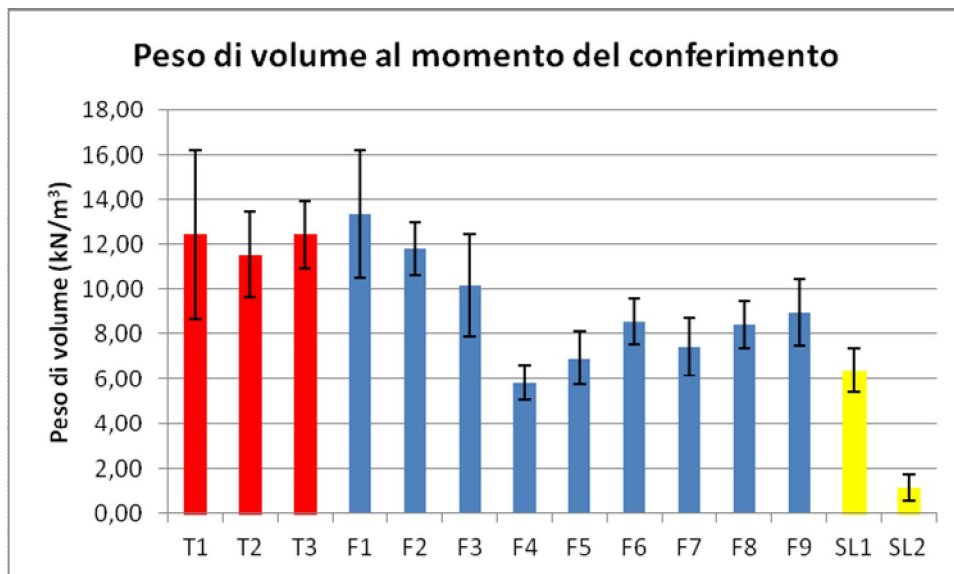


Figura 18 : Analisi del peso di volume apparente su campioni di rifiuti; i dati rappresentano la media di 40 ripetizioni, le barre di errore sono definite come $3 \times$ deviazione standard. I vari colori indicano le diverse categorie di appartenenza dei materiali (rosso: terre e rifiuti da bonifica, blu: fanghi disidratati, giallo: rifiuti da selezione meccanica).

5.3.2.2. Contenuto in acqua

Il contenuto in acqua è stato determinato nei laboratori dell'Università degli Studi dell'Insubria a Como su campioni di dimensioni rappresentative (dell'ordine di $2 \div 4 \text{ kg}$) prelevati al momento del conferimento, subito dopo lo scarico dal camion. I campioni vengono inseriti in contenitori di alluminio o plastica a tenuta e pesati sul posto tramite bilancia analitica con precisione del mezzo grammo. Tramite questa procedura, è possibile ottenere risultati attendibili anche se il campione giunge in laboratorio in tempi successivi rispetto al prelievo.

La determinazione del contenuto in acqua si svolge, in accordo alle norme geotecniche, mediante essiccamento del campione in forno termostato (modello NUVE FN400) a 105°C per 24 ore e successiva misurazione del peso secco. Il residuo a 105°C è calcolato come rapporto tra peso secco netto e peso fresco netto, espresso in percentuale; il contenuto in acqua viene ricavato per differenza.

Sono stati analizzati 10 campioni (2 appartenenti alla categoria T, 6 alla categoria F e 2 campioni prelevati in occasione delle prove di carico su piastra); l’elaborazione grafica dei risultati ottenuti è presentata nella Figura 19. Tutti i campioni sono stati raccolti in assenza di precipitazioni.

Il contenuto di acqua della categoria T è dell’ordine del 15 ÷ 20%, mentre quello della categoria F è più elevato e oscilla tra il 30 e il 50%. I campioni F1 e F2 rappresentano 2 carichi conferiti nello stesso giorno dallo stesso produttore e hanno comportamento simile alle terre: infatti, pur essendo merceologicamente dei fanghi, si tratta sostanzialmente di un miscuglio di terre e fanghi derivanti da operazioni di prospezioni geofisiche.

I campioni misti raccolti in occasione delle prove di carico su piastra, rappresentativi quindi di materiale già abbancato da tempo, hanno contenuto di acqua molto ridotto; questo risultato supporta la scelta di considerare il materiale in condizioni drenate.

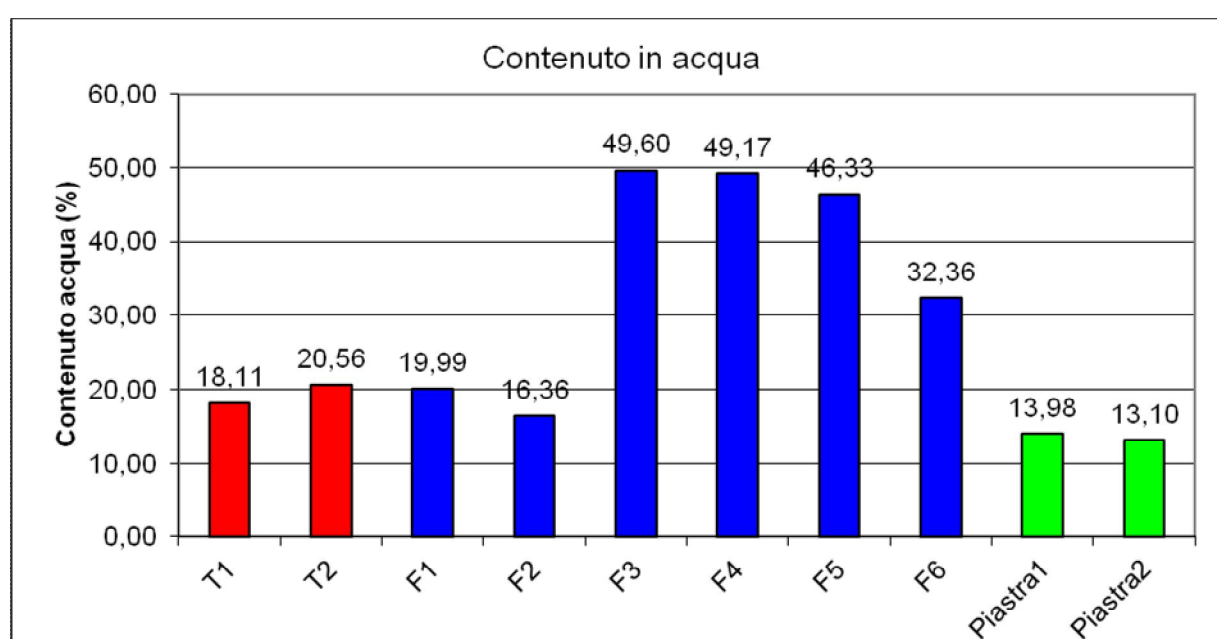


Figura 19 : Analisi del contenuto in acqua su campioni di rifiuti. I vari colori indicano le diverse categorie di appartenenza dei materiali (rosso: terre e rifiuti da bonifica, blu: fanghi disidratati, verde: campioni misti da prove di carico su piastra).

Peso di volume e contenuto in acqua permettono di caratterizzare in modo specifico il comportamento dei materiali analizzati: in particolare, sebbene l’ammasso nel suo complesso può essere considerato in condizioni drenate, nel caso dei materiali a grana fine (fanghi), il contenuto in acqua è direttamente collegato ai valori dei limiti di liquidità e plasticità, che a loro volta definiscono le proprietà di resistenza meccanica (O’Kelly, 2005; Belfiore *et al.*, 1990). La Figura 20, che presenta il confronto tra le due proprietà indice, mostra come le diverse categorie merceologiche siano ben differenziabili: i campioni della categoria T, in blu, hanno contenuto in acqua relativamente basso e densità molto elevata; la categoria F, in viola, ha contenuto in acqua più elevato e densità mediamente elevata. L’unico campione della categoria SL (*fluff*, in giallo), presenta contenuto in acqua e densità estremamente ridotte. I due campioni di fanghi con caratteristiche simili alle terre da bonifica sono i campioni F1 e F2, già segnalati in precedenza.

Il grafico conferma ulteriormente la bontà della classificazione adottata, poiché evidenzia che le macrocategorie merceologiche ben si correlano all’effettivo comportamento dei materiali, essendo caratterizzate da proprietà indici che, seppur spaziando in campi relativamente ampi, sono peculiari delle

categorie specifiche. È inoltre da sottolineare che i due parametri sono di facile determinazione e a basso costo; tale approccio, se adeguatamente sviluppato, potrebbe quindi rappresentare un metodo rapido ed economico per stimare il comportamento dei materiali già al momento del conferimento, consentendo di ottimizzare le successive fasi di lavorazione.

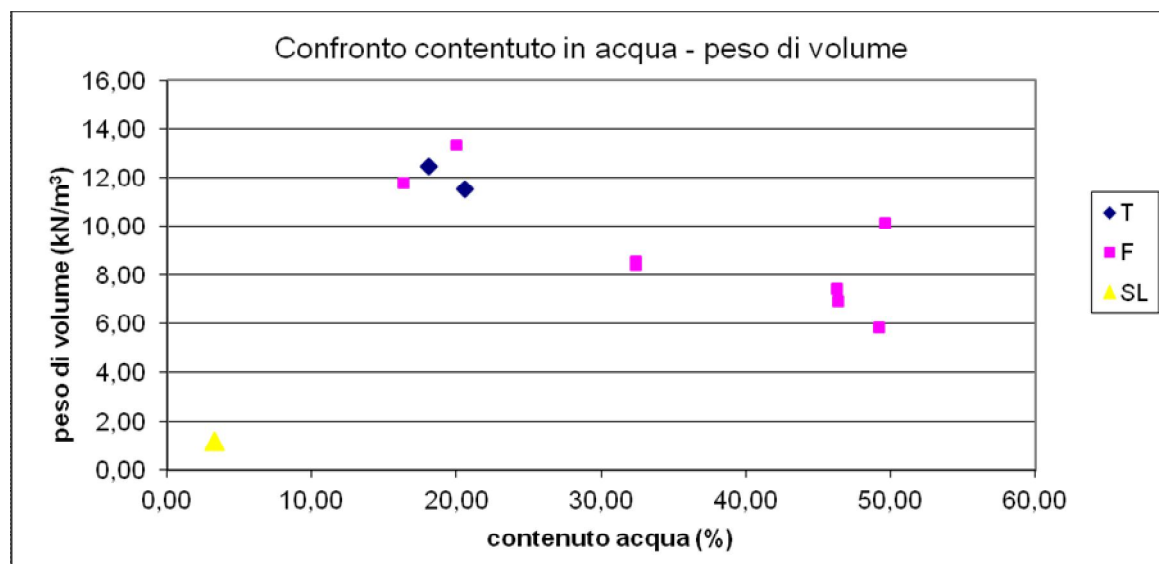


Figura 20 : Relazione tra contenuto in acqua e densità apparente misurate al momento del conferimento. Si osservi la differenziazione delle categorie merceologiche in base ai parametri in esame.

5.3.2.3. Analisi granulometriche

Le analisi granulometriche sono state effettuate presso i laboratori dell'Università dell'Insubria mediante vagliatura per via umida con setacci in acciaio della serie ASTM (n° 230, n° 200, n° 100, n° 60, n° 40, n° 20, n° 10, n° 4, 3/8", 3/4", 1", 1,5", 2" e 3").

Sono stati analizzati 6 campioni (Figura 21), ognuno con peso di circa 3 kg; 2 campioni appartengono alla categoria T, 2 alla categoria F e 2 sono campioni misti raccolti in occasione dello svolgimento delle prove di carico su piastra.

La composizione granulometrica individua, come per i terreni naturali, il tipo di comportamento geotecnico del materiale e consente una, sia pur generica, valutazione della resistenza al taglio. I terreni da bonifica e i rifiuti solidi sono composti dal punto di vista granulometrico da ghiaie, generalmente prevalenti, con sabbie, oppure da sabbie e ghiaie in proporzioni circa equivalenti. La frazione fine composta esclusivamente da limo raggiunge al più il 10 ÷ 15%. Assortimento analogo si rileva nei rifiuti solidi da selezione meccanica, seppure questi assumano una densità apparente inferiore. Anche una parte dei fanghi conferiti presenta una composizione prevalentemente sabbioso-ghiaiosa, che si associa a valori relativamente elevati del peso di volume.

È da sottolineare come le analisi sulla categoria F si siano limitate a 2 soli campioni, in relazione alla modalità di conferimento dei materiali: i fanghi vengono infatti generalmente conferiti in “piastrelle” pressate, che rendono impossibile o perlomeno non rappresentativa l'analisi. In occasione dello svolgimento delle prove di carico si è infatti verificato che, anche nei materiali abbancati da tempo e coperti da altri strati

di rifiuti, i fanghi non subiscono una frantumazione a seguito delle lavorazioni ordinarie, ma la pezzatura originaria si mantiene nel tempo.

Anche nel caso dei campioni misti (in verde), è rilevante la presenza di materiale grossolano; il campione è stato prelevato in corrispondenza dell'esecuzione di una prova di carico su piastra, svolta su materiali della categoria T abbancati da circa 24 mesi e caratterizzati da buone proprietà meccaniche.

Questi caratteri attribuiscono alle categorie composizionali, che nell'insieme rappresentano la maggior parte dei materiali, un comportamento di tipo granulare improntato dallo sviluppo dei processi attritivi. L'elevata incidenza, se non la prevalenza, della componente ghiaioso-sabbiosa fa ipotizzare, inoltre, valori medi nei parametri di resistenza al taglio.

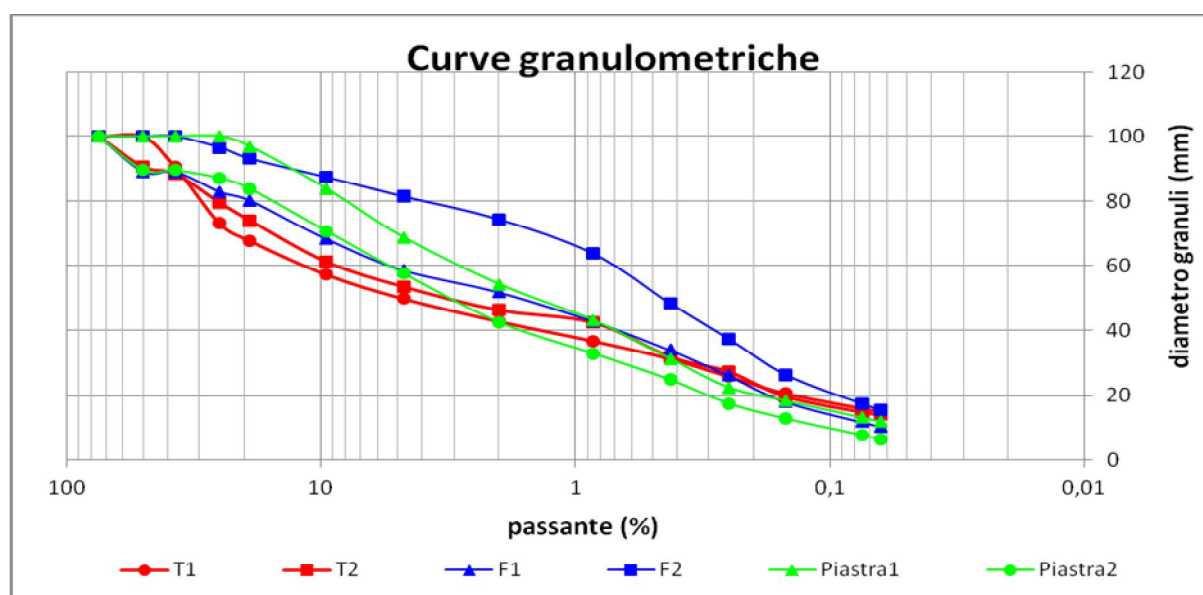


Figura 21 : Curve granulometriche ottenute su campioni di rifiuti; i campioni, analizzati mediante setacciatura per via umida, sono costituiti prevalentemente da ghiaie e sabbie.

Per quanto riguarda i rifiuti solidi assimilabili agli urbani (Categoria SR), in relazione alla natura e alla conformazione particolare dei materiali, le operazioni di caratterizzazione sono state condotte con una procedura specifica e differente da quella appena esposta. Trattandosi prevalentemente di elementi a geometria bidimensionale (fogli, nastri, ecc.), con basso peso specifico (circa $3 \div 5 \text{ kN/m}^3$) e già conferiti pressati in balle reggettate, si è proceduto al rilievo delle caratteristiche dimensionali di intere “confezioni” prelevate in carichi provenienti da diverse località e impianti di pretrattamento (Tabella 12). Tale approccio risulta peraltro in linea con le modalità di lavorazione di questi materiali, che vengono abbancati in livelli mantenendo l'originale assemblaggio in balle. Non è stato possibile rilevare, quindi, il peso di volume e la composizione granulometrica dei singoli elementi.

Parametro	Range rappresentativo
Dimensioni lato balla	0,8 ÷ 1,2 m
Volume complessivo balla	0,8 ÷ 1,2 m ³
Peso singola balla	6,5 ÷ 9,0 kN
Peso di volume	3 ÷ 5 kN/m ³

Tabella 12: Principali caratteristiche della categoria SR (rifiuti solidi assimilabili agli urbani). La caratterizzazione è stata basata sul rilevamento degli aspetti dimensionali medi di un campione rappresentativo di balle.

5.3.3. Rifiuti depositati in cumulo

5.3.3.1. Modalità di abbancamento e compattazione

I materiali afferenti alle tipologie terreni, rifiuti solidi e fanghi vengono conferiti generalmente sfusi e scaricati tramite ribaltamento posteriore del cassone di trasporto.

I rifiuti solidi assimilabili agli urbani normalmente sono conferiti confezionati in balle con automezzi dotati di sistemi di scarico a piano mobile (*walking floor*). In questo caso le balle, scaricate senza ribaltamento del cassone, vengono spinte progressivamente fuori dalla parte posteriore del cassone di trasporto attraverso il sistema di movimentazione posto sul fondo dello stesso.

I mezzi meccanici in dotazione alla discarica, comprendenti escavatore cingolato, rullo compattatore e trattore cingolato, provvedono alla sistemazione con modalità diverse in funzione della tipologia del materiale, in modo da conferire condizioni di stabilità e *packing* ottimali all'abbancamento.

Le operazioni di abbancamento e compattazione sono effettuate con un trattore cingolato Komatsu mod. D85 con peso operativo di 28 t. I materiali sfusi vengono stesi a strati con spessore di circa $30 \div 60$ cm e costipati con il passaggio del trattore cingolato. La stesa avviene su un piano orizzontale o debolmente inclinato (pendenza nell'ordine di $1 \div 5\%$); in media vengono effettuati con il trattore da 4 a 6 passaggi per ogni strato. Le balle composte da rifiuti solidi assimilabili agli urbani, invece, vengono sistemate in affiancamento, una ad una, evitando di sovrapporle e di deteriorare le reggette di imballaggio costituite generalmente da robusto filo di ferro. Una volta disposte a costituire una sorta di strato, le balle sono coperte con una porzione dei materiali sfusi in arrivo, in modo da riempire i vuoti che si determinano tra un elemento e l'altro e di esercitare su di esse una prima azione di carico (Figura 22).

A partire da luglio 2011, la superficie superiore dell'abbancamento così predisposta viene ulteriormente compattata per mezzo di un rullo compattatore (modello Volvo SD190DX, peso operativo circa 20 t) dotato di tamburo dentato e di sistema di regolazione della frequenza di vibrazione che permette di adeguare le vibrazioni del tamburo al tipo di materiale che si sta compattando. Quest'ulteriore lavorazione comporta un deciso miglioramento nelle condizioni di abbancamento, come si è potuto riscontrare dalle rilevazioni sul peso di volume medio dei materiali abbancati (cfr. Tabella 13). Nell'insieme il piano di coltivazione della discarica prevede la realizzazione di bancate progressive ognuna con altezza di circa 2 m.



Figura 22 : Fasi di abbancamento dei materiali in entrata; a): posizionamento di rifiuti assimilabili agli urbani, conferiti in balle; b) stesa di materiale granulare, che viene successivamente compattato mediante gli automezzi in dotazione all'impianto.

5.3.3.2. Verifica dell’addensamento raggiunto nel cumulo

Il rilevamento periodico dei piani quotati della discarica in coltivazione consente di disporre di elementi di verifica diretta delle caratteristiche assunte dai materiali in abbancamento e dell’evoluzione nel tempo dei fenomeni di costipamento. Trattandosi di misure topografiche riferite alla superficie esterna dell’accumulo, i dati assumono necessariamente la valenza di valori medi d’insieme. Tale limitazione è compensata, d’altra parte, dal fatto che si tratta di rilievi diretti rappresentativi dell’accumulo nelle sue dimensioni reali.

Nella Tabella 13 sono riassunti, con riferimento al peso dei materiali conferiti rilevato direttamente sui carichi in entrata, i volumi totali e i valori medi del peso di volume. Le volumetrie annuali derivano dal confronto dei rilievi topografici eseguiti periodicamente. I valori di peso di volume sono definiti come:

peso totale dei rifiuti conferiti nell’anno / volume totale di abbancamento nello stesso anno

e rappresentano, quindi, la densità reale media dei rifiuti depositati, valutata sull’intero abbancamento.

		2008	2009	2010	2011 totale	2011 1° sem.	2011 2° sem.	2012 1° sem.	Media 2008 ÷ 2011
abbancamento	Quantitativi conferiti (kN)	450.118	963.965	762.773	970.166	477.150	493.016	447.870	786.755
	Volume in abbancamento (m³)	25.581	63.105	60.866	80.100	45.450	34.650	29.000	57.413
	Peso di volume medio in abbancamento (kN/m³)	17,59	15,27	12,53	12,11	10,50	14,23	15,44	14,38
ingresso	Volume in ingresso (m³)	45.208	100.235	100.505	135.712	69.032	66.679	51.159	95.416
	Peso di volume in ingresso (kN/m³)	9,96	9,62	7,59	7,15	6,91	7,39	8,75	8,58
	Rapporto peso di volume abbancamento / ingresso	1,77	1,59	1,65	1,69	1,52	1,92	1,76	1,68

Tabella 13 : Quantitativi di materiali conferiti e volumi in ingresso e a seguito delle operazioni di abbancamento relativi all’attività della discarica nel 2008 ÷ 2012. La loro acquisizione diretta tramite rilievi strumentali consente una precisa definizione della densità in sito effettiva assunta dai rifiuti in abbancamento.

I dati ottenuti, sebbene indicativi delle condizioni medie dell'accumulo, assumono particolare valenza in quanto riferibili all'intero abbancamento. Risulta così possibile superare i limiti delle determinazioni dirette che, per quanto condotte su campioni significativi, assumono comunque valenza puntuale.

Pur prendendo in considerazione il peso di volume minore, $\gamma_{\text{med}} = 12,11 \text{ kN/m}^3$ ottenuto per il 2011, risulta evidente che tale valore è superiore alle densità apparenti determinate sui rifiuti nelle condizioni di conferimento per i materiali meno addensati con $\gamma = 6 \div 9 \text{ kN/m}^3$ (rifiuti solidi da selezione meccanica, assimilabili agli urbani, fanghi), o circa equivalente ai terreni granulari caratterizzati da $\gamma = 11,5 \div 12,4 \text{ kN/m}^3$ (terre e rifiuti da bonifica). Si è considerato il peso di volume dell'intero anno 2011, poiché i valori estremamente ridotti rilevati nel primo semestre del 2011 risultano scarsamente rappresentativi dei conferimenti medi, in quanto derivano dal conferimento, considerato atipico dagli stessi operatori della discarica, di elevate quantità di materiali con caratteristiche scadenti, appartenenti alle categorie SL e SR.

La variabilità dei valori di densità apparente ottenuti per i diversi anni riflette i mutamenti nei rapporti composizionali nei materiali conferiti, e in particolare l'aumento delle categorie caratterizzate da minor densità apparente nel 2010 e 2011 (SR, SL; cfr. Figura 15).

Il confronto tra i valori di densità apparente ottenuti per “La Filippa” e i dati relativi a impianti con caratteristiche analoghe situate nella Regione evidenzia caratteri merceologici complessivi nettamente migliori dei rifiuti conferiti, come pure i significativi valori di costipamento raggiunti con l'abbancamento. A titolo di esempio, si rileva che la densità apparente media verificata per gli anni 2008 ÷ 2012 nell'impianto attuale ha raggiunto i $10,5 \div 17,5 \text{ kN/m}^3$ (valore medio $14,4 \text{ kN/m}^3$), mentre nella vicina discarica per rifiuti non pericolosi di Bossarino (Sv) sulla base delle prove in sito è possibile stimare un valore medio di 8 kN/m^3 (Cevasco *et al.*, 2008).

I valori di densità in entrata per le varie categorie merceologiche sono stati stimati sulla base delle determinazioni svolte in sito (cfr. § 5.3.2.1.) e delle indicazioni fornite dagli operatori della discarica (cfr. Tabella 10). Si sono così calcolati volumi e densità in ingresso per ogni categoria; il rapporto tra peso di volume in abbancamento e in ingresso consente, inoltre, di verificare l'efficacia della procedura di abbancamento e compattazione. Si può infatti notare come tale valore sia compreso tra 1,5 e 2,0, a dimostrazione dell'effettiva capacità delle lavorazioni di incrementare significativamente la densità dei materiali.

Per quanto riguarda l'anno 2011, la differenza tra i due semestri risiede in una diversa merceologia dei materiali in ingresso (elevati conferimenti di *fluff* nel primo semestre) e nell'utilizzo, a partire da luglio, di un'ulteriore lavorazione con rullo compattatore. A fronte di lievi modificazioni nella densità in ingresso ($6,91$ e $7,39 \text{ kN/m}^3$ rispettivamente nei due semestri), si registrano notevoli variazioni nella densità dei materiali abbancati ($10,50$ e $14,23 \text{ kN/m}^3$).

L'aumento della densità esplica un effetto positivo sul tempo di vita operativa della discarica, poiché un miglior costipamento dei materiali comporta la possibilità di abbancare un maggior quantitativo di rifiuti e, di conseguenza, incrementare il tempo di attività della discarica (Belfiore *et al.*, 1990). Tale dinamica produce un'evidente ottimizzazione dei costi, oltre che delle proprietà meccaniche dell'ammasso: in particolare, l'aumento della densità induce una maggiore resistenza al taglio dell'ammasso dei rifiuti.

5.3.3.3. Prove di carico su piastra

Per la definizione dei parametri di deformabilità dell'ammasso dei rifiuti, rappresentativi delle diverse condizioni di deposizione e della variabilità composizionale dei materiali, è stata condotta una serie di prove di carico su piastra; queste prove rappresentano una modalità di analisi ampiamente diffusa per i rilevati stradali, ma innovativa nel campo dei rifiuti, come testimonia l'assoluta scarsità di dati di confronto in letteratura. Le prove sono state svolte sempre in posizione sommitale ai cumuli, dove successivamente all'abbancamento non sono stati applicati ulteriori carichi o azioni di compattazione. È stata impiegata una piastra di grande diametro (600 mm) e quale contrasto all'applicazione del carico un escavatore cingolato del peso operativo di 21 t. Le prove sono state condotte nei mesi di marzo – aprile 2011, in presenza di condizioni meteorologiche ordinarie. Condizioni di prova e risultati ottenuti sono riassunti nella Tabella 14; per l'ubicazione dei punti indagati, si rimanda all'Allegato 1.

Le prove sono state condotte su diverse categorie di rifiuti: in particolare, la Prova n. 1 è stata svolta al di sopra di terre da bonifica compattate in strati di $20 \div 30$ cm; la Prova n. 2 su rifiuti solidi assimilabili agli urbani e rifiuti da selezione meccanica. Infine, la Prova n. 3 è stata condotta su uno strato di materiale sfuso ($20 \div 30$ cm), non ancora compattato e ricoprente una balla composta di materiali molto deformabili. Questa ultima prova rappresenta quindi le condizioni che possono essere ritenute maggiormente penalizzanti, ovvero in presenza di materiali molto deformabili, breve permanenza dei rifiuti nel cumulo e limitata incidenza della compattazione.

I materiali indagati con la Prova n. 1 sono stati campionati e sottoposti a misurazioni di laboratorio per l'analisi di granulometria e contenuto in acqua; la composizione granulometrica rileva la presenza di ghiaie e sabbie debolmente limose, il contenuto di umidità è prossimo al 13%.

Prova	Età della superficie accumulo (piano di prova)	Intervallo di carico applicato (kN/m ²)	Cedimento massimo (mm)	Modulo di deformazione					
				Intervallo carico (kN/m ²)	25 ÷ 125	50 ÷ 150	100 ÷ 200	150 ÷ 250	200 ÷ 300
1	24 mesi	20 ÷ 200 ÷ 20	4,63		21,1 MPa	21,7 MPa	24,9 MPa		
2	6 mesi	20 ÷ 300 ÷ 20	19,54		5,6 MPa	7,0 MPa	9,6 MPa	11,8 MPa	14,0 MPa
3	pochi giorni	20 ÷ 300 ÷ 20	40,44		4,1 MPa	4,2 MPa	4,3 MPa	4,3 MPa	4,0 MPa

Tabella 14 : Prove di carico su piastra (diam. 600 mm) condotte alla sommità di abbancamenti di rifiuto realizzati in diversi periodi. Tutte le prove sono state condotte con un ciclo di carico (con incrementi = 25 kN/m²) seguito da una fase di scarico (con decrementi = 100 kN/m²). L'applicazione dei carichi è stata condotta sino alla stabilizzazione del cedimento, o comunque per almeno 20 minuti.

A seguito del posizionamento dell'escavatore con funzione di mezzo di contrasto, si procede alla stesura di un velo di sabbia fine calibrata per rendere omogeneo il piano di appoggio e al montaggio dell'attrezzatura

(Figura 23). In tutti i casi, la composizione dei materiali sottostanti al piano di esecuzione della prova è stata verificata alla conclusione della prova tramite scavo di un pozzetto (Figura 24).



Figura 23 : a) Posizionamento dell’escavatore (del peso operativo di 21 t) con funzione di mezzo di contrasto e preparazione della postazione di prova. È ben visibile la composizione del cumulo, in questo caso comprendente terre granulari medio-grossolane (Prova n. 1); b) Configurazione della strumentazione nella Prova di carico n. 2; si può notare il velo di sabbia steso alla base per rendere omogeneo il piano di appoggio, il pistone idraulico posto a contrasto con il telaio dell’escavatore e i 3 comparatori posizionati sulla piastra, con riferimento al “compasso” a 3 braccia poggiate al di fuori dell’area di risentimento dei carichi.



Figura 24 : Al termine della prova, lo scavo del pozzetto consente di verificare la stratigrafia della porzione di cumulo interessato dall’applicazione dei carichi; nella Prova n. 3, al di sotto di un livello di materiale sfuso con spessore di 20 ÷ 30 cm è presente un livello di balle costituite da rifiuti assimilabili agli urbani, con prevalenza di materiali molto deformabili.

Il comportamento dell’ammasso nei confronti della deformazione ha consentito, anche in presenza delle condizioni peggiori (Prova n. 3), l’applicazione di carichi rilevanti (300 kN/m^2 , corrispondenti ad un accumulo sovrastante di rifiuti di altezza superiore ai 20 metri), senza l’insorgere di fenomeni di rottura o di punzonamento. In tutti i gradini di applicazione del carico, infatti, è stato possibile raggiungere la stabilizzazione del cedimento o la sua regolarizzazione. I cedimenti totali massimi sono stati nell’ordine dei 40 mm, valore non elevato in considerazione della profondità significativa di risentimento del carico (per le dimensioni della piastra) e dei materiali interessati con la prova caratterizzati, tra l’insieme di quelli conferiti, dalla maggiore deformabilità. Altro aspetto di particolare importanza per la valutazione del comportamento

d’insieme è quello inerente la velocità di sviluppo del cedimento che, anche per i materiali più compressibili, risulta abbastanza rapida anche in relazione allo spessore del cumulo interessato dall’applicazione del carico. Per la Prova n. 3, i valori del modulo di deformazione risultano discreti in relazione alle casistiche riportate in bibliografia per i rifiuti solidi urbani. Il comportamento rilevato è improntato fondamentalmente dall’elevata deformabilità dei rifiuti racchiusi nelle balle. Il valore del modulo ottenuto, indicativo del comportamento dei materiali maggiormente deformabili appena depositi, è stato assunto quale riferimento per l’impostazione della verifica dei cedimenti immediati del cumulo.

In generale, tutti i dati ottenuti evidenziano per l’insieme dei materiali esaminati valori relativamente elevati delle proprietà indice, relazionabili a un comportamento meccanico quanto meno discreto.

5.3.4. Evoluzione del cumulo dei rifiuti

L’evoluzione dello stato del materiale nel tempo costituisce un aspetto primario da non trascurare per una corretta comprensione del funzionamento del sistema discarica – rifiuti. Se pure i rifiuti non putrescibili (che costituiscono la totalità dei volumi conferiti nell’impianto in esame) non sono interessati da significativi processi decompositivi, anche i rifiuti definibili come “inerti” subiscono dallo scarico nell’invaso di deposito, alla sistemazione in bancate, al progressivo accumulo, rilevanti fenomeni di natura sia fisica (addensamento, compressione, deformazione), che chimico-fisica (variazione del contenuto in acqua, presenza fase gassosa negli interstizi, ecc.). Tali modifiche nella struttura del deposito di rifiuti comportano rilevanti variazioni nello stato tensionale e, di conseguenza, nelle caratteristiche di deformabilità e resistenza al taglio, i principali fattori che condizionano la stabilità dell’ammasso e del sistema discarica – rifiuti.

La conoscenza delle proprietà geotecniche dei rifiuti costituisce allo stato attuale un aspetto di fondamentale importanza nella progettazione e nella gestione di una discarica. In entrambe le fasi, infatti, nella maggior parte dei casi ci si trova a dover fronteggiare e risolvere problemi inerenti la stabilità del cumulo dei rifiuti ed il verificarsi di cedimenti che possono protrarsi anche per tempi assai lunghi.

La soluzione degli aspetti delineati dipende, in primo luogo, dalla conoscenza dei parametri che definiscono il comportamento geotecnico dei rifiuti che vengono depositi a discarica.

Come per i terreni naturali, la definizione di valori rappresentativi del comportamento geotecnico dei rifiuti richiede, preliminarmente, il riconoscimento delle relazioni tra sollecitazioni e risposta dell’ammasso, nonché l’individuazione dei parametri adeguati a spiegare le relative proprietà fisiche e meccaniche.

I rifiuti, come i terreni naturali, costituiscono un mezzo polifase, composto da una fase solida, una fase liquida ed una fase gassosa. Rispetto ai terreni, tuttavia, i rifiuti in generale presentano alcune differenze sostanziali. La presenza di una fase liquida e gassosa nei pori del rifiuto rende ancora più complessa la struttura e il comportamento d’insieme dell’ammasso di rifiuti. In generale, si può rilevare che il rifiuto non è allo stato saturo e che la fase gassosa comprende sia l’aria rimasta intrappolata nei vuoti in fase di accumulo, sia i gas che si generano a seguito della decomposizione dei materiali biodegradabili.

La densità media del rifiuto nel cumulo assume un ruolo rilevante, dato che vari Autori hanno evidenziato una correlazione con la resistenza al taglio del materiale (e.g., Cowland *et al.*, 1993). La definizione a partire dalla compattazione iniziale risulta difficilmente valutabile a priori, soprattutto in presenza di materiali deformabili o biodegradabili. I carichi di tipo permanente, quali quelli dovuti all’abbancamento sovrastante, anche se di modesta entità possono determinare un sensibile aumento della densità con la profondità di seppellimento del materiale (Cancelli & Cossu, 1984).

Il tempo relativo alla permanenza del rifiuto nel cumulo rappresenta un altro fattore significativo, sia nei confronti del comportamento meccanico al momento dell'analisi, sia della variazione successiva dei parametri geotecnici. Da esso dipenderanno le deformazioni viscosi dei materiali plastici e le trasformazioni della sostanza organica biodegradabile. Il suo ruolo può assumere, tuttavia, rilevanza molto diversa in relazione al tipo di rifiuti e al loro assortimento compositivo.

Nella valutazione del modello geotecnico di riferimento, l'assenza di materiali biodegradabili consente di introdurre delle ipotesi semplificatrici.

La resistenza al taglio nell'ambito del cumulo dipende essenzialmente dalle tensioni effettive che si determinano al contatto tra gli elementi di materiali inerti stabili. Si può anche ritenere che questa resistenza sia di tipo attritivo ed esprimibile tramite un angolo di attrito interno, ϕ' , analogamente a quanto si fa ordinariamente per i terreni granulari (Grisolia *et al.*, 1995a). Sotto l'azione di carichi esterni, con il tempo e a seguito del procedere dei fenomeni di assestamento degli elementi deformabili, le tensioni efficaci tra materiali inerti tendono ad aumentare, e con esse la resistenza al taglio. Tali processi sono complessi, ma in ogni caso comportano variazioni di volume associate ad un incremento della densità e, di conseguenza, della resistenza al taglio d'insieme dei rifiuti.

Per quanto riguarda il contributo di resistenza al taglio in termini di coesione si può rilevare che questo è fornito interamente dai materiali di forma bidimensionale contenuti nei rifiuti, in funzione della posizione che assumono all'interno dell'ammasso. Affinché questi materiali possano esplicare la loro azione, giungendo a costituire degli “elementi di rinforzo”, è richiesto lo sviluppo di deformazioni elevate, in genere superiori a quelle accettabili in campo applicativo. In accordo a Grisolia *et al.* (1995a), pertanto, operando a favore della sicurezza si è ritenuto opportuno ignorare il contributo della coesione nelle verifiche di stabilità. L'assenza di materiali facilmente degradabili tra i materiali conferiti all'impianto implica una serie di aspetti positivi tra i quali i principali comprendono l'assenza di fenomeni di decomposizione biologica, la mancata produzione di biogas, le riduzioni di volume molto minori, la mancata formazione dei prodotti di mineralizzazione della sostanza organica. Nel complesso le deformazioni di insieme del corpo dei rifiuti risultano molto più limitate e contraddistinte da uno sviluppo relativamente rapido. Il ruolo e gli effetti del fattore tempo, di conseguenza, assumono un'incidenza molto minore se non trascurabile rispetto agli ordinari RSU.

L'applicazione del modello logico formulato dagli Autori sul comportamento dei RSU, tarato sull'effettiva composizione merceologica di interesse per l'impianto in studio, consente di definire i principali elementi necessari alla caratterizzazione del comportamento geotecnico del cumulo di rifiuti:

- i materiali conferiti a “La Filippa” sono relativi esclusivamente alle classi degli inerti stabili e dei materiali deformabili;
- nell'ambito degli inerti la parte preponderante (non meno del 70% sul totale) è costituita da materiali solidi, granulari poco o niente deformabili nel regime di carichi di interesse;
- lo “scheletro” dell'accumulo è rappresentato da materiali granulari grossolani, naturali o artificiali, con granulometria compresa tra le sabbie e i ciottoli, che nell'insieme rappresentano dal 50 al 70% (in funzione degli anni) dei rifiuti conferiti;
- per tali materiali è lecito assumere un comportamento di tipo granulare, con resistenza al taglio controllata dai fenomeni di tipo attritivo, e valori medi in relazione alla granulometria d'insieme;
- l'ammasso di rifiuti si trova in condizioni drenate, date le caratteristiche composizionali e idrauliche dei rifiuti, e il controllo/allontanamento continuo del percolato;

- la metodologia di abbancamento consente una buona compattazione dei materiali, riscontrabile anche in termini di comportamento dell’ammasso, che si esplica sin dalla stesa degli strati di posa;
- natura e granulometria dei materiali consentono un rapido sviluppo dei cedimenti che, come previsto dalla teoria e verificato sperimentalmente, si attuano in gran parte con modalità immediata;
- la rapida riduzione di volume iniziale, insieme all’assenza di materiali biodegradabili, comporta un modesto incremento dei cedimenti nel tempo, come verificato direttamente nell’impianto in coltivazione e, di conseguenza, un trascurabile sviluppo dei cedimenti secondari.

Il *database* sperimentale acquisito sui materiali conferiti, inquadrato nel modello interpretativo del comportamento dei rifiuti, esaminati criticamente alla luce della letteratura scientifica, consente una caratterizzazione geotecnica. I parametri geotecnici presentati nella Tabella 15 sono stati ottenuti sulla base delle prove in sito e di laboratorio condotte nella discarica, dell’esame delle trasformazioni subite dai materiali conferiti e del monitoraggio dell’impianto.

Questi dati sono stati utilizzati per il dimensionamento geotecnico, allo scopo di testare la “sensitività” del modello di calcolo; tuttavia, le verifiche di stabilità relative all’impianto sono state condotte adottando un ampio campo di variabilità attorno al valore rappresentativo.

Peso di volume naturale	$\gamma_{rif} = 13 \text{ kN/m}^3$
Angolo di attrito	$\varphi' = 34^\circ$
Coesione	$c' = 0 \text{ kPa}$

Tabella 15 : Parametri geotecnici rappresentativi del cumulo dei rifiuti per l’impianto “La Filippa”.

5.3.4.1. Verifiche di stabilità

L’esame della realizzabilità di un’opera comporta il rispetto di alcuni requisiti generali di progetto, tra i quali assumono particolare rilevanza l’accertamento di prefissati margini di sicurezza nei confronti di possibili meccanismi di collasso (requisito di sicurezza) e la compatibilità delle deformazioni dell’opera con la funzionalità della stessa (requisito di funzionalità) (Lancellotta, 2004).

Le NTC (Cap. 6.11.1.4) prescrivono inoltre che *“nelle verifiche che interessano il corpo della discarica, si devono attribuire ai materiali di rifiuto parametri che tengono conto della composizione del rifiuto medesimo e dei metodi di pretrattamento e costipamento adottati nonché dei risultati di specifiche prove in sito o di laboratorio”*.

A tale scopo, sono state condotte analisi per la verifica della capacità portante e dei cedimenti a livello del piano di imposta della discarica (Timoshenko & Goodier, 1951), per la verifica per scorrimento sul piano di posa e di stabilità globale dell’insieme terreno-fondazioni e del sistema terreno-discarica. Le indagini, condotte sulle sezioni di progetto maggiormente significative per la verifica delle eventuali criticità, sono state sviluppate dall’Ing. Paola Bosco sulla base dei modelli proposti in letteratura (Terzaghi, 1943; Brinch Hansen, 1970; Vesic, 1975).

Nello specifico sono stati presi in considerazione i settori in cui il completamento dell’impianto assume dimensioni maggiori, le zone critiche per l’esame dello stato del volume di sottosuolo significativo, i dislivelli topografici maggiori, le massime altezze di accumulo dei rifiuti, la fascia di connessione con la parte di impianto attualmente in coltivazione.

I modelli di calcolo utilizzati per le verifiche sono fortemente cautelativi, in quanto, operando a favore della sicurezza, si assumono una serie di condizioni estreme al contorno o comunque più severe rispetto a quanto desumibile dal modello geologico e geotecnico di riferimento (Eurocodice 7, 2005; Eurocode 7, 2006; Eurocode 8).

In accordo alle prescrizioni della normativa vigente, le verifiche sono state condotte con riferimento ai 3 stati fondamentali per lo stato dell'impianto: *ante-operam* (configurazione area di imposta precedente alla realizzazione), *inter-operam* (con la discarica in fase di esercizio) e *post-operam* (con raggiungimento della volumetria di progetto, chiusura e sistemazione finale del manto di copertura).

Le verifiche sono state condotte ipotizzando la concomitanza di condizioni negative, quali:

- il verificarsi di eventi di precipitazione rilevanti per intensità e durata;
- la formazione di percolato con possibile accumulo con battenti sino a circa 5 m, dovuti a condizioni naturali (piogge prolungate) e tecniche eccezionali (guasti);
- condizioni di sollecitazione statica e dinamica, con terremoto di progetto definito secondo il quadro sismotettonico e la Normativa.

Rispetto a quanto specificato relativamente ai parametri propri delle unità geotecniche, nell'elaborazione delle verifiche di stabilità si è fatto ricorso a valori adeguatamente ridotti, per tenere in debita considerazione sia gli effetti di ammasso (discontinuità, alternanze a diversa composizione e consistenza, anisotropia parametri fisici e meccanici), che i possibili effetti di decadimento delle proprietà.

I parametri geotecnici del sistema di impermeabilizzazione di fondo e del *capping* sono stati definiti sulla base di un'accurata revisione della bibliografia sul tema e delle indicazioni fornite dai produttori dei geocompositi.

Per le verifiche condotte con l'impianto in esercizio o completato, nonostante la costante presenza del substrato rigido (terreno di Categoria A) al di sotto dell'impianto, cautelativamente è stata adottata per il complesso terreno – impianto la Categoria sismica C, identificata sulla base della letteratura scientifica (Manassero *et al.*, 1997; 1998; 2000; Qian *et al.*, 2002; Kavazanjian *et al.*, 1996; Kavazanjian, 1999; Matasovic & Kavazanjian, 2006; Maugeri *et al.*, 2005) per i RSU, con $V_{s,30}$ compresa tra 200 e 400 m/s.

Tutte le analisi condotte soddisfano le condizioni di stabilità del versante ($F_s \geq 1,1$), anche assumendo valori geotecnici sensibilmente inferiori a quelli definiti sulla base delle indagini geognostiche e geofisiche e delle prove di laboratorio.

5.3.4.2. Cedimenti del cumulo dei rifiuti

Lo studio dei cedimenti del corpo dei rifiuti riveste un'importanza fondamentale per la stabilità e la durabilità, sia dei sistemi di barriera idraulica, sia di quelli di drenaggio e smaltimento delle acque superficiali. Eccessivi cedimenti possono indurre, infatti, nei sistemi di copertura sollecitazioni di trazione più elevate della resistenza del materiale, con conseguente rottura e perdita di tenuta idraulica.

Nel caso dell'impianto “La Filippa” si rileva che le interazioni tra i costituenti solidi all'interno dell'abbancamento si esplicano in condizioni drenate. Il deposito di materiali prevalentemente granulari con valori di umidità molto ridotti, la loro deposizione in strati estesi su ampie superfici, unitamente al monitoraggio continuo e alla rapida estrazione del percolato quando necessario, impediscono la saturazione dell'accumulo. L'insieme di queste condizioni comporta una rapida riduzione di volume durante la fase di posa e compattazione dello strato, con uno sviluppo dei cedimenti pressoché immediato per la maggior parte.

L'assenza nella letteratura geotecnica di approcci teorici per la valutazione dei cedimenti attesi nei materiali con le composizioni di specifico interesse rende necessario, per la previsione del comportamento dell'abbancamento previsto nella “Filippa”, l'adozione dei modelli di calcolo elaborati per gli ammassi di RSU (si vedano ad es., Sowers, 1973; Grisolia *et al.*, 1995a; Grisolia & Luciani, 1995; Favaretti & Maestrini, 1998). L'applicazione di questi modelli ha comportato, comunque, una loro taratura sperimentale attraverso il *database* disponibile per i rifiuti in esame che, oltre a verificarne la rappresentatività, ha consentito l'introduzione di ipotesi semplificatrici in relazione alle effettive tipologie composizionali di interesse.

I materiali conferiti all'impianto “La Filippa” possiedono infatti proprietà fisico-chimiche sostanzialmente migliori rispetto agli RSU; occorre tuttavia ricordare che il comportamento del cumulo di rifiuti è sempre riferibile ad un insieme di elementi indipendenti di diversa natura e proprietà, disposti in modo tale da delimitare dei vuoti, più o meno ampi e continui, eventualmente riempiti almeno in parte di liquidi.

I meccanismi che regolano lo sviluppo dei cedimenti risultano, pertanto, molteplici e complessi da schematizzare a causa dell'estrema eterogeneità dei materiali, della deformabilità propria di parte delle particelle, dell'eventuale degradazione che subiscono nel tempo e dell'elevata presenza iniziale di vuoti al momento dell'abbancamento.

La riduzione di volume subita dai rifiuti in abbancamento si esplica, come verificato sia per mezzo di esperienze di laboratorio (Grisolia *et al.*, 1993, 1995a) che mediante il monitoraggio degli ammassi in discarica (Wall & Zeiss, 1995; Spikula, 1997; Dodt *et al.*, 1987; Edil *et al.*, 1990), attraverso una serie articolata di processi di deformazione, assestamento e decomposizione. La loro azione si svolge per lo più in modo contemporaneo ma, per semplicità di analisi, gli effetti sono considerati separatamente. Le velocità di sviluppo, e di conseguenza i cedimenti, assumono valori fortemente variabili (dai cm/min ai mm/anno) e la loro evoluzione completa può richiedere periodi dell'ordine dei decenni dopo la fine dell'abbancamento.

L'andamento ideale dei cedimenti nel tempo, ottenuto da Grisolia *et al.* (1995a) sulla base di prove sperimentali su RSU, è illustrato nella Figura 25, che consente di schematizzare la seguente evoluzione:

- **Fase 1** – rapida deformazione iniziale, con elevata riduzione della macroporosità a seguito della traslazione degli inerti stabili e dell'assestamento dei materiali molto deformabili;
- **Fase 2** – assestamento degli elementi molto deformabili;
- **Fase 3** – deformazioni lente (*creep*) e inizio della decomposizione della sostanza organica;
- **Fase 4** – completamento della decomposizione della sostanza organica;
- **Fase 5** – deformazioni residue.

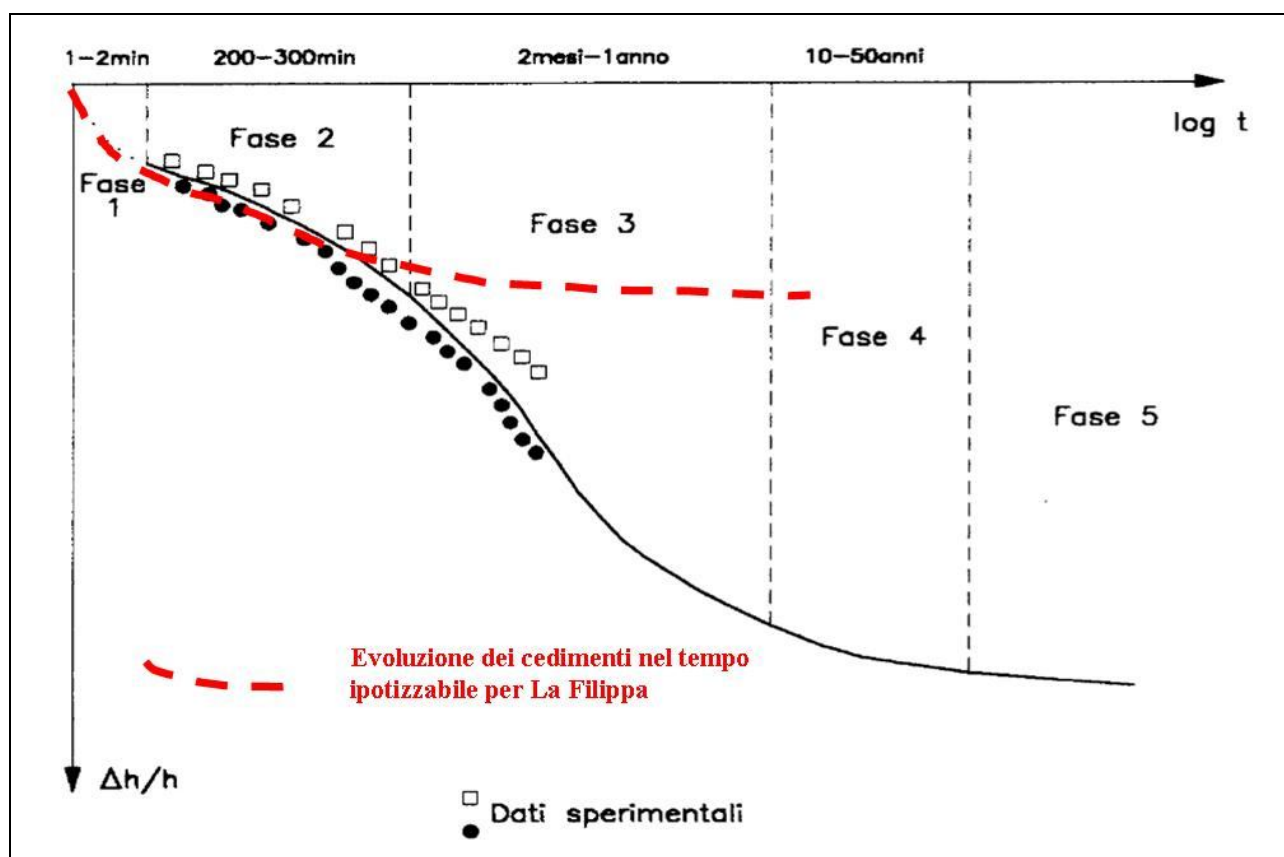


Figura 25 : Schema ideale dell'andamento della consolidazione nel tempo ottenuto tramite prove sperimentali su RSU (modificata da Grisolia et al., 1995a). Per l'impianto “La Filippa”, in relazione alla tipologia dei rifiuti conferiti, risulta rappresentativo solo il tratto iniziale del grafico (Fase 1 e Fase 2). Nella Fase successiva (3) la riduzione di volume risulta molto limitata e tende ad esaurirsi più velocemente rispetto ad una discarica di RSU. L'andamento ipotizzabile per i cedimenti, sulla base delle caratteristiche dei materiali e dei processi che ne improntano il comportamento, è indicato con la linea tratteggiata in colore.

Al momento della deposizione in strati i rifiuti in generale sono caratterizzati da un elevato volume di vuoti, con i singoli elementi in contatto solo su pochi punti. L'azione di compattazione tramite mezzo meccanico (Fase 1) comporta un immediato avvicinamento dei componenti e una rapida riduzione di volume. I materiali inerti stabili tendono a traslare nell'ambito del cumulo sino a raggiungere in breve una configurazione pressoché definitiva. Gli elementi deformabili, invece, per la notevole compressibilità subiscono una riduzione di volume. Al crescere del carico applicato (Fasi 2 e 3), come nel caso della progressiva crescita dell'abbancamento, i materiali deformabili producono la maggior parte della riduzione di volume. Gli inerti stabili, al contrario, possono solo subire limitati aggiustamenti nella posizione reciproca, mentre le sollecitazioni sono influenti rispetto a variazioni di volume della stessa fase solida. La presenza della sostanza organica e di un'elevata frazione deformabile, come si verifica tipicamente negli RSU, impedisce il contatto completo tra gli elementi inerti stabili. Con il passare del tempo (Fase 4), tuttavia, l'inizio della trasformazione della sostanza organica e lo sviluppo di deformazioni lente tipo *creep* sotto carichi applicati costanti determina il procedere dei cedimenti per lunghi periodi e con valori complessivi elevati.

Applicando questo modello interpretativo all'impianto “La Filippa”, dove i materiali deformabili assumono un ruolo subordinato (dal 10 al 30% del totale in peso) e i rifiuti biodegradabili sono totalmente assenti, è immediato rilevare che le Fasi 1 e 2 comportano il riassetto in condizioni drenate della frazione inerte e l'assestamento di quella deformabile. La ridotta incidenza di quest'ultima, insieme all'assenza della

componente biodegradabile, consente un rapido sviluppo dei cedimenti, con l’assestamento dei singoli componenti già nella posizione pressoché definitiva. La Fase 3 comprende gli assestamenti connessi fondamentalmente alla riduzione di volume della componente deformabile. I cedimenti, benché ancora presenti, assumono una rilevanza minima alla scala dell’accumulo, come confermato sperimentalmente dai rilievi topografici eseguiti periodicamente, che rilevano abbassamenti dei piani sommitali dell’ordine di pochi centimetri all’anno. L’evoluzione successiva (corrispondente alle Fasi 4 e 5) comporta solo cedimenti residuali di limitata entità complessiva e più ridotto sviluppo temporale rispetto allo schema generale modellato per i RSU.

Ai fini di una valutazione quantitativa dei cedimenti, il modello concettuale dello sviluppo della consolidazione può essere schematizzato, sulla base del monitoraggio di casi reali, in tre componenti principali (Wall & Zeiss, 1995):

$$S_{\text{tot}} = S_i + S_p + S_s$$

dove:	S_{tot}	=	cedimento totale
	S_i	=	cedimento iniziale
	S_p	=	cedimento primario
	S_s	=	cedimento secondario

La prima componente, S_i , che si sviluppa immediatamente a seguito di una sollecitazione, corrisponde alla cosiddetta compressione iniziale, associata alla riduzione dei vuoti pressoché istantanea che si determina con l’applicazione di un carico esterno. S_i per questo motivo non è valutabile dai rilievi dei cedimenti ottenuti con il monitoraggio di discariche reali. La componente di cedimento iniziale è analoga alla compressione elastica delle terre naturali e per il suo calcolo si impiegano le procedure basate sulla teoria dell’elasticità utilizzate per la stima dei cedimenti immediati delle fondazioni. Per la stima della seconda e terza componente del cedimento totale (S_p e S_s) sono stati proposti dagli Autori diversi modelli derivati, in forma più o meno complessa, dall’applicazione dei principi della meccanica delle terre ai rifiuti.

Per quanto l’impostazione dei modelli sia tarata sulle osservazioni condotte su casi reali, l’eterogeneità composizionale e reologica dei rifiuti, insieme alla variabilità delle condizioni ambientali al contorno, introduce nelle valutazioni ampi margini di indeterminazione. Nel caso de “La Filippa”, tuttavia, questi aspetti assumono rilevanza minore, grazie alla tipologia composizionale caratterizzata da un assortimento molto più ridotto rispetto agli RSU e dall’assenza dei materiali biodegradabili.

L’applicazione del modello di calcolo e la conseguente stima delle diverse componenti dei cedimenti è stata condotta dall’Ing. Bosco nell’ambito delle indagini per il progetto di completamento della discarica; nei calcoli, di seguito riassunti, si sono adottate modalità cautelative per tener conto dell’eventuale variabilità del comportamento dei materiali e delle condizioni al contorno.

Modello di calcolo

Cedimento immediato

Procedura basata sulla teoria dell’elasticità, con definizione del modulo di elasticità E_s del rifiuto a partire dalle prove di carico su piastra.

$$S_i = (\Delta q * H_0) / E_s$$

dove:	Δq	= incremento di carico (espresso in kPa),
	H_0	= altezza iniziale dello strato di rifiuti (in m);
	E_s	= modulo di elasticità (in kPa)

Es può essere stimato, in prima approssimazione, sulla base delle correlazioni empiriche proposte in letteratura (Wall & Zeiss, 1995), oppure valutato sulla base di prove di carico in sito condotte in condizioni rappresentative dell'effettivo comportamento del rifiuto:

$$Es = Md * Cd * Cz * (1 - v^2)$$

- Md = Modulo elastico (kPa) ottenuto da prove di carico su piastra;
 Cd = fattore che tiene conto della forma della piastra (nel caso in esame circolare);
 Cz = fattore che tiene conto della profondità a cui è stata effettuata la prova
 (nel caso in esame $z = 0$ perché le prove sono state fatte dal piano campagna);
 v = coefficiente di Poisson (assunto pari a 0,3)

Utilizzando i dati ottenuti con le prove di carico sui rifiuti (Tabella 14), con l'applicazione delle relative condizioni al contorno sperimentali si definiscono per Es i valori indicati in Tabella 16. In relazione alle condizioni operative di Es, necessario per la valutazione del cedimento immediato nella prima fase di abbancamento dei materiali, il modulo elastico è stato definito sulla base della prova n. 3, condotta sui rifiuti conferiti da pochi giorni, non ancora compattati (e quindi non soggetti ai cedimenti immediati), e comprendenti in proporzioni rilevanti materiali deformabili. Il valore di Es ottenuto, arrotondato nei calcoli seguenti a 3.000 kPa, può essere considerato, pertanto, effettivamente rappresentativo del comportamento dei materiali non ancora compattati e adeguatamente cautelativo.

Prova di carico su piastra	Intervallo di carico considerato per il calcolo di Md (kN/m ²)	Md (kPa)	Es (kPa)
n. 1	100 ÷ 200	24.900	17.900
n. 2	100 ÷ 200	9.600	6.900
n. 3	100 ÷ 200	4.300	3.100

Tabella 16 : Valori del modulo elastico Es dei rifiuti ottenuti sulla base delle prove di carico di piastra condotte a “La Filippa”. Per la definizione del dato operativo di Es si è fatto riferimento, operando in modo cautelativo, alla prova n. 3 e adottando nei calcoli seguenti un valore pari a 3.000 kPa.

Considerando la disposizione dei materiali in strati con spessore medio di 0,5 m, l'applicazione di un primo carico di compattazione di 200 kPa e un modulo Es caratteristico dei rifiuti pari a 3.000 kPa si ottengono i cedimenti:

- per un singolo strato (spessore = 0,5 m) $S_i = 0,033$ m
- per l'insieme di strati componenti il cumulo finale (totale = 30 m) $S_i = 2,0$ m

Come ben noto dallo studio sulle fondazioni, nonché dalle esperienze di laboratorio e in discarica sui rifiuti, i cedimenti immediati si sviluppano in pratica contemporaneamente all'applicazione del carico, e per le condizioni in esame si esauriscono nei primi minuti – decine minuti dalla sua azione. Lo stesso monitoraggio condotto nelle discariche reali non consente di rilevare i cedimenti immediati, proprio perché già esauriti.

In termini pratici, il cedimento immediato conseguente alla prima compattazione di ogni strato di rifiuti viene subito occupato dall'accumulo successivo. Alla fine dell'abbancamento la riduzione totale di volume connessa a questa componente della compattazione è esaurita, e già occupata da altri materiali, per cui il valore ottenuto, per quanto elevato, non interferisce più con l'evoluzione successiva della discarica.

Cedimento primario

Le altre componenti della riduzione di volume possono essere ottenute facendo riferimento alla meccanica dei terreni, applicando due procedure separate per la valutazione del cedimento primario e di quello secondario. Su questo approccio si basa, in particolare, il modello proposto da Sowers (1973). La compressione primaria è legata principalmente all'espulsione dell'acqua e dei gas presenti inizialmente nel corpo dei rifiuti. Nella sua trattazione si impiegano solitamente le ipotesi assunte da Terzaghi nello studio della consolidazione monodimensionale delle terre coesive sature, sebbene i rifiuti possano presentare caratteristiche anche sostanzialmente diverse (Favaretti & Maestrini, 1998). La durata dei cedimenti connessi alla compressione primaria può risultare molto variabile in funzione delle proprietà del cumulo dei rifiuti. Operando in condizioni drenate, tuttavia, è stato documentato sperimentalmente anche nel caso dei RSU che il cedimento primario si sviluppa rapidamente, di solito entro il primo mese dall'applicazione del sovraccarico (Morris & Woods, 1990; Pasqualini *et al.*, 2003; Sharma & Lewis, 1994). Con riferimento alla tipologia dei materiali conferiti, tale ipotesi può essere ritenuta valida per “La Filippa”.

Sowers (1973) per il calcolo del cedimento primario ha proposto l'espressione:

$$s_p = H_i \cdot \frac{c_c}{1 + e_0} \cdot \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0}$$

dove:

- H_i = altezza dello strato di rifiuti dopo la compressione iniziale;
- e_0 = indice dei vuoti dopo la compressione iniziale;
- c_c = indice di compressione primaria;
- p_0 = pressione esistente a metà dello strato di rifiuti;
- Δp = incremento di pressione a metà dello strato di rifiuti.

Questi parametri, nel caso della Filippa, assumono i valori:

- H_i = corrisponde all'altezza di lavorazione di ogni livello di abbancamento (2 m) meno la riduzione connessa allo sviluppo del cedimento immediato;
- e_0 = indice dei vuoti dopo la compressione iniziale, valutato per l'intero ammasso di rifiuti nelle condizioni successive allo sviluppo dei cedimenti immediati = 1, sulla base dei rilievi condotti in sito;
- c_c = $0,15 \cdot e_0$ (per rifiuti a basso contenuto in sostanza organica; da Sowers, 1973);
- p_0 = 13 kPa, in base al peso di volume medio dei rifiuti;
- Δp = 26 kPa, pari al carico esercitato dal successivo strato di rifiuti con spessore = 2 m.

L'applicazione della formula, tenendo conto del progressivo incremento di carico determinato dall'accrescimento del cumulo di rifiuti sino alla quota finale di progetto, fornisce per il cedimento dovuto alla consolidazione primaria un valore di S_p nell'ordine di 0,9 m. Anche in questo caso va ricordato che le caratteristiche dei rifiuti e le modalità di coltivazione della discarica consentono uno sviluppo rapido del processo di consolidazione primario e, d'altra parte, la vita d'esercizio dell'impianto è nell'ordine della decina di anni. Al termine della fase di accumulo, pertanto, anche l'aliquota di cedimento primario risulta totalmente, o in parte preponderante, esaurita.

Cedimento secondario

Il cedimento secondario è invece riferibile al comportamento viscoso dello scheletro solido del rifiuto ed alla biodegradazione della sostanza organica. Applicando ancora il modello di Sowers (1973), questa componente del cedimento può essere calcolato con l'espressione:

$$s_s = H_p \cdot \frac{c_\alpha}{1 + e_p} \cdot \log \frac{t}{t_p}$$

dove:

- H_p = altezza dello strato di rifiuti dopo la compressione primaria;
- e_p = indice dei vuoti dopo la compressione primaria;
- c_α = indice di compressione secondaria;
- t = tempo dopo il quale si vuole calcolare il cedimento;
- t_p = durata della fase di compressione primaria.

Nel caso della Filippa, considerando un'altezza totale del cumulo dei rifiuti pari a 30 m, questi parametri assumono i valori:

- H_p = corrispondente all'altezza totale del cumulo = 30 m; dato che i cedimenti immediati e primari di ogni strato sono stati colmati dall'accumulo sovrastante;
- e_p = indice dei vuoti dopo la compressione primaria, valutato per l'intero ammasso di rifiuti nelle condizioni successive allo sviluppo dei cedimenti primari = 0,6, sulla base dei rilievi condotti in sito;
- c_α = $0,02 * e_p$ (in relazione all'assenza di sostanza organica; da Sowers, 1973);
- t = assunto rispettivamente pari a 1, 10 e 30 anni dalla chiusura dell'impianto per una valutazione dell'andamento temporale del cedimento secondario;
- t_p = durata fase compressione primaria assunta pari a 30 giorni (da Morris & Woods, 1990).

Con questi parametri il cedimento secondario relativo all'intero accumulo, riferito a vari intervalli di tempo decorrenti dalla chiusura dell'impianto, assume i valori seguenti (Tabella 17):

	1 anno	10 anni	30 anni
Cedimento complessivo (m)	0,24	0,47	0,57
$\Delta h / h$ (%)	0,81	1,56	1,92

Tabella 17 : Cedimenti secondari attesi per l'impianto “La Filippa”; i valori sono stati calcolati applicando il modello proposto da Sowers (1973).

Questi valori, tenendo conto delle possibili cause di approssimazione, devono essere considerati quali ordini di grandezza. Il loro calcolo è stato svolto in modo cautelativo, in quanto riferito alla fine dell'abbancamento; in realtà per ogni strato la consolidazione secondaria prende avvio contemporaneamente a quella primaria. Al termine della coltivazione della discarica, ovvero dopo circa 10 anni è presumibile, quindi, che un'aliquota significativa del cedimento secondario si sia già esplicata.

Pur assumendo, trascorsi 30 anni dalla chiusura dell'impianto, lo sviluppo per intero di un cedimento secondario di 0,6 m in corrispondenza della zona di massima altezza dei rifiuti, le modeste variazioni indotte

nella geometria dell'accumulo non determinano condizioni di instabilità, né inficiano la perfetta funzionalità delle opere di completamento dell'impianto (*capping*, drenaggi, sistemazione ambientale, ecc.).

Un'ulteriore conferma della ridotta entità dei cedimenti attesi per “La Filippa” viene fornita dal confronto tra i dati attesi per l'impianto in esame e quelli disponibili in letteratura; in mancanza di dati di riferimento su materiali analoghi, il confronto è stato basato sui dati relativi a RSU. La Figura 26 presenta l'andamento nel tempo dei cedimenti, calcolati come $\Delta h / h$, cioè come rapporto tra cedimento rilevato e altezza complessiva dei rifiuti. La normalizzazione dei dati in base dell'altezza complessiva dei rifiuti consente il confronto immediato tra varie tipologie di discariche e materiali, dal momento che il cedimento risulta in tal modo funzione dell'indice dei vuoti, dell'indice di compressione secondaria e della durata della compressione primaria. Sono rappresentati i dati di Grisolia *et al.* (1992), riferiti a prove di compressione effettuate in laboratorio su campioni di RSU saturi e non saturi, e il *range* di cedimenti stimato da Edgers *et al.* (1992). Dal grafico è immediato rilevare come i cedimenti attesi per “La Filippa” sono decisamente limitati e raggiungono al massimo valori del 2% rispetto all'altezza complessiva del cumulo dopo 30 anni dall'abbancamento.

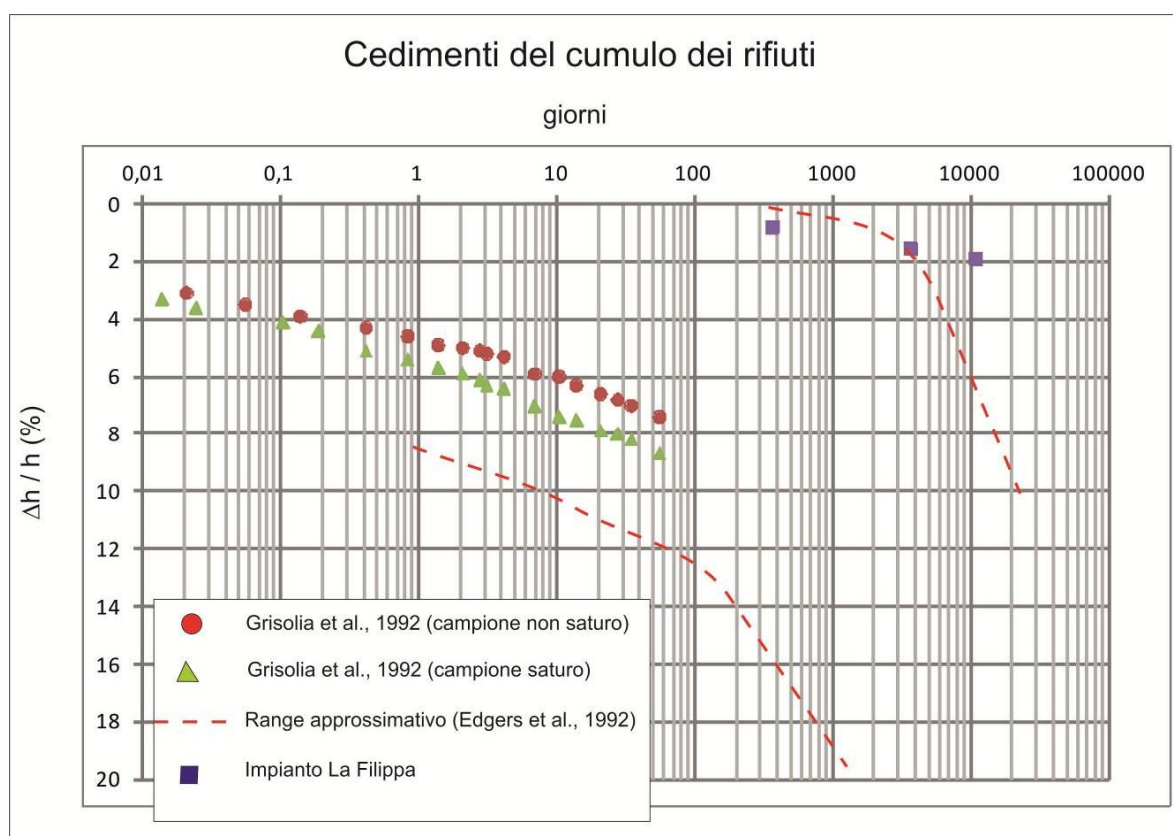


Figura 26 : Evoluzione dei cedimenti del cumulo dei rifiuti nel tempo; il confronto tra i dati attesi per l'impianto “La Filippa” e quelli disponibili in letteratura mostra la ridotta entità dei cedimenti per l'impianto in esame.

In definitiva, l'impiego delle procedure di calcolo dei cedimenti nelle discariche di RSU – per le quali è disponibile una casistica sperimentale sufficientemente attendibile – applicate alle condizioni al contorno che improntano l'impianto “La Filippa”, ha consentito una valutazione delle diverse componenti del cedimento del cumulo di rifiuti.

In corrispondenza dell'altezza massima dell'accumulo (30 m) si ottengono dati complessivi di 2,0 m per il cedimento immediato, 0,9 m per il cedimento primario e di 0,6 m per quello secondario, quest'ultimo

calcolato facendo riferimento a 30 anni dalla chiusura dell’impianto. Tali valori devono comunque essere considerati quali ordini di grandezza, per le possibili cause di variabilità nelle assunzioni di calcolo. Ai fini operativi, tuttavia, con riferimento alla tipologia dei materiali attualmente conferiti, è da ritenersi che nell’arco della vita di esercizio dell’impianto, si esauriscano completamente le componenti relative al cedimento immediato e a quello primario, come documentato da vari Autori sulla base del monitoraggio di discariche reali. Lo stesso cedimento secondario che può esplicarsi su lunghi periodi, prende avvio contemporaneamente alla consolidazione primaria, per cui si può ragionevolmente assumere che alla chiusura dell’impianto risulti anch’esso in gran parte completato (come evidenziato dal calcolo precedente). Dopo la chiusura dell’impianto la riduzione di volume nei rifiuti è attribuibile, quindi, solo alla parte residua del cedimento secondario, valutabile nell’ordine di alcuni decimetri. Tale valore rientra ampiamente nelle deformazioni attese per il cumulo dei rifiuti riportate nella casistica scientifica e, per la sua modesta entità, non comporta condizioni di instabilità, né può inficiare la completa funzionalità delle opere di completamento dell’impianto.

Il modello teorico appena presentato è sottoposto a verifica sperimentale diretta all’interno dell’impianto “La Filippa”; infatti, nella porzione di discarica già completata, sono stati materializzati 4 capisaldi per la valutazione delle variazioni plano-altimetriche nel tempo (Tabella 18; per l’ubicazione degli strumenti si rimanda all’Allegato 1). I rilievi, svolti periodicamente, consentono di valutare gli spostamenti nelle tre dimensioni spaziali e di verificare la rispondenza dei dati reali al modello ipotizzato.

Caposaldo	Asse spaziale	Lettura iniziale 23/12/2011	Lettura di esercizio 04/03/2012	Spostamenti rispetto a lettura iniziale (m)
1 (piazzale)	x	1332,6769	1332,6712	-0,0057
	y	702,7542	702,7700	0,0158
	z	375,1027	375,0987	-0,0040
	a			177,9585 (°)
	d			0,0168
2 (roseto)	x	1250,9661	1250,9619	-0,0042
	y	707,6567	707,6693	0,0126
	z	375,1153	375,1112	-0,0041
	a			179,5167 (°)
	d			0,0133
3 (vasca prato)	x	1232,7056	1232,6976	-0,0080
	y	701,6201	701,6361	0,0160
	z	375,8744	375,8777	0,0033
	a			170,4833 (°)
	d			0,0179
4 (scarpata Rio Filippa)	x	1215,2751	1215,2757	0,0006
	y	691,2590	691,2727	0,0137
	z	375,2573	375,2534	-0,0039
	a			202,7863 (°)
	d			0,0137

Tabella 18 : Prospetto riassuntivo delle variazioni plano-altimetriche rilevate nel corpo della discarica. A: azimut della variazione; d: lunghezza della variazione

I dati sinora disponibili indicano, in accordo all’evoluzione degli abbancamenti verificata a livello puntuale, lo sviluppo di assestamenti molto limitati, nell’ordine di $1,5 \div 2$ centimetri in 3 mesi. Tali valori risultano molto prossimi ai limiti di rilevabilità della tecnica e permettono quindi di concludere che non vi sono evidenze di movimenti in atto.

I monitoraggi si collocano nell’arco temporale corrispondente alla Fase 3 di Figura 25 (mesi – anni). I rilievi proseguiranno nel tempo e, con il progressivo completamento dell’impianto, verrà ampliata la rete strumentale di monitoraggio.

5.4. Risultati

5.4.1. Evoluzione geologica dell’area

Tutti gli studi condotti presso l’impianto “La Filippa” si inseriscono in un progetto di analisi geositologica per la valutazione della compatibilità tra ambiente naturale e impianto industriale; le ricerche consentono inoltre di ricostruire alcuni degli eventi e dei processi che hanno condizionato l’evoluzione geologica dell’area in esame nel Quaternario.

In quest’ottica, risulta di particolare interesse il rinvenimento, al di sotto di uno strato di sedimenti sciolti di circa $5 \div 9$ m, di un reticolo di solchi di erosione e paleovallecole, con andamento non corrispondente all’attuale reticolo idrico.

Alla base di uno dei depositi di versante di maggiore spessore (circa 7 m), sono stati ritrovati alcuni tronchi di notevoli dimensioni (lunghezza fino a 2 m, diametro fino a 40 cm circa; Figura 27) e in ottimo stato di conservazione, identificati come *Pinus silvestris* / *montana* (Laboratorio di Archeobotanica – Musei civici Como). L’ubicazione esatta del ritrovamento è segnalata nell’Allegato 1.



Figura 27 : Alcuni dei resti lignei rinvenuti nel corso delle attività di cava sul fondo di una paleovallecola.

Tali frammenti hanno consentito di delineare anche in misura semi-quantitativa l’evoluzione geologica e geomorfologica dell’area. Il deposito occupa il riempimento di un antico solco di incisione modellato nelle marne del substrato lungo il pendio degradante dalla dorsale di C. Speziere – C. Vallone. Al contrario della superficie topografica attuale, degradante dolcemente verso il fondovalle del Rio Filippa, il solco si presenta piuttosto acclive e incassato, caratteri potenzialmente favorevoli all’innescò di movimenti gravitativi o erosivi intensi. In realtà, una volta finito nell’incisione, il legno è stato rapidamente sepolto da depositi di

versante a granulometria fine che hanno portato anche al completo mascheramento della paleo-morfologia. Tale accumulo si è conservato in condizioni praticamente inalterate sino all’attuale ritrovamento.

Il buono stato di conservazione e l’assenza di deformazioni, oltre a confermare la stabilità complessiva del tratto di pendio e, nello specifico, dei depositi delle coperture, ha consentito di sottoporre a datazione radiometrica con il metodo del ^{14}C il resto vegetale. La datazione, effettuata dal Centro Universitario Datazioni Milano Bicocca (sigla camp. 233) con tecnica ^{14}C -AMS presso il LABEC dell’Università di Firenze ha fornito un’età convenzionale ^{14}C di 37.435 ± 821 anni, corrispondente ad una data calibrata ($\pm 2 \sigma$) di $41.615 \div 39.095$ a.C..

Il ritrovamento, oltre al notevole interesse scientifico intrinseco, fornisce una precisa indicazione della sostanziale stabilità del pendio e dei depositi delle coperture negli ultimi 40.000 anni: l’attivazione di movimenti in massa o fenomeni erosivi concentrati, infatti, avrebbe portato in breve tempo all’affioramento del resto ligneo e alla sua decomposizione, come pure all’asporto dei terreni incoerenti delle coperture, peraltro facilitato dalla loro granulometria fine.

Sono attualmente in corso indagini dendrocronologiche presso il laboratorio *Dendrodata* di Verona, che permetteranno di acquisire ulteriori informazioni per una definizione più dettagliata dell’evoluzione ambientale dell’area.

Una prospettiva di sicuro interesse riguarda la possibilità di correlare il ritrovamento dei resti lignei e del paleoreticolo fluviale con le deviazioni fluviali (Po, Tanaro, Dora Baltea) avvenute nel Pleistocene nell’area ligure e piemontese (Carraro 1976; Carraro *et al.*, 198; 1995; Capitani & Marrucci, 2008) e di inquadrarle nell’ottica dell’attività geodinamica quaternaria regionale (sviluppo della Collina di Torino, evoluzione dei settori delle Langhe e del Monferrato; Barbero *et al.*, 2007; Boano *et al.*, 2004; cfr. § 4.3.); obiettivo finale di tale analisi risulta la definizione di vincoli morfo-cronologici per l’evoluzione dell’intero bacino padano.

L’analisi geomorfologica di terreno e delle riprese aeree consente di sviluppare alcune prime valutazioni: la presenza, a livello della porzione collinare del reticolo minore, di alvei incassati in roccia testimonia come le aste idriche siano state interessate da una significativa tendenza all’incisione, in conseguenza dell’abbassamento del livello di base del corso d’acqua ricettore (F. Bormida e, a scala più ampia, intero bacino del F. Tanaro). Nei tratti di fondovalle, invece, la presenza di depositi incoerenti, seppur di spessore ed estensione modesta, evidenzia il raggiungimento di un equilibrio morfodinamico; le incisioni non tendono più ad approfondirsi in modo rilevante e gli alvei assumono anche andamenti tendenti al meandriforme.

La configurazione complessiva delineata fornisce precise indicazioni sullo stato evolutivo attuale del reticolo idrico locale:

- nei settori a maggiore acclività, quali la testata del Rio Filippa, la presenza di alvei incisi e solchi di erosione anche ben pronunciati sottolineano le buone caratteristiche dell’ammasso roccioso costituenti il substrato di tutto il bacino. In presenza di rocce con caratteristiche scadenti tali forme non si potrebbero conservare per il periodo di tempo necessario alla loro individuazione e sviluppo (per lo meno centinaia – migliaia di anni);
- l’attività erosiva nel Pleistocene è stata particolarmente intensa a causa del contesto climatico regionale, con il susseguirsi di vari periodi a clima freddo e arido; la presenza di un diffuso substrato impermeabile ha inoltre favorito il ruscellamento superficiale in luogo dell’infiltrazione, facilitando ulteriormente l’approfondimento del reticolo.
- la parte medio alta del bacino non è sede, oramai da tempo, di significativi processi di trasporto e deposito, comprese le colate detritiche. Questo aspetto, desumibile dall’assetto generale del reticolo secondario in un ampio settore circostante, è stato verificato direttamente nell’intorno dell’area di

interesse attraverso la posizione “fossilizzata” dei depositi di conoide, che costituiscono lembi residui in parte rimodellati, e dall’assenza sia in superficie che nel sottosuolo (sondaggi) di depositi torrentizi al di fuori dell’incisione vera e propria del Rio Filippa;

- la fase parossistica di sviluppo dei processi erosivi e la conseguente tendenza generale all’approfondimento del reticolo è terminata, o comunque si è fortemente ridotta, dato che un’ampia porzione dei fondovalle delle aste principali risulta oramai in equilibrio con il livello di base rappresentato dal corso del F. Bormida;
- il rinvenimento di resti vegetali fossili alla base dei depositi di versante documenta in modo diretto che da quella data il bacino del Rio Filippa non è stato più soggetto a fenomeni erosivi o dissestivi rilevanti.

La definizione dell’evoluzione del reticolo idrico risulta particolarmente utile nel contesto ligure – piemontese, in quanto quest’area, durante l’ultima glaciazione, non venne ricoperta dai ghiacci (cfr. Figura 5, § 4.3.): nella morfologia odierna è pertanto possibile osservare l’effetto dell’attività fluviale e di quella geodinamica, non obliterate dalle forme di erosione o deposizione glaciale.

5.4.2. Valutazione sitologica

Le ricerche condotte, commissionate da LPL, sono finalizzate primariamente alla valutazione sitologica dell’impianto “La Filippa”, in un’ottica di sviluppo industriale compatibile e di riqualificazione paesaggistica del territorio. Le indagini hanno coinvolto l’intero bacino del Rio Filippa ed hanno comportato la caratterizzazione, puntuale ed approfondita, dei numerosi fattori geologico-ambientali potenzialmente interagenti con l’attività dell’impianto. La definizione di un quadro conoscitivo migliorato, con dati sia qualitativamente che quantitativamente dettagliati, permette quindi di valutare la compatibilità dell’impianto con le dinamiche evolutive del territorio ospite.

Gli elementi acquisiti definiscono i processi morfogenetici come fenomeni prettamente puntuali, che lo stato di sviluppo ingegneristico e tecnologico consente di controllare con strumenti di gestione ordinari (quali la regimazione idraulica del Rio Filippa, la manutenzione del bosco e la costruzione di un bacino per il contenimento dei fenomeni di sovralluvionamento), sia nella fase attuale che nelle tendenze evolutive future. I valori sperimentali risultano del tutto coerenti con le precedenti campagne d’indagine; la compatibilità di dati ottenuti mediante differenti tecniche e metodologie analitiche confermano la bontà dell’approccio adottato. Nell’interpretazione complessiva degli elementi acquisiti è inoltre da tenere in considerazione che le indagini in campo comportano necessariamente un certo grado di variabilità, frutto dell’eterogeneità dell’ambiente fisico; proprio la possibilità di valutare le modeste variazioni dei parametri investigati rappresenta un ulteriore conferma del grado di dettaglio raggiunto.

I rilevamenti di superficie condotti, il piano d’indagine e il monitoraggio geognostico consentono di validare i modelli di riferimento e di ricostruire natura ed assetto delle unità litologiche costituenti il substrato sino a profondità significative, insieme agli altri fattori condizionanti il comportamento geotecnico e idrogeologico del volume di sottosuolo significativo.

La composizione del substrato locale, comprendente una sequenza praticamente mono-litologica di marne e marne siltoso-argillose, con un’incidenza assolutamente episodica e pressoché trascurabile dei livelli arenacei, riveste un ruolo fondamentale nell’improntare le caratteristiche fisico-meccaniche dell’ammasso

roccioso, sempre compatto e spesso con stratificazione quasi indistinta, e il suo comportamento nei confronti della circolazione idrica. La roccia, in relazione alla sua natura, possiede ottime caratteristiche di consistenza e resistenza al taglio, mentre compressibilità e deformabilità risultano sostanzialmente trascurabili nel regime di sollecitazione di interesse per l'intervento in progetto.

L'integrazione dei dati ottenuti con le indagini dirette e le prospezioni geofisiche consente di verificare l'uniformità litologica e la sostanziale omogeneità delle caratteristiche fisiche, giaciture, idrauliche e meccaniche dell'ammasso in posto. Al di sotto dell'orizzonte di alterazione della roccia, di spessore generalmente inferiore ai 3 metri, non sono state individuate discontinuità di origine tettonica (faglie) o gravitativa (superfici di scivolamento), né zone significative di fratturazione o degrado dell'ammasso roccioso con conseguente decadimento delle sue caratteristiche.

Per quanto riguarda la stabilità dei versanti, le frane superficiali di piccole dimensioni individuate al margine del bacino del Rio Filippa, peraltro in uno stato di quiescenza, anche in caso di rimobilizzazione non possono giungere ad interferire per posizione e localizzazione con l'areale dell'impianto.

L'individuazione di alcuni depositi di *debris flow* pre-olocenici nella porzione superiore dell'apparato di conoide del Rio Filippa ha fornito prova di come questa dinamica evolutiva sia propria del contesto in analisi. Dati di terreno, indagini di sottosuolo e modellizzazione idrologica (Politecnico di Milano, 2007) portano concordemente ad escludere la possibilità di innesco di colate detritiche con volumi rilevanti. Anche in caso di un loro verificarsi, tuttavia, l'impianto risulterebbe protetto dalle vasche di deposito realizzate nell'ambito degli interventi di regimazione del Rio Filippa, in grado di contenere sia i depositi torrentizi mobilizzati, sia eventuali ammassi detritici franati dai pendii sovrastanti.

Il funzionamento dell'impianto di discarica non determina un aumento nel regime delle portate di piena a valle dell'impianto stesso o la possibilità di contaminazione delle acque, in quanto non sussistono ostacoli al deflusso naturale né tantomeno esiste alcun collegamento tra i circuiti idrici ospitati nei depositi colluviali ed i sistemi di drenaggio dell'impianto.

Dal punto di vista idrogeologico, l'ammasso roccioso in posto afferente alla Formazione di Rocchetta-Monesiglio in condizioni integre è caratterizzato da una permeabilità al limite della rilevabilità sperimentale (coefficienti di permeabilità $k \cdot 10^{-8} \div 10^{-9}$ m/s), tanto da far classificare la roccia come praticamente impermeabile. Di conseguenza, l'infiltrazione e il movimento di acque sotterranee può avvenire soltanto in corrispondenza delle coperture e delle porzioni superficiali degradate del substrato. La circolazione idrica sotterranea, di tipo epidermico e generalmente effimera, può essere sensibilmente ridotta asportando le coperture stesse o predisponendo un adeguato sistema di drenaggio e convogliamento delle acque: questi accorgimenti permettono di diminuire sensibilmente se non di annullare la possibilità di infiltrazioni di acque sotterranee all'interno della vasca dei rifiuti. Anche la regimazione delle acque superficiali comporta la realizzazione di opere di modesta entità, poiché la superficie delle aree imbrifere scolanti da monte risulta limitata; tali opere risultano in parte già presenti nell'area in relazione alle precedenti attività di cava condotte.

Inoltre, il fondo della vasca di stoccaggio dei rifiuti poggia interamente sul substrato roccioso pressoché impermeabile e con elevata capacità portante, il che comporta notevoli vantaggi sia per la gestione delle acque meteoriche che si infiltrano nell'ammasso che per la stabilità complessiva.

Le condizioni di sostanziale stabilità del rilievo e del reticolo idrografico locale nei confronti dei processi mobilizzati dalla gravità e dalle acque di superficie incanalate, sono state testate direttamente a partire dall'estate del 2006, anche rispetto al verificarsi di condizioni meteo-ambientali di particolare severità. La rete strumentale permette di monitorare il versante superiore, l'alveo del Rio Filippa e la circolazione idrica

sotterranea e di superficie. Risultano particolarmente rilevanti le precipitazioni occorse nell'autunno 2011, che hanno provocato ingenti danni ed anche alcune vittime in varie località della Liguria e dell'Appennino toscano.

In tale occasione, le precipitazioni, per quantità totali, distribuzione temporale e concentrazione hanno costituito una significativa sollecitazione idrologica. Tuttavia, in corrispondenza dell'impianto “La Filippa” non si sono verificati particolari problemi nella gestione dei deflussi idrici; anche le verifiche effettuate sul terreno immediatamente dopo gli eventi e il monitoraggio della rete strumentale non hanno riscontrato l'insorgere di fenomeni di instabilità o evoluzione parossistica dei normali processi di scorrimento delle acque superficiali.

Gli studi e le indagini svolte, condotte allo stato dell'arte secondo le direttive della Normativa e delle prescrizioni tecnico-scientifiche, hanno consentito di verificare l'assenza di fattori penalizzanti di carattere geologico, geomorfologico, geotecnico, idrogeologico e sismico, pur in presenza di ipotesi fortemente cautelative. Infatti, tutte le simulazioni sono state condotte nel peggiore scenario ipotizzabile, vale a dire con una mobilitazione contemporanea di tutti i depositi, un livello piezometrico massimo, parametri geomeccanici peggiori rispetto a quelli riscontrati in realtà e in concomitanza di un evento sismico del massimo grado attendibile.

A seguito della chiusura dell'impianto (o di una parte dell'impianto) perché completata la fase di abbancamento, potranno essere svolte indagini per verificare caratteristiche e comportamento del cumulo (ad esempio indagini geognostiche o geofisiche) e verrà implementato un sistema di monitoraggio strumentale, che, in prima analisi, potrà essere costituito da piezometri, inclinometri e assestimetri.

Il quadro conoscitivo definito per l'area evidenzia, inoltre, numerosi aspetti del territorio fisico da considerarsi preferenziali per la localizzazione di un impianto di discarica controllata:

- il substrato è costituito da roccia compatta a composizione prevalentemente marnoso-argillosa e a permeabilità praticamente nulla, dello spessore di varie centinaia di metri;
- la zona di deposito dei materiali poggia, sul fondo e su tre lati, direttamente sulla roccia, che presenta caratteristiche geotecniche in grado di assicurare elevate capacità portanti e di evitare cedimenti o deformazioni significative;
- la ridotta sismicità dell'area, considerata tra le più basse a livello nazionale, come confermato anche nella nuova classificazione sismica;
- l'assenza nell'intorno significativo di fenomeni di instabilità connessi a frane, processi torrentizi o fenomeni di erosione accelerata in grado di interferire con l'impianto;
- la manutenzione idraulica degli alvei e la completa gestione delle acque di ruscellamento meteorico riduce i contributi di piena lungo l'alveo del Rio Filippa – Rio Ferrere e le acque potenzialmente convogliabili verso la vasca dei rifiuti;
- la presenza di bacini di raccolta del trasporto solido alla base del tratto iniziale del Rio Filippa intercetta completamente i sedimenti mobilizzabili a seguito di eventi di pioggia eccezionalmente intensi, che altrimenti andrebbero ad intasare l'alveo del Rio Ferrere.

6. Area urbana di Como

6.1. Tipo di impianto e contesto ambientale

L'area in cui si sviluppa la città di Como presenta caratteri geologici ed ambientali molto peculiari: la posizione topografica e le dinamiche evolutive locali hanno fatto sì che il bacino su cui sorge la città, che durante il Tardoglaciale costituiva un bacino lacustre proglaciale, venisse progressivamente colmato da varie tipologie di depositi, relativi a processi deposizionali molto differenti tra loro. In particolare, si registra la presenza di uno spesso strato di sedimenti organici di origine palustre, molto recenti (Pleistocene Superiore – Olocene), caratterizzati da proprietà geotecniche scadenti e particolarmente compressibili.

L'analisi di tutti i fattori fisici di rilevanza geologica che agiscono sul territorio di Como risulta quindi piuttosto complessa, soprattutto per la varietà delle dinamiche fisiografiche e antropiche. Il territorio di Como presenta infatti una notevole energia di rilievo con versanti caratterizzati da pendenze elevate, una idrografia complessa comprensiva delle dinamiche lacustri e di aree umide, e un'espressione peculiare dei fenomeni di subsidenza. Questi caratteri, inoltre, sono inseriti in un contesto di intensa antropizzazione, a decisa stratificazione storica (Comune di Como, 2011).

L'area urbana della città di Como è oggetto di studio, a partire dal 2002, del Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia dell'Università degli Studi dell'Insubria. L'attività scientifica in corso si basa sulla collaborazione con numerosi Enti di ricerca, istituzioni e Studi professionali (tra cui Università di Berna, Università di Aachen, IMONT, Comune di Como, Regione Lombardia, Ingegneria Geotecnica s.r.l. di Torino, ISPRA – Servizio Geologico d'Italia, Università La Sapienza di Roma, Musei civici di Como) ed ha comportato la realizzazione di numerose attività ed indagini, i cui risultati complessivi verranno esposti in questo capitolo.

I principali progetti di ricerca, compiuti o in fase di completamento, comprendono la realizzazione del Foglio Geologico Como in scala 1:50.000 (Progetto CARG) e la perforazione di due sondaggi ubicati in Piazza Verdi, che hanno consentito di ricostruire nel dettaglio la stratigrafia dei sedimenti olocenici presenti nel sottosuolo della città. Inoltre, sono stati raccolti, analizzati ed interpretati numerosi dati topografici, geotecnici ed idrogeologici per definire un modello del comportamento dei sedimenti e delle interazioni con il Lago e la falda. Infine, assume particolare rilevanza l'identificazione delle tracce di eventi sismici recenti e la loro influenza sulla modellazione dei versanti e sulla circolazione idrica sotterranea.

Un nuovo filone di indagine è stato sviluppato a seguito della recente progettazione e realizzazione di alcune opere di difesa idraulica per proteggere la città dalle esondazioni del Lago; la possibilità di visionare il progetto originario e le modifiche successive, avvenuta grazie alla collaborazione con il Comune di Como, ha permesso di applicare, in un contesto differente, l'approccio metodologico utilizzato per l'impianto di Cairo Montenotte. Pur essendo un'analisi geositologica "a posteriori", in quanto il progetto di difesa idraulica della città di Como era già stato ideato, approvato e parzialmente realizzato, si è ritenuta interessante la possibilità di testare l'applicabilità dello schema concettuale alla base del presente progetto, integrando i nuovi dati con quelli acquisiti mediante gli studi già condotti dall'Università.

L'attività di ricerca qui presentata ha come obiettivo la ricostruzione dell'evoluzione recente dell'area, da perseguire mediante la definizione degli eventi e dei cambiamenti che hanno interessato il territorio nel Quaternario, sia dal punto di vista stratigrafico e paleoclimatico che nei suoi riflessi ambientali e applicativi.

La Tabella 19 presenta i dati relativi alla configurazione ambientale e ai principali fattori morfogenetici caratterizzanti l'assetto territoriale e l'evoluzione dell'area urbana di Como:

		Principali criticità relative a fattori predisponenti processi di instabilità in atto o potenziali	Indagini e approfondimenti specifici necessari alla valutazione dell'idoneità del sito	
			Dati pregressi	Ricerche condotte nel presente studio
Piano topografico	198 ÷ 270 m s.l.m.	Variazione livello per subsidenza	Livellazioni geometriche di precisione, interferometria (Comerci, 2004; Bonci <i>et al.</i> , 2004; Giussani, 1997; Comune di Como, 1980)	Analisi livellazione geometrica 2011 (Barzaghi <i>et al.</i> , 2011), dati interferometrici 2003 ÷ 2012
Ambito meteo-climatico	Prealpi lombarde, mesoclima insubrico	Vasto bacino idrografico; localmente, altezze di precipitazioni rilevanti su periodi 1 mese ÷ 1 anno; elevato manto nevoso; interazione con bacino lacustre	Verifica delle serie pluviometriche storiche; analisi di dati pluviometrici su tutto il bacino idrografico (Ferrario, 2009)	Aggiornamento dati per il periodo 2009 ÷ 2012
Dominio morfologico	Fascia di raccordo colline – pianura	Erosione versanti, presenza di dissesti attivi e quiescenti	Analisi geomorfologica in campo, fotointerpretazione	
Ambito idrologico	Lago di Como; corsi d'acqua (T. Cosia, T. Valduce), reticolo secondario	Variazioni livello Lago influenzate da afflussi e regolazione diga Olginate; esondazioni Lago; eventi di piena con elevato trasporto solido	Analisi congiunta precipitazioni, livello Lago, livello falda; analisi regime afflussi e deflussi dal Lago (Ferrario, 2009)	Aggiornamento dati per il periodo 2009 ÷ 2012
Assetto idrogeologico	Acquifero multistrato, falda profonda in pressione	Aumento livello falda in corrispondenza di elevati livelli lacustri; possibile contaminazione falda profonda	Rilievi piezometrici (tesi di laurea Università dell'Insubria)	Aggiornamento dati per il periodo 2009 ÷ 2012 (Tarzi, 2011); monitoraggio in continuo livello falda
Assetto litologico-stratigrafico	Substrato litoide, sedimenti olocenici con spessori rilevanti	Sedimenti limosi di origine lacustre sottoconsolidati	Rilevamento in campo (progetto CARG), raccolta stratigrafie di sondaggio (Colmegna, 2006)	Analisi dati (Comune di Como, 1997 a, b); costruzione profili e carte geologiche (Tarzi, 2011; Frigerio, 2012), datazioni, paleobotanica
Caratteristiche geotecniche	Sedimenti olocenici: strato limoso con pessime caratteristiche meccaniche	Sedimenti poco consolidati soggetti a subsidenza. Substrato lapideo compatto soggetto a fratturazione	Valutazione subsidenza (Comerci <i>et al.</i> , 2007)	Aggiornamento dati, analisi dati di prove geotecniche in sito e di laboratorio

Sismicità	Classe sismica IV	Presenza di lineamenti ad attività tettonica recente	Rilevamenti geologici e sismotettonici, ridefinizione pericolosità sismica della zona (Chunga <i>et al.</i> , 2007; Sileo <i>et al.</i> , 2007)	Rilevamenti geologici e sismotettonici, ridefinizione pericolosità sismica della zona (Livio <i>et al.</i> , 2011; Michetti <i>et al.</i> , 2012)
Influenza antropica	Sovrasfruttamento falda (1950 ÷ 1970); opere di regimazione dalle esondazioni	Abbassamento livello falda comporta aumento subsidenza	Comune di Como, 1980	Analisi progetto originale e varianti (Comune di Como, 1997 a, b)

Tabella 19 : Configurazione ambientale e fattori morfogenetici caratterizzanti l'area di studio.

6.1.1. Inquadramento territoriale

Il Lago di Como (Tabella 20), detto anche Lario (latitudine media N46°10', longitudine E Greenwich 09°16'), si trova ai piedi delle Alpi Meridionali e si sviluppa alla quota di 198 m s.l.m. con una caratteristica forma a λ . L'affluente principale è il Fiume Adda, quarto fiume italiano per lunghezza e sesto per estensione del bacino imbrifero, che confluisce nel Lago di Como a Colico e prosegue poi come unico emissario del Lago al termine del ramo orientale (di Lecco).

La città di Como sorge all'estremità meridionale del ramo occidentale del Lago di Como, idrologicamente chiuso; la zona del centro storico della città, localmente detta *convalle*, è costituita da una conca pianeggiante che si estende dal Lago verso S-SE, fino alla soglia di Camerlata, a quote comprese tra 200 e 270 m s.l.m. circa. La peculiare posizione topografica rende l'area un'importante trappola sedimentaria, che raccoglie materiali provenienti da un bacino idrografico estremamente ampio (Figura 28), caratterizzato da una superficie di circa 4.550 km² e comprendente parte delle province di Como, Lecco e Sondrio e alcune zone della Confederazione Elvetica, in particolare nel Canton Ticino e nel Cantone dei Grigioni (Salvadè & Gerosa, 1997).

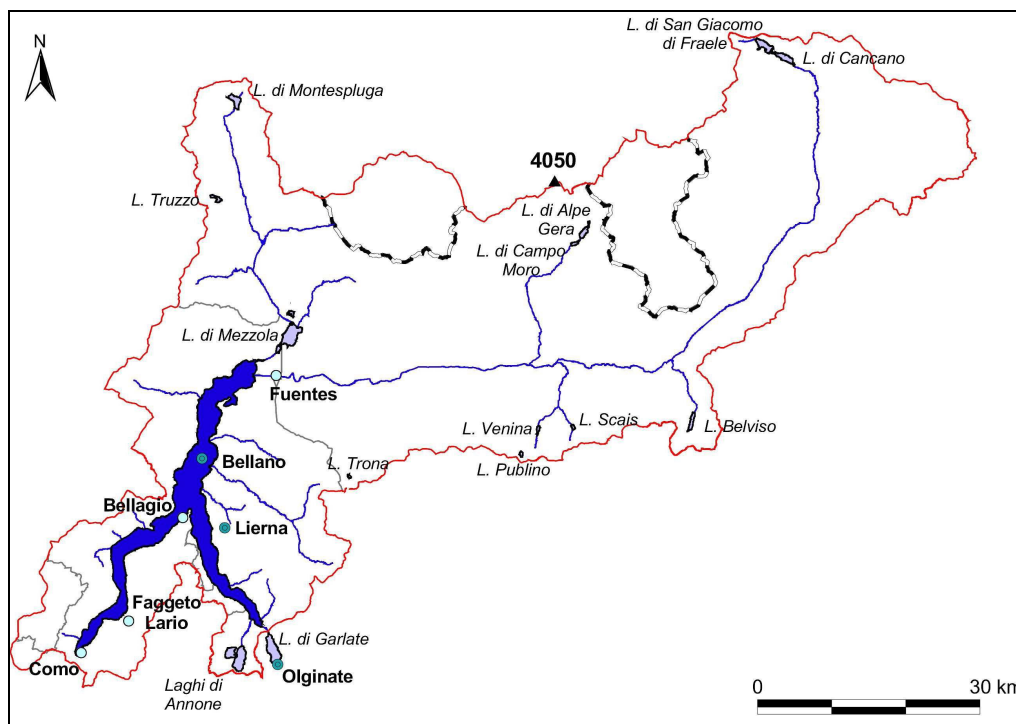


Figura 28 : Bacino idrologico del Lago di Como (linea rossa), che comprende buona parte della Lombardia settentrionale e alcune zone della Confederazione Elvetica. La linea a tratti bianchi e neri rappresenta il confine di Stato tra Italia e Svizzera (fonte ISPRA).

Lago di Como	
Latitudine media	N 46°10'
Longitudine	E (G) 09°16'; W (Monte Mario) 03°11'
Province	Como, Lecco, Sondrio (Italia), Cantoni Grigioni e Ticino (Svizzera)
Tipo	Naturale, regolato (dal 1946)

Affluenti principali	Adda, Mera, Liro, Albano, Senagra, Telo, Breggia, Cosia, Varrone, Pioverna, Meria, Rio Torto
Portata massima immissario (m³/s)	1836 (Adda, 18/07/87)
Emissario	Fiume Adda
Portata massima emissario (m³/s)	918 (Adda, 20/07/87)
Portata media emissario (m³/s)	158
Quota media del Lago (m s.l.m.)	198
Livelli riferiti allo zero idrometrico di Malgrate (m s.l.m.)	197,37
Livello minimo del ciglio di Piazza Cavour di Como (m s.l.m.)	198,53
Massimo storico (m)	3,97 (06/10/1868)
Massimo nel periodo regolato (m)	2,64 (21/07/1987 e 15/10/1993)
Minimo storico (m)	-0,72 (13/12/1983)
Limite di regolazione all'idrometro di Malgrate (m)	max 1,20 / min -0,50
Superficie Lago (km²)	145
Superficie del bacino imbrifero (km²)	4522
Rapporto tra superficie del bacino e superficie del Lago (m)	31,34
Altitudine massima nel bacino (m)	4049 (Pizzo Bernina)
Volume (m³ x 10⁶)	23372
Lunghezza perimetro (km)	185
Lunghezza massima (km)	45,7
Larghezza massima (km)	4,2
Profondità massima (m)	425
Profondità media (m)	161
Tempo teorico di ricambio (anni)	4,5
Tempo di residenza (bacino ovest) (anni)	10,8 ÷ 14,5
Tempo di residenza (bacino est) (anni)	3,7 ÷ 6,5
Tempo di residenza (alto Lago) (anni)	7,1 ÷ 9,7
Tempo di residenza (Lago intero) (anni)	10,4 ÷ 12,8

Tabella 20 : Principali caratteristiche del Lago di Como (fonti: Attardo, 2002; www.meteocomo.it).

6.1.1.1. Elementi meteo-climatici

Il clima della regione lariana si può considerare, a livello generale, di tipo temperato piovoso e di transizione tra quello medio-europeo e quello nord-mediterraneo. Le caratteristiche climatiche sono influenzate dall'orografia alpina e quindi dai rilievi montuosi e dai sistemi vallivi, oltre che dalla presenza del Lago di Como; inoltre, in un ambito territoriale estremamente articolato quale quello in esame, i parametri climatici

sono spesso influenzati da fattori a carattere strettamente locale, che possono generare notevoli variazioni nella quantità di precipitazione e nelle modalità di afflusso al suolo.

L'area della città di Como, per posizione geografica e caratteristiche morfologiche, appartiene al “mesoclima insubrico” (Comune di Como, 2003), con precipitazioni generalmente più abbondanti rispetto al clima padano e inferiori rispetto a quello alpino.

I dati climatici, in particolare temperatura e precipitazioni, vengono rilevati giornalmente in varie stazioni meteorologiche afferenti a vari Enti e strutture distribuite in tutto il territorio regionale e provinciale; i dati sono facilmente reperibili su siti a scala regionale quali quelli di ARPA Lombardia (www.arpalombardia.it) e del Centro Meteorologico Lombardo (www.centrometeolombardo.com), oltre che su siti maggiormente attinenti all'area di studio quali www.meteocomo.it e www.laghi.net.

Per quanto riguarda il regime termometrico, in Tabella 21 sono riportati i valori medi mensili registrati a Como nel periodo 1921 ÷ 1970 (Regione Lombardia, 2005) e nel periodo 1991 ÷ 2003 (Comune di Como, 2003). Per confronto, sono indicati gli estremi dell'anno 2011.

Mese	T media mensile [°C] 1921 ÷ 1970	T media mensile [°C] 1991 ÷ 2003	T media mensile [°C] 2011
Gennaio	3.10	4.71	3.35
Febbraio	5.00	6.00	6.05
Marzo	8.80	10.47	9.14
Aprile	12.70	13.10	15.88
Maggio	16.90	18.43	19.08
Giugno	21.00	22.03	20.37
Luglio	23.40	24.22	21.95
Agosto	22.60	24.41	24.81
Settembre	19.20	19.23	21.84
Ottobre	13.80	14.55	14.63
Novembre	8.40	8.85	9.31
Dicembre	4.20	5.57	6.69

Tabella 21 : Temperature medie mensili registrate a Como nei periodi 1921 ÷ 1970 (Regione Lombardia, 2005), 1991 ÷ 2003 (Comune di Como, 2003) e 2011 (www.arpalombardia.it).

Per quanto riguarda il regime pluviometrico, il lavoro di maggior accuratezza a scala nazionale oggi disponibile è la “Carta delle precipitazioni medie annue in Italia per il trentennio 1921 ÷ 1950”, pubblicata nel 1961 dal Servizio Idrografico del Ministero dei Lavori Pubblici (in Figura 29 si riporta la situazione lombarda).

Dalla lettura della carta appare netta la delimitazione dell'area di media e bassa pianura con una precipitazione annua inferiore al metro; la precipitazione totale cresce poi gradualmente da sud verso nord, superando i 1.000 mm e raggiungendo i massimi nell'area prealpina. I massimi relativi sono circoscritti su diverse aree prevalentemente montuose, tra cui i rami del Lago di Como. Lungo la Valtellina, invece, i valori sono più bassi e risultano simili a quelli di pianura.

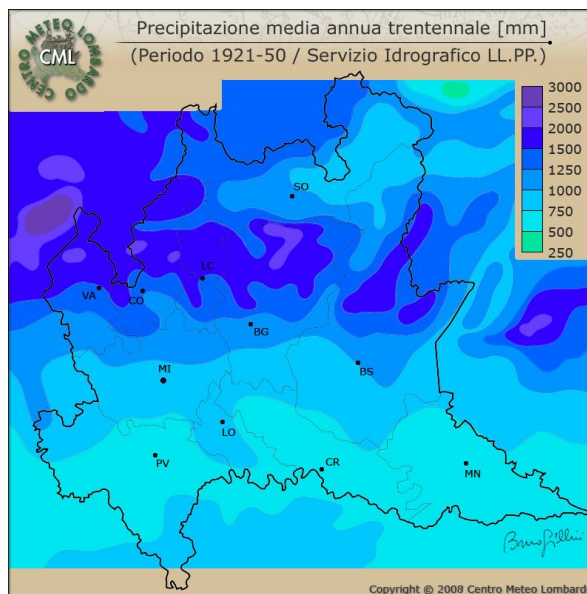


Figura 29 : Carta della precipitazione media annua per il periodo 1921 ÷ 1950. Fonte: www.centrometeolombardo.com.

A scala regionale, le serie storiche sono riassunte ed elaborate nella “*Carta delle precipitazioni medie, massime e minime annue del territorio alpino della Regione Lombardia*” (Ceriani & Carelli, 2000); l’analisi risulta parzialmente inaccurata poiché si sono considerate anche stazioni con dati relativi ad archi temporali molto brevi, dell’ordine della decina di anni (Figura 30).

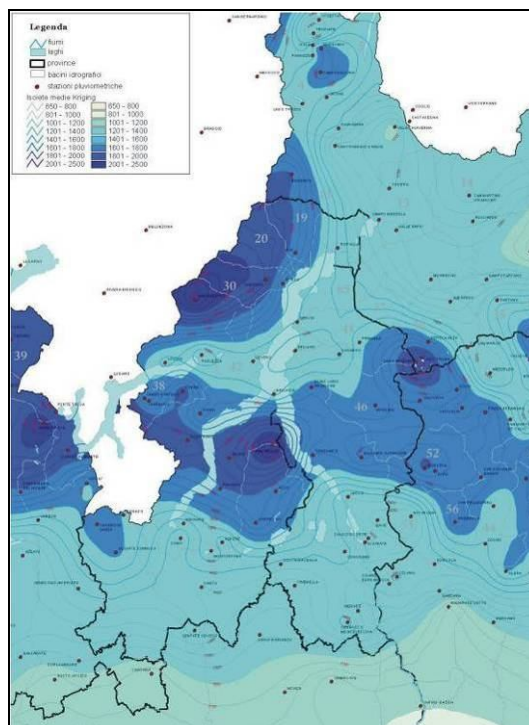


Figura 30 : Stralcio della Carta delle precipitazioni medie annue del territorio alpino lombardo, registrate nel periodo 1891 ÷ 1990 (Ceriani e Carelli, 2000).

Relativamente alla città di Como, risulta che nel periodo indagato (1891 ÷ 1990) la precipitazione media annua è risultata pari a 1.413,5 mm, la minima annua pari a 712,0 mm e la massima annua pari a 2.473,8 mm.

Il regime annuale nella provincia comasca mostra un massimo relativo stagionale primaverile (aprile - maggio) e uno assoluto autunnale (settembre - novembre); il minimo assoluto è in giugno, mentre il minimo relativo invernale è tra gennaio e febbraio (Comune di Como, 2011).

La Tabella 22 riassume i dati di precipitazione media annua per vari periodi di tempo rilevati nella stazione di Como.

Periodo	Fonte	P annua media (mm)
1921 ÷ 1950	Servizio Idrografico	1.275
1951 ÷ 1970	Servizio Idrografico	1.437
1920 ÷ 1970	Servizio Idrografico	1.340
1961 ÷ 1990	APAT	1.350 circa
1891 ÷ 1990	Ceriani e Carelli, 2000	1.475
1991 ÷ 2003	Comune di Como, 2003	1.410
1951 ÷ 1997	Regione Lombardia, 2005	1.376,1
1989 ÷ 2008	Meteocomo.it	1.515
2011	ARPA Lombardia	1.109

Tabella 22 : Schema riassuntivo delle precipitazioni annuali a Como.

Nel corso degli ultimi decenni si riscontra una diminuzione nel numero di eventi, ma con un significativo aumento nell'intensità (Comune di Como, 2003), dinamica che comporta una notevole incidenza sul rischio di frane e alluvioni. Il Lago tuttavia garantisce, grazie all'effetto di laminazione, una protezione nelle zone a valle, poiché rallenta e diminuisce i picchi di piena.

Nel 2011 si è rilevato un valore cumulato di pioggia annuale inferiore alle medie appena riportate, pari infatti a 1.109 mm (ARPA Lombardia). La Figura 31 rappresenta un confronto tra i dati annuali del periodo 1953 ÷ 2010, le medie storiche disponibili e l'anno 2011.

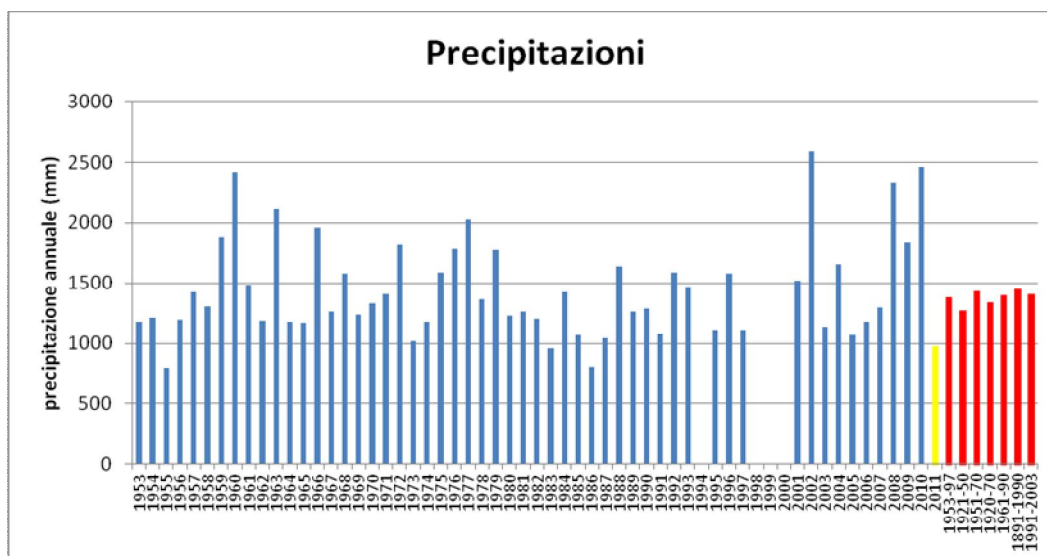


Figura 31 : Precipitazioni annuali a Como nel periodo 1953 ÷ 2010 (grafico blu); in rosso sono rappresentate le medie di vari intervalli temporali (cfr. Tabella 22) e in giallo le precipitazioni del 2011. Fonti: Regione Lombardia, 2005, Ministero dei Lavori Pubblici, ARPA Lombardia.

6.1.1.2. Inquadramento geologico e strutturale

Come discusso nel capitolo 4, la città di Como e le Alpi Lariane appartengono al Dominio del Sudalpino, delimitato a nord dalla Linea Insubrica; la geologia della zona, sia dal punto di vista del substrato che delle coperture quaternarie, è stata oggetto di numerosi ed approfonditi studi (per una revisione della letteratura scientifica disponibile, si rimanda alle note CARG del Foglio Como).

Le Prealpi Lariane sono costituite da due formazioni geneticamente distinte: il basamento metamorfico e la copertura sedimentaria, separate dalla linea del Monte Grona – Val Grande (Bertotti, 1991). Il basamento affiora dall’altezza di Menaggio verso nord e rappresenta l’antica crosta continentale, di età pre-westfaliana e anche precedente, poiché chiaramente polimetamorfica. L’ultimo evento metamorfico riconosciuto è precedente all’orogenesi alpina, mentre non vi sono importanti testimonianze di metamorfismo di età alpina. La copertura sedimentaria ha invece un’età compresa tra il Carbonifero superiore e il Paleogene-Neogene basale (i suoi termini sono progressivamente più recenti da nord a sud) e risulta deformata per sovrascorrimenti sud-vergenti (Gianotti & Perotti, 1986); nelle zone dove predominano i calcari, si riscontrano fenomeni di carsismo che alterano la struttura fisica e chimica delle rocce, oltre che dell’acqua, con formazione di tipiche strutture carsiche quali le cavità sotterranee e le doline. A sud i cordoni morenici sono gli ultimi rilievi prima della pianura alluvionale.

Il basamento cristallino e le unità sedimentarie sono stati dislocati da grandi sistemi di faglie estensionali orientate da N-S fino a E-NE / O-SO, che hanno indotto considerevoli variazioni di spessore nella sequenza sedimentaria e originato una struttura ad “alti e bassi”, tra cui la ruga di Lugano e il bacino del Monte Generoso (Bertotti, 1991).

Nell'ambito del Progetto CARG per la realizzazione della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000, è stato di recente predisposto il Foglio 75 "Como", sotto la supervisione scientifica dell'Università dell'Insubria (Figura 32).



Figura 32 : Stralcio del Foglio 75 “Como” della Carta Geologica d’Italia in scala 1:50.000, progetto CARG (Servizio Geologico d’Italia, 2012).

Il bacino sedimentario su cui sorge l'area urbana di Como è bordato lateralmente da due settori in cui affiora il substrato roccioso: in particolare, a est si trova una potente sequenza di calcari giurassici (Calcare di Moltrasio) e a ovest una serie di conglomerati risalenti all'Oligo-Miocene (Formazione di Chiasso e Gruppo della Gonfolite).

Il Calcare di Moltrasio fa parte, assieme al Calcare di Domaro, del Gruppo del Medolo ed è costituito da calcari e calcari marnosi selciferi stratificati di colore scuro, da grigio a nero; localmente sono presenti bioturbazioni e all'interno della successione, abbastanza monotona, vi sono variazioni litologiche significative dovute alle locali condizioni paleogeografiche di sedimentazione; nel Foglio Como sono state cartografate 5 litozone, distinte in base alla quantità e alla disposizione della selce (Servizio Geologico d'Italia, 2012). Il Calcare di Moltrasio è caratterizzato da una permeabilità di tipo secondario per fratturazione e carsismo, con valori relativi da ridotti a medi, in funzione del grado di sviluppo raggiunto dai fenomeni di dissoluzione della componente carbonatica.

Lo spessore dell'unità varia da poche decine di metri, in corrispondenza dei paleoalti (Corni di Canzo), ad oltre 1.500 ÷ 2.000 m nelle fosse (Triangolo Lariano e Lario Occidentale). Età: Sinemuriano – Pliensbachiano inferiore.

Il substrato roccioso affiorante ad ovest della conca di Como è invece costituito da una successione oligo-miocenica di sedimenti di natura clastica terrigena, appartenenti alla Formazione di Chiasso e al Gruppo della Gonfolite.

La Formazione di Chiasso è rappresentata da marne e marne siltose grigie in sottili livelli e lamine a cui si intercalano arenarie da fini a medie, in strati centimetrici, spesso gradate e con laminazioni pianoparallele. Lo spessore minimo è di 170 metri. Comprende al suo interno i "Conglomerati di Villa Olmo", composti da conglomerati a supporto clastico con una stratificazione generalmente grossolana e mal distinguibile. Età: Chattiano.

Il gruppo della Gonfolite Lombarda costituisce un deposito di conoide sottomarina a composizione silicoclastica, generatosi in un ambiente a rapida subsidenza ed elevata velocità di sedimentazione. Nell'area comasca si distinguono, dal basso verso l'alto, le seguenti formazioni (Servizio Geologico d'Italia, 2012):

- conglomerati a supporto clastico e, in quantità minore, a supporto di matrice, da medi a grossolani, costituenti la formazione di Como (FCM);
- in parziale eteropia con la parte superiore conglomeratica, è presente una successione arenaceo-pelitica articolata in peliti di Prestino (RSI) e arenarie della Val Grande (VGD);
- al di sopra di tutte le precedenti unità seguono nuovamente conglomerati a supporto clastico, associati ad arenarie conglomeratiche massive o rozzamente laminate: i conglomerati di Lucino (LUI).

La Gonfolite ha permeabilità primaria pressoché nulla, mentre quella secondaria risulta generalmente molto ridotta. Nel complesso l'unità è da considerarsi a permeabilità ridotta o molto ridotta. Lo spessore totale del gruppo nell'area Comasca è dell'ordine dei 2.000 metri. Età: Burdigaliano – Chattiano.

Per quanto riguarda i depositi continentali quaternari, questi sono principalmente legati ai diversi episodi glaciali che hanno visto, a più riprese nel corso del Pleistocene, la discesa del grande ghiacciaio dell'Adda lungo la valle ora occupata dal Lago di Como.

Nell'area pedemontana si possono riconoscere vasti anfiteatri caratterizzati da cerchie semicircolari di morene, depositati durante i vari episodi di avanzata e ritiro del ghiacciaio Abduano, che si suddivideva in

lobi. I depositi glaciali e periglaciali sono attualmente soggetti a erosione e rimaneggiamento, legati prevalentemente alla dinamica dei versanti, spesso molto acclivi e interessati da fenomeni gravitativi di varia natura.

6.1.1.3. Inquadramento sismotettonico ed evidenze paleosismiche

L'evoluzione tettonica del territorio che ospita la città di Como è complicata dalla presenza di diversi fattori che agiscono contemporaneamente, sia a scala regionale che locale: la compressione alpina tuttora attiva, il *glacial rebound* e la subsidenza indotta a scala regionale dalla subduzione appenninica (Comerci, 2004). Dal punto di vista strutturale (Figura 33), l'area urbana di Como è delimitata ad ovest da un importante lineamento tettonico, il Retroscorrimento di Monte Olimpino, che borda il massiccio gonfolitico con andamento NO-SE. Tale struttura rappresenta un sovrascorrimento N vergente, che porta il Gruppo della Gonfolite Lombarda a sovrascorrere sulla successione mesozoica con uno scollamento che si imposta in corrispondenza della rampa frontale al livello della formazione di Chiasso. Questo lineamento è stato direttamente osservato nel tunnel ferroviario di M. Olimpino (Bernoulli *et al.*, 1989) e in corrispondenza di uno scavo edilizio in Via Borgovico (Como). La giacitura media del sovrascorrimento è di N210° con un'inclinazione piuttosto elevata (circa 60°), almeno nei settori più superficiali.

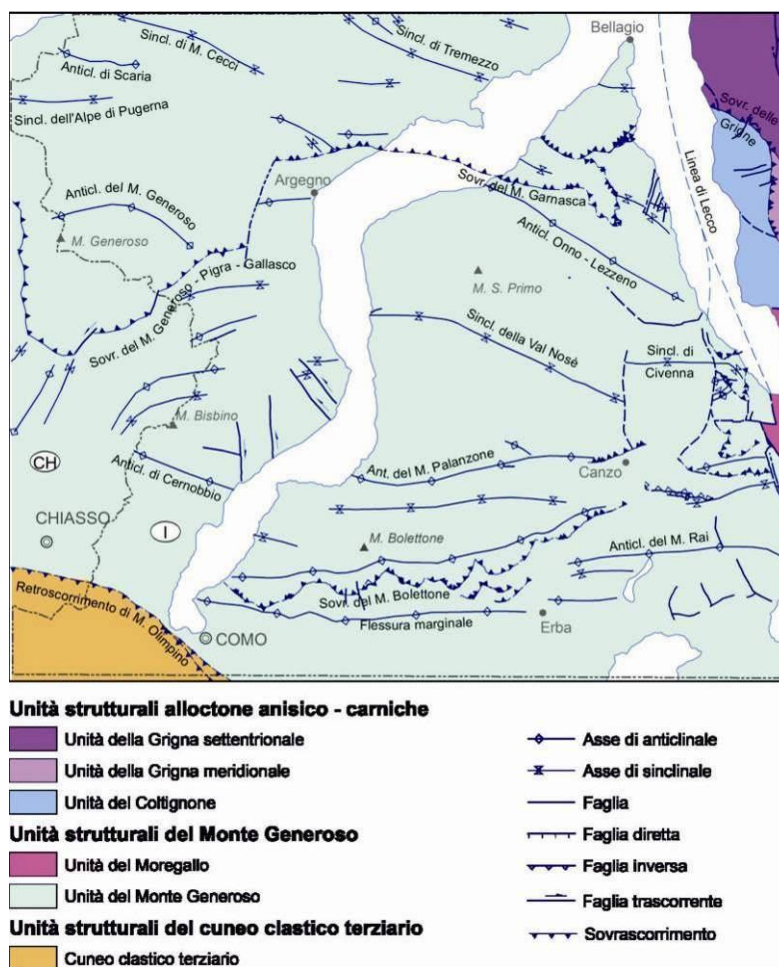


Figura 33 : Schema strutturale del Foglio 75 "Como" (Servizio Geologico d'Italia, 2012).

A dispetto della mancanza di forti terremoti locali registrati nel catalogo storico e strumentale, l'area intorno alla città di Como è interessata da significative evidenze di tettonica attiva e paleosismicità recente, descritte già a partire dagli anni '70 (Orombelli, 1976; Castaldini & Panizza, 1991; Bini *et al.*, 1993, 2001; Zanchi *et al.*, 1997). Infatti, sebbene la deformazione tettonica compressiva dell'area pedemontana fra i laghi di Como e Maggiore, al fronte della catena Sudalpina, sia stata considerata in letteratura come terminata a partire dal Tortoniano (Pieri & Groppi, 1981), sussistono numerose evidenze di carattere geologico e geomorfologico di attività neotettonica nell'area, ascrivibili all'intervallo Pliocene – Olocene (Livio *et al.*, 2009a; 2009b; Michetti *et al.*, 2010; Berlusconi *et al.*, 2012; Michetti *et al.*, 2012).

Le principali strutture tettoniche presenti nell'area comasca, tra cui l'Anticlinale di Albese con Cassano e il Retroscorrimento di Monte Olimpino, sono state oggetto di recenti analisi geomorfologiche e di rilevamenti sul terreno (Chunga *et al.*, 2007; Sileo *et al.*, 2007; Livio *et al.*, 2011). In particolare, nella zona di Albese con Cassano sono state identificate delle evidenze di liquefazioni e deformazioni sinsedimentarie in depositi proglaciali pleistocenici, che sembrano suggerire l'occorrenza di forti paleoterremoti locali (Chunga *et al.*, 2007).

Lungo la traccia del Retroscorrimento di Monte Olimpino si possono osservare depositi pliocenici (Mendrisiotto), medio pleistocenici (Val Faloppia), e glaciali (Novazzano) sistematicamente coinvolti nella deformazione. L'età di attivazione del Retroscorrimento sembra essere contemporanea alle arenarie della Valgrande (Burdigaliano); il limite superiore per l'attività del Retroscorrimento è tradizionalmente posto al Messiniano, sulla base dell'interpretazione dei dati di sismica a riflessione industriale (Fantoni *et al.*, 2004). Tuttavia, sulla base di recenti studi (Sileo *et al.*, 2007, Livio *et al.*, 2011, Michetti *et al.*, 2010), è possibile affermare che l'attività di questa struttura perdura nel Plio-Pleistocene e sino all'Olocene; il tasso di scorrimento del Retroscorrimento di M. Olimpino durante il Tardo Quaternario è valutabile in $0,2 \div 0,4$ mm/anno.

In particolare, lo scavo delle fondazioni in un cantiere aperto nel 2010 presso Borgo Vico, nella zona NO della città di Como, ha consentito di osservare uno *splay* secondario al tetto del Retroscorrimento che porta il membro dei conglomerati di Villa Olmo in contatto tettonico inverso con dei sedimenti conglomeratici attribuibili all'Ultimo Massimo Glaciale e con argille lacustri di età tardo-glaciale (Figura 34; Livio *et al.*, 2011). Le osservazioni condotte portano pertanto a dimostrare che anche la sequenza di argille e limi post-glaciali e olocenici che caratterizzano il sottosuolo dell'area urbana di Como è interessata dalla deformazione.

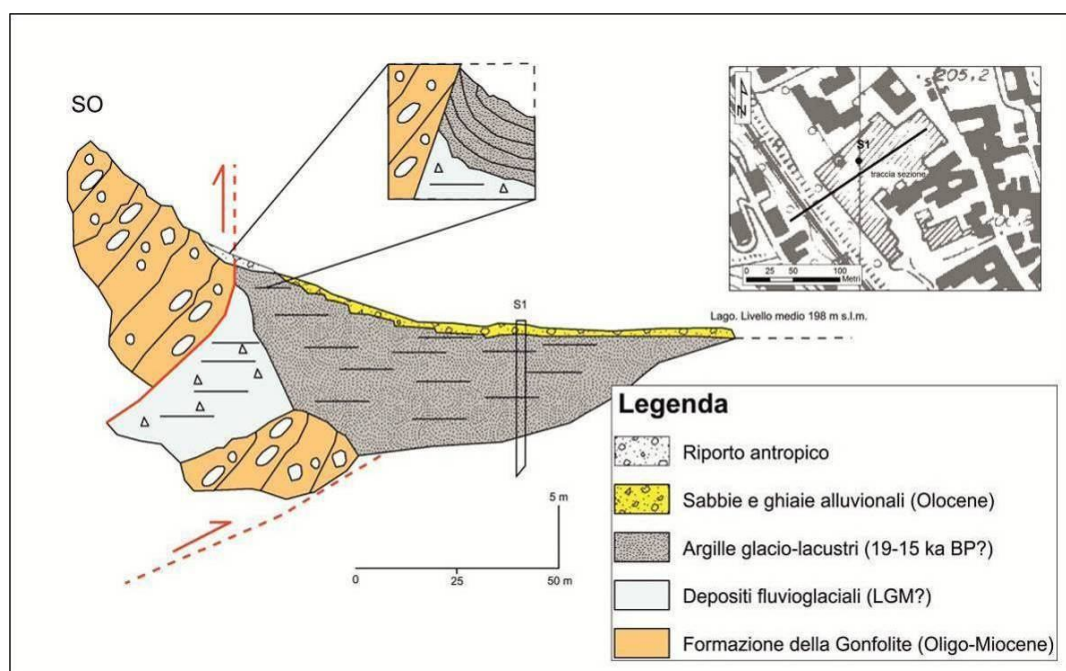


Figura 34 : Profilo geologico dell'affioramento nel sito di Borgo Vico, in cui si osserva un contatto tettonico che coinvolge la sequenza di argille e limi post-glaciali.

I dati appena esposti, uniti ai movimenti verticali recenti del suolo (Beretta *et al.*, 1986) ed alle evidenze geodetiche del raccorciamento crostale in corso individuate dalle recenti indagini GPS (e.g., Serpelloni *et al.*, 2005; Michetti *et al.*, 2012), rappresentano rilevanti indicazioni del livello di attività tettonica esistente nel settore lariano. Per l'intorno significativo dell'area di Como, il terremoto di riferimento è rappresentato dal sisma del 25 Dicembre 1222 con epicentro nel Bresciano (Intensità IX ÷ X MCS; cfr. Michetti *et al.*, 2012; Tabella 23). A tale sisma sono stati ad esempio attribuiti effetti paleosismici secondari (movimenti gravitativi cosismici con innesco di megatorbiditi) osservati nei depositi del Lago di Como (Fanetti *et al.*, 2008).

La sismicità dell'area comasca è comunque da considerare bassa, come confermano i “*Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e la formazione e l'aggiornamento degli elenchi e delle medesime zone*” conseguente all'O.P.C.M. n. 3274 del 2003, che collocano il territorio comunale di Como in Zona 4.

Data	Epicentro	Intensità epicentrale (scala MCS)	Ms	Distanza dalla città di Como (km)
3/1/1117	Veronese	IX ÷ X	6,49	160
25/12/1222	Basso Bresciano	VIII ÷ IX	6,05	110
26/11/1396	Monza	VII ÷ VIII	5,1	50
24/1/1491	Verona	VII ÷ VIII	5,1	155
7/4/1786	Piacenza	VI ÷ VII	5,01	70
12/5/1802	Valle dell'Oglio	VIII	5,54	78
7/6/1891	Valle d'Illasi	VIII ÷ IX	5,61	165
30/10/1901	Salò	VIII	5,55	105

Tabella 23 : Principali terremoti storici e strumentali (intensità epicentrale > VII MCS) rilevati nell'area lombarda (Fonte: CPTI04). Note: intensità espresse secondo la scala MCS; Ms: magnitudo relativa ai terremoti storici stimata attraverso correlazioni intensità/magnitudo elaborate per il territorio italiano.

6.1.1.4. Geomorfologia ed evoluzione ambientale recente

Il paesaggio dell'area comasca è ovviamente dominato dalla presenza del Lago di Como, la cui origine è molto complessa e tuttora in discussione; il Lago, così come gli altri grandi laghi a sud delle Alpi, risulta caratterizzato, secondo le prospezioni sismiche effettuate (Bini *et al.*, 1978; Finckh, 1978; Finckh *et al.*, 1984), da una profondità considerevole del fondo roccioso, oltre che da un consistente sviluppo longitudinale e da ripidi fianchi rocciosi.

L'origine di questi bacini fu inizialmente attribuita all'erosione glaciale recente (Nangeroni, 1956); in seguito, è stata avanzata un'ipotesi che suggerisce invece che le valli siano dei *canyon* fluviali, generati dall'abbassamento del livello di base conseguente al disseccamento del Mediterraneo avvenuto nel Messiniano, poi rimodellati dai ghiacciai (Servizio Geologico d'Italia, 2012).

Le evidenze a supporto di tale ultima ipotesi sarebbero i profili trasversali dei bacini lacustri, che presentano forma a V propria delle valli fluviali in luogo della tipica forma a U delle valli glaciali, oltre che l'elevata criptodepressione del fondo lacustre, non spiegabile attraverso il processo di esarazione glaciale. Inoltre, la sezione trasversale dei bacini presenta una condizione di *oversteepening*, riscontrata in numerosi casi sia a sud che a nord delle Alpi (Preusser *et al.*, 2010), e identificata, nel corso di questo progetto, anche nel Lago di Como (cfr. § 6.3.1.2.; Allegato 3).

Durante il Quaternario il principale agente modellatore del paesaggio circumlacuale fu senza dubbio il ghiacciaio, con formazione di rilievi dai fianchi ripidi separati da ampie vallate. Le forme risultanti, a testimonianza dell'azione dei ghiacciai, sono sia di tipo erosivo (sezioni ad U delle valli e rocce montonate) che di tipo deposizionale (morene e terrazzi fluvioglaciali).

La glaciazione più recente, che prende il nome di Glaciazione Cantù negli anfiteatri morenici del Lago Maggiore e del Lago di Como, corrisponde allo stage isotopico 2 (Bini & Zuccoli, 2004). Durante tale glaciazione non esisteva sulle Alpi un'unica calotta glaciale ma grandi ghiacciai vallivi; uno di questi era il ghiacciaio dell'Adda proveniente dall'alta Valtellina e formato dalla coalescenza di più ghiacciai.

In corrispondenza dell'ultimo massimo glaciale, circa 20.000 anni fa, l'area lariana veniva ricoperta quasi completamente dal ghiaccio (cfr. Figura 62 a), che nell'Alto Lario raggiungeva i 1.530 m s.l.m.. Verso sud il ghiacciaio si ripartiva in più rami, attraverso transfluenze e diffluenze, a formare i lobi pedemontani di Como, della Brianza e di Lecco (Servizio Geologico d'Italia, 2012). La deposizione dei sedimenti glaciali e fluvio – glaciali quaternari è connessa alle fluttuazioni climatiche pleistoceniche, che hanno notevolmente influenzato le varie lingue glaciali (Bini *et al.*, 2001).

La deglaciazione, e la conseguente ricomparsa della foresta, è stata confermata da analisi polliniche già a partire da circa 18.000 BP nel territorio comasco (Comerci *et al.*, 2004). Per la ricostruzione dettagliata dell'evoluzione ambientale a partire dall'UMG, si rimanda al successivo § 6.4.3..

La morfologia glaciale è stata successivamente rimodellata dall'azione delle acque superficiali, della gravità e dei processi deformativi attivi sui versanti, oltre che della tettonica. Particolarmente significativi risultano inoltre i fenomeni di carsismo profondo, favoriti da estese e potenti coperture sedimentarie facilmente alterabili (in particolare, il calcare di Moltrasio). Infine, non sono trascurabili gli effetti dell'antropizzazione degli ultimi millenni, che ha comportato intensi diboscamenti e lo sfruttamento a fini agricoli e industriali del territorio.

6.1.1.5. *Idrologia, idrogeologia e regolazione del Lago*

L'area afferente al Lago si può considerare di una certa complessità idrologica poiché, oltre all'articolazione morfologica delle aree e alla frammentarietà dei bacini, si è in presenza di una circolazione pluridirezionale: centripeta, verso il Lago, in gran parte del territorio; centrifuga, ma in più direzioni, nella zona sud (Comune di Como, 2011).

A livello locale, l'area della convalle può essere quindi considerata la parte terminale di un anomalo bacino idrografico, che presenta un'inversione di direzione delle sue acque, sia superficiali che sotterranee, per diretta conseguenza delle linee morfologiche del territorio, caratterizzate da una serie di colline che delimitano la città in direzione sud favorendo il deflusso delle acque verso il Lago.

Per quanto riguarda le acque superficiali, la città di Como è interessata principalmente dalla presenza dei Torrenti Cosia e Valduce.

Il Torrente Valduce ha carattere effimero, con portate occasionali influenzate dal regime pluviometrico oltre che dalla geologia del territorio: il suo bacino è caratterizzato infatti da rocce prevalentemente carbonatiche e soggette a fenomeni di dissoluzione carsica, che determinano una buona permeabilità secondaria del substrato e, di conseguenza, una prevalenza di infiltrazione delle acque meteoriche rispetto a fenomeni di ruscellamento superficiale.

Il Torrente Cosia è invece alimentato da alcune piccole sorgenti ubicate ai piedi dei detriti del Monte Bollettone, a circa 1.100 m s.l.m.. Il suo andamento segue inizialmente la direttrice N-S, attraverso i calcari selciferi e la Maiolica (Ghezzi, 1972), per deviare quindi verso ovest e sfociare nel Lago di Como, nei pressi del Tempo Voltiano, dopo aver attraversato la convalle di Como. Nel tratto urbano il suo corso è ormai completamente artificiale, addirittura tombinato nella parte finale. Verso sud, il bacino del Cosia definisce il limite del bacino del Lago di Como.

A livello idrogeologico, si evidenzia a scala regionale la presenza di una falda "principale" estesa con buona continuità tra Como e Milano, contenuta in vari livelli discontinui legati alle variazioni di granulometria e alla presenza di lenti argillose intercalate nella sequenza quaternaria. Gli acquiferi risultano fortemente intercomunicanti tra loro, sia per la scarsa continuità laterale degli orizzonti impermeabili che li dividono, sia per la mancanza totale di questi in alcune aree.

La direzione prevalente delle linee di flusso, desunta dalle curve isopiezometriche, è orientata nel complesso da nord verso sud o da NO verso SE, in genere parallela allo scorrimento delle acque superficiali ed alle direzioni di maggiore spessore dei depositi permeabili (Amministrazione Provinciale di Como, 1998). Nell'area urbana di Como, meglio descritta in seguito, l'andamento della falda superficiale è, invece, opposto.

Per una completa definizione del bilancio idrologico del Lario sarebbe necessario implementare un modello idrografico-idrogeologico con tutti i dati idraulici di superficie e di sottosuolo riferiti a un arco temporale consistente, che tenga conto delle relazioni reciproche tra i vari parametri e il loro andamento nel tempo. Sebbene tale indagine esuli dagli scopi della presente ricerca, gli studi condotti, in particolare quelli idrogeologici, sono stati necessariamente basati sull'acquisizione di dati relativi ad afflussi, deflussi e altezza idrometrica; la Figura 35 presenta l'andamento dei parametri citati a partire dall'agosto 2008.

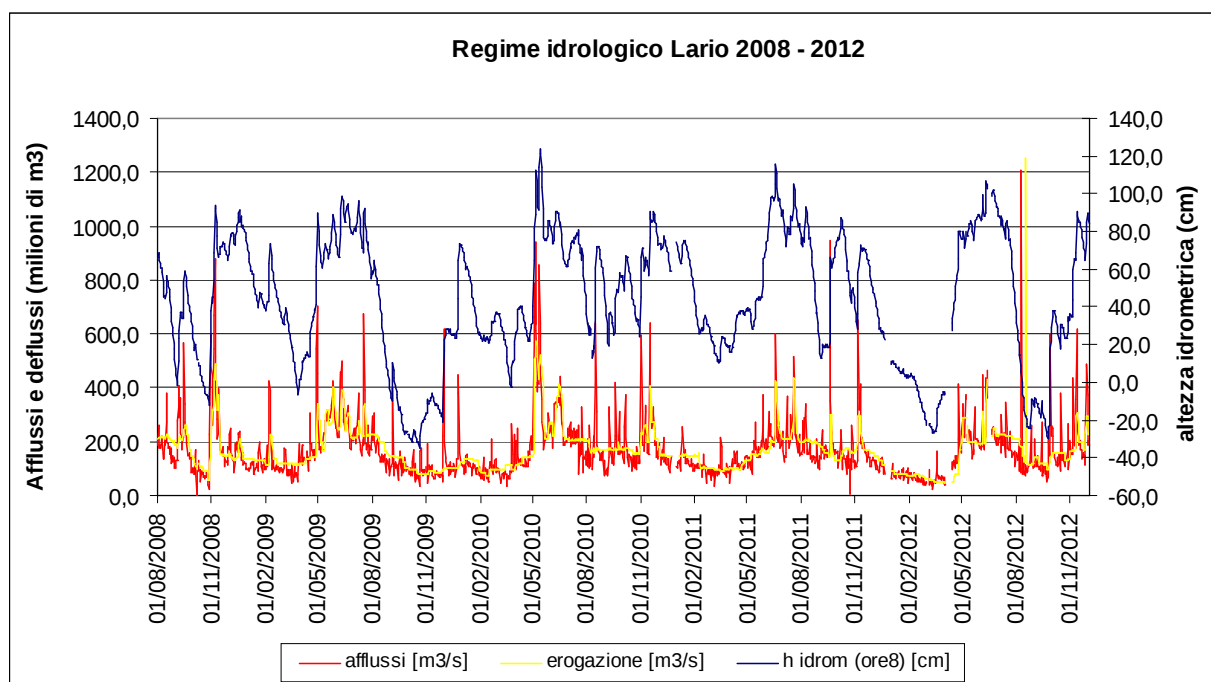


Figura 35 : Andamento dei parametri idrologici a partire da agosto 2008. Fonte: www.laghi.net

Si può facilmente notare la stretta relazione tra afflussi da un lato e altezze idrometriche e deflussi dall'altro: i picchi negli apporti meteorici provocano delle variazioni nel livello del Lago anche abbastanza repentine; i deflussi sono invece caratterizzati da variazioni più contenute e sono modulati in conseguenza degli afflussi. Oltre a questi parametri, sono da considerare molti altri aspetti che concorrono alla definizione del regime idrologico: ad esempio, la distribuzione delle precipitazioni in tutto il bacino imbrifero, la presenza di una serie di invasi alpini a gestione antropica posti a monte del Lago, con volume invasabile superiore ai 500 milioni di m³, la gestione delle captazioni dal Lago.

L'andamento generale desumibile dalle medie storiche presenta livelli minimi nei mesi invernali e massimi nei periodi primaverile ed autunnale. Questo regime è frutto sia di cause naturali (piogge, scioglimento delle nevi) sia di azioni antropiche (gestione degli invasi alpini e regolazione del Lago). A questo proposito, è opportuno sottolineare che se è praticamente impossibile incidere in modo sostanziale sulla gestione dei volumi idrici in afflusso, poiché sono la conseguenza di eventi meteorici non regolabili e almeno in parte anche difficilmente prevedibili, si può invece programmare almeno parzialmente la gestione dei deflussi e quindi del livello idrometrico, agendo sulla diga di Olginate.

Il Lago di Como è infatti, dal 1946, un bacino regolato artificialmente: il Consorzio dell'Adda, ente gestore della diga, regola il livello idrometrico all'interno dei limiti disciplinari, cioè -0,50 / +1,20 m sullo zero idrometrico del Fortilizio (Lecco).

La gestione del livello lacustre influisce certamente anche sulle esondazioni del Lago: nel caso di Como, un fattore aggravante è costituito dai fenomeni di subsidenza cui è soggetta piazza Cavour. Nel 1946, fra il limite superiore della fascia di regolazione e la piazza c'era un franco di sicurezza di oltre 50 cm; nel 1996, per effetto della subsidenza, con +123 cm sull'idrometro di Malgrate si avevano già i primi problemi di allagamento (Fantoli, 1921; Bertoli *et al.*, 2007). Oggi, tale livello è ulteriormente diminuito.

A Como, le aree più depresse, e pertanto maggiormente colpite dalle esondazioni, sono il lungolago e piazza Cavour; storicamente tuttavia sono documentati eventi che hanno comportato l'inondazione di areali estesi

anche oltre il Duomo. L'esondazione più antica di cui si ha buona documentazione risale al 1431 (Ricci, 2001) e da allora tale evento si è ripetuto decine di volte. La maggiore esondazione risale al 1868, con 3,97 m sopra lo zero idrometrico. Dal 1946, con l'entrata in funzione della regolazione artificiale del Lago e con il contestuale allargamento dell'alveo dell'Adda a Lecco, si è registrata una diminuzione del numero e dell'entità delle esondazioni.

6.2. La convalle di Como

6.2.1. Stratigrafia

Il sottosuolo dell'area urbana di Como è costituito da uno spessore accertato di almeno 180 m di sedimenti tardo-quaternari riconducibili a diversi agenti esogeni di trasporto e ambienti deposizionali. Si tratta globalmente di sedimenti di origine fluvio-glaciale, glaciolacustre, palustre, di costa, alluvionale e di versante, che si sono depositi nella convalle essenzialmente negli ultimi 20.000 anni.

L'accentuata disomogeneità litostratigrafica dei terreni, addebitabile alla varietà degli agenti di trasporto dei materiali (acqua, ghiaccio, gravità), all'ambiente di deposizione (subaereo, subacqueo) ed alle modalità di deposito (fluviale, lacustre, palustre, gravitativo), influisce sulle caratteristiche geotecniche dei terreni e quindi, con una variabilità altrettanto grande, sul loro comportamento sotto sforzo (Ghezzi & Landi, 1992). Inoltre, nelle prime fasi il processo deposizionale è stato interrotto da successive avanzate glaciali che hanno parzialmente eroso e deformato i sedimenti più antichi; si registra poi la deposizione fluviale di corpi sedimentari in erosione sugli altri sedimenti passanti lateralmente a depositi di piana alluvionale (Bini, 1993). Per tali motivi, in profondità i depositi si rivelano discontinui e caratterizzati da marcate eteropie laterali.

L'area pianeggiante su cui sorge la città è contornata ai lati da terrazzi sedimentari: a sud ovest la serie di terrazzi di San Abbondio alti più di 10 m sulla piana; a nord est una serie di terrazzi piuttosto complicata, soprattutto per la presenza di un conoide proveniente dal torrente Valduce; a sud est una serie di terrazzi, poco evidenti a causa dell'urbanizzazione, che interrompono il raccordo con la valle proveniente da Camerlata (Bini, 1993).

L'analisi litostratigrafica dei sedimenti, ricostruita essenzialmente sulla base di stratigrafie di sondaggio e dati geotecnici correlati, è stata oggetto di numerosi studi, caratterizzati da diverso grado di dettaglio ed eseguiti per vari scopi. Si citano, in particolare, le ricostruzioni ad opera della Commissione per lo studio dei fenomeni di subsidenza (Comune di Como, 1980), basate anche su 4 sondaggi profondi appositamente realizzati e vari studi di carattere geologico e idrogeologico condotti nel periodo 1980 ÷ 2000 (Beretta *et al.*, 1986; Ghezzi & Landi, 1992; Apuani *et al.*, 2000). Negli ultimi anni, la progettazione di opere per la difesa dalle esondazioni del Lago ha comportato la realizzazione di ulteriori e approfondite indagini, fra cui l'esecuzione di numerosi sondaggi a carotaggio continuo, di prove geotecniche e l'installazione di nuova strumentazione piezometrica. I rapporti di cantiere, di cui si è entrati recentemente in possesso, costituiscono lo studio più accurato e di maggior dettaglio dell'intera zona prospiciente il Lago (Comune di Como, 1997 a). Inoltre, a partire dal 2002, l'area è stata indagata dall'Università dell'Insubria, con la realizzazione di numerose tesi e pubblicazioni scientifiche volte alla ricostruzione dell'evoluzione ambientale postglaciale (Capelletti, 2004, 2008; Comerci, 2004; Colmegna, 2006; Comerci *et al.*, 2007; Moretti, 2008; Ferrario,

2009; Tarzi, 2011; Frigerio, 2012). Infine, una revisione dei dati esistenti è contenuta nel nuovo PGT comunale (Comune di Como, 2011).

In sintesi, al di sotto della coltre di materiali di riporto antropico sono presenti sedimenti di natura alluvionale depositati dai corsi d'acqua, primariamente i torrenti Cosia e Valduce; ai margini esterni della convalle i depositi alluvionali si rinvengono in parziale eteropia con detriti di falda (Comune di Como, 1980). A profondità comprese tra i 15 e i 24 metri, si passa a depositi di origine palustre costituiti da limi sabbiosi e debolmente argillosi, con frequente presenza di sostanza organica e materiale vegetale; questa unità passa gradualmente ad argille limose inorganiche spesso laminate (varve?), di deposizione glaciolacustre. Infine, nei sondaggi più profondi si sono incontrati sedimenti più grossolani (sabbie e limi sabbiosi, definiti dagli Autori precedenti come “sabbie e ghiaie inferiori”) e riconducibili a depositi glaciolacustri prossimali.

Le caratteristiche principali delle varie unità sono di seguito sinteticamente descritte:

Materiali di riporto: eterogenei, con una certa prevalenza delle frazioni sabbiose e limose, di spessore generalmente compreso tra 1 e 3 metri, salvo che nella parte più vicina al Lago, dove superano i 10 metri. Si registra la presenza di pietrisco, frammenti di laterizi, legno e di resti fondazionali ed archeologici (Ghezzi & Landi, 1992). Questi materiali riflettono l'evoluzione storica della città: nel corso del tempo, la linea di costa è avanzata di diverse decine di metri, a partire dall'interramento dell'antico porto di Como (odierna piazza Cavour), realizzato artificialmente nel 1872.

Depositi alluvionali e di versante: sono presenti, sebbene con spessori variabili, sulla maggior parte dell'area urbana di Como; l'unità è di origine alluvionale e di versante ed è costituita essenzialmente da sabbie e ghiaie eterometriche con intercalazioni di limo, in cui sono immersi ciottoli, di natura gonfolitica o calcarea. Le sabbie, con intercalate lenti di limo torboso e talvolta di torba, prevalgono in genere nella zona ovest del lungolago, le ghiaie a est; la frazione limosa raggiunge al massimo il 36%. Si tratta di depositi poco uniformi, classificabili secondo la *Unified Standard Classification of Soil* come ghiaie ben gradate (GW), sabbie ben gradate (SW) o sabbie limose (SM).

Il limite inferiore con i limi palustri è erosivo e si rinviene a profondità variabile dai 15 ai 24 m; nella zona di confluenza dei conoidi dei torrenti Cosia e Valduce la potenza è di circa 25 m (Comune di Como, 1980, 1997b; Bini, 1993).

Depositi lacustri e palustri organici: limi organici sabbiosi e debolmente argillosi, localmente sabbia fine limosa (gruppo OL, OH); presenza di lenti di torba. Gli spessori risultano in progressivo aumento da S a N fino alla zona di lungolago. Sono stati rinvenuti fino a profondità variabili tra 23 m e 45 m; sono invece assenti nell'area dell'antico conoide del torrente Valduce. I limiti superiore ed inferiore dell'unità sono caratterizzati da notevole irregolarità dovuta a forme erosionali ed eteropiche (Ghezzi & Landi, 1992).

La granulometria è prevalentemente limosa; nella parte superiore del deposito la frazione accessoria più rappresentata è quella sabbiosa, mentre nella parte inferiore è quella argillosa. I valori del limite di liquidità LL sono mediamente superiori al 40%, l'indice di plasticità si attesta su valori relativamente bassi ($IP < 10$ %); in concordanza con l'origine recente e con l'assenza di sovraccarichi nella storia geologica del deposito, tali sedimenti sono caratterizzati dal comportamento tipico di un terreno normalmente consolidato (Comune di Como, 1997b). Questa unità si rinviene esclusivamente nella parte più depressa della convalle, dove il piano topografico è inferiore ai 220 m s.l.m. circa (cfr. § 6.4.2.; Figura 58).

Depositi glacio – lacustri distali: argille limose inorganiche grigio-verdi, di bassa plasticità (CL, ML); contengono abbondanti ciottoli subarrotondati e subangolari (*dropstones*). Rappresentano depositi distali di un lago proglaciale; nella parte più superficiale hanno struttura laminata e rare intercalazioni di limo sabbioso, che tendono ad aumentare con la profondità. La compressibilità è relativamente modesta, l'indice di attività medio è di 0,5 e le prove edometriche indicano un grado di normale consolidazione del deposito e una permeabilità verticale da bassa (coefficiente di permeabilità $k \cdot 10^{-6} \div 10^{-8}$ m/s) a molto bassa ($k < 10^{-8}$ m/s). Lo spessore relativamente potente suggerisce che il lago proglaciale ebbe una durata significativa e tassi di sedimentazione elevati (cfr. § 6.4.3.).

Depositi glacio – lacustri prossimali: limo sabbioso con abbondanti ciottoli; questa unità si ritrova a profondità superiori ai 60 m dal p.c., ad eccezione della zona di S. Agostino, dove risulta essere più superficiale. Il limite inferiore è posto ad oltre 170 m di profondità; nella zona ovest della convalle, a partire dai 100 m dal p.c., si evidenzia una sequenza ciclica di depositi fini e grossolani (cfr. § 6.3.1.2.; Allegato 3). A causa dell'elevata profondità, non si dispone di campioni e prove geotecniche. Questa unità rappresenta sedimenti glaciolacustri prossimali, depositi in vicinanza di una fronte glaciale e depositi fluvioglaciali.

La definizione della stratigrafia del sottosuolo è stata affinata nel tempo, grazie alla crescente disponibilità di dati accurati e ben distribuiti sul territorio. In particolare, le sezioni geologiche e stratigrafiche (§ 6.3.1.2.) consentono di valutare la distribuzione spaziale delle varie unità, permettendo inoltre di ricostruire in modo più dettagliato i processi e gli eventi che ne hanno influenzato la deposizione e l'evoluzione (§ 6.4.3.).

6.2.2. Idrogeologia

Lo studio dell'assetto idrogeologico di Como è stato oggetto negli anni passati di diversi lavori di ricerca (Ghezzi, 1972; Comune di Como, 1980; Beretta *et al.*, 1984, 1986; Croce *et al.*, 1987; Apuani *et al.*, 2000; Attardo, 2002).

Nell'area della città di Como si distinguono due acquiferi principali: il primo ha sede nei depositi alluvionali sabbioso-ghiaiosi olocenici che raggiungono una profondità massima di circa 25 m nella zona di confluenza dei conoidi dei Torrenti Cosia e Valduce; la trasmissività è dell'ordine di $2 \div 5 \cdot 10^{-3}$ m²/s e l'acquifero è alimentato direttamente dalle precipitazioni efficaci in grado di infiltrarsi nel sottosuolo e dalle perdite di subalveo dei corsi d'acqua locali. Il gradiente idraulico assume valori superiori al 5% in vicinanza dei contrafforti rocciosi e inferiori allo 0,5% nella fascia centrale della piana e in riva al Lago, dove si raggiunge la maggiore depressione piezometrica (Beretta *et al.*, 1986).

Il livello piezometrico, fortemente influenzato dalle oscillazioni del Lago e dalle precipitazioni atmosferiche, è sub-affiorante nei pressi del Lago e aumenta allontanandosi dalle rive lacustri; sussiste così, a scala locale, una concordanza tra l'andamento della superficie topografica e quella freatica (Comune di Como, 1980). Come anticipato in precedenza (§ 6.1.1.5.), la falda superficiale defluisce da SE verso NO, avendo come recapito finale il bacino lacustre; questo andamento risulta in contrasto con le dinamiche idrogeologiche regionali, che vedono la falda fluire da nord a sud.

Il secondo acquifero, più profondo, risiede nei sedimenti glaciolacustri grossolani, che si ritrovano generalmente a profondità dai 50 ÷ 60 m fino a oltre 170 m. La trasmissività si attesta su $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Gli apporti derivano dai versanti montani circostanti, in quanto l'elevato spessore di depositi limoso-argillosi sovrastanti impedisce afflussi diretti dalla superficie. In questo caso i tempi di risposta agli apporti meteorici risulteranno molto più lunghi ed i percorsi dell'acqua di ricarica molto più complessi.

Lo strato semipermeabile - impermeabile che separa i due acquiferi è costituito dai limi palustri e dalle argille glaciolacustri (Beretta *et al.*, 1986). La falda profonda si articola in realtà su più livelli più o meno continui, corrispondenti alle porzioni più grossolane dei sedimenti tardoglaciali. Il quadro relativo alle modalità di ricarica non è chiaro, in quanto non sono quantificati i contributi delle varie tipologie di apporti presunti (versanti carsici, Lago, precipitazioni, ecc.).

Nella zona del lungolago, il tetto dell'acquifero si approfondisce spostandosi da est verso ovest (Comune di Como, 1997b; Apuani *et al.*, 2000); ciò potrebbe essere ricondotto alla diversa quantità di materiale grossolano depositato dal Cosia (ad ovest della conca) e dal Valduce (ad est della conca) prima di entrare nel Lago.

6.2.3. Il fenomeno della subsidenza

La subsidenza rappresenta un graduale abbassamento della superficie topografica, che può essere accompagnato da piccoli movimenti orizzontali e che comprende processi di varia origine ed estensione spaziale e temporale; la velocità di spostamento è di solito abbastanza lenta (ma non mancano casi ad evoluzione rapida) e le alterazioni ambientali che ne conseguono possono essere di varia natura (Prokopovich, 1986).

L'area urbana di Como risulta particolarmente sensibile nel favorire l'instaurarsi di cedimenti nel terreno a causa del peculiare assetto del sottosuolo, costituito da elevati spessori di sedimenti quaternari interessati da consistente presenza di argille e limi normalmente consolidati e da limi organici con torbe aventi spessori fino a 40 metri. La città è quindi soggetta ad una subsidenza naturale, che decorre su scale di tempi geologici con tassi dell'ordine di qualche mm annuo (fino a $2,5 \div 3 \text{ mm/anno}$ nella zona della Città Murata più prossima al Lago; Comerci, 2004; Comerci *et al.*, 2007); a questa si è sovrapposta, nel secondo dopoguerra, una subsidenza antropica, causata principalmente dall'eccessivo emungimento dall'acquifero profondo e caratterizzata da tassi di abbassamento massimi di 20 mm/anno.

Cedimenti e dissesti furono segnalati già all'inizio del Novecento, ma è nel 1974 che, a causa degli episodi sempre più frequenti ed estesi, il Comune istituì un *Comitato scientifico per lo studio dei fenomeni di subsidenza*, che studiò la situazione nell'ottica di caratterizzare i fenomeni di cedimento delle infrastrutture, accertarne le cause e individuare possibili azioni di rimedio (Comune di Como, 1980). A seguito delle azioni intraprese, tra cui la cessazione dell'estrazione di acqua dalla falda profonda, si è rilevata una consistente diminuzione dei tassi di abbassamento, con ritorno a valori tipici della subsidenza naturale.

Il processo di subsidenza è stato studiato in modo molto approfondito e interdisciplinare; i risultati, ottenuti mediante modalità investigative indipendenti, indicano che i cedimenti massimi si registrano nella zona a Lago e decrescono verso le zone periferiche della convalle (Ascheri, 1972; Arca & Cardini, 1984; Giussani, 1997; Bonci *et al.*, 2004; Barzaghi *et al.*, 2011).

Il tasso di subsidenza naturale è legato alla composizione litologica dei materiali presenti nel sottosuolo; le argille e i limi di età quaternaria, dotati in generale di un indice dei vuoti superiore a quello degli analoghi sedimenti pliocenici o miocenici, sono destinati a subire assestamenti in misura tale che il loro indice dei vuoti diminuisca con il tempo; si possono così originare fenomeni di subsidenza anche accelerata, per consolidazione (Cancelli, 1996).

Le proprietà geotecniche delle formazioni, relativamente giovani, che hanno riempito il bacino sedimentario di Como lasciano presupporre che l'area sia stata interessata fin da tempi geologici da assestamenti rilevanti per consolidazione. I tassi di subsidenza naturale degli ultimi 17.000 anni, stimati su basi geologiche mediante dati stratigrafici, studi paleogeografici e datazioni radiometriche, sono esposti nella Figura 36 (Comerci *et al.*, 2007).

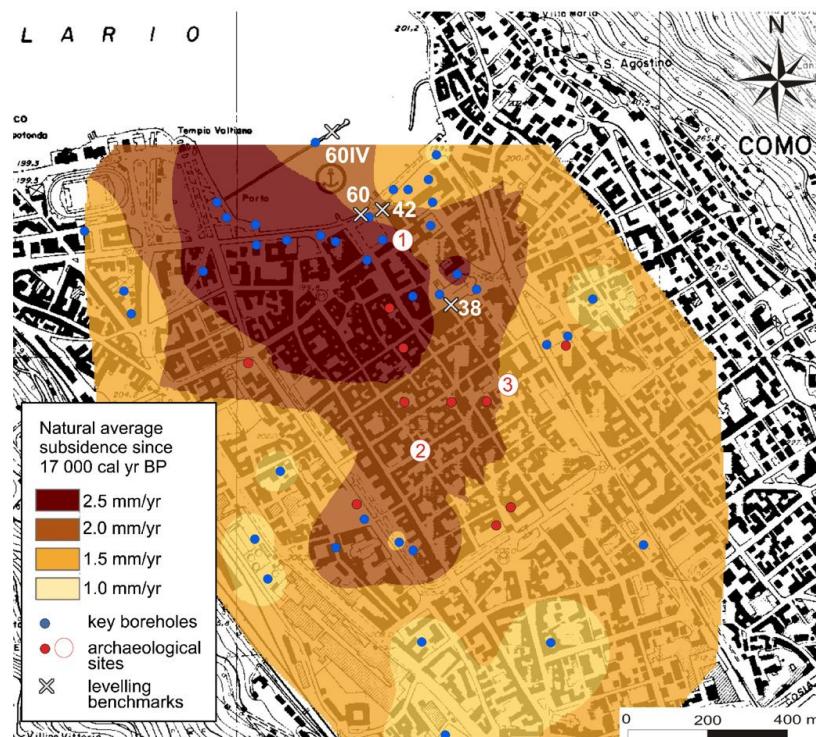


Figura 36 : Tassi di subsidenza naturale nell'area urbana di Como a partire dal Tardoglaciale stimati sulla base di dati stratigrafici. Da Comerci *et al.*, 2007.

La stima dei tassi di subsidenza storici, e in particolare quelli degli ultimi 100 ÷ 150 anni, può essere condotta sulla base delle livellazioni geometriche di precisione: a partire dalla fine dell'Ottocento, si sono infatti susseguite una decina di rilevazioni, che hanno monitorato nel tempo le variazioni di quota della superficie topografica (Arca & Cardini, 1984; Cancelli, 1986, 1996). Le ultime livellazioni in ordine di tempo sono state realizzate nel 1997 dal Politecnico di Milano (Giussani, 1997), nel 2004 da APAT (oggi ISPRA; Bonci *et al.*, 2004) e nel 2011 di nuovo dal Politecnico di Milano (esclusivamente nella zona del lungolago; Barzaghi *et al.*, 2011). I dati delle livellazioni sono stati integrati con dati satellitari PSInSAR (interferometria radar differenziale da satellite), portando a risultati in accordo reciproco (Comerci, 2004). Per una disamina dei dati più recenti e delle interazioni con i lavori per la costruzione delle opere antiesondazione, si rimanda al successivo § 6.3.3.

Gli abbassamenti del terreno possono essere quantificati anche mediante l'analisi di dati archeologici: infatti, tra la notevole mole di reperti di età romana rinvenuti nell'area urbana di Como, molti testimoniano che la

quota del piano di calpestio nelle diverse epoche del passato si trovava circa $2,5 \div 3$ metri più in basso rispetto all'attuale piano campagna (Comerci, 2004).

Un metodo del tutto indipendente per la stima degli abbassamenti del suolo è stato sviluppato a partire dalle serie idrometriche pluridecennali degli strumenti di Como Lungo Lario, fondato su sedimenti soggetti a compattazione, e Como Villa Geno e Malgrate, fondati in roccia. Il tasso di subsidenza stimato attraverso questa tipologia d'indagine risulta di circa 3,65 mm/anno in media per il periodo 1978 $\div$ 1988 (Moretti, 2008), concorde con quanto ricavato dalle livellazioni di precisione: ciò conferma la validità sperimentale del metodo e fornisce una nuova base per poter monitorare i processi di cedimento del suolo.

In generale, si è riconosciuto che i valori massimi di velocità di abbassamento si sono verificati nel periodo 1955 $\div$ 1975, raggiungendo i 20 mm/a, (Arca & Beretta 1985); negli anni successivi, i tassi di subsidenza sono diminuiti, fino ad assestarsi sull'ordine di qualche mm annuo nella zona di Piazza Cavour e della Diga Foranea, in attenuazione verso l'esterno della convalle.

Movimenti positivi si riscontrano invece su tutti i rilievi esterni all'area urbana di Como. Sui monti di Brunate, ad esempio, sono stati rilevati sollevamenti fino a 2 mm/a. Tali dati sono in linea con il sollevamento a carattere regionale, noto in letteratura (§ 4.3.), che caratterizza l'intera fascia prealpina; si può pertanto affermare che il fenomeno della subsidenza di Como è circoscritto alla depressione morfologica su cui sorge la città, ed è quindi originato da fattori e processi locali (Bonci *et al.*, 2004).

Al monitoraggio dei movimenti dei terreni possono contribuire anche gli assestimetri, in grado di rilevare le variazioni di quota di punti materializzati sulla superficie topografica e nel sottosuolo. Nell'area urbana di Como sono presenti 2 assestimetri, uno installato nel 1997 sulla Diga Foranea e l'altro collocato in Piazza Verdi nel 2005 nell'ambito del progetto C.D.P.; tuttavia, le rilevazioni attualmente disponibili non sono sufficientemente estese per consentire di valutare adeguatamente le tendenze evolutive dei fenomeni in atto.

6.3. Dati sperimentali

I dati sperimentali raccolti nel corso del presente progetto di ricerca afferiscono sostanzialmente a due differenti ambiti geologico – ambientali: quello stratigrafico – geotecnico (§ 6.3.1.) e quello idrogeologico (§ 6.3.2.).

In particolare, la disponibilità di stratigrafie di estremo dettaglio, corredate da numerose prove geotecniche, ha consentito la ricostruzione dell'assetto stratigrafico del sottosuolo mediante profili geologico-tecnici; il continuo monitoraggio della rete piezometrica comunale e dei parametri idrologici del bacino lacustre ha permesso di caratterizzare più in dettaglio il comportamento delle falde acquifere e di ipotizzare un modello concettuale per la spiegazione di alcune anomalie idrogeologiche precedentemente identificate. Infine, sono stati approfonditi alcuni aspetti relativi alla presenza di lineamenti strutturali di importanza regionale, in particolare il Retroscorrimento di Monte Olimpino.

6.3.1. Dati stratigrafici e geotecnici

Elemento cardine per la ricostruzione dell'assetto del sottosuolo sono le indagini condotte nel 2005 in Piazza Verdi, che comprendono la perforazione di due sondaggi profondi e l'esecuzione di molteplici analisi afferenti a varie discipline, riassunte nella Tabella 24. I fori di sondaggio sono poi stati attrezzati con un assestometro magnetico e un piezometro per il monitoraggio della falda profonda (RCT, 2005).

	Sv1	Sv2
Data di realizzazione	10.10.05 – 21.10.05	25.10.05 – 16.11.05
Profondità raggiunta (m da p.c.)	70	65
Prove geotecniche in foro	SPT, prove di permeabilità, prove di taglio in foro con scissometro	/
Campionamenti	Prelievo di campioni indisturbati a scopo geotecnico in fustelle di acciaio (campionatore Osterberg nei terreni fini); prelievo di campioni rimaneggiati in contenitori di plastica	Prelievo tramite campionatore di ottima qualità (campionatore triplo) dell'intera porzione di sequenza stratigrafica comprendente terreni a granulometria fine
Indagini condotte	Analisi stratigrafica, datazioni ¹⁴ C, analisi paleobotaniche, analisi preliminare sulle diatomee	Analisi stratigrafica, datazioni ¹⁴ C, analisi geofisiche, analisi palinologiche
Strumentazione installata	Piezometro tipo Casagrande nel tratto inferiore per il monitoraggio della falda profonda	Assestometro magnetico per il rilevamento in sito delle deformazioni, a diverse quote, dell'ammasso di terreno

Tabella 24 : Principali caratteristiche dei sondaggi Sv1 e Sv2 realizzati in Piazza Verdi nell'ambito del progetto C.D.P.; modificata da Ferrario, 2009.

I sedimenti prelevati nei due sondaggi di Piazza Verdi costituiscono, nel contesto delle intere Alpi meridionali, un eccezionale e unico archivio biologico e geologico presumibilmente continuo della storia ambientale compresa tra l'ultima fase glaciale e l'età moderna. L'obiettivo dell'analisi integrata e multidisciplinare dei dati stratigrafici, geotecnici, palinologici, paleobotanici e geochimici, tuttora in corso, è la ricostruzione dell'evoluzione ambientale per un arco cronologico estremamente ampio e fino ad oggi mai indagato con un simile dettaglio. In particolare, le analisi paleobotaniche permettono di identificare in modo completo e dettagliato le caratteristiche vegetazionali del passato e l'impatto antropico sul paesaggio vegetale; invece, le analisi geotecniche e geochimiche si rivelano fondamentali soprattutto per i sedimenti più antichi, sterili a causa delle condizioni di sedimentazione in ambiente periglaciale.

Tutti i dati relativi ad altri siti nell'area urbana di Como sono quindi stati confrontati e "tarati" sulla base dei risultati ottenuti nel sito di Piazza Verdi, localizzato al centro della convalle e vincolato cronologicamente mediante datazioni radiometriche.

Il *database* disponibile presso l'Università dell'Insubria consta di circa 300 stratigrafie relative a sondaggi geognostici e pozzi per acqua realizzati nella città di Como a partire dall'inizio del Novecento. La varietà delle fonti e degli scopi per cui sono stati realizzati i sondaggi determina gradi di dettaglio molto diversi e una conseguente scarsa omogeneità dei dati. I sondaggi a miglior risoluzione e con profondità rilevanti risultano essere quelli realizzati dall'Università (piazza Verdi), dal Comune di Como per l'impostazione del Progetto di difesa dalle esondazioni del Lago (Comune di Como, 1997 a) e dalla Commissione per lo studio dei fenomeni di subsidenza (Radaelli & Castellotti, 1975). I pozzi per acqua realizzati perlopiù tra gli anni '50 e '70 del Novecento raggiungono profondità molto elevate, localmente superiori ai 150 metri, ma presentano un dettaglio stratigrafico abbastanza limitato, coerentemente alla finalità delle perforazioni.

Alcune zone, quali il lungolago, il Duomo e Sant'Abbondio, sono state nel tempo meglio indagate e permettono elaborazioni di maggior dettaglio e precisione.

La Figura 37 presenta l'ubicazione delle verticali di sondaggio analizzate e le tracce dei profili stratigrafici e geologico-tecnici realizzati.

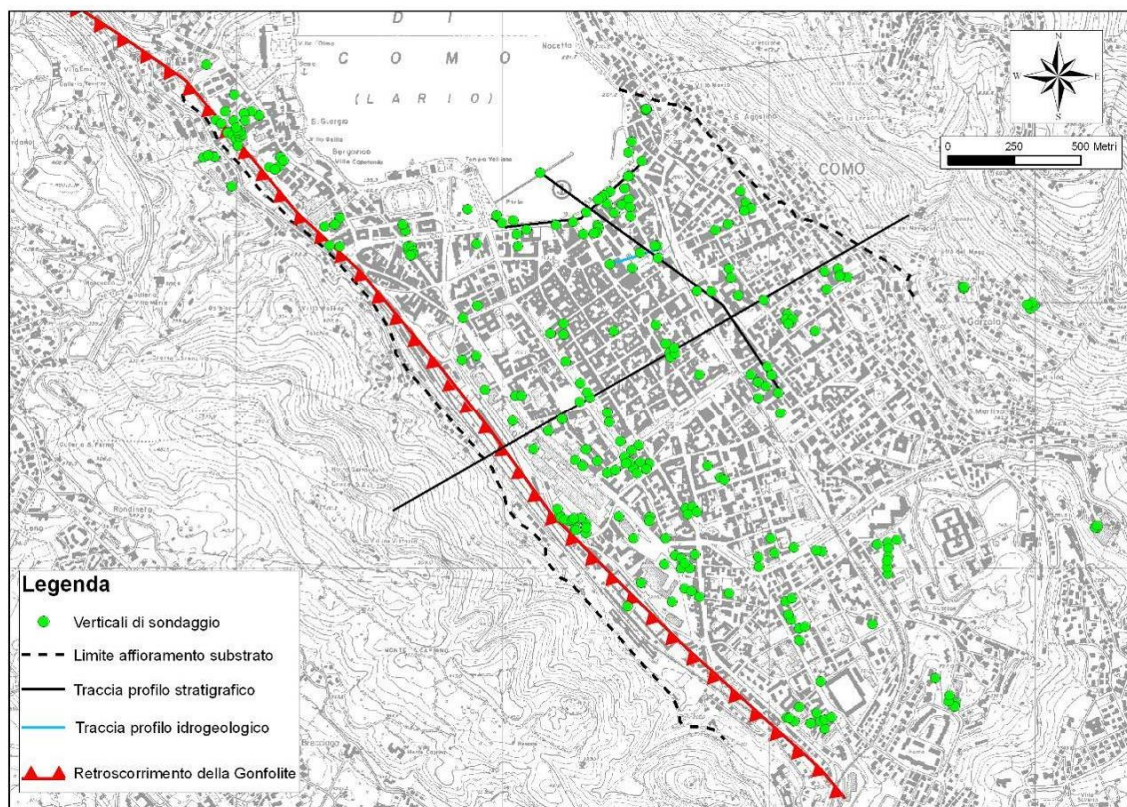


Figura 37 : Ubicazione delle verticali di sondaggio analizzate e traccia dei profili stratigrafici realizzati; si riporta anche il limite degli affioramenti rocciosi del substrato e la traccia del Retroscorrimento di Monte Olimpino. La mappa è stata sviluppata sulla base della C.T.R. della Regione Lombardia.

6.3.1.1. I sondaggi di Piazza Verdi: risultati delle analisi multidisciplinari

Come anticipato in fase di premessa, i sondaggi di maggior dettaglio disponibili sono i due carotati dall'Università dell'Insubria in Piazza Verdi; la descrizione litostratigrafica dei sondaggi conferma ampiamente quella riportata nel § 6.2.1., individuando 5 fasi distinte (le profondità si riferiscono al sondaggio Sv2):

- **Riporto antropico:** compreso tra circa 3 e 5,5 metri, è costituito da clasti, alcuni dei quali di Calcare di Moltrasio, immersi in una matrice argillosa o sabbiosa, e da resti archeologici.
- **Fase fluviale e alluvionale:** presente a profondità comprese tra 5,5 e 17,5 metri; caratterizzata prevalentemente da conglomerati e livelli di ciottoli, con saltuaria presenza di sabbia e limo.
- **Fase palustre-lacustre:** costituita da livelli di sabbia, limo e argilla. Il limite superiore di questa fase è a circa 17,5 m, mentre quello inferiore si trova tra 32,40 e 33,05; tale limite verrà determinato con precisione in base al limite della presenza di macroresti vegetali.

- **Fase glacio-lacustre:** presente fino alla profondità di 61,5 metri; predominanza di argille e presenza di alcuni livelli sabbiosi; nelle argille sono visibili alcune laminazioni.
- **Fase glacio-lacustre grossolana:** da circa 61,5 m fino alla base della carota (65 m circa); sedimenti glaciolacustri costituiti principalmente da sabbie.

Nel corso del sondaggio Sv1 sono stati prelevati oltre 90 campioni, parte indisturbati e parte rimaneggiati, che sono poi stati sottoposti ad analisi geotecniche di laboratorio da ISPRA (ex APAT). I parametri indagati comprendono: densità della parte solida, peso di volume, umidità naturale, contenuto in carbonati, saturazione, indice dei vuoti, porosità, tenore organico, viscosità e consolidazione secondaria.

In cantiere, sono state eseguite in foro prove penetrometriche dinamiche, prove scissometriche e prove di permeabilità. Sulle carote appena estratte, si è proceduto allo svolgimento sistematico di determinazioni di resistenza alla penetrazione della punta del penetrometro tascabile (*pocket penetrometer*) e prove di resistenza al taglio (di picco e residua) tramite scissometro tascabile (tipo Geonor H60).

Infine, sono state condotte alcune datazioni radiometriche e sono stati identificati e studiati i macroresti vegetali, attraverso la collaborazione con il Laboratorio di Archeobiologia del Museo civico Giovo (Motella, 2007).

Sul sondaggio Sv2 sono state condotte numerose analisi di carattere geofisico, in collaborazione con varie istituzioni e università, tuttora in corso:

- analisi della radioattività naturale mediante il metodo *Gamma Ray* in collaborazione con la Regione Lombardia;
- analisi multiparametrica presso l'istituto ETH con *Multi-sensor core logger* GEOTEK, che permette di misurare tramite una scansione continua e non distruttiva di alta precisione l'attenuazione dei raggi gamma, il tempo di propagazione delle onde P e la suscettività magnetica;
- analisi geochemiche e paleomagnetiche presso le Università di Postdam e Aachen (*Neotectonics & Natural Hazards Group*);
- analisi paleobotaniche sui sedimenti di origine palustre, in corso di svolgimento presso l'Istituto di Scienze Botaniche dell'Università di Berna (palinologia) e il Laboratorio di Archeobiologia dei Musei Civici di Como (macroresti);
- datazioni al radiocarbonio su campioni prelevati a profondità comprese tra i 18 e i 31 m dal p.c.

L'insieme degli elementi indagati evidenzia concordemente una decisa discontinuità nella tipologia dei sedimenti e nell'ambiente di deposizione in corrispondenza della profondità di 32 m circa, dove si segnala il passaggio tra depositi di due differenti ambienti deposizionali: quello di un bacino glaciolacustre, riconducibile ad un lago proglaciale relativamente ampio e profondo, impostatosi a valle del fronte del ghiacciaio in condizioni climatiche ancora fredde e aride, e quello di un bacino lacustre prossimale, poco profondo, impostatosi in presenza di una fitta copertura vegetale e clima temperato-umido.

Tale drastica variazione dell'ambiente di sedimentazione è ben rilevata dalla distribuzione dei parametri geofisici e geotecnici.

La prospezione della radioattività naturale evidenzia tre pacchi di sedimenti con diverse *facies* radiogeniche, confermando la netta variazione nella composizione granulometrica e nel contenuto in sostanza organica che contraddistingue la sequenza prevalentemente fine riscontrata con le perforazioni al di sotto dei depositi torrentizi:

- tra i 16,5 e i 29,5 m dal p.c. a valori relativamente elevati del *Gamma Ray* si associa un alto contenuto in sostanza organica riconosciuto tramite l'esame macroscopico dei carotaggi;
- tra i 29,5 e i 48 m si incontrano i valori massimi tipici di sedimenti fini e omogenei;
- da 48 m sino a fondo foro, i valori diminuiscono sensibilmente, evidenziando nel contempo una forte variabilità puntuale; questa risposta è rappresentativa di una rilevante eterogeneità granulometrica: siamo infatti in corrispondenza delle alternanze di livelli sabbiosi e limosi, con sottili intercalazioni di ghiaie fini.

Le misurazioni dei valori di suscettività magnetica svolte presso l'istituto ETH mostrano che i valori sono generalmente molto variabili e presentano una certa uniformità soltanto nell'ambiente palustre-lacustre e tendenza alla diminuzione. Al passaggio tra palustre-lacustre e glaciolacustre il segnale raggiunge i massimi valori. Il valore della densità ha caratteristiche simili ma tende ad aumentare nella fase palustre-lacustre e nella glaciolacustre.

Questi dati necessitano di ulteriori approfondimenti e confronti con i dati geochimici in corso di elaborazione per poter essere correlati a variazioni nell'ambiente di sedimentazione e/o di composizione chimica del sedimento.

Le prove geotecniche, condotte in numero statisticamente significativo, hanno consentito di definire in modo pressoché puntuale la variabilità dei principali parametri fisici e la relativa discontinuità nei processi di sedimentazione. La Figura 38 presenta l'andamento di alcuni parametri (densità naturale del terreno, peso specifico dei granuli e tenore di sostanza organica) in funzione della profondità.

Per quanto riguarda la densità naturale, si distinguono due ampi intervalli di profondità con andamenti significativamente diversi. In quello inferiore (da 35 a 70 m) i valori di densità, pur dimostrando una certa dispersione, spiegabile con la natura dei depositi e le diverse metodologie di campionamento, si dispongono in forma abbastanza coerente, evidenziando una netta correlazione con la quota di prelievo. La densità naturale in posto aumenta progressivamente con l'incremento di profondità, passando da valori medi di 17,5 kN/m³, a -35 m dal p.c., a circa 22 kN/m³, attorno ai 65 m dalla superficie. Nel tratto superiore (da 17 m a circa 30 m dal p.c.), i singoli valori risultano invece dispersi in un campo relativamente ampio di valori compresi tra 15 e 20 kN/m³.

Il peso specifico γ_s presenta un andamento pressoché omogeneo tra i 70 e i 35 m dal p.c., con valori che si attestano sui 28 kN/m³. Tra i 35 e i 30 m si rileva una repentina diminuzione dei valori, molto più dispersi, che si collocano tra 26 e 27 kN/m³.

Anche il tenore percentuale in sostanza organica rivela un deciso mutamento nell'ambiente di formazione del deposito. Tra i 70 e 50 m dal p.c., il contenuto organico è molto basso, nell'ordine dello 0,2 ÷ 0,4%, e pressoché costante. Risalendo, dai 50 m di profondità il grafico evidenzia un aumento del contenuto percentuale di sostanza organica, con andamento graduale (da 1% a -45 m a circa 2% nell'intorno dei -30 m). I campioni prelevati a quote poco superiori dimostrano, al contrario, una distribuzione molto varia e irregolare, con tenori compresi tra 0,5% e 6%.

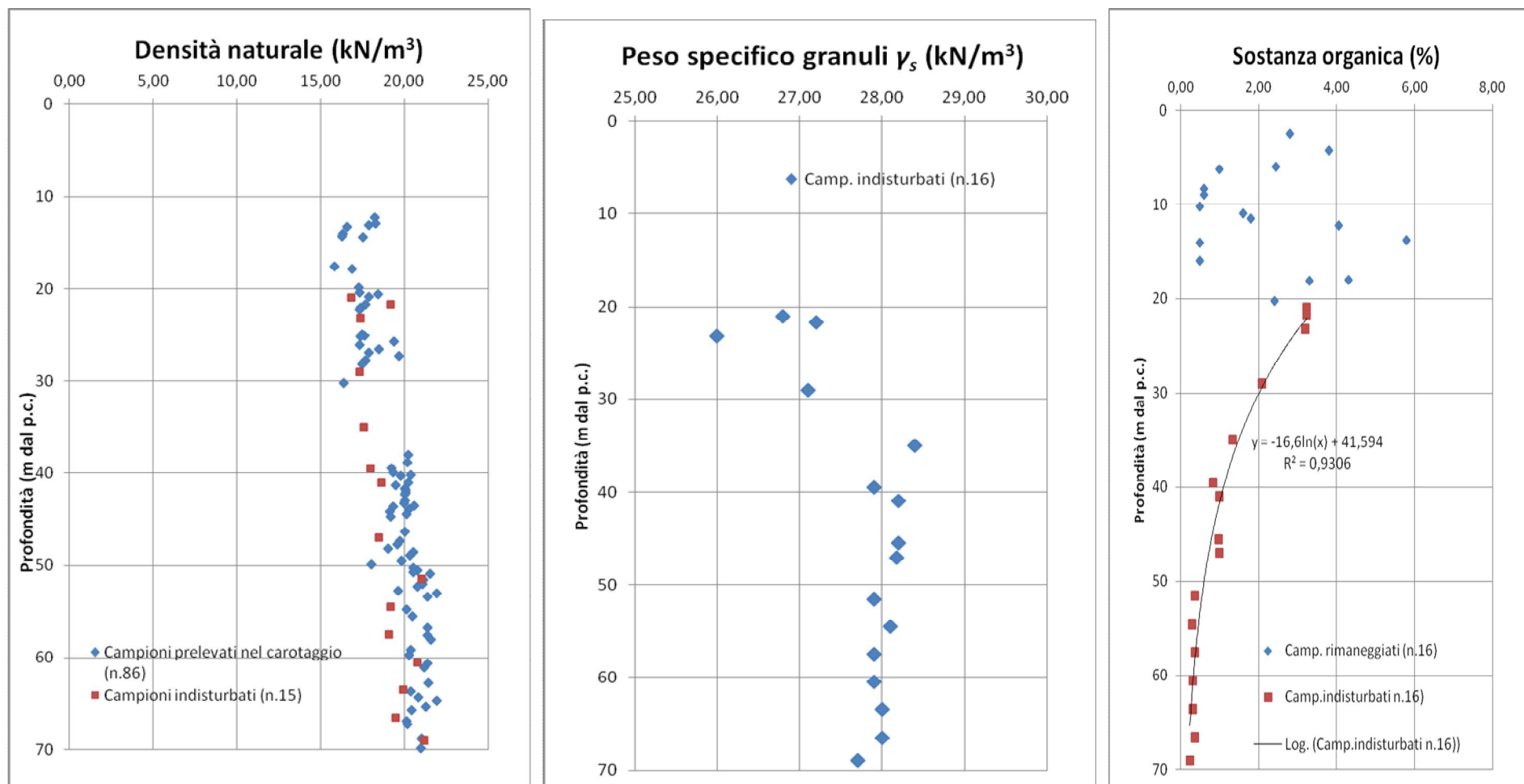


Figura 38 : Andamento di densità naturale, peso specifico dei granuli e tenore di sostanza organica in funzione della profondità nel sondaggio Sv1 di Piazza Verdi.

Risulta evidente la netta discontinuità alla profondità di circa 30 m dal piano campagna.

Il comportamento meccanico dei terreni riflette naturalmente la genesi e le caratteristiche dei depositi: alcuni campioni dei sedimenti recenti di età olocenica evidenziano, fra i 25 e i 30 m, un grado di sovraconsolidazione che assume un importante significato per la storia evolutiva poiché potrebbe essere ricondotto a oscillazioni del livello freatico e a sporadiche emersioni, con formazione di croste essiccate di estensione limitata (Comune di Como, 1980). È importante sottolineare che il consolidamento e la riduzione di volume dei sedimenti (con conseguenti fenomeni di abbassamento della superficie topografica), in relazione al contesto geologico-ambientale, all'età molto recente della sequenza e alle caratteristiche riscontrate con i sondaggi, sono determinati dal semplice accumulo di nuovi sedimenti sui depositi precedenti, anche a prescindere da eventuali azioni antropiche. Il decorso di tali fenomeni è estremamente lento in funzione della composizione granulometrica e delle caratteristiche idrogeologiche dei terreni: infatti, il loro sviluppo naturale può procedere, con diretto riferimento agli elevati spessori riscontrati, per migliaia – decine di migliaia di anni.

I macroresti vegetali (legni, carboni, muschi e frammenti di frutti, semi e foglie; $> 500 \mu\text{m}$) sono presenti esclusivamente al di sopra dei 30,80 m di profondità in Sv1 e 32,83 m in Sv2. L'analisi dei macroresti ha consentito di stabilire (Motella, 2007) che l'ambiente deposizionale è stato costante nel tempo, con tassi di sedimentazione di circa 2 mm/a, ed equivalenti tassi di subsidenza; tra 17 e 32 metri di profondità si segnalano ripetuti episodi di trasporto colluviale che hanno coinvolto i versanti della convalle coperti da vegetazione boschiva.

Le analisi palinologiche condotte finora hanno portato alla realizzazione del diagramma pollinico di Figura 39 (Martinelli, 2012 a, b) che permette di delineare l'evoluzione vegetazionale dell'area.

Nella parte più profonda finora indagata (34,90 ÷ 32,94 m dal p.c.) predomina una vegetazione arbustiva ed erbacea (*Juniperus*, *Poaceae*, *Artemisia*), tipica di un contesto climatico di tundra – steppa. Tra i 32,89 e i 32,50 m si ha una vegetazione costituita da foreste di *Pinus* affiancato da piante tipicamente mesofile (*Quercus*, *Abies alba*, *Corylus*, *Tilia*, *Ulmus*), per poi tornare a condizioni fredde (tundra – steppa), fino a 32,03 m dalla superficie.

Tra i 31,92 e i 30,84 m si ha un'assoluta dominanza di *Pinus sylvestris/mugo* e *Betula*, indice di foresta continentale; l'assenza di arbusti suggerisce che la foresta era compatta.

Successivamente, tra i 30,62 e i 22,55 m, la comparsa e il progressivo aumento di latifoglie mesofile (quercia, nocciolo, ontano) e dell'abete bianco indicano un miglioramento climatico; per lungo tempo permane una foresta mesofila mista, con presenza di segnali di disturbo antropico (ad es. aumento di arbusti causato dalle attività di diboscamento) soprattutto a partire da 27,11 m. A partire da 30,54 m si nota la presenza di alcuni granuli di specie mediterranee (soprattutto ulivo) in modo intermittente lungo la sequenza: probabilmente a livello locale vi erano delle aree caratterizzate da un microclima sub-mediterraneo che ne permetteva lo sviluppo. Tra i 22,42 e 18,33 m si diffonde il faggio, che sostituisce l'abete bianco, praticamente estinto a livello regionale a causa di diboscamenti e incendi di origine antropica; la diffusione del faggio fu forse favorita anche da un abbassamento della temperatura e dall'aumento dell'umidità. Un segnale di impatto antropico in questa parte della sequenza è presente in corrispondenza di un calo di presenza del faggio con corrispondente aumento di ontano: quest'ultima è una specie pioniera che colonizza rapidamente aree diboscate. L'aumento della pressione antropica è poi particolarmente evidente a partire da 19,55 m, in corrispondenza dell'aumento di piante coltivate (cereali), di uso alimentare (vite, olivo) e tipiche di ambienti ruderali (acetosa e artemisia).

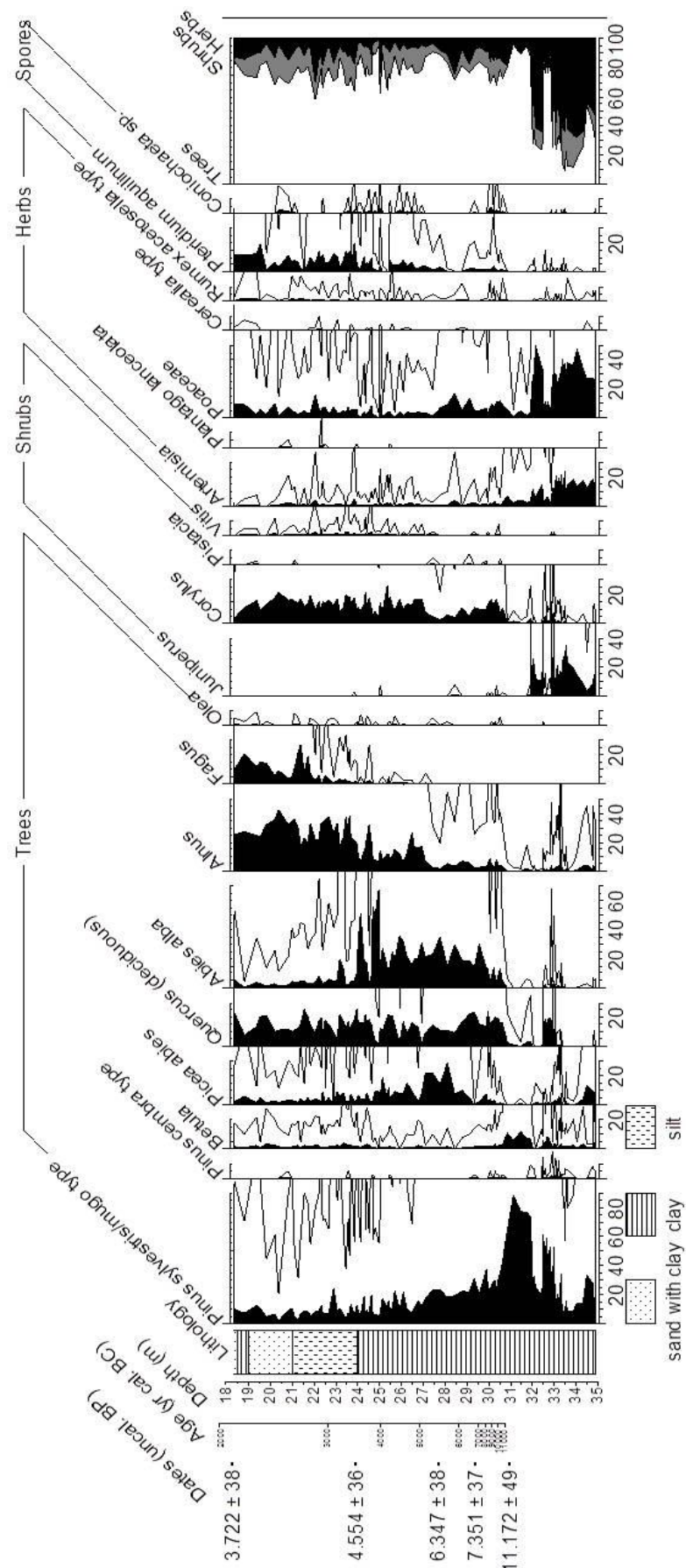


Figura 39 : Diagramma pollinico per il sondaggio Sv2 di Piazza Verdi; sono segnalate anche litologia e datazioni radiometriche.

6.3.1.2. Profili stratigrafici e geologico-tecnici

Nell'ambito delle ricerche preliminari per la realizzazione delle opere di difesa dalle esondazioni del Lago, nel 1997 venne condotta un'ampia e articolata indagine nella zona di Piazza Cavour e del lungolago, comprendente la trivellazione di 10 sondaggi geognostici a carotaggio continuo spinti fino a 60 m dal p.c. e l'esecuzione in foro di prove di permeabilità (tipo Lefranc), di resistenza alla penetrazione (tipo SPT) e di prove penetrometriche con piezocono (prove CPTU). Inoltre, sugli oltre 100 campioni prelevati, furono eseguite analisi di laboratorio mirate alla valutazione di granulometria, limiti di plasticità, contenuto di acqua, peso unitario, prove di compressione edometrica e di resistenza alla compressione e al taglio.

All'interno dei fori di sondaggio vennero installati dei piezometri per il monitoraggio della falda superficiale e profonda (S1 ÷ S9); inoltre il sondaggio S10 (Diga Foranea) fu equipaggiato con un assestometro magnetico.

L'acquisizione, avvenuta solo recentemente, della Relazione tecnica emessa dalla società So.Ge.Tec. (Comune di Como, 1997 a) ha permesso di implementare la definizione dei rapporti stratigrafici e delle proprietà geotecniche relative alle varie unità presenti nel sottosuolo; in particolare, la disponibilità di questi dati ha reso possibile l'elaborazione di profili stratigrafici e geologico-tecnici con un dettaglio notevolmente più accurato rispetto agli studi precedenti.

I profili sono stati definiti integrando i dati appena citati con quelli già presenti nell'archivio dell'Università e con quelli relativi ad una nuova campagna di indagine realizzata nel 2010 per ampliare la rete di monitoraggio della falda freatica nella zona del lungolago (RCR, 2010).

Le sezioni presentate nell'Allegato 4 sono state costruite utilizzando unità stratigrafiche create *ex-novo*, ma che riprendono, in linea generale, quelle definite dagli Autori precedenti, integrando alcuni aspetti innovativi, emersi dall'analisi congiunta e multidisciplinare della notevole mole di dati a disposizione (Frigerio, 2012).

Le principali caratteristiche fisiche e meccaniche delle unità stratigrafiche sono riassunte nella Tabella 25:

	Riporto	Orizzonte alluvionale	Orizzonte palustre	Orizzonte glaciolacustre inorganico
Resistenza alla penetrazione (SPT) (colpi / 30 cm)	< 5	6 ÷ 15		
Resistenza alla punta (<i>pocket penetrometer</i>) (kPa)			20 ÷ 30	150 ÷ 400
Peso di volume naturale (kN/m ³)	18 ÷ 19	17 ÷ 18,5	16 ÷ 18	17,5 ÷ 22
Coefficiente di permeabilità k (m/s)	10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻⁶	10 ⁻² ÷ 10 ⁻⁸	10 ⁻⁶ ÷ 10 ⁻⁸	10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻⁸
Angolo di resistenza al taglio (°)		32 ÷ 35	26 ÷ 32	24 ÷ 38
Coesione c' (kPa)		0	10 ÷ 30	10 ÷ 40

Tabella 25 : Parametri rappresentativi delle caratteristiche fisiche e meccaniche delle unità stratigrafiche presenti nel sottosuolo di Como. I dati derivano dall'integrazione delle analisi svolte in Piazza Verdi con quelli contenuti nel nuovo PGT comunale (Comune di Como, 2011).

- **Unità 1:** *Riporto antropico, materiale rimaneggiato e terreno di età storica. Stato del deposito sciolto / poco consistente. Comportamento geotecnico improntato dalla presenza della frazione fine. Permeabilità bassa o medio-bassa. Età storica.*

Comprende il riporto antropico chiaramente individuabile all'interno delle stratigrafie, perché espressamente citato come “detrito di riporto” o per la presenza di laterizi, e i depositi riferibili all'età storica, caratterizzati da proprietà meccaniche generalmente scadenti e identificati sulla base delle prove CPTU.

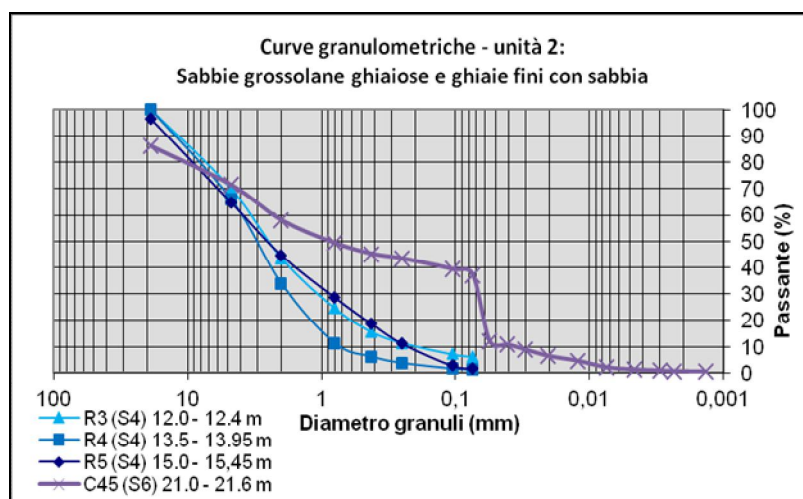
Lo spessore è molto variabile e generalmente di pochi metri nei settori più esterni della convalle; verso Lago, invece, l'unità forma un cuneo che si ispessisce notevolmente fino ad un massimo di circa 15 metri nella zona di Piazza Cavour e di 24 metri nel sondaggio realizzato sulla Diga Foranea. I terreni di riporto possono derivare dal rimaneggiamento in loco di terreni esistenti o dall'accumulo antropico di terreno per compensare il fenomeno di subsidenza o per avanzare la linea di costa (cfr. Allegato 3).

- **Unità 2:** *Sabbie grossolane ghiaiose e ghiaie fini con sabbia; presenza di rari ciottoli. Stato del deposito sciolto / poco addensato. Comportamento di tipo granulare. Permeabilità medio-alta. Olocene – Età storica.*

Questo orizzonte, riconducibile a deposizione fluviale e alluvionale operata primariamente dai Torrenti Cosia e Valduce, è presente in modo discontinuo a profondità generalmente comprese tra i 10 e i 20 metri; localmente la sua potenza supera la decina di metri, in corrispondenza di un antico conoide del T. Valduce (Bini, 1993). L'unità è identificabile anche grazie alle prove CPTU, che evidenziano sedimenti grossolani. Una sezione di qualche metro di spessore, analizzata da Bini & Castelletti (1986) presso piazza Roma, mostra la presenza di depositi deltizi attribuiti al T. Cosia, con strati immergenti verso N-NE di $30 \div 40^\circ$; al tetto di tali sedimenti, si rinvenivano dapprima depositi di spiaggia e in seguito depositi lacustri. La causa della progradazione dei sedimenti lacustri su quelli fluviali è da attribuire, secondo gli Autori, alla subsidenza o ad una possibile deviazione del corso d'acqua alimentatore.

Le curve granulometriche relative ai campioni afferenti a questa unità sono presentate nella Figura 40. I campioni, relativi ai sondaggi S4 e S6, si riferiscono a profondità comprese tra i 12 e i 22 metri dal piano campagna.

Nelle aree esterne della convalle, a ridosso dei contrafforti rocciosi che la delimitano, l'unità è eteropica con i detriti di versante; la distinzione tra le due componenti è spesso poco chiara a causa del limitato dettaglio delle descrizioni stratigrafiche. Il limite inferiore è erosionale sui sottostanti depositi palustri (Unità 3 e 4).



- **Unità 3:** Limi debolmente sabbiosi, con sostanza organica; colore da grigio a bruno scuro, presenza di aggregati limosi e di materiali organici nerastri, a volte organizzati in letti suborizzontali, oltre che di vivianite; isolati orizzonti sabbiosi. Consistenza da bassa a moderata. Comportamento di tipo coesivo. Depositi normal-consolidati con presenza localmente di livelli sovra-consolidati. Permeabilità bassa. Pleistocene superiore finale (post UMG) – Olocene.

Questa unità, così come la successiva, si è deposta in ambiente lacustre-palustre di acque superficiali e bassa energia; in generale, nell'ambito dell'intera unità, con l'aumentare della profondità si nota un progressivo aumento della frazione argillosa e una contestuale diminuzione della frazione sabbiosa e della componente organica. Nel sondaggio S8 si incontrano livelli di aggregati limosi scuri spessi 1 ÷ 3 mm, localmente leggermente inclinati.

L'unità raggiunge la potenza massima di circa 40 metri e si dispone in eteropia laterale con i limi debolmente argillosi (Unità 4); la Figura 41 presenta le curve granulometriche. Gli isolati orizzonti sabbiosi possono essere ricondotti a temporanei apporti grossolani causati da eventi di elevata energia, quali piene fluviali.

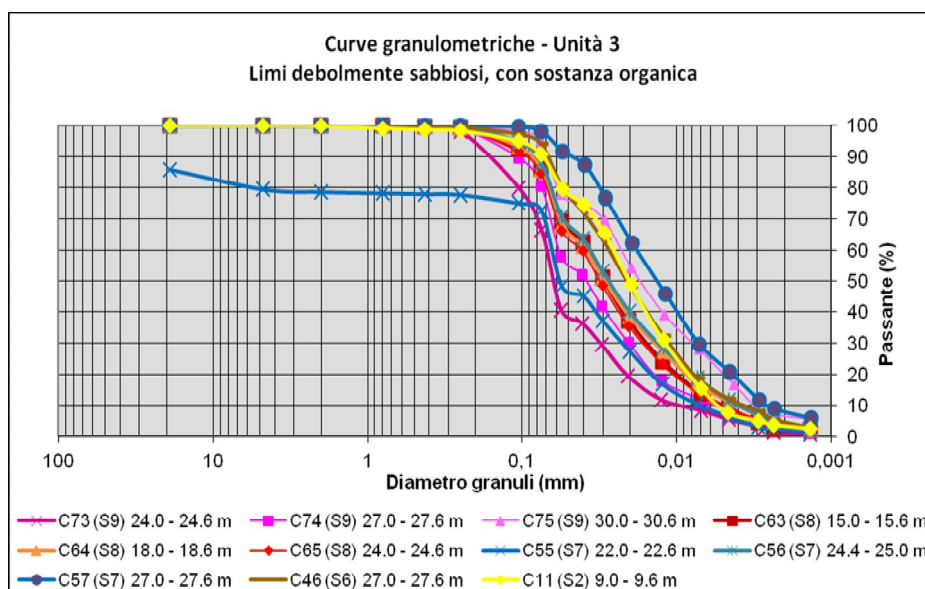


Figura 41 : Curve granulometriche dei campioni relativi all'unità 3. L'unità è in eteropia laterale con l'Unità 4, costituita da limi argillosi.

- **Unità 4:** Limi debolmente argillosi e limi argillosi, con sostanza organica; colore generalmente bruno scuro; presenza di lenti e aggregati di materiale organico nerastro e di vivianite. Consistenza da bassa a moderata. Comportamento di tipo coesivo. Depositi normal-consolidati con presenza localmente di livelli sovra-consolidati. Permeabilità molto bassa. Pleistocene superiore finale (post UMG) – Olocene.

L'unità, in eteropia con la precedente, presenta una rilevante componente argillosa (Figura 42); come per l'Unità 3, si registra la presenza di materia organica disposta in aggregati o livelli centimetrici e di vivianite. Gli orizzonti di materiale organico scuro e di materiale grigio più chiaro hanno inclinazione da sub-orizzontale fino a 35 ÷ 40° (sondaggio S4). In S8, i livelli organici si trovano “a volte convoluti e disturbati (*microslumping*)”. Nel § 6.4.2. verranno esposte alcune ipotesi relative alla genesi di questi caratteri anomali, riscontrati anche in altri sondaggi. Il limite inferiore, graduale, è definito dalla progressiva scomparsa della sostanza organica.

I depositi organici olocenici (Unità 3 e 4) non mostrano alcuna variazione verticale di *facies*: ciò significa che, in origine, la superficie di deposizione della base dell'unità doveva essere sub-orizzontale o caratterizzata da dislivelli topografici molto limitati (Comerci, 2004; cfr. Figura 60).

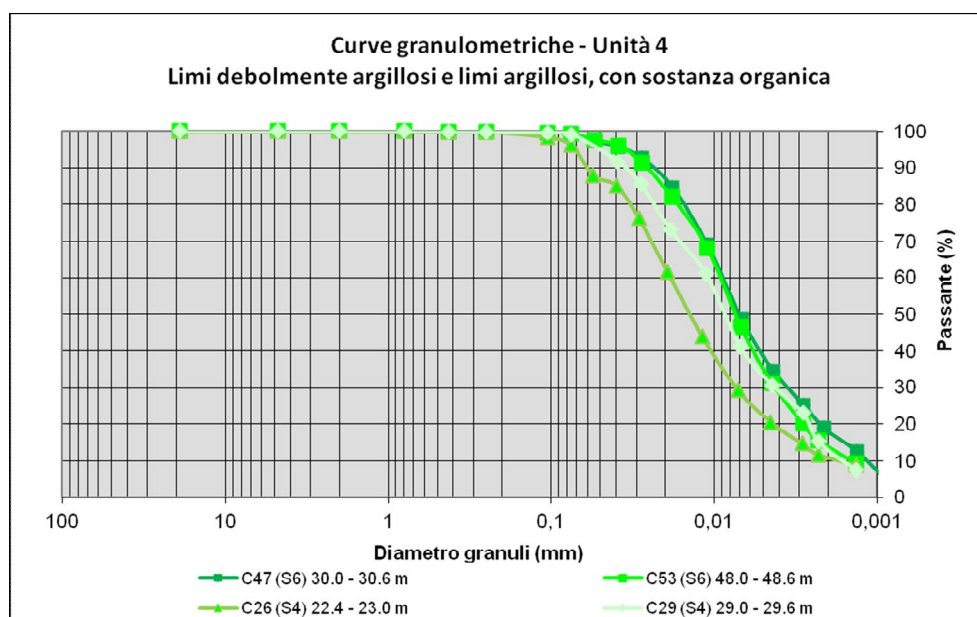


Figura 42 : Curve granulometriche dei campioni relativi all'Unità 4, eteropica all'Unità 3.

- **Unità 5:** Limi debolmente sabbiosi, inorganici; colore grigio; rari livelli di sabbia fine. Da consistenti a molto consistenti. Comportamento di tipo coesivo. Depositi normal-consolidati. Permeabilità d'insieme bassa, media in corrispondenza dei livelli sabbiosi dotati di continuità. Pleistocene superiore finale.

L'Unità, analoga all'Unità 3, si distingue da questa per l'assenza di sostanza organica; l'ambiente deposizionale è relativo ad un lago proglaciale, in condizioni di clima freddo ed arido. La definizione di questa Unità, non disponendo di prove granulometriche e geotecniche, si è basata sull'analisi delle stratigrafie di sondaggio e sul confronto con le caratteristiche dei depositi immediatamente adiacenti. Sono presenti rari ciottoli isolati, riconducibili a *dropstones*.

- **Unità 6:** Limi argillosi, inorganici; colore grigio chiaro, presenza di orizzonti sabbiosi e rara ghiaia. Ciottoli e trovanti isolati. Da consistenti a molto consistenti. Comportamento di tipo coesivo. Depositi normal-consolidati. Permeabilità bassa. Pleistocene superiore finale.

L'Unità è caratterizzata dalla rilevante presenza di ciottoli e trovanti, di dimensioni anche considerevoli: il sondaggio S4 ha perforato, a 37 metri di profondità, un trovante granitico di 80 cm di spessore, costituito da un unico blocco, "*probabilmente Granito di San Fedelino*". I trovanti rinvenuti, sia di tipo calcareo che cristallino, riflettono la provenienza glaciale del sedimento e sono classificabili come *dropstones*.

L'Unità è costituita da sedimenti glaciolacustri a matrice fine, deposti in posizione distale con occasionale presenza di posizioni più prossimali e conseguente apporto a maggiore granulometria. Gli orizzonti sabbiosi possono essere ricondotti a pulsazioni minori della fronte glaciale o ad eventi ad elevata energia (piene fluviali, repentino scioglimento di masse glaciali) che hanno incrementato l'apporto di sedimenti in un ambiente generalmente di acque calme.

Nella zona orientale della convalle (S2 e S3, Piazza Matteotti), l'Unità si ritrova a profondità limitate, anche inferiori ai 20 m dal p.c.; nella zona centrale, invece, è presente solo a partire dai 40 metri di profondità. Il

campione C81 (Figura 43) rappresenta probabilmente un isolato orizzonte sabbioso all'interno di un pacco di sedimenti a granulometria più fine, come desumibile dalle stratigrafie di sondaggio.

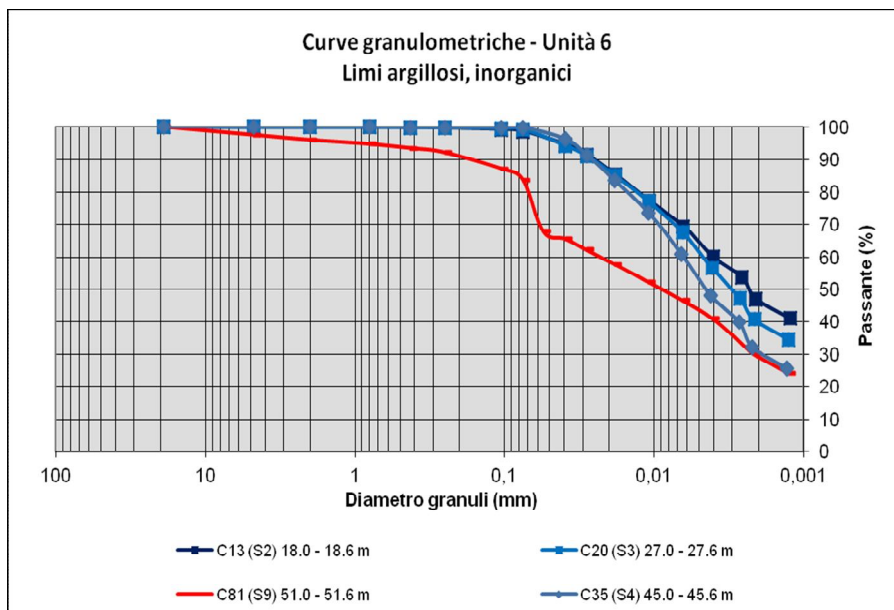


Figura 43 : Curve granulometriche dei campioni relativi all'Unità 6. Il campione C81 potrebbe essere riconducibile ad un isolato orizzonte più grossolano.

- **Unità 7:** Sabbie medie e grossolane, localmente limose; rara ghiaia e ciottoli. Consistenza da bassa a moderata. Permeabilità medio-alta. Pleistocene superiore finale.

Questa Unità si rinviene, con potenza superiore ai 40 metri, all'estremità orientale del profilo sul lungolago e alla base del sondaggio S10 sulla Diga Foranea. Questi sedimenti, ascrivibili a depositi glaciolacustri prossimali, sono costituiti da sabbie e limi con locale presenza di clasti millimetrici (Figura 44) e sono ricollegabili a quelli rinvenuti nella parte terminale dei due sondaggi di Piazza Verdi. I dati geotecnici sono scarsi poiché l'Unità si dispone generalmente a profondità superiori ai 50 metri, ad eccezione della zona di Piazza Matteotti, ed è quindi stata perforata soltanto dai sondaggi più profondi.

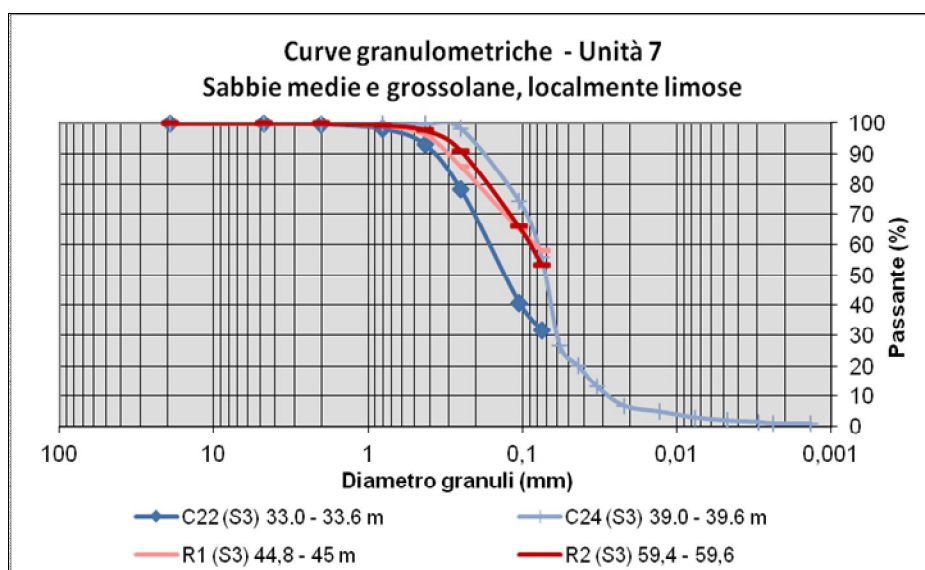


Figura 44 : Curve granulometriche dei campioni relativi all'Unità 7.

La stratigrafia della zona centro-orientale della convalle (Allegato 4, sezione A – A'') è stata definita sulla base dei sondaggi So.Ge.Tec., spinti fino a 60 m di profondità e caratterizzati da elevato dettaglio; questi dati hanno permesso di identificare natura ed assetto delle unità e dei limiti stratigrafici.

Il profilo C – C' presentato nell'Allegato 4 taglia trasversalmente tutta la convalle all'altezza di San Abbondio, dove sono disponibili numerose stratigrafie e alcuni studi scientifici corredati da datazioni radiometriche (Castelletti & Orombelli, 1986; Comerchi *et al.*, 2007). La traccia scelta consente di vincolare la sezione con le indagini di migliore qualità (Piazza Verdi, C, D, E, H) e profondità (P16, P17, P12), allo scopo di illustrare l'assetto litologico-stratigrafico e tettonico dell'intera area. Il dettaglio puntuale raggiunto dalla sezione C – C' è quindi inferiore rispetto alla zona del lungolago; tuttavia, specie nella zona occidentale, le stratigrafie, seppur di dettaglio limitato, raggiungono profondità superiori ai 150 m, risultando quindi particolarmente utili nella ricostruzione dei rapporti tra versante gonfolitico e bacino sedimentario.

Ai margini esterni del bacino si rinvencono potenti orizzonti grossolani disposti a limitata profondità, subito al di sotto dei depositi di riporto; tali sedimenti sono legati al riempimento della convalle con materiali provenienti dai contrafforti rocciosi circostanti e alla deposizione operata dal T. Cosia nella porzione occidentale e dal T. Valduce in quella orientale.

Nella zona occidentale del profilo, a partire dai 50 m dal p.c., si può notare una sequenza ciclica di argille e limi sabbiosi. Le argille inorganiche, riconducibili ad un ambiente di lago proglaciale, sono infatti intercalate a depositi più grossolani di origine glaciale, eterogenei nella composizione e potenzialmente ascrivibili a *till* o morene di fondo.

L'andamento di questi orizzonti profondi potrebbe essere ricondotto a pulsazioni dell'ultima glaciazione, presumibilmente le Fasi di Cucciago e della Ca' Morta, oppure a due glaciazioni distinte; lo strato argilloso profondo è stato rinvenuto con buona continuità e potenza di circa 30 m nella zona più occidentale del profilo, mentre i sondaggi della zona orientale non hanno raggiunto profondità tali da perforarlo. In assenza di ulteriori dati non si ritiene possibile caratterizzare ulteriormente l'ambiente genetico; non si può tuttavia escludere che le argille profonde, potenzialmente classificabili come pre-UMG, siano arealmente estese in tutta la convalle.

Di notevole importanza risulta il fatto che il pozzo P16 ha rilevato a 181,5 m di profondità, corrispondenti a 24,5 m s.l.m. il substrato gonfolitico; questo infatti rappresenta l'unico caso in cui un sondaggio profondo ha raggiunto il substrato roccioso.

Ipotizzando che la pendenza del versante sepolto coincida con quella del tratto subaereo del pendio, il substrato gonfolitico dovrebbe trovarsi a profondità inferiori ai 100 m dalla superficie; questa ipotesi risulta in contrasto con i dati di pozzo, che al contrario evidenziano la presenza di una condizione di *oversteepening*. Caratteri simili sono presenti anche in altre valli glaciali sia a nord che a sud delle Alpi (Preusser *et al.*, 2010; Dehnert *et al.*, 2012; Jordan, 2010; Anselmetti *et al.*, 2010).

La variazione di pendenza tra il versante emerso e quello sotterraneo potrebbe essere ricondotta all'azione di esarazione glaciale, maggiore in corrispondenza della porzione marnosa del substrato (Formazione di Chiasso) rispetto alla parte più conglomeratica (Conglomerato di Como); tuttavia, in considerazione del fatto che la traccia del profilo interseca il Retroscorrimento di Monte Olimpino, si ipotizza anche un contributo tettonico alla definizione della morfologia attuale. L'interpretazione presentata nell'Allegato 4 mostra il contatto tettonico tra la Formazione di Chiasso e il substrato calcareo mesozoico per mezzo del Retroscorrimento di Monte Olimpino e la presenza di uno *splay* secondario all'interno del tetto della faglia.

Tale ipotesi di lavoro richiede tuttavia conferme e approfondimenti specifici per una corretta valutazione dell'effettivo assetto strutturale e deformativo del margine ovest della convalle.

La sezione B – B' dell'Allegato 4 presenta invece un profilo geologico orientato N-S; l'integrazione con gli altri profili consente di definire in modo dettagliato la stratigrafia del sottosuolo comasco e di valutare le variazioni litologiche e stratigrafiche in tutto l'areale.

Il profilo B – B' mette in luce la complessa architettura stratigrafica del sottosuolo, e in particolare l'evoluzione recente del settore costiero, caratterizzato da diversi avanzamenti della linea di costa, avvenuti in epoca storica (cfr. Allegato 3). La parte più meridionale della sezione interseca un antico conoide del T. Valduce, già segnalato in precedenza (Bini, 1993). La giacitura dei depositi alluvionali è sub-orizzontale o clinostratificata verso lago, come segnalato da Bini & Castelletti (1986), in corrispondenza di un fronte di scavo aperto in Piazza Roma.

La Figura 45 presenta un profilo geologico-tecnico, realizzato in scala 1:200 con l'obiettivo di dettagliare ulteriormente la zona del Lungo Lario Trieste compresa tra S4 e S6; tale area risulta di particolare interesse in quanto posta al centro del lungolago e caratterizzata da rilevanti tassi di subsidenza. In questo caso, i dati stratigrafici sono stati integrati con le relative prove penetrometriche (CPT 4 e 6), che hanno permesso di identificare la transizione tra riporto antropico e terreni di età storica, questi ultimi caratterizzati da parametri geotecnici molto scadenti (Frigerio, 2012).

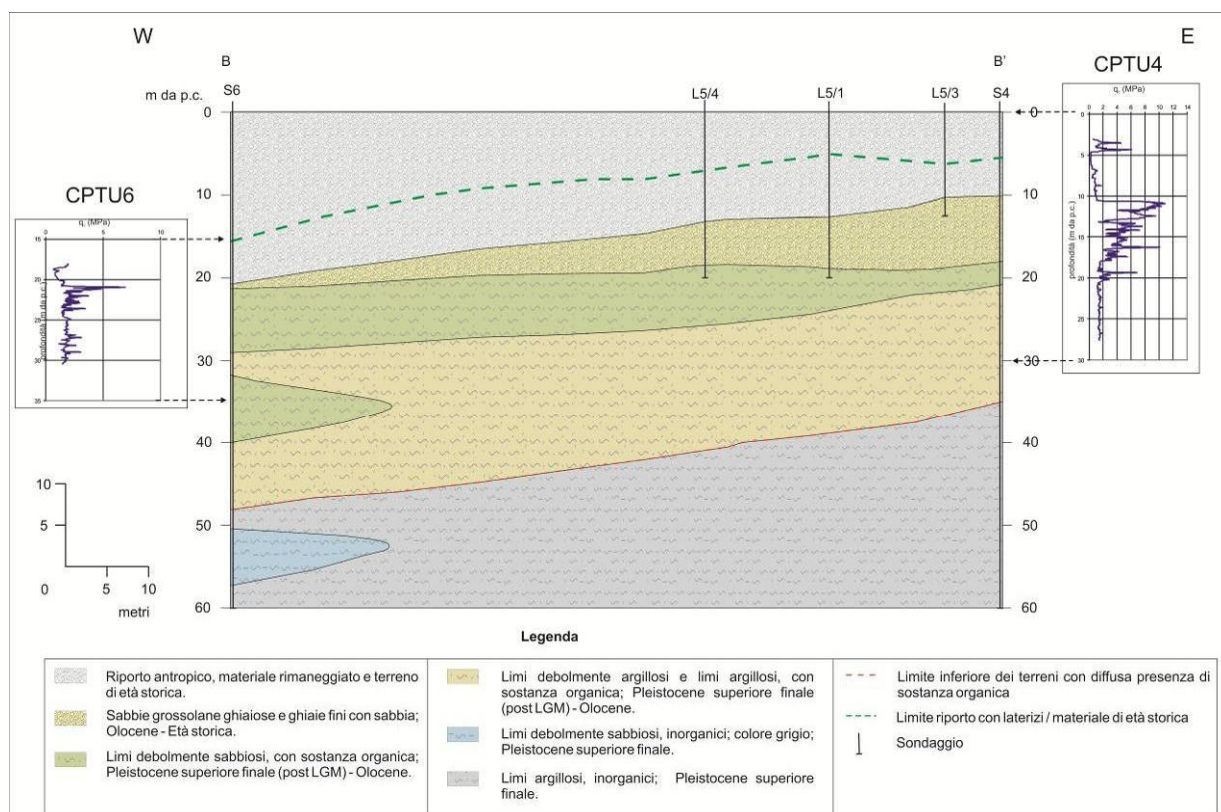


Figura 45 : Profilo geologico-tecnico di dettaglio per la zona centrale del lungolago, riduzione dell'elaborato originale. I grafici indicano i risultati delle prove CPTU eseguite in foro.

Una conferma indiretta delle modalità di sedimentazione deriva dall'analisi dei dati geotecnici, in particolare i limiti di Atterberg: la Figura 46 presenta un confronto tra i campioni del lungolago, di Piazza Verdi e di

Borgovico. I terreni prelevati nella zona del lungolago presentano valori dell'indice di plasticità generalmente ridotti, in accordo con la posizione del prelievo: infatti, nella grande maggioranza dei casi, tali campioni sono stati prelevati a profondità inferiori ai 30 m dal p.c., quindi nella zona interessata da depositi limosi organici.

I campioni provenienti da Borgovico cadono nella parte più a sinistra del grafico, ovvero nel campo dei limi, mentre quelli prelevati nel sottosuolo di Piazza Verdi spaziano in parte verso destra, cioè nel campo delle argille. Questo è in accordo con la diversa composizione dei sondaggi di Borgovico a granulometria più limoso-sabbiosa rispetto a quelli di Piazza Verdi, come desumibile dalle stratigrafie dei sondaggi.

La distribuzione generale dei punti nella carta di plasticità è riferibile a quella rappresentativa delle argille glaciali ottenuta sui depositi dell'America settentrionale (Terzaghi & Peck, 1967).

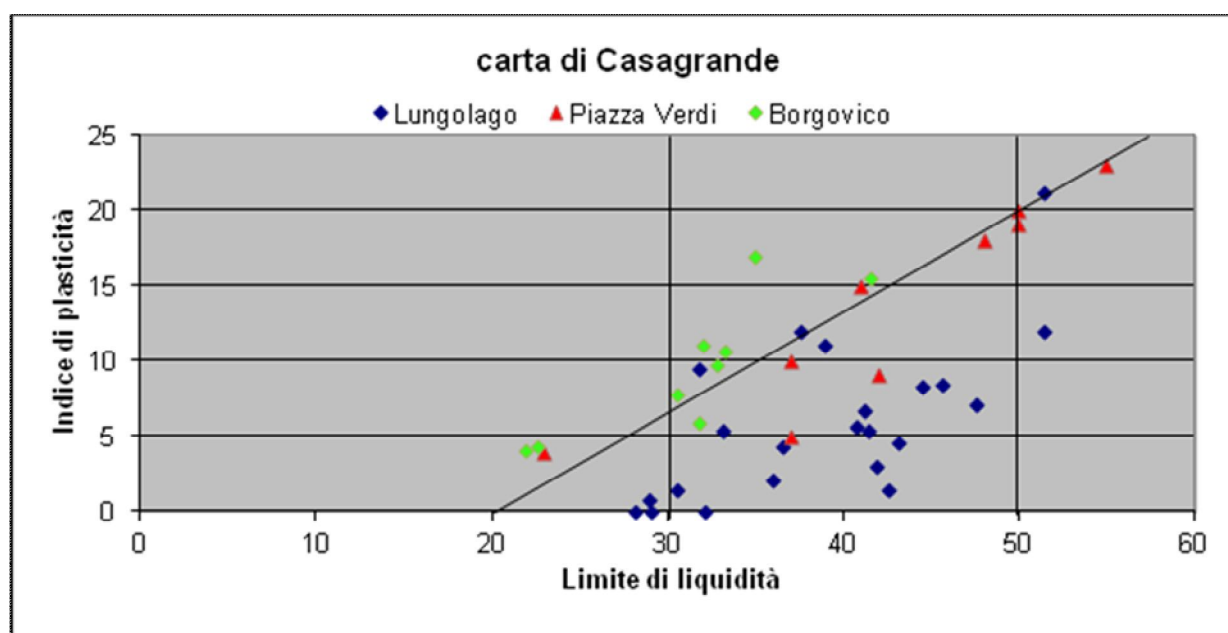


Figura 46 : Carta di Casagrande per i campioni del lungolago, di Piazza Verdi e di Borgovico.

6.3.2. Dati idrogeologici

La rete piezometrica comunale è costituita da circa 50 piezometri censiti (Figura 47, Tabella 26) che monitorano in parte la falda superficiale e in parte la falda profonda, di cui solo alcuni sono attualmente in funzione (Ferrario, 2009).

Sigla	Tratto fenestrato (m da p.c.)	Quota tappo (m s.l.m.)	Tipo strumento	Unità idrogeologica monitorata	Anni di rilevazione
A1	13,60	202,474	Casagrande	Superficiale	1975 ÷ in corso
A2	14,00	203,533	Casagrande	Superficiale	1975 ÷ in corso
B	18,00	200,683	Pozzo	Superficiale	1975 ÷ in corso
C1 (1-2)	5,00	200,419	Casagrande	Superficiale	1975 ÷ in corso
C2 (1-2)	21,60	200,419	Casagrande	Profonda	1975 ÷ in corso

D1 (1-2)	10,00	200,491	Casagrande	Superficiale	1975 ÷ in corso
D2 (1-2)	45,00	200,491	Casagrande	Profonda	1975 ÷ in corso
ID		200,541	Superficiale		1975 ÷ in corso
E1 (1-2)	9,00	201,056	Casagrande	Superficiale	1975 ÷ in corso
E2 (1-2)	89,00	201,056	Casagrande	Profonda	1975 ÷ in corso
F(1-2)	13,70	206,869	Casagrande	Superficiale	1975 ÷ in corso
G1	5,00	201,274	Pozzo	Superficiale	1975 ÷ 2007
G2	2,00	201,319	Pozzo	Superficiale	1975 ÷ 2007
G3	4,00	201,453	Pozzo	Superficiale	1975 ÷ 2007
G4	8,00	201,34	Pozzo	Superficiale	1975 ÷ 2007
G5	6,00	201,575	Pozzo	Superficiale	1975 ÷ 2007
H1 (1-2)	10,00	202,468	Casagrande	Superficiale	1975 ÷ 2001
H2 (1-2)	97,00	202,466	Casagrande	Profonda	1975 ÷ 2001
S1 (1-2)	62,80	199	Casagrande	Profonda	1998 ÷ 2004
S1 (3-4)	11,80	199	Casagrande	Superficiale	1998 ÷ 2004
S2/1	39,50	199,55	Casagrande	Profonda	1998 ÷ 2004
S2/2	36,60	199,55	Casagrande	Profonda	1998 ÷ 2004
S3 (1-2)	8,40	199,780	Casagrande	Superficiale	1998 ÷ 2004
S3 (3-4)	53,10	199,780	Casagrande	Profonda	1998 ÷ 2004
S4 (1-2)	16,25	199,439	Casagrande	Superficiale	1998 ÷ 2004
S4 (3-4)	60,00	199,439	Casagrande	Profonda	1998 ÷ 2004
S5/1	14,50	199,324	Casagrande	Superficiale	1998 ÷ 2008
S5/2	14,80	199,324	Casagrande	Superficiale	1998 ÷ in corso
S6/1	13,45	198,621	Casagrande	Superficiale	1998 ÷ in corso
S6/2	13,85	198,621	Casagrande	Superficiale	1998 ÷ in corso
S7 (1-2)	5,30	198,98	Casagrande	Superficiale	1998 ÷ 2008
S8 (1-2)	6,25	199,49	Casagrande	Superficiale	1998 ÷ 2004
S9 (1-2)	16,10	199,44	Casagrande	Superficiale	1998 ÷ 2004
S9 (3-4)	8,20	199,44	Casagrande	Superficiale	1998 ÷ 2004
S/C1		211,747	Casagrande	Superficiale	1993 ÷ 2002
S/C2		212,078	Casagrande	Superficiale	1993 ÷ 2002
T2	30,00	227,5	Tubo aperto	Superficiale	1993 ÷ in corso
T7	20,00	214,68	Tubo aperto	Superficiale	1993 ÷ 2002
SV1	68,50	200,307	Casagrande	Profonda	2006 ÷ in corso
L1		198,691	Tubo aperto	Superficiale	2010 ÷ in corso
L2		198,692	In continuo	Superficiale	2010 ÷ in corso
L3		198,902	In continuo	Superficiale	2010 ÷ in corso
L4		198,795	Tubo aperto	Superficiale	2010 ÷ in corso
L5/1	12,50 ÷ 15,50	199,244	In continuo	Superficiale	2010 ÷ in corso
L5/2	2,00 ÷ 5,00	199,069	Tubo aperto	Superficiale	2010 ÷ in corso
L5/3	2,00 ÷ 5,00	199,290	Tubo aperto	Superficiale	2010 ÷ in corso
L5/4	2,00 ÷ 5,00	198,849	Tubo aperto	Superficiale	2010 ÷ in corso

L6	3,00 ÷ 6,00	199,664	Tubo aperto	Superficiale	2010 ÷ in corso
L7	3,00 ÷ 6,00	199,914	Tubo aperto	Superficiale	2010 ÷ in corso
L8	2,00 ÷ 5,00	200,295	Tubo aperto	Superficiale	2010 ÷ in corso
L9/1-2	16,50 ÷ 19,50	200,194	Tubo aperto	Superficiale	2010 ÷ in corso
L10		199,664	Tubo aperto	Superficiale	2010 ÷ in corso

Tabella 26 : Elenco degli strumenti di monitoraggio con indicazione di quota della presa, quota assoluta, tipologia di strumento e anni di rilevazione (modificata da Ferrario, 2009); gli strumenti attualmente non rilevati sono andati distrutti o risultano non funzionanti.

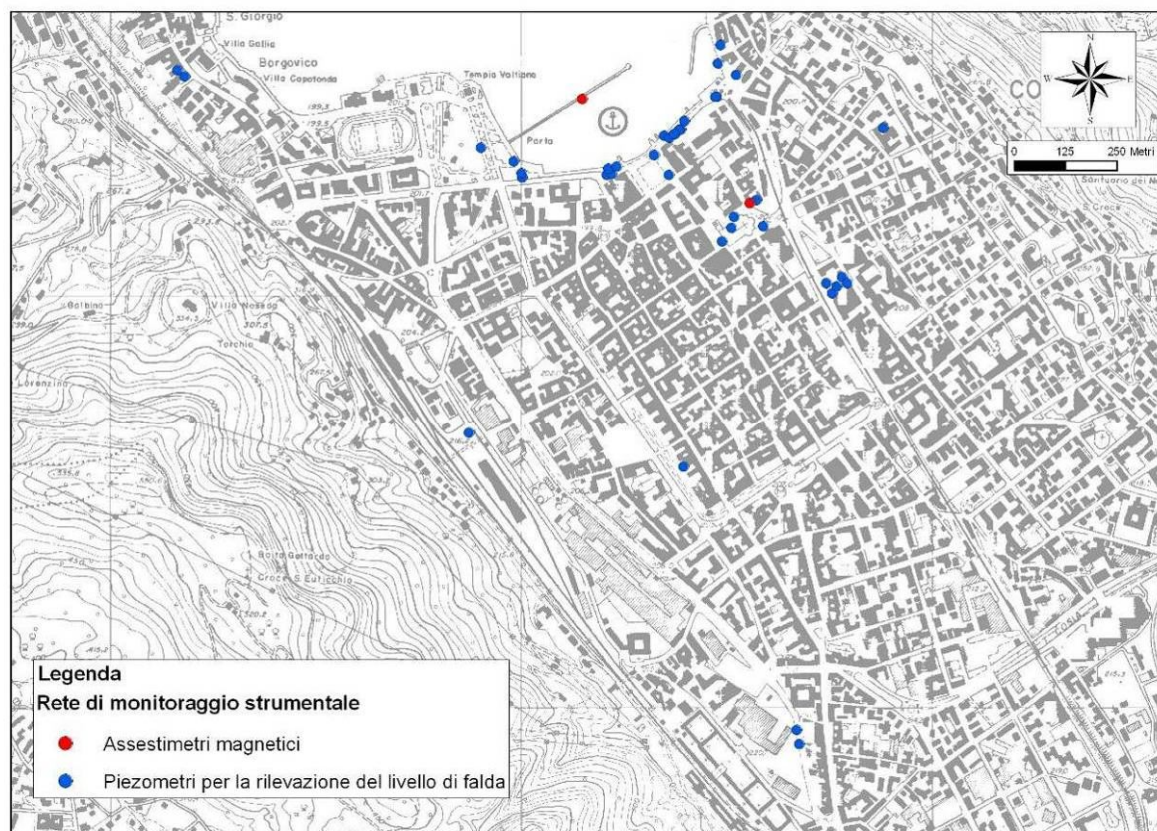


Figura 47 : Ubicazione della rete strumentale per il monitoraggio geotecnico nell'area urbana di Como.

La rete piezometrica comunale ha raggiunto la sua configurazione attuale in seguito a varie fasi di installazione degli strumenti:

- Strumenti A, B, F, G: installati negli Anni '70 nell'ambito delle attività di ricerca della Commissione per lo studio dei fenomeni di subsidenza; furono realizzati nuovi strumenti o adattati vecchi pozzi. Questi punti forniscono i valori più datati: le prime misure risalgono infatti al 1975 ÷ 1977. Diversi strumenti di questa serie sono ancora attivi.
- I piezometri attorno al Duomo (C, D, E) e in Viale Varese (H) vennero installati nel 1980, nel corso di una campagna d'indagine finalizzata specificatamente allo studio della subsidenza e al monitoraggio delle falde superficiale e profonda, promossa dal Comune e dalla Commissione per lo studio della subsidenza.
- ID, Interno Duomo: la misurazione avviene misurando l'acqua nella cripta del Duomo; i primi dati sono del 1993.

- Serie S: frutto della campagna di indagini condotta da So.Ge.Tec. nel 1997 nell'ambito della progettazione delle opere di difesa dalle esondazioni. Questa serie è dislocata tra piazza Matteotti, piazza Cavour e il lungolago. I dati relativi a questi piezometri partono da giugno 1998 e per alcuni strumenti continuano tuttora. Nei sondaggi da S1 a S4 e in S9 sono state installate 2 celle piezometriche tipo Casagrande, posizionate rispettivamente nell'acquifero freatico e nell'acquifero profondo. Nei sondaggi da S5 a S8 è presente una sola cella Casagrande per il monitoraggio della falda superficiale (Comune di Como, 1997 a).
- Serie L: strumenti ubicati sul lungolago, installati a fine 2010; messi in opera durante i lavori di risistemazione del lungolago. Tre strumenti sono attrezzati con rilevatori elettronici in continuo che misurano ogni ora la soggiacenza della falda.
- Relativamente a S/C1, S/C2, T2 e T7 non si è in possesso dei dati riguardanti la messa in opera.
- Sv1: posizionato nel novembre 2005 nell'ambito dei sondaggi realizzati dall'Università degli Studi dell'Insubria in piazza Verdi.

Il monitoraggio piezometrico è stato condotto da vari enti e istituzioni, a partire dalla Commissione per lo studio della subsidenza (anni 1975 ÷ 1977), e in seguito da ACSM (1998 ÷ 2004) e dall'Università dell'Insubria (dal 2006). Si dispone quindi di un record di rilevazioni che copre, seppur in modo incompleto, un arco temporale di 35 anni, permettendo quindi di valutare le variazioni nel livello piezometrico, in particolare in considerazione dei radicali mutamenti sovvenuti nel frattempo nella gestione delle risorse idriche sotterranee. In taluni casi, tuttavia, le rilevazioni risultano incomplete o prive di coerenza interna, impedendo di fatto l'analisi dell'evoluzione temporale della falda per alcune postazioni di misura o per alcuni periodi all'interno dell'intervallo 1975 ÷ 2012.

Con la realizzazione delle opere di difesa dalle esondazioni, all'andamento naturale si sovrappone una forte impronta antropica causata dall'aggettamento dell'acqua, che ha indotto una depressione piezometrica di circa 3 ÷ 4 metri nel periodo 2008 ÷ 2010. I dati disponibili, presentati in Figura 48, mostrano la risalita della falda fino ai livelli naturali, in equilibrio con il Lago; gli strumenti L sono relativi alla zona del lungolago, B si trova nei Giardini di Ponente, S5 in Piazza Cavour e C davanti al Duomo.

Il confronto tra gli strumenti L1 ÷ L4, direttamente adiacenti all'area di emungimento e i piezometri S5 e S6, ubicati in Piazza Cavour e che non risentono della diminuzione del livello di falda, indicano che il cono piezometrico ha avuto un raggio dell'ordine di qualche decina di metri.

Tutti gli strumenti sono relativi alla falda freatica, ad eccezione di C2, che monitorizza una falda profonda e il cui andamento verrà discusso in dettaglio in seguito.

Durante l'arco di tempo considerato, la quota del livello del Lago varia tra +106,5 cm sullo zero idrometrico in data 21 giugno 2011, e -19,7 cm sullo zero in data 1 marzo 2012 e 20 settembre 2012, con un'oscillazione quindi dell'ordine dei 125 cm. Le massime oscillazioni dei piezometri della serie L sono comprese tra i 100 e i 123 cm; nel caso di B raggiungono i 96 cm, in S5 i 62 cm, in C1 e C2 rispettivamente 34 e 20 cm. Questi andamenti testimoniano la forte influenza del livello lacustre su quello freatico e il suo attenuarsi all'aumento della distanza dal Lago stesso. Si evidenzia poi come la falda profonda abbia oscillazioni molto contenute rispetto a quella freatica. Dal grafico è possibile individuare anche le eventuali esondazioni del Lago, ricordando che la soglia di Piazza Cavour è posta a 198,53 m s.l.m..

La presenza di misuratori in continuo ha permesso inoltre di valutare su scala oraria le oscillazioni idrometriche e freatiche, che confermano la stretta connessione tra Lago e falda.

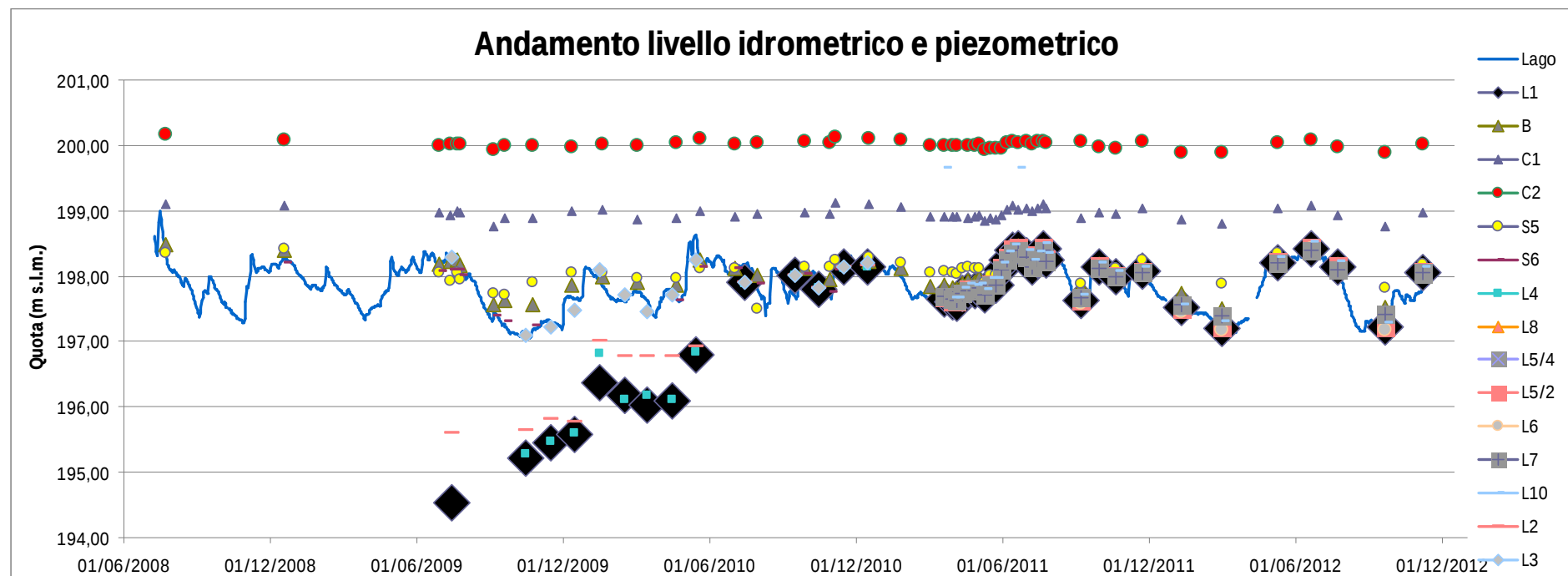


Figura 48 : Andamento delle serie piezometriche per il periodo giugno 2008 ÷ novembre 2012. Per la localizzazione dei piezometri si veda l'Allegato 3.

Durante l'intero periodo coperto dai rilevamenti, il Lago si dispone a quote inferiori rispetto alla falda, rappresentando quindi il recapito ultimo della falda libera superficiale. Osservando però le serie storiche, in particolare quelle riferite agli anni 1975 ÷ 1977, si notano alcune differenze rispetto all'andamento attuale: ad esempio, il piezometro B si disponeva costantemente a livelli più bassi rispetto al Lago, con differenze dell'ordine di qualche decina di centimetri. Questo fatto è facilmente imputabile alle diffuse captazioni di acqua in opera in quel periodo sia sulla falda superficiale che su quella profonda, in grado di provocare un diffuso abbassamento della superficie piezometrica (Tarzi, 2011). Le serie storiche mostrano anche che nei primi anni '90, a seguito della cessazione degli emungimenti, si è registrata una risalita del livello freatico nella zona del Duomo, fino a raggiungere la superficie topografica (Cancelli, 1996).

Dall'esame comparato tra livelli piezometrici e precipitazioni, è stato possibile identificare la risposta della falda nel breve periodo a seguito di precipitazioni intense: il verificarsi di eventi pluviometrici significativi comporta un repentino innalzamento dei livelli relativi alla falda libera superficiale, che, in assenza di ulteriori apporti, torna lentamente ai valori precedenti. Le oscillazioni freatiche risultano comunque più lente e contenute rispetto al livello lacustre (Ferrario, 2009).

Scarsi sono i dati relativi alla falda profonda, a causa del ridotto numero di strumenti preposti alla sua misurazione, dello stato di efficienza dei piezometri e della tipologia di acquifero. Tutti i piezometri con cella di captazione a profondità maggiore di 40 m dalla superficie rilevano infatti una falda di tipo artesianico, in cui la quota piezometrica si dispone a livelli superiori al piano campagna.

L'unico strumento di monitoraggio della falda profonda in cui il livello è al di sotto del p.c. risulta C2, posizionato davanti al Duomo e con cella di captazione a 21,6 m dalla superficie; nello stesso foro di sondaggio, eseguito nel piano d'indagine promosso dalla Commissione per lo studio della subsidenza, è stato posizionato anche un piezometro per il rilevamento della falda freatica, con cella di captazione a 5 m dal piano campagna.

La stratigrafia della perforazione, concordemente con l'assetto litologico-stratigrafico generale ricostruito per l'area (cfr. Allegato 4), indica che la cella superiore C1 (-5,0 m dal p.c.) risulta impostata nell'acquifero libero superficiale. La cella inferiore C2 (-21,6 m dal p.c.) interessa un livello della falda confinata posto in un acquifero a maggiore profondità, ospitante una circolazione idrica nettamente distinta da quella superficiale, in quanto i livelli piezometrici rilevabili risultano significativamente diversi.

Tutte le rilevazioni condotte, a partire dal 1975, hanno sempre riscontrato livelli piezometrici più elevati per la cella inferiore C2, fino ad un massimo di 1,5 m rispetto alla cella C1.

A questa discrepanza nella quota assoluta si associa un comportamento nettamente differente dei due piezometri. Il livello in C1, a fronte di un campo complessivo di variabilità abbastanza esteso, subisce anche variazioni significative (vari decimetri) rilevabili nell'intervallo di pochi giorni – settimane. L'andamento nel tempo del livello in C1, inoltre, corrisponde perfettamente al livello misurato direttamente nel sottosuolo del Duomo, tramite l'apertura esistente nel pavimento interno. La cella C2, al contrario, evidenzia una variabilità molto limitata (centimetri – decimetro) sia con riferimento al lungo periodo temporale mesi – anno, che a scala dei giorni – settimane. Le rilevazioni indicano che la falda monitorata da C2 è soggetta a modifiche del carico piezometrico e risulta pertanto in movimento, poiché mostrano variazioni nel livello. Si evidenzia inoltre la possibilità della circolazione relativa all'acquifero profondo di portarsi a quote relativamente prossime alla superficie topografica mantenendo i caratteri di falda confinata, nettamente distinta dalla falda libera superficiale ospitata nei depositi alluvionali recenti.

L'analisi delle stratigrafie di sondaggio e le successive interpretazioni idrogeologiche e paleoambientali consentono di approfondire questo tema e di superare lo schema classico relativo alla dicotomia acquifero superficiale – acquifero profondo. La Figura 49 presenta una ricostruzione schematica dell'assetto idrogeologico nella zona in esame; sono riportati i livelli sede di circolazione idrica, gli strati semi-impermeabili di separazione e gli strumenti di misurazione. È possibile riconoscere l'acquifero superficiale, ospitato nei terreni di riporto e alluvionali e ricaricato prevalentemente dagli apporti meteorici, una piccola falda confinata, rilevabile dalle stratigrafie di P6 e C, e l'acquifero profondo in pressione.

La presenza della falda confinata a circa 20 m dal p.c. (quota della cella C2) può essere ricondotta, in prima approssimazione, a due possibili situazioni:

- Assetto litologico-stratigrafico, con disposizione di corpi sedimentari a granulometria grossolana in continuità idraulica con i livelli acquiferi profondi, completamente isolati verso l'alto e lateralmente da sedimenti fini, in modo da impedire il libero deflusso verso la falda libera superficiale;
- Presenza di discontinuità di tipo fragile (sistemi di fratture – faglie), sovrainposte all'originaria architettura deposizionale, che consentono la risalita più o meno diretta della falda confinata attraverso il potente pacco di sedimenti limoso-argillosi pressoché impermeabili.

L'elevata variabilità laterale di *facies* (cfr. Allegato 4), riconducibile alle complesse modalità genetiche, suggerisce che numerose falde confinate di estensione limitata possano essere presenti in tutto il sottosuolo dell'area urbana di Como; tale ipotesi deve comunque essere sottoposta a verifiche e approfondimenti a scala areale significativa, che comprenda ad esempio una caratterizzazione chimica delle acque per poter differenziare i circuiti idrici, in modo da giungere ad una ricostruzione adeguatamente rappresentativa dell'assetto idrogeologico locale.

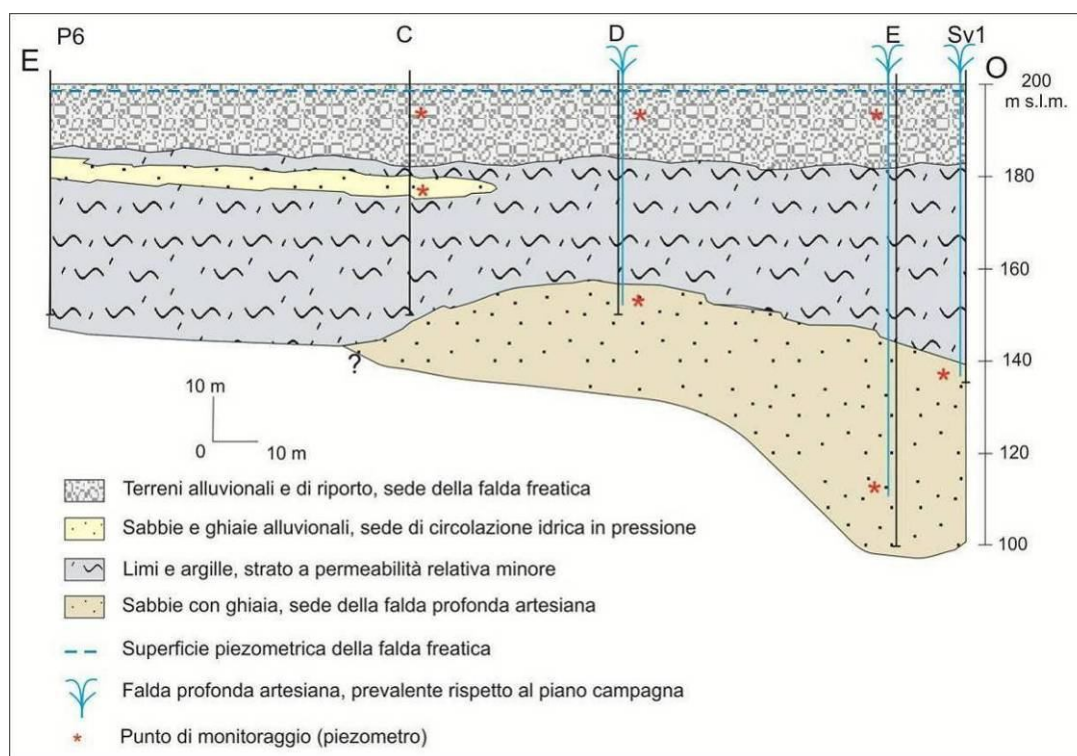


Figura 49 : Profilo idrogeologico schematico nella zona del Duomo; sono evidenziati gli strati acquiferi, gli acquitardi e i punti di monitoraggio (modificato da Tarzi, 2011).

6.3.3. Interazioni tra le opere di difesa dalle esondazioni e l'ambiente naturale ed urbano

L'attuale stato realizzativo del sistema di opere di difesa dalle esondazioni del Lago deriva da un complesso iter progettuale, autorizzativo, amministrativo e tecnico in corso da oltre 15 anni.

Il progetto esecutivo, datato marzo 2004, ma basato su studi ed indagini propedeutiche condotte a partire dal periodo 1996 ÷ 1997, comporta sia la difesa idraulica della città che una sostanziale risistemazione urbana lungo la fascia del lungolago. Le opere sono progettate per difendere dalle esondazioni la quota di 200,30 m s.l.m. (il punto più depresso di Piazza Cavour si trova a 198,53 m s.l.m.), e sono ideate per contenere la frequenza delle esondazioni in media una volta ogni 50 anni circa. Il progetto prevede la realizzazione di paratie fisse e mobili, vasche di laminazione e di prima pioggia e interventi di barrieramento sotterraneo tramite *jet grouting*, allo scopo di limitare, durante le fasi di innalzamento del livello lacustre, l'afflusso di volumi idrici dal Lago verso l'area urbana attraverso l'orizzonte superficiale del sottosuolo (Comune di Como, 1998 ÷ 2004; 1999; 2000).

La realizzazione del sistema di opere di difesa ideato comporta una serie di aspetti di fondamentale rilevanza per le possibili ripercussioni sull'assetto territoriale, geologico, geotecnico e idrogeologico dell'area. Tra questi, va segnalato innanzitutto l'avanzamento della linea di costa di una decina di metri circa; inoltre, le principali opere strutturali, tra cui le vasche di laminazione, sono ubicate a lago, cioè oltre la precedente linea di costa.

I possibili effetti delle lavorazioni sull'ambiente naturale ed urbano sono chiaramente connessi alle modalità di lavorazione adottate; in particolare, tale concetto risulta particolarmente valido per le fasi di aggotamento dell'acqua e di realizzazione delle vasche, con le conseguenti variazioni dello stato di sollecitazione dei terreni.

La valutazione delle scelte progettuali ed operative non rientra tra gli obiettivi della presente trattazione, di conseguenza ci si limita ad esporre i risultati delle rilevazioni topografiche (livellazioni e dati satellitari) e dei monitoraggi clinometrici sugli edifici. È infatti da segnalare, in concomitanza delle lavorazioni, il manifestarsi di evidenti lesioni nella strada e nei fabbricati prospicienti il Lungolago Trieste, che ha portato all'interruzione dei lavori ed alla richiesta, da parte del Comune, di approfondimenti scientifici sugli aspetti idrologici, idraulici, idrogeologici e geotecnici.

Le indagini comprendono una livellazione geometrica di alta precisione, condotta dal Politecnico di Milano, relativa alle deformazioni verticali al suolo accumulate nel periodo 2004 ÷ marzo 2011 (Barzaghi *et al.*, 2011), l'acquisizione di dati interferometrici per l'intervallo temporale 2003 ÷ 2012 (TRE Europa, 2012) e una serie di dati clinometrici rilevati nell'area della vasca B (Lungolaro Trento) nel periodo febbraio 2008 ÷ febbraio 2010 e della vasca A (Lungolaro Trieste) nel periodo aprile 2010 ÷ settembre 2011.

Le livellazioni geometriche sono state eseguite, limitatamente alla zona del lungolago, sui capisaldi già oggetto della precedente livellazione, realizzata da APAT nel 2004. I valori rilevati si attestano tra 1 e 28 mm di abbassamento con i minimi registrati nei settori prossimi all'affioramento del substrato roccioso ed i massimi nell'area di Piazza Cavour.

In Figura 50 è stato calcolato, a partire dai valori puntuali, un campo di distribuzione dei valori di subsidenza, attraverso un'interpolazione lineare di tipo *nearest neighbour*. L'elaborazione conferma che i massimi valori di subsidenza corrispondono all'area in cui è stata realizzata la vasca B. Si nota inoltre un significativo aumento dei gradienti di deformazione in corrispondenza del passaggio, verso lago, ai terreni di riporto relativi all'ampliamento del settore costiero post 1722.

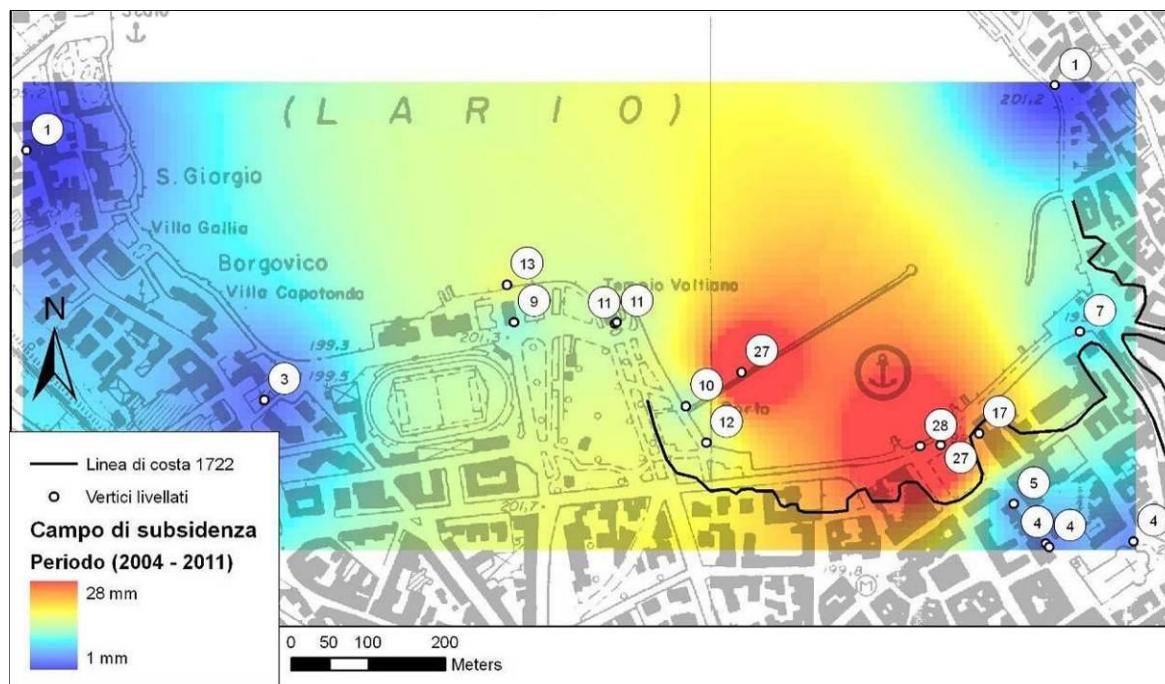


Figura 50 : Campo di subsidenza al suolo, per il periodo 2004 ÷ 2011, calcolato a partire dai vertici quotati dalla campagna di livellazione del Politecnico di Milano. Si noti il considerevole incremento della deformazione in corrispondenza della presenza dei terreni di riporto storici.

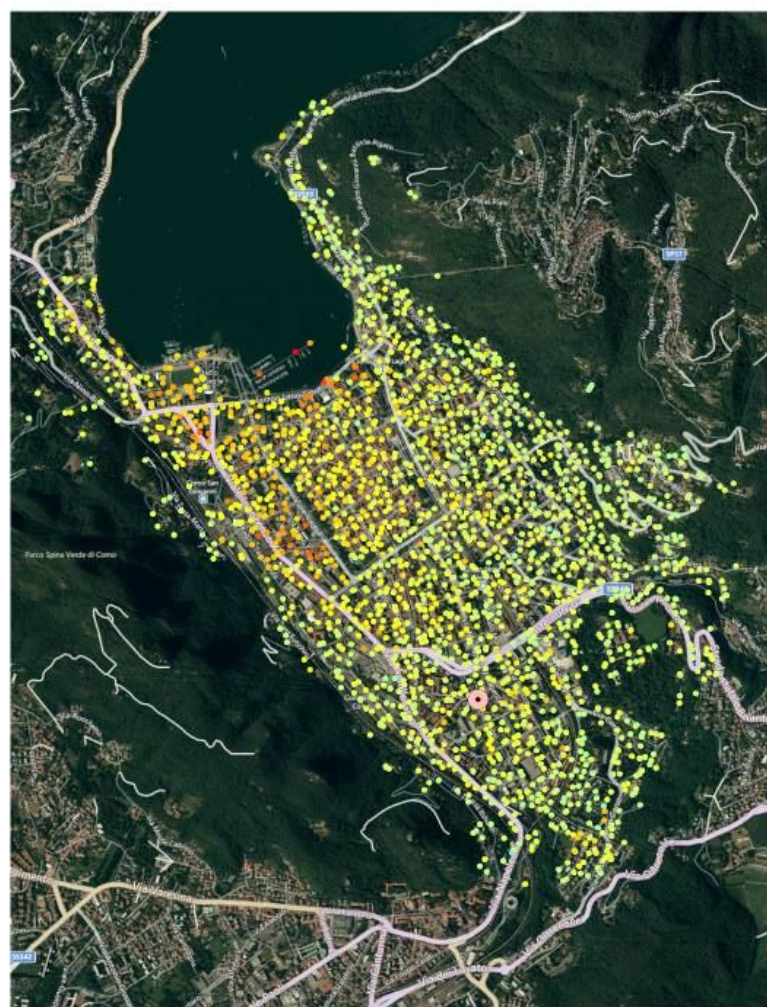
Una conferma dei dati ricavati dalle livellazioni geometriche deriva dall'analisi dei dati di interferometria da satellite, condotta dalla società TRE (Tele-Rilevamento Europa) mediante la tecnica PSInSAR™ e del suo ultimo aggiornamento SqueeSAR™.

Dal confronto tra i movimenti verticali medi del periodo 1992 ÷ 2003 e il periodo 2003 ÷ 2012 (Figura 51), si nota come in entrambi i casi i movimenti siano pressoché nulli nelle zone prossime ai contrafforti rocciosi; nella fase *ante operam* gli abbassamenti più rilevanti sono distribuiti in modo abbastanza uniforme nella zona della Città Murata e di Viale Innocenzo, con valori decrescenti verso le aree più esterne della convalle, in accordo alla subsidenza naturale.

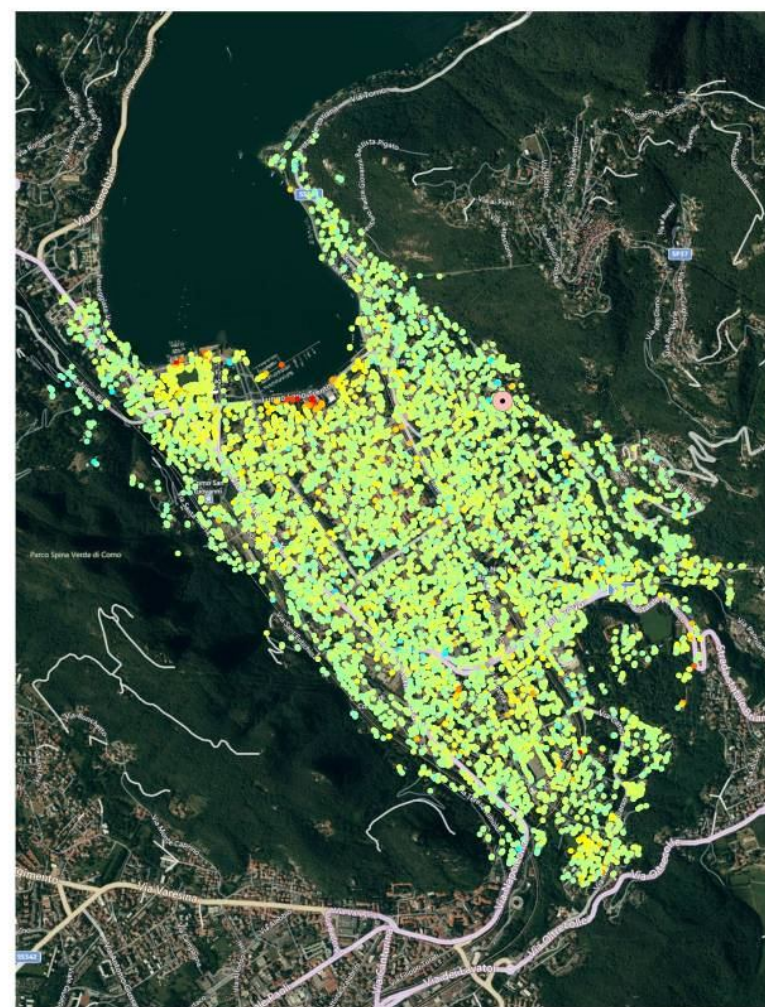
Al contrario, nel periodo di realizzazione delle opere, nella zona a ridosso dell'area oggetto dei lavori si osservano alcuni riflettori contraddistinti da cedimenti rilevanti; tali punti risultano inoltre caratterizzati da elevati cedimenti relativi rispetto ai riflettori adiacenti.

Dall'analisi puntuale di alcuni singoli riflettori nella zona del lungolago (Figura 53; per l'ubicazione si veda la Figura 52), si evince che sul Lungolaro Trento diversi punti di misura presentano un'accelerazione della subsidenza nel periodo 2008 ÷ 2009, coincidente con l'inizio dei lavori di scavo per la vasca B; al contrario, il Lungolaro Trieste non presenta accelerazioni ma solo dei leggeri *trend* di subsidenza.

Dalla fine del 2008, si è prodotto un abbassamento verticale del terreno di circa 4 cm in corrispondenza dei bersagli che si trovano a distanza di alcune decine di metri dalla riva del Lago, ove sono stati effettuati gli scavi. Tale abbassamento sembra avere avuto una fase più intensa terminata ad inizio 2009, ma i movimenti continuano anche negli anni successivi e permangono tuttora.



a)

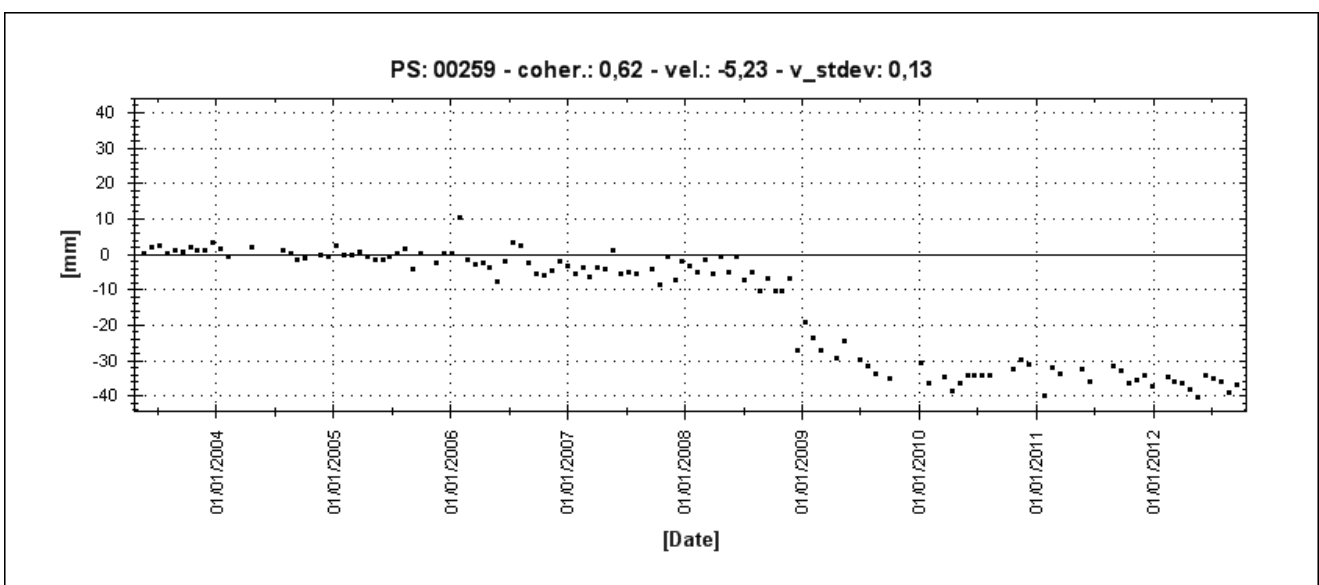


b)

Figura 51 : Confronto tra i dati interferometrici per il periodo 1992 ÷ 2003(a) e il periodo 2003 ÷ 2012 (b), comprendente le fasi di lavorazione per la realizzazione delle opere di difesa dalle esondazioni; si noti la variazione nella zona oggetto dei lavori, con vari riflettori che presentano abbassamenti dell'ordine dei 5 mm/a. Dati forniti da TRE Tele-Rilevamento Europa.



Figura 52 : Ubicazione dei bersagli analizzati da TRE per l'elaborazione delle misure di interferometria radar nel settore del Lungario Trento; il codice di colore si riferisce alla velocità media di spostamento verticale del terreno nell'intervallo 2003 ÷ 2012; in particolare, i punti rossi sul Lungario Trento presentano velocità di subsidenza dell'ordine di 5 mm/anno.



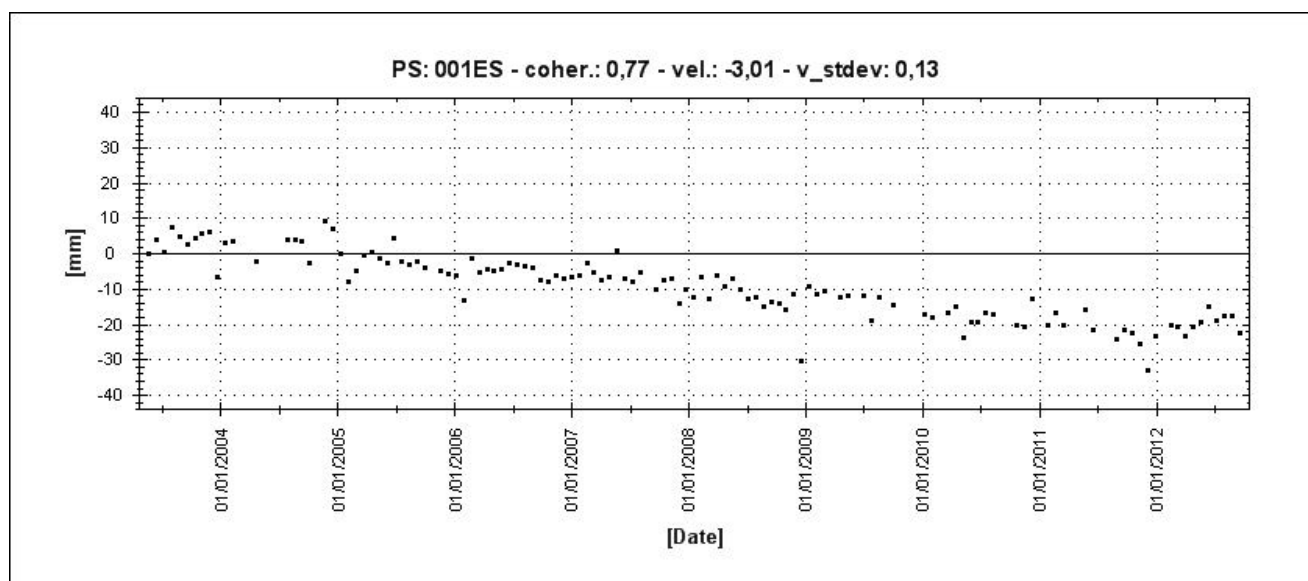


Figura 53 : Serie storica delle deformazioni osservate dai dati di interferometria satellitare TRE durante il periodo 2003 ÷ 2012, corrispondente al grafico spostamento-tempo per i punti PS00259 e PS001ES (ubicazione in Figura 52); nel primo caso è visibile un abbassamento relativo di circa 4 cm avvenuto a seguito dei lavori eseguiti sul Lungo Lario Trento, nel secondo caso si nota l'assenza di variazioni significative nei movimenti del terreno.

Infine, la variazione dell'assetto statico degli edifici è stata monitorata mediante l'impiego di clinometri, installati lungo i due settori contigui ai lotti di lavorazione.

Il periodo monitorato riguarda un intervallo temporale durante il quale si assiste ad una lenta ricarica dell'acquifero superficiale, depresso dalle precedenti fasi realizzative dell'opera (cfr. § 6.3.2.).

In Figura 54 sono illustrati i grafici rappresentativi delle misure di alcuni dei clinometri posizionati in prossimità della vasca B e le principali fasi di realizzazione dell'opera. In particolare è stato evidenziato l'inizio di quelle attività che possono avere influenzato la stabilità del settore costiero: l'infissione delle palancole nell'area di cantiere (da maggio 2008), l'inizio della depressione della falda tramite pompaggio (da luglio 2008) e la risalita della falda (da luglio 2009). Per ciascun clinometro vengono riportate le componenti di movimento (ortogonale e parallelo alla parete su cui è fissato – indicati nei canali a e b) e, in verde, l'andamento delle temperature, per poter sottrarre al segnale rilevato la componente dovuta all'espansione/contrazione termica dell'edificio.

Dai grafici si possono desumere chiaramente deformazioni cumulate su una o entrambe le componenti dei clinometri nel corso del tempo (Ingegneria e Controlli S.r.l., 2010; 2011). In particolare, CL6 presenta un progressivo decremento del valore nel canale CL6b, che incrementa la propria velocità di movimento in corrispondenza delle fasi di aggotamento. Il grafico relativo a CL3b, mostra inoltre come in corrispondenza della fase di risalita della falda a monte del cantiere vi sia un forte recupero dei valori angolari nel suddetto canale, superiore a quello normalmente imputabile alla variazione termica stagionale.

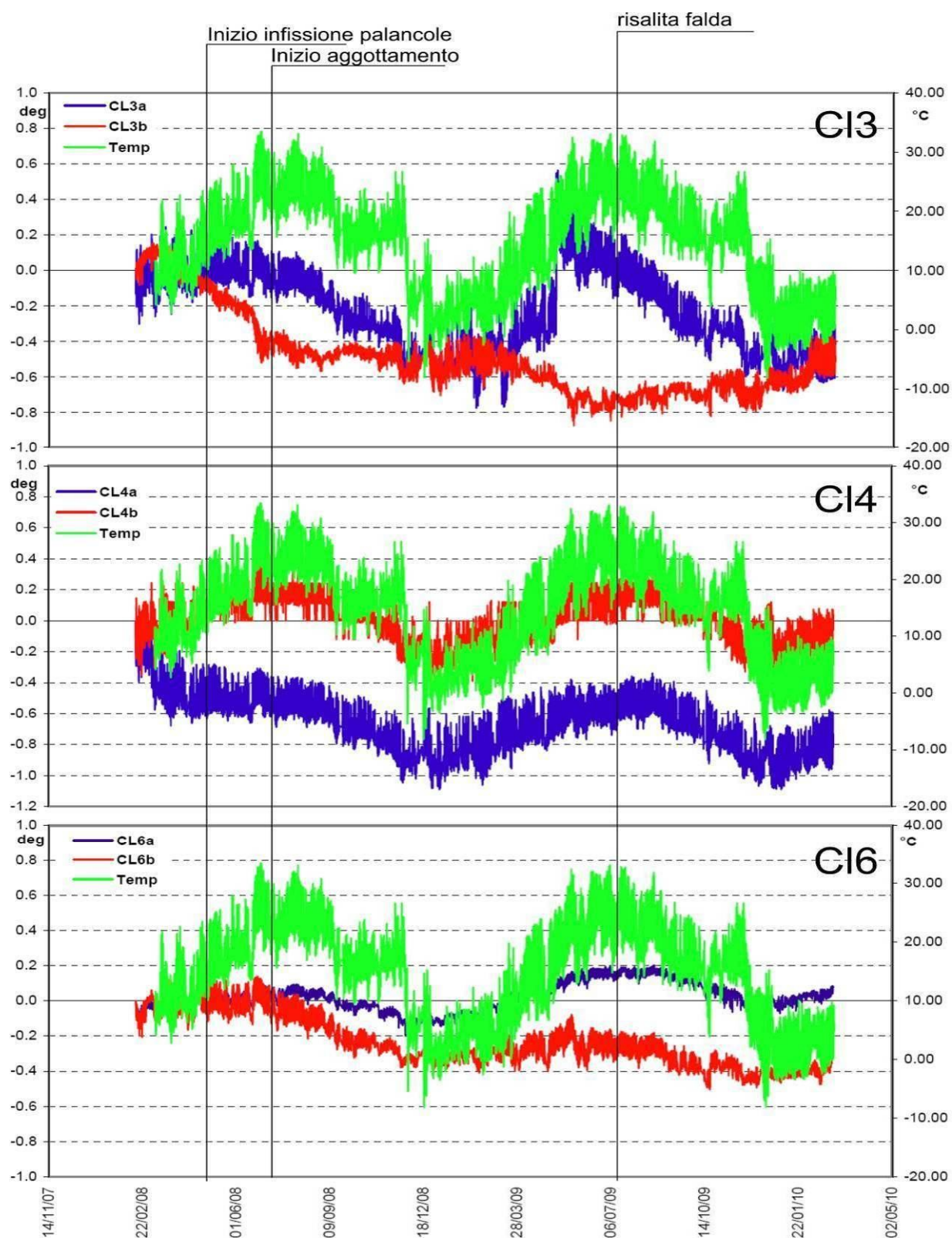


Figura 54 : Dati clinometrici relativi all'area della Vasca B. Si riporta l'inizio delle principali attività di cantiere che possono influenzare la stabilità del settore a lago. Per l'ubicazione degli strumenti si rimanda all'Allegato 3.

I dati appena presentati mostrano numerose evidenze di alterazioni e deformazioni dell'assetto ambientale e del tessuto urbano nell'area più prossima al cantiere; purtroppo manca un monitoraggio del settore *ante operam* e durante alcune fasi realizzative, che avrebbe consentito una precisa definizione delle condizioni

originarie e la discriminazione tra effetti riconducibili alla realizzazione delle opere e fenomeni prettamente naturali, o comunque indipendenti dalle lavorazioni.

I rilevamenti mostrano tuttavia in modo chiaro che quasi contemporaneamente all'avvio dell'aggottamento si rileva una tendenza generalizzata alla rotazione degli edifici verso il Lago, ovvero verso la zona di maggiore depressione piezometrica, accompagnata da un abbassamento verticale del suolo di circa 4 cm, e dall'aumento della velocità di subsidenza nel settore interessato dagli scavi.

Il continuo monitoraggio della rete strumentale (capisaldi, piezometri, clinometri) è pertanto un fattore imprescindibile per una corretta comprensione dei fenomeni in atto e della loro evoluzione futura, nell'ottica di giungere alla migliore gestione possibile del delicato equilibrio ambientale dell'area e della dinamica falda-Lago.

6.4. Evoluzione paleo-ambientale

L'integrazione di tutti i dati presentati in precedenza, unitamente alle datazioni radiometriche disponibili, all'interno di un modello multidisciplinare, ma unitario, ha consentito di sviluppare alcune elaborazioni, volte principalmente alla ricostruzione dell'evoluzione paleo-ambientale dell'area a partire dal momento della deglaciazione del bacino comasco.

In particolare, le datazioni radiocarboniche forniscono utili informazioni sui tassi di sedimentazione degli ambienti deposizionali che si sono succeduti nel tempo; l'analisi comparata dell'intero *database* stratigrafico e dei dati geotecnici ha permesso di identificare spessore ed estensione delle varie unità litostratigrafiche. I risultati ottenuti permettono di ricostruire con un buon dettaglio gli eventi e i processi responsabili dell'attuale assetto fisiografico ed ambientale dell'area, seppure permangono alcuni aspetti che richiedono ulteriori ricerche ed approfondimenti.

6.4.1. Datazioni radiometriche e tassi di sedimentazione

La disponibilità di numerose datazioni radiometriche in vari siti dell'area urbana di Como (Tabella 27) costituisce un elemento fondamentale per identificare le condizioni ambientali che si sono succedute nel tempo. Per il presente studio, tutte le date calibrate sono state ricalcolate con il programma OxCal 4.1, utilizzando la curva di calibrazione IntCal09, in modo da eliminare la variabilità connessa all'uso di diverse curve di calibrazione.

Localizzazione	Profondità (m da p.c.)	Quota (m s.l.m.)	Data convenzionale	Data calibrata (a.C.), 2 σ	Riferimento
Sv2	18,26	182,74	3.722 $\pm$ 38 BP	2.276 $\div$ 1.982	
Sv1	21,70 $\div$ 21,95	179,2	3.959 $\pm$ 61 BP	2.830 $\div$ 2.214	
Sv2	23,92	177,08	4.554 $\pm$ 36 BP	3.485 $\div$ 3.103	
Sv1	25,00 $\div$ 25,20	175,9	4.590 $\pm$ 55 BP	3.518 $\div$ 3.101	Capelletti, 2008
Sv1*	27,25 $\div$ 27,38	173,7	6.653 $\pm$ 65 BP	5.672 $\div$ 5.480	
Sv1*	27,40 $\div$ 27,50	173,5	7.018 $\pm$ 43 BP	5.997 $\div$ 5.799	
Sv2	27,70	173,30	6.347 $\pm$ 38 BP	5.466 $\div$ 5.222	

Sv2	29,42	171,58	7.351 ± 37 BP	6.356 ÷ 6.081	
Sv1*	30,80 ÷ 31,00	170,1	12.496 ± 55 BP	13.111 ÷ 12.249	Capelletti, 2008
Sv2	30,98	170,02	11.172 ± 49 BP	11.291 ÷ 10.921	
Sv1	31,95	169,05	15.140 ± 70 BP	16.667 ÷ 16.081	Capelletti, 2008
S. Abbondio	5,07 ÷ 5,10	204	13.230 ± 120 BP	14.772 ÷ 13.334	Comerci <i>et al.</i> , 2007
S. Abbondio	8,74 ÷ 8,78	201	11.730 ± 180 BP	12.013 ÷ 11.307	Castelletti & Orombelli, 1986
Via Valleggio	4,50 ÷ 4,60	209	5.100 ± 50 BP	3.989 ÷ 3.775	Comerci <i>et al.</i> , 2007
Via Valleggio	5,00 ÷ 5,10	209,5	13.880 ± 200 BP	15.605 ÷ 14.666	Comerci <i>et al.</i> , 2007

Tabella 27 : Datazioni radiometriche disponibili per la convalle comasca. Sv1 e Sv2: Piazza Verdi; i campioni evidenziati con * sono probabilmente riferibili a materiale rimaneggiato.

Di particolare interesse risultano i dati relativi ai due sondaggi di Piazza Verdi, per i quali è stato elaborato un modello preliminare di correlazione tra l'età e la profondità dei sedimenti, in grado di fornire anche informazioni sulla variazione nei tassi di sedimentazione nel tempo.

Tutte le datazioni disponibili per i sondaggi di Piazza Verdi sono state condotte sui sedimenti dello strato di origine palustre presente tra i 17 e i 32 m di profondità; le età calibrate sono comprese tra il 2.000 a.C. circa alla profondità di 18 m dal p.c. e il 16.000 a.C. circa a 32 m dal p.c., coprendo quindi l'intervallo temporale a partire dalla prima parte del Tardoglaciale.

I dati ricavati dai due sondaggi risultano generalmente coerenti tra loro; tuttavia la curva età – profondità è stata elaborata escludendo tre delle datazioni del sondaggio Sv1, poiché presumibilmente riferibili a materiale rimaneggiato.

La Figura 55 mostra due andamenti ben differenziabili: al di sopra dei 29 m di profondità i tassi di sedimentazione sono dell'ordine del mm annuo; al di sotto si hanno invece valori di circa 0,2 ÷ 0,3 mm/a. La brusca variazione corrisponde a circa il 6.000 a.C., e risulta quindi difficilmente ascrivibile a mutamenti indotti dall'attività dell'uomo. Nello stesso intervallo di profondità, si registra una netta variazione anche nella radioattività naturale, misurata mediante il *Gamma-Ray*; in particolare, si distinguono una *facies* radiogenica caratterizzata da alto contenuto organico (16,5 ÷ 29,5 m) e una *facies* che indica deposizione omogenea di sedimenti fini (29,5 ÷ 48 m). La variazione nel tasso di sedimentazione sembra quindi essere causata da mutamenti climatici e vegetazionali avvenuti nel bacino idrografico.

L'intera sequenza indagata con le datazioni è riferibile alla deposizione di limi e sabbie in condizioni di bassa energia, tipica di ambienti stagnanti; localmente, non è da escludere l'occasionale emersione di porzioni del bacino, che avrebbe provocato l'erosione di parte dei sedimenti, o quantomeno la presenza di fasi con assenza di deposizione. Il modello età – profondità deve quindi essere considerato il risultato “netto” di tutti i processi che si sono susseguiti nel tempo; tale limitazione risulta di notevole rilevanza per alcune tipologie di analisi, quali ad esempio quelle palinologiche e paleobotaniche, che mirano alla ricostruzione dell'evoluzione vegetazionale con risoluzione dell'ordine delle decine – centinaia di anni.

Questo ostacolo risulta tuttavia meno problematico ai fini della presente ricerca, che si occupa di valutare le variazioni su un arco temporale più esteso, e di ricostruire gli eventi più significativi a partire dall'ultimo massimo glaciale (cfr. § 6.4.3.) e le proprietà fisiche e meccaniche del sottosuolo su aree spazialmente estese. In tale contesto, la risoluzione offerta dalle datazioni disponibili risulta sufficiente per il raggiungimento degli obiettivi prefissati.

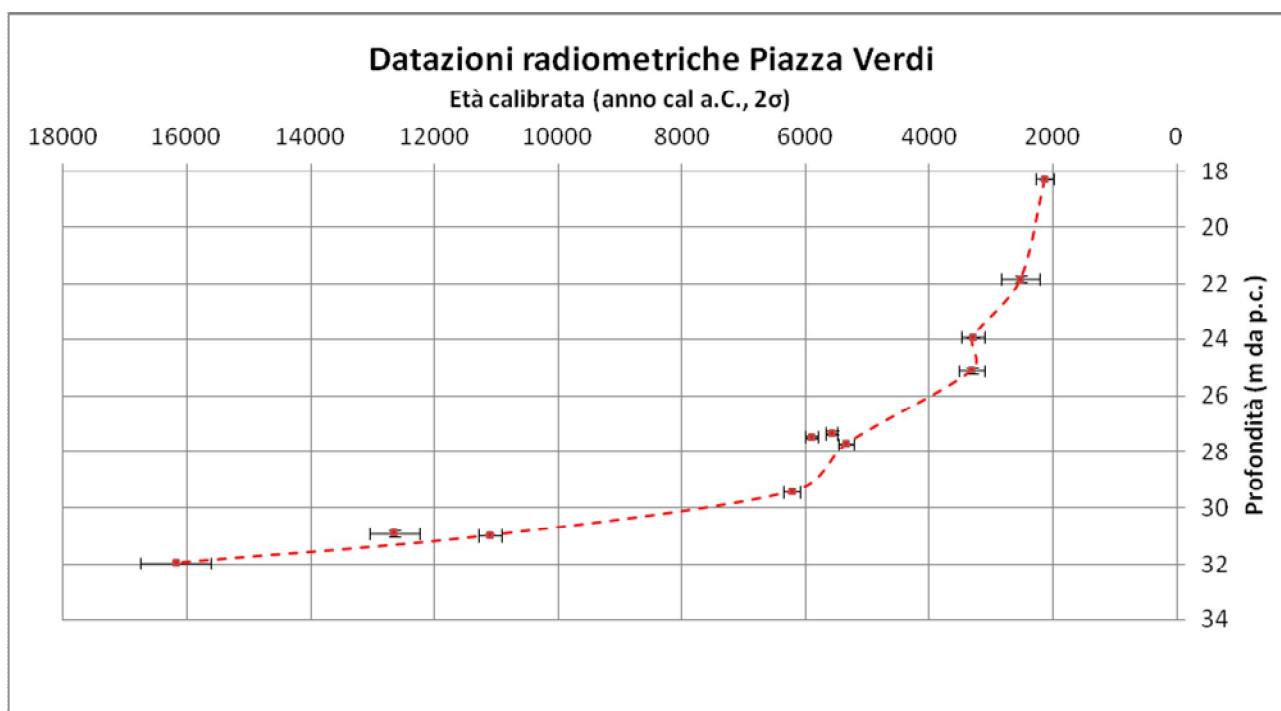


Figura 55 : Modello età – profondità ricavato dalle datazioni radiometriche disponibili per i due sondaggi di Piazza Verdi; le barre di errore orizzontali indicano l'intervallo 2σ per l'età calibrata. Tre campioni sono stati esclusi dal modello poiché probabilmente hanno subito processi di rimaneggiamento.

Il confronto dei dati disponibili per Piazza Verdi con gli altri presenti nell'area urbana di Como e con quanto noto in letteratura in contesti analoghi permette di estendere tentativamente il modello anche nelle zone non coperte da datazioni (Figura 56).

È necessario premettere che l'elaborazione del modello risulta condizionata da numerosi fattori affetti da incertezza, per via della mancanza di una buona base di dati di partenza; si ritiene tuttavia utile presentare questi dati poiché, seppur qualitativi, forniscono interessanti spunti per eventuali future ricerche.

La parte alta del modello è stata completata ipotizzando che l'età del piano campagna di Piazza Verdi corrisponda al 2.000 d.C.; tale ipotesi, volutamente semplicistica, consente di delineare il tasso di sedimentazione medio nell'arco di tempo in cui, presumibilmente, l'influenza antropica oblitera gran parte dei contributi naturali. Ovviamente uno studio di dettaglio, che tuttavia esula dagli scopi della presente tesi, dovrebbe essere basato su di un approccio di tipo archeologico o vegetazionale.

Per quanto riguarda i primi stadi della deglaciazione, la caratterizzazione mediante datazioni radiometriche risulta particolarmente complessa, a causa della scarsa presenza di materiale databile. Infatti, per alcune migliaia di anni tra il ritiro del ghiaccio e l'interstadiale di Bolling-Allerød, le vallate alpine rimasero in condizioni paraglaciali, favorendo una intensa evoluzione dei versanti e dei fondovalle e la deposizione di ingenti successioni sedimentarie, con tassi di sedimentazione molto elevati (Ravazzi *et al.*, 2007).

Il ritiro dei ghiacciai alpini dagli anfiteatri pedemontani è datato tra 21 e 18 mila anni cal BP, sia in Svizzera che in Italia (Ivy-Ochs *et al.*, 2004; Van Husen, 2004; Monegato *et al.*, 2007); la deglaciazione dei principali laghi prealpini, situati all'interno degli anfiteatri, è stata ipotizzata da Orombelli (1984) tra i 15 e i 14 mila anni BP (13 ÷ 12 mila a.C.) e da Ravazzi *et al.* (2007) a 17,5 mila anni cal BP (15,5 mila a.C.). Le datazioni disponibili per Piazza Verdi anticipano ulteriormente tale data: infatti, a 16.747 ÷ 15.623 a.C., relativa alla profondità di 31,95 m dal p.c. in Sv1, si è in presenza di deposizione lacustre con sostanza organica (datazione riferita al carbonio organico totale nel campione analizzato). Le analisi del contenuto

paleobotanico su Sv1 hanno rivelato che il limite inferiore dei macroresti ($> 500 \mu\text{m}$) si trova a 30,80 m di profondità in Sv1 e circa 2 m più in basso in Sv2; inoltre, altri resti vegetali di dimensioni comprese tra 500 e $125 \mu\text{m}$ (legni, epiteli vegetali) sono distribuiti a partire da 33,06 m in Sv1 e 33,89 m in Sv2 (Mazzola, 2012). Il limite inferiore della presenza di granuli pollinici corrisponde a 34,90 m in Sv2. Al di sotto di tali profondità, la stratigrafia dei sondaggi di Piazza Verdi indica la deposizione di circa 35 m di sedimenti lacustri inorganici, rinvenuti fino al fondo foro delle perforazioni.

Pertanto, il limite inferiore della comparsa di sostanza organica in Sv1 corrisponde ad un'età antecedente il $16.747 \div 15.623$ a.C., trovandosi 1 m al di sotto rispetto al livello datato. L'età della scomparsa del ghiaccio dalla conca di Como deve quindi essere più antica rispetto al 16 mila a.C..

Si ricorda che i dati geotecnici mostrano che questi sedimenti sono normalmente consolidati e risultano pertanto post-glaciali. Coerentemente con la cronologia del Tardiglaciale del versante sud delle Alpi, la scomparsa del ghiacciaio dal bacino di Como può essere posta attorno al 18 mila a.C..

Il miglioramento climatico dell'interstadio di Bolling-Allerød e più ancora dell'Olocene si esprime con la progressiva copertura forestale che riduce la dinamica dei processi erosivi, promuovendo l'instaurarsi di una lunga fase di prevalente biostasia (Bassetti & Borsato, 2005). L'aumento della paleo produttività dei bacini lacustri-palustri e la diminuzione della componente terrigena portano ad avere tassi di sedimentazione nettamente inferiori rispetto alle prime fasi tardoglaciali.

In sintesi, il modello età – profondità, esteso dalla deglaciazione all'attuale, evidenzia quattro fasi ben distinguibili:

- dal 2.000 d.C. al 3.200 a.C. si registrano tassi di sedimentazione di circa 5 mm/a, presumibilmente riconducibili all'intensa attività antropica;
- dal 3.200 al 6.200 a.C. la sedimentazione si attesta su valori di circa 1 mm/a;
- dal 6.200 al 16.000 a.C. i tassi di sedimentazione “netti” dei limi organici sono di circa $0,3 \div 0,5$ mm/a; questa fase è visibile nel sondaggio Sv2 a partire dai 34,90 m dal p.c., dove sono presenti i primi granuli pollinici: in presenza di tassi di sedimentazione particolarmente elevati, infatti, la conservazione dei pollini sarebbe impossibile;
- dal 16.000 a.C. e fino al momento della deglaciazione si stima che i tassi di sedimentazione siano di circa $1 \div 2$ cm/a, quindi quasi 2 ordini di grandezza superiori alla fase precedente.

Tale ultima fase risulta in accordo con quanto noto in letteratura per il periodo Tardoglaciale in altre aree alpine; i sedimenti inorganici, depositi immediatamente a seguito della deglaciazione, presentano infatti meccanismi e modalità genetiche differenti rispetto ai terreni organici sovrastanti. Numerosi studi condotti in ambienti lacustri e marini ad elevata energia, sia fossili (Ashley, 1975; Clague, 1975; Bassetti & Borsato, 2005) che attuali (Church & Gilbert, 1975; Gilbert, 1982; Elverhoi *et al.*, 1983), hanno permesso di caratterizzare in dettaglio le forme sedimentarie e l'evoluzione ambientale di questa particolare tipologia di ambienti.

I tassi di sedimentazione in ambienti glaciolacustri e glaciomarini sono notevolmente maggiori rispetto alla deposizione in ambiente non glaciale, raggiungendo ordini di grandezza compresi tra i cm e i m/anno, a causa delle abbondanti risorse di materiale detritico e del regime idrologico ad elevata energia; inoltre, i tassi di sedimentazione decrescono esponenzialmente allontanandosi dalla fronte glaciale (Church & Gilbert, 1975; Clague, 1975; Elverhoi *et al.*, 1983). Tutti questi dati supportano la validità del modello ipotizzato per Piazza Verdi.

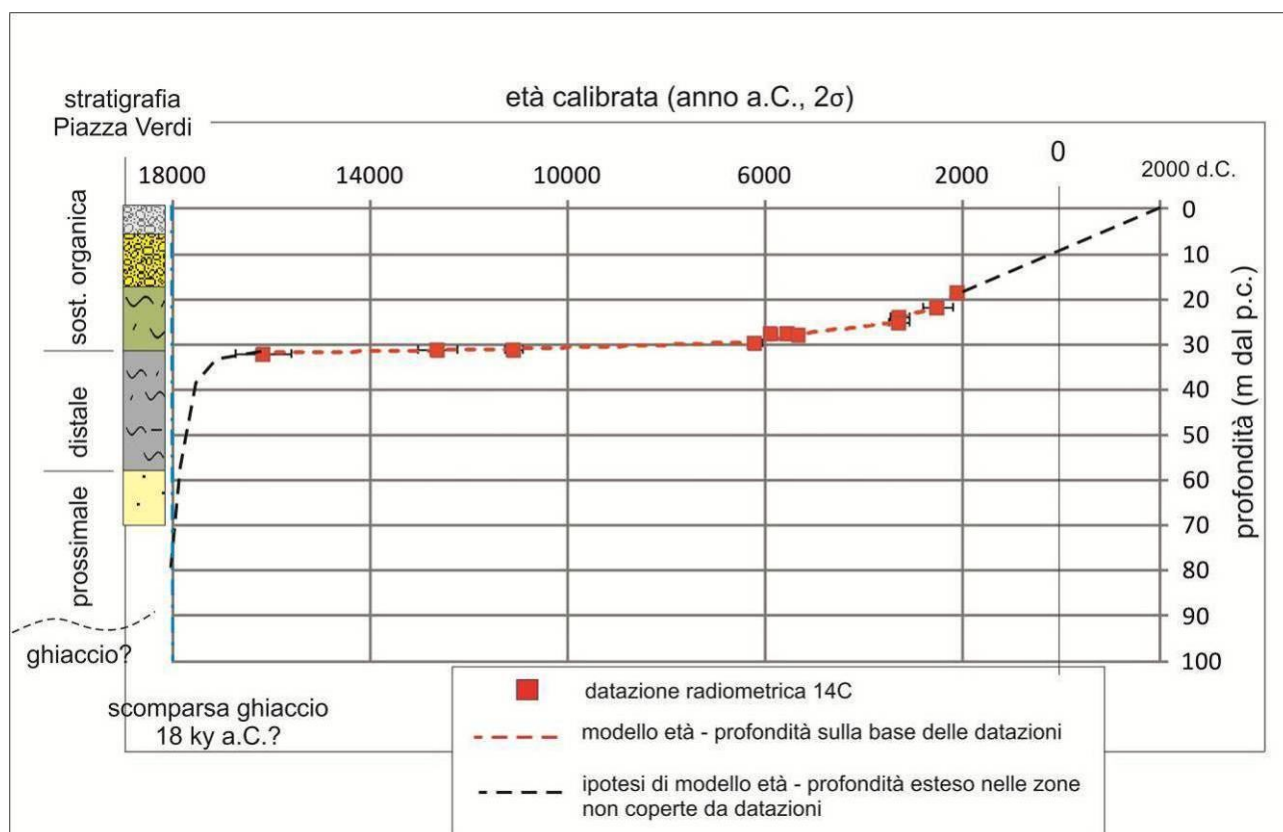


Figura 56 : Estensione del modello età – profondità sulla base di dati di letteratura. Si noti la repentina variazione nei tassi di sedimentazione nelle prime fasi dopo la scomparsa del ghiaccio.

In letteratura sono presenti altre datazioni radiocarboniche per l'area di Como, effettuate nella zona di S. Abbondio, al margine SO della convalle (Castelletti & Orombelli, 1986; Comerci *et al.*, 2007) e in via Valleggio, nella zona sud-orientale dell'area urbana di Como (Comerci *et al.*, 2007). L'analisi delle numerose stratigrafie presenti nell'area di S. Abbondio ha permesso di identificare dei depositi di spiaggia e diversi ordini di terrazzi lacustri, disposti a quote comprese tra i 209 e i 214 m s.l.m.; le stratigrafie presentano i caratteri tipici di una regressione deposizionale, con sedimenti che dal basso verso l'alto mostrano granulometrie sempre maggiori, a testimonianza del succedersi di ambienti deposizionali con condizioni energetiche via via maggiori. Le due datazioni disponibili per l'area in oggetto (13.230 ± 120 BP; 11.730 ± 180 BP) sono presumibilmente condizionate da processi di rimaneggiamento, dal momento che il reperto più antico si trova a profondità minori.

Nell'area di via Valleggio, invece, un livello ricco in sostanza organica, posto a 5 m dalla superficie (circa 209 m s.l.m.), è stato datato a 16.650 anni BP. Nella sequenza litostratigrafica analizzata in quest'area mancano le sabbie di spiaggia; la zona, infatti, si trova nell'area centrale della valle, quindi più depressa rispetto a S. Abbondio. Di conseguenza, mentre ai margini della convalle si depositavano sabbie, in via Valleggio sedimentavano limi di ambiente lacustre-palustre.

Per una ricostruzione più completa dell'evoluzione ambientale post-glaciale, si rimanda al successivo § 6.4.3.

6.4.2. Definizione degli ambienti deposizionali ed elaborazione dei dati stratigrafici

La disponibilità di oltre 300 stratigrafie di sondaggio localizzate in tutta l'area urbana di Como ha permesso di definire in dettaglio posizione, estensione e spessore delle varie unità che caratterizzano la sequenza stratigrafica del sottosuolo. A causa della scarsa omogeneità dei dati, è stato possibile eseguire elaborazioni di dettaglio solo in zone specifiche (lungolago, Duomo, S. Abbondio), dove sono presenti dati a migliore risoluzione. L'analisi complessiva dei dati a disposizione ha permesso invece di ottenere informazioni qualitative sull'intera area urbana di Como.

I profili geologici presentati nell'Allegato 4 sono stati ulteriormente analizzati al fine di identificare le caratteristiche peculiari dei vari ambienti deposizionali. Gli elementi considerati nell'elaborazione fanno riferimento ad alcuni indicatori che forniscono informazioni utili per ricostruire l'evoluzione delle condizioni di sedimentazione, quali la presenza di minerali specifici (vivianite) o di ciottoli isolati (*dropstones*).

È stato così possibile identificare cinque ambienti deposizionali che si sono succeduti nel tempo; a partire dall'alto, si riconoscono:

- Sedimenti con sostanza organica dispersa o in aggregati e presenza di gusci di gasteropodi e materiale vegetale; comprende parte delle Unità 1 e 3 dei profili geologici. L'ambiente deposizionale è di tipo palustre, con condizioni di anossia; la parte superiore comprende il riporto antropico.
- Sabbie ghiaiose, riconducibili a deposizione alluvionale ad opera dei corsi d'acqua che andavano via via riempiendo la convalle; coincide con l'Unità 2 dei profili stratigrafici.
- Ritmiti; matrice limosa con accessoria sabbia o argilla in funzione di posizione e profondità. Aggregati limosi scuri organici disposti in letti sottili (1 ÷ 2 mm) generalmente sub-orizzontali, talvolta inclinati o convoluti, alternati a materiale più chiaro inorganico di spessore più elevato. Presenza di vivianite in livelli o concrezioni, gusci di molluschi e frustoli vegetali o resti lignei. Corrispondono a parte delle Unità 3 e 4; l'ambiente di sedimentazione è di tipo lacustre-palustre. Transizione netta al livello sottostante, coincidente con il limite inferiore dei terreni con diffusa presenza di sostanza organica.
- Limi inorganici con livelli sabbiosi e presenza di *dropstones*, corrispondenti a parte delle Unità 5 e 6 dei profili geologici. La litologia dei clasti è variabile (calcarei, granitoidi, metamorfici), il diametro medio è di 1 ÷ 2 cm, con valori massimi accertati di 80 cm. Occasionalmente, si rinviene ghiaia in livelli spessi fino a 10 cm, potenzialmente riconducibili ad eventi ad elevata energia (piene di fiumi proglaciali) o a detrito di versante. Depositi ascrivibili a sedimenti glaciolacustri distali.
- Sabbie con *dropstones*, corrispondenti all'Unità 7; rappresentano depositi glaciolacustri più prossimali, contraddistinti da matrice più grossolana.

I dati in possesso non consentono di evidenziare eventuali differenze granulometriche nelle alternanze di livelli organici ed inorganici; si riscontra tuttavia che i letti organici hanno spessore generalmente millimetrico, e sempre inferiore rispetto ai livelli inorganici.

Tale andamento si può spiegare con il fatto che le ritmiti, almeno nella parte più profonda dei sondaggi, si depositano in un ambiente di lago proglaciale: lo strato organico sedimenta solo durante la stagione estiva, di breve durata nel periodo ancora freddo seguente alla deglaciazione, e con poca disponibilità di sostanza organica.

Inoltre, le ritmiti si rinvengono per spessori consistenti, per un massimo di circa 30 m nella zona del lungolago, senza rilevanti variazioni verticali, a testimonianza della presenza di un ambiente di

sedimentazione costante e privo di grosse perturbazioni; pertanto, è possibile supporre che tali sedimenti si siano accumulati in posizione distale e relativamente distante dagli immissari. La presenza di vivianite in livelli o concrezioni è sempre associata a questo orizzonte deposizionale, mentre i *dropstones* sono del tutto assenti, dal momento che compaiono esclusivamente al di sotto del limite dei materiali con diffusa presenza di sostanza organica. Analogamente a quanto evidenziato tramite i profili geologici, si nota che tutti gli strati aumentano di spessore nella zona del depocentro del bacino e tendono a rastremarsi verso sud.

Le stratigrafie rilevano anche alcuni livelli in cui gli strati delle ritmiti sono inclinati fino a $35 \div 40^\circ$ o convoluti; le possibili spiegazioni per tale fenomeno sono numerose, e comprendono processi di clinostratificazione (deposizione su *foreset*, *ripples*, stratificazioni incrociate), deformazioni sinsedimentarie (*microslumping*) o effetti cosismici (liquefazioni).

La disponibilità esclusivamente di dati di sondaggi e la contestuale mancanza di affioramenti impediscono di identificare in modo univoco il processo genetico specifico di queste strutture; si ritiene tuttavia oltremodo interessante l'approfondimento delle ricerche in questo senso, che potrebbero fornire ulteriori informazioni per una più completa comprensione dell'evoluzione ambientale.

Per quanto riguarda le elaborazioni condotte sull'intero *database*, si è proceduto a valutare l'andamento e lo spessore dei limiti stratigrafici. La Figura 57 presenta lo spessore del riporto, che evidenzia valori generalmente compresi tra 1 e 5 m, con un notevole ispessimento verso lago, e in particolare a partire dalla zona di Piazza Grimoldi; tale andamento potrebbe marcare un primo intervento antropico di riporto, antecedente al 1722. Il Palazzo Vescovile, il cui edificio originario risale all'XI sec. attesta comunque che in quel punto la linea di costa per parecchi secoli era già posizionata molto prossima a quella cartografata per il XVIII secolo.

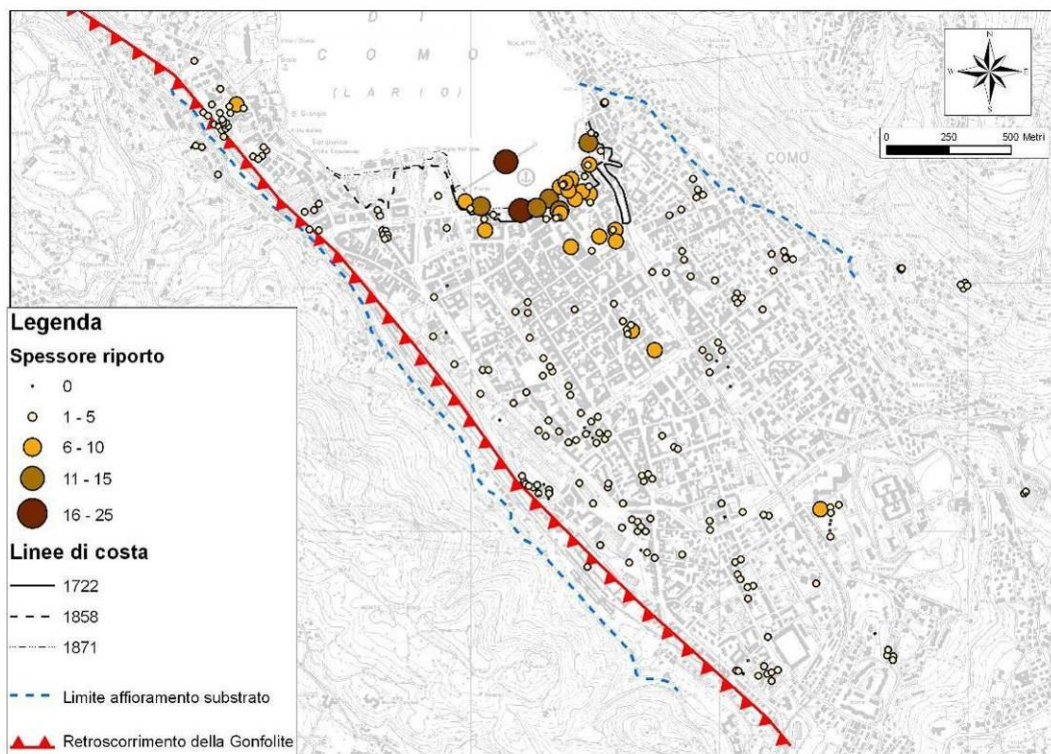


Figura 57 : Spessori relativi al riporto antropico, che risultano più consistenti nella zona del lungolago; è evidenziato anche il progressivo avanzamento della linea di costa in epoca storica.

Per quanto riguarda lo strato palustre, in primo luogo ne è stato calcolato lo spessore; i valori sono stati suddivisi in 6 classi (0 m; 1 ÷ 2 m; 3 ÷ 5 m; 6 ÷ 10 m; 11 ÷ 15 m; >15 m) e riportati sulla mappa. Nei casi in cui lo strato organico è assente si registra il passaggio diretto tra sedimenti grossolani alluvionali e argille glaciolacustri. La Figura 58 mostra come gli spessori più consistenti siano presenti al centro della convalle; i valori massimi, superiori ai 30 m, si registrano nella zona del lungolago.

Sono state inoltre tracciate le linee di separazione tra aree in cui lo strato organico è presente e aree in cui tale strato è assente; la zona di via Dante – via Tommaso Grossi, in cui lo strato organico è assente, è stata identificata da Autori precedenti (Comune di Como, 1980; Bini, 1993) come un antico conoide del Torrente Valduce. Il limite si attesta a quote comprese tra 210 e 220 m s.l.m. ed è indicativo del livello del lago al momento del passaggio stratigrafico tra sedimentazione di depositi prettamente inorganici e depositi con sostanza organica.

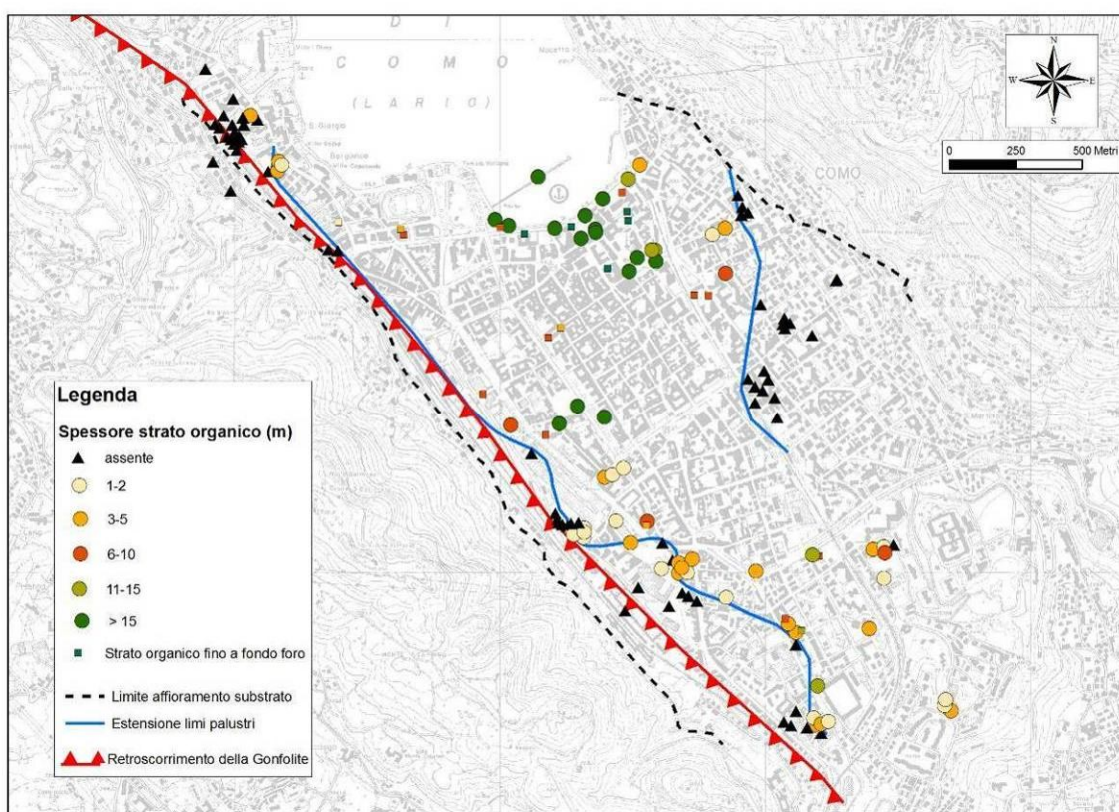


Figura 58 : Sulla CTR sono riportate le classi degli spessori relativi allo strato organico, il limite dell'affioramento del substrato, le linee di demarcazione dell'estensione dei limi palustri e il Retroscorrimento della Gonfolite. Si evidenzia il maggior spessore di limi palustri nell'area di piazza Verdi e piazza Cavour e l'assenza degli stessi nella zona est dell'area urbana. I simboli quadrati indicano un valore minimo (la base del sondaggio è situata nello strato organico).

L'elaborazione di Figura 59 evidenzia i sondaggi in cui si sono rinvenuti il substrato roccioso in profondità (simbolo rosso) e/o i sedimenti fini inorganici di origine glaciale (verde); in giallo sono invece mostrati i punti in cui lo strato limoso con sostanza organica è assente.

Si può notare come il substrato sia stato perforato esclusivamente nelle aree più periferiche rispetto alla piana su cui sorge la città di Como. In corrispondenza di un pozzo per acqua in Viale Innocenzo XI, il substrato gonfolitico è stato perforato alla profondità di 181,5 m dal piano campagna (cfr. Allegato 4): questo pozzo è

situato al margine della piana, quindi è possibile supporre che i sedimenti quaternari presenti nel depocentro del bacino abbiano spessori almeno equivalenti, se non addirittura maggiori.

Per quanto riguarda i depositi fini glaciali, questi sono stati perforati sia nelle zone esterne della convalle, dove si incontrano a pochi metri di profondità, sia al centro dell'area urbana, a profondità superiori ai 30 metri. Considerando che buona parte dei sondaggi si spinge fino a profondità inferiore ai 30 metri e il tipo di ambiente di sedimentazione (fase di ritiro del ghiacciaio, presenza di un lago proglaciale), si può ragionevolmente dedurre che limi e argille inorganici siano presenti in tutto il territorio.

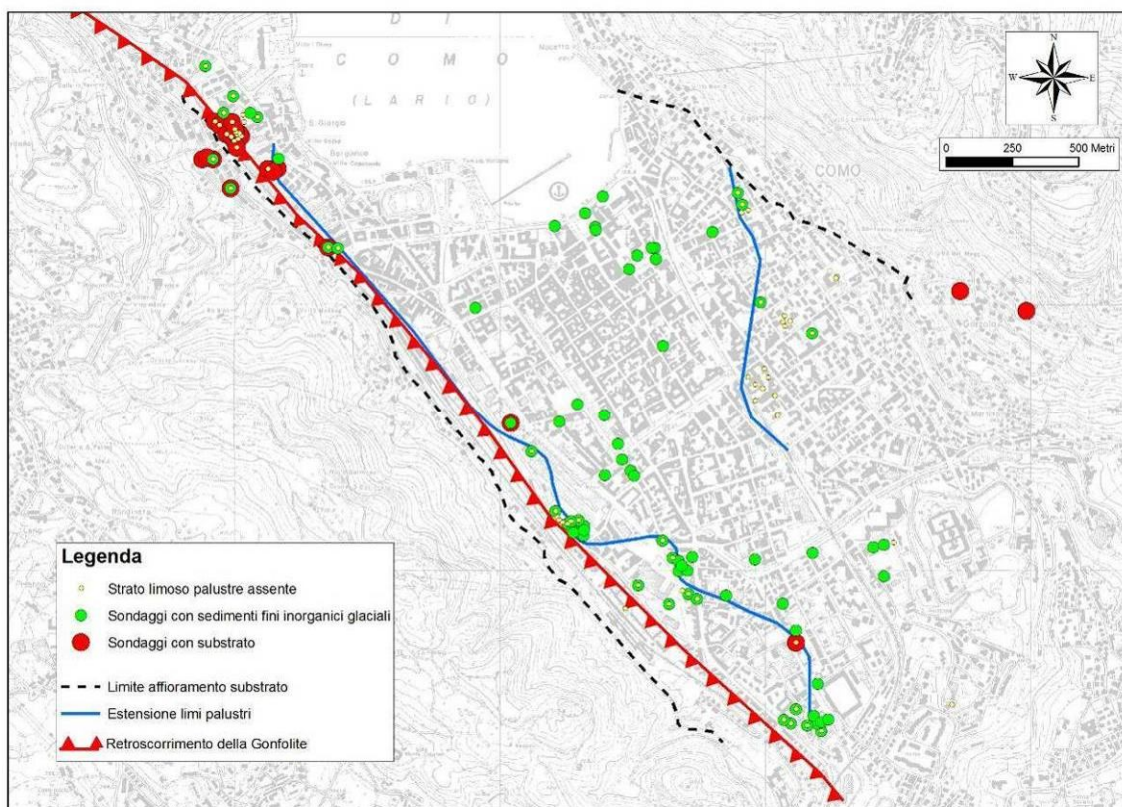


Figura 59 : Sulla CTR sono evidenziati i sondaggi in cui non si sono rilevati strati palustri (giallo), i sondaggi che hanno rilevato la presenza di depositi fini inorganici (verde) e quelli che hanno raggiunto il substrato (rosso).

Un'ulteriore linea di indagine è costituita dall'osservazione della quota delle transizioni tra le varie unità litologiche, e di conseguenza tra gli ambienti deposizionali.

La Figura 60 presenta la quota assoluta della base dello strato palustre, cioè il passaggio tra sedimenti organici e sedimenti inorganici di ambiente glaciolacustre; in seguito, è stata elaborata una superficie di interpolazione tra i dati, che mostra l'andamento altimetrico del passaggio stratigrafico.

Il limite raggiunge quote inferiori ai 150 m s.l.m. (quindi circa 50 m dal p.c.) nella zona della Diga Foranea – giardini a Lago, e diventa più superficiale spostandosi verso le zone esterne e verso sud, in accordo a quanto rinvenuto nell'analisi dello spessore dello strato palustre e nella costruzione dei profili stratigrafici. Al centro della convalle la base dello strato organico si trova a profondità inferiori rispetto ai lati, per via delle conseguenze di lungo termine della subsidenza locale (Comerci, 2004).

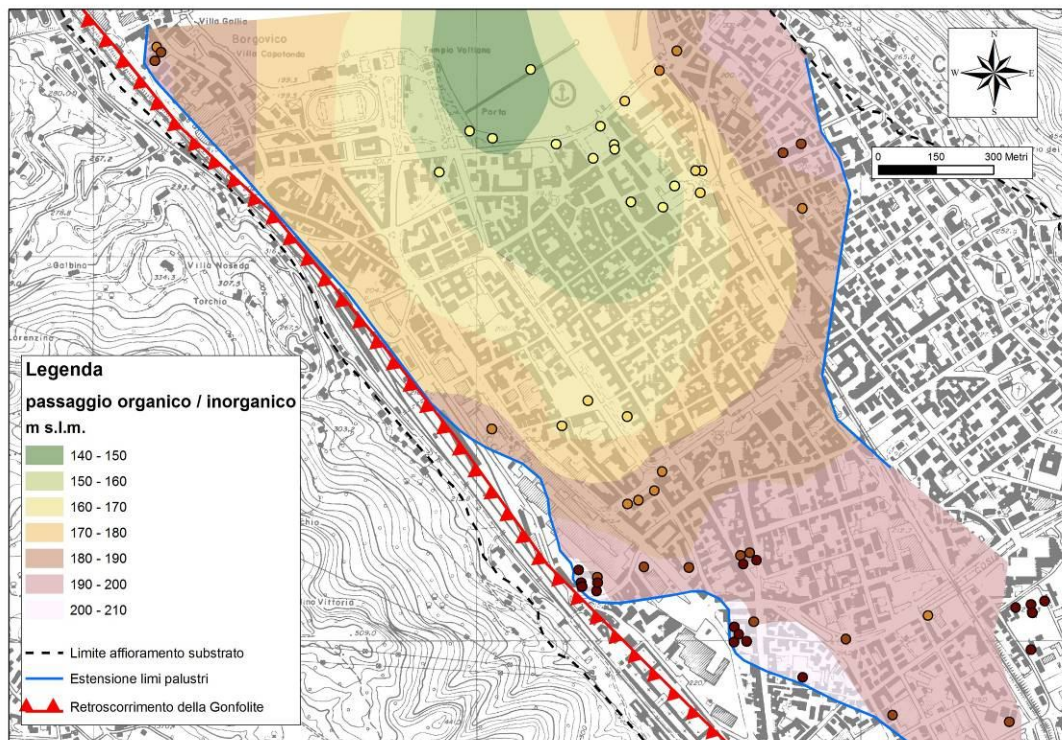


Figura 60 : Andamento del passaggio tra sedimenti con diffusa presenza di sostanza organica e sedimenti inorganici. Sono raffigurate le quote assolute individuate tramite l'analisi delle stratigrafie e una superficie di interpolazione tra i punti.

La Figura 61 presenta invece la quota assoluta del passaggio tra sedimenti fini distali e depositi sabbiosi prossimali; i dati di partenza sono in questo caso meno numerosi poiché minore è il numero dei sondaggi che raggiungono profondità adeguate per l'osservazione di questo limite.

La superficie risulta più omogenea rispetto alla base dei limi palustri, con variazioni altimetriche più contenute, soprattutto lungo la direttrice N-S; si registrano invece cospicue variazioni verticali nell'area di S. Agostino, con il limite che risale fino a circa 20 m dal p.c. (180 m s.l.m.).

Questa superficie non è influenzata dal fenomeno della subsidenza, poiché il costipamento delle sabbie profonde è praticamente trascurabile rispetto a quello dei depositi fini sovrastanti; è possibile quindi osservare la morfologia del fondale del lago proglaciale formatosi subito dopo la deglaciazione.

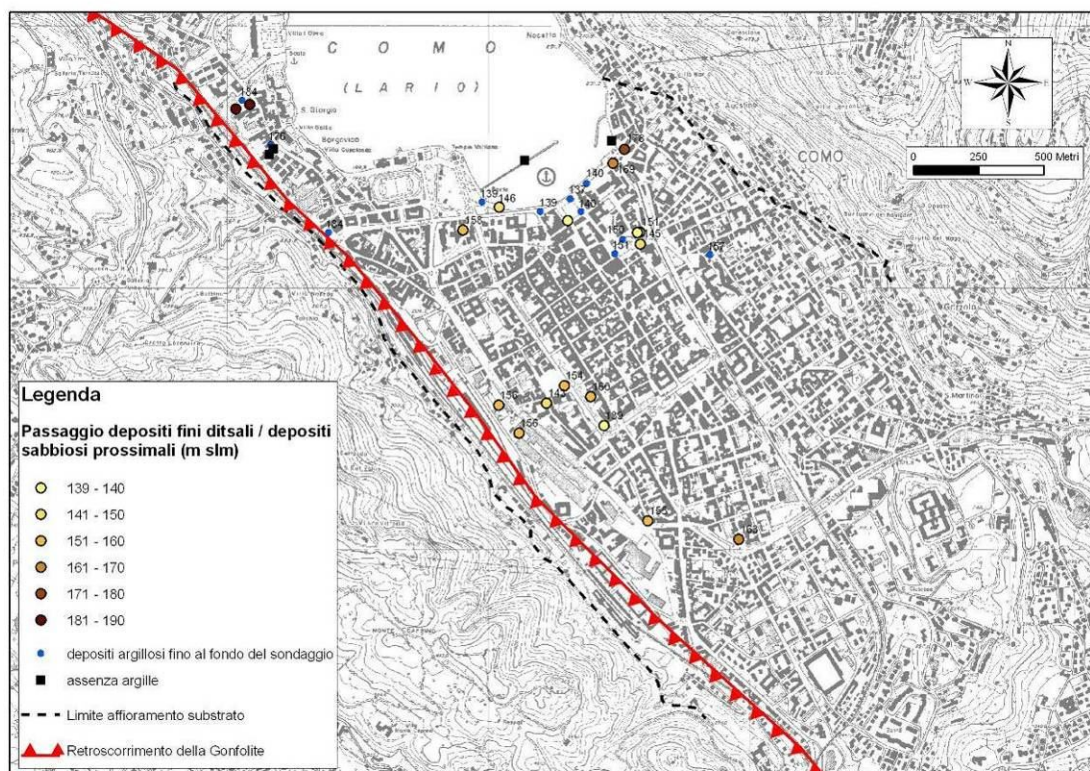


Figura 61 : Quote del passaggio tra sedimenti lacustri distali e prossimali, desunte dalle stratigrafie di sondaggio. I punti rappresentati in blu costituiscono un valore minimo (la base del sondaggio non raggiunge il limite stratigrafico in oggetto).

6.4.3. Ricostruzione dell'evoluzione ambientale tardo-quadernaria dell'area comasca

L'analisi integrata e multidisciplinare delle cartografie storiche, dei ritrovamenti archeologici e dei dati esposti in precedenza ha permesso di ricostruire l'evoluzione ambientale dell'area comasca a partire dal Pleistocene superiore, schematicamente riassunta nella Figura 62.

- a) Durante l'ultimo massimo glaciale e nelle Fasi di Cantù e di Cucciago la conca comasca è ricoperta dal ghiacciaio Abduano, che a Brunate raggiunge gli 800 m di quota; gli scaricatori glaciali defluiscono da nord a sud, scavando ampie vallate, quale quella del Fiume Seveso, sovradimensionate rispetto al drenaggio attuale.
- b) Alla fine della fase di Cucciago il ghiacciaio si ritira nella valle del Lago di Como formando un primo lago proglaciale; nella successiva Fase della Ca' Morta il ghiacciaio avanza di nuovo erodendo i depositi lacustri, ed è solo alla fine della Fase della Ca' Morta che si verifica il definitivo ritiro del ghiacciaio dalla piana comasca. Quando il ghiaccio si ritira a monte della soglia di Camerlata, tra la fronte del ghiacciaio e la soglia stessa si forma un lago proglaciale alla quota di 270 m s.l.m., con emissario che defluisce verso sud dalla soglia di Acquanegra. Un altro lago proglaciale si forma nella piana di Chiasso alla quota di 300 m s.l.m.; tra i due laghi doveva sussistere una connessione, con l'acqua che fluiva dal lago proglaciale "di Chiasso" verso quello "di Como". In questa fase si ha un notevolissimo apporto sedimentario, con i fiumi proglaciali e il ghiaccio stesso

in scioglimento che entrano nel lago come flusso di fondo, poiché più densi a causa del carico di sedimenti. Si depongono così *till* e sabbie prossimali; durante il ritiro si formano anche alcuni delta proglaciali che, in zona di Como, sono testimoniati dai dossi di Bontà e del Manicomio (Bini, 1993).

- c) Con il proseguire dell'arretramento del ghiaccio, il lago proglaciale si espande, restando sempre alla quota di 270 m s.l.m.; sul fondo lacustre si depongono limi e argille inorganiche, che vengono dispersi in tutto il bacino da correnti di torbidità.
- d) A scala più ampia, anche nel ramo lecchese si forma un lago sbarrato dalla fronte glaciale; tale bacino si attesta però a quote inferiori ai 220 m s.l.m., come testimoniano lembi di terrazzo e depositi di argille lacustri (Nangeroni, 1972).
- e) Con l'arretramento del ghiaccio fino all'altezza della soglia di Bellagio – Menaggio si verifica l'unione dei laghi proglaciali presenti nel ramo comasco e in quello lecchese; le acque del lago proglaciale comasco si scaricano nel lago di Lecco, il cui livello si trova, come detto, poco al di sotto dei 220 m s.l.m., cioè oltre 50 m più basso rispetto a quello di Como. Il fenomeno deve essersi ripetuto più volte a causa delle pulsazioni glaciali (Bini, 1993). Con l'unione dei due laghi, si modifica anche la direzione del drenaggio nell'area comasca: le acque non fluiscono più verso sud, tramite la soglia dell'Acquanegra, ma verso nord.

Dall'analisi delle stratigrafie di sondaggio (cfr. Figura 58) si può affermare con certezza che l'inizio della deposizione della sostanza organica avviene quando il ghiaccio è già a monte della soglia di Bellagio – Menaggio e il lago proglaciale si dispone a quote comprese tra i 210 e i 220 m s.l.m.; le datazioni radiocarboniche indicano inoltre che tale evento avviene prima del 16 mila a.C. circa (cfr. Tabella 27). I campioni datati consentono anche di individuare la quota del lago proglaciale: la datazione condotta in Via Valleggio indica che il livello del lago era circa 11 m più alto di oggi. Da specie arboree ritrovate nei depositi di Sant'Abbondio si risale a date di 15.900 e 13.810 anni BP, con prelievi a circa 204 e 201 m s.l.m.; a quel tempo il livello del lago era più alto di 6 m e 3 m rispetto a oggi e l'inizio della forestazione è confermato da analisi sui pollini (Comerci *et al.*, 2007). La quota del lago proglaciale può essere desunta anche dalla localizzazione delle sabbie sciacquate di spiaggia, rinvenute ad esempio nei sondaggi di San Abbondio e Borgovico.

- f) Durante l'Olocene la conca comasca viene progressivamente colmata dalle alluvioni del Cosia e del Valduce e, ai bordi della valle, dai detriti di versante e dai depositi di conoide (Comerci, 2004), fino a raggiungere la configurazione fisiografica attuale. L'apporto del Cosia è stato inizialmente molto modesto: infatti, il bacino idrografico del Cosia quale immissario del Lago di Como era in origine limitato alla sua bassa valle (Camnago Volta) ed ai valloni di Civiglio e Ponzate. Solo in seguito, per fenomeni di cattura, il bacino si è allargato sino a comprendere tutta l'attuale estensione (Ascheri, 1972). Tra i meccanismi che hanno portato al riempimento della conca comasca prevale la lenta sedimentazione del materiale fine portato in sospensione dalle acque in ambiente di bassa energia; occasionali piene fluviali favoriscono invece il deposito di materiale grossolano.

Infine, in epoca storica, il corso del Cosia è stato deviato dall'uomo e la linea di costa antistante la città murata è avanzata a causa di successive colmate.

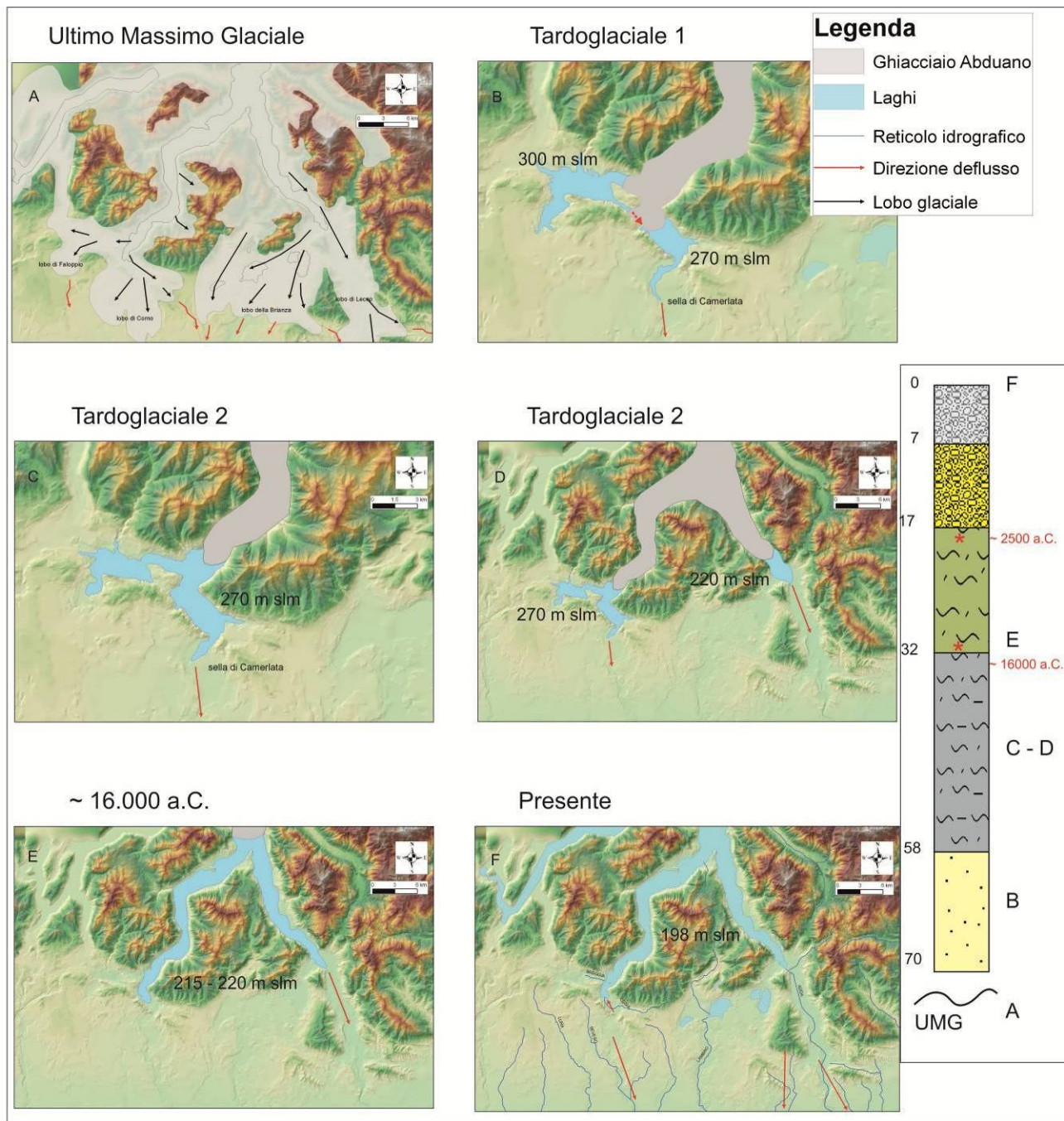


Figura 62 : Sequenza di mappe relative all'evoluzione ambientale della conca di Como a partire dall'ultimo massimo glaciale.

7. Conclusioni

La finalità primaria del presente progetto di Dottorato è la valutazione geositologica di due siti di studio con caratteristiche radicalmente diverse, ma entrambi appartenenti al bacino Padano, area che risulta essere una delle più industrializzate e densamente popolate d'Europa. Tuttavia, a dispetto di questo ruolo cruciale, la percezione del rischio derivante da fattori e processi di natura geologica (sisma ed effetti correlati, subsidenza) od ambientale in senso lato (eventi meteo-idrologici intensi, alluvioni) appare sottostimata. Tale carenza risulta ancor più significativa se si considera che l'area della Pianura Padana ospita numerosi impianti strategici o ad alto rischio.

L'approccio metodologico fornito dalla geositologia mira all'identificazione delle dinamiche evolutive proprie dell'ambiente in esame e degli eventi estremi avvenuti in passato e che hanno modellato il paesaggio attuale. Va infatti sottolineato che gli equilibri naturali propri di un territorio sono spesso delicati, dinamici e riferibili a scale temporali significative, quali quelle geologiche; i dati analizzati nel corso del presente studio mostrano che, al contrario, i processi antropici che si sovrappongono a quelli naturali sono invece praticamente istantanei e spesso irreversibili. L'approccio metodologico qui adottato risulta valido nel definire gli eventi e le dinamiche che interessano un territorio sia su scale temporali millenarie, che caratterizzano i processi naturali, che su scale temporali più brevi, tipiche dei processi antropici.

L'analisi geositologica rappresenta uno dei passi fondamentali nella fase preliminare del processo di localizzazione di un impianto: la scelta del luogo ottimale non può infatti prescindere da un corretto inquadramento ambientale e dall'identificazione dei processi e dei fenomeni peculiari del contesto in esame.

L'applicazione di un modello di indagine completo e multidisciplinare, che utilizzi le diverse metodologie tipiche delle Scienze della Terra, consente di caratterizzare nel dettaglio le interazioni tra l'impianto e l'ambiente naturale in cui questo si inserisce, accertando i processi potenzialmente più impattanti ed individuando le soluzioni migliori per fronteggiarli. Obiettivo finale di tale processo è la diminuzione della vulnerabilità e quindi del rischio complessivo legato alla presenza di impianti industriali sul territorio.

I risultati ottenuti mediante il presente progetto di ricerca consentono di affermare che lo svolgimento di indagini ambientali costituisce un valore aggiunto per l'impianto finale, in quanto permette di riconoscere le potenziali criticità e minimizzarne gli effetti negativi; tale ruolo è ben esemplificato dal caso di studio dell'impianto "La Filippa", dove gli accorgimenti tecnico – ingegneristici hanno finora assicurato la completa funzionalità e stabilità dell'impianto, anche in concomitanza del verificarsi di condizioni ambientali esterne avverse (ad esempio, le intense precipitazioni del novembre 2011).

Il secondo caso di studio, l'area urbana di Como, dove si è invece operata un'analisi geositologica "a posteriori", conferma la validità dell'approccio metodologico e concettuale utilizzato, e sottolinea ulteriormente l'importanza dell'analisi preventiva delle criticità ambientali: infatti, se tale analisi fosse stata condotta prima della progettazione delle opere di difesa dalle esondazioni del Lario, si sarebbero potute mettere in atto opere e modalità esecutive che impedissero, per quanto possibile, di indurre alterazioni significative sul delicato equilibrio che caratterizza l'area in esame.

La prima fase delle indagini è stata finalizzata alla ricostruzione del quadro conoscitivo preesistente per i due siti di studio, mediante accurata ricerca bibliografica, consultazione della documentazione disponibile a livello comunale, analisi dei dati relativi alle campagne di indagine pregresse, inquadramento strutturale e meteo-climatico regionale e locale.

Si è poi proceduto all'elaborazione del modello geologico, geotecnico ed idrogeologico di riferimento, con la ricostruzione delle peculiari caratteristiche stratigrafiche e geotecniche del sottosuolo; tale fase ha comportato la realizzazione di rilevamenti sul campo, indagini dirette di terreno, esecuzione di prove sperimentali in sito e di laboratorio e il monitoraggio strumentale delle reti di misura esistenti.

La valutazione nel tempo della validità del modello concettuale di riferimento si è basata sul costante monitoraggio strumentale e sull'aggiornamento dei dati empirici; la taratura del modello in funzione della sempre più ampia base di dati ha permesso di affinare la conoscenza dell'ambiente fisico, delle dinamiche che lo contraddistinguono e delle interazioni con le componenti antropiche.

Le analisi specifiche condotte nei due siti di studio si sono differenziate in funzione dei diversi obiettivi da perseguire: nel caso dell'impianto "La Filippa", le indagini si inseriscono all'interno di un progetto di completamento dell'impianto e di ricomposizione ambientale di un vasto areale circostante, già interessato da lavorazioni di cava. L'esigenza alla base dello studio è stata quindi la valutazione complessiva dei numerosi dati a disposizione, mirata allo sviluppo di approcci innovativi per una gestione dell'impianto oculata sia sotto il profilo imprenditoriale ed economico che ambientale.

Una seconda esigenza, di tipo più strettamente scientifico, complementare ma non contrastante rispetto alla precedente, è legata alla ricostruzione dell'evoluzione ambientale recente, e si è basata sulla definizione dei processi e delle modalità evolutive per un arco temporale significativo (tardo Pleistocene – Olocene) e sulla stima delle tendenze evolutive future dei fenomeni ambientali in atto. L'integrazione della visione "imprenditoriale" con quella "scientifica" permette di ottimizzare le risorse in campo ed i risultati ottenibili: appare infatti scontato come, ad esempio, la stima delle proprietà meccaniche e del comportamento a lungo termine dei rifiuti può favorire l'abbancamento di maggiori quantità di materiali in uno stesso volume, ma fornisce anche valori di riferimento su un tema in cui la letteratura scientifica risulta non adeguatamente approfondita.

A livello pratico, le indagini condotte nel sito di Cairo Montenotte comprendono innanzitutto rilevamenti diretti in campo e la realizzazione di una campagna geognostica, con la perforazione di 7 sondaggi a carotaggio continuo spinti fino a 40 m di profondità; l'integrazione dei dati puntuali di sondaggio con perforazioni a distruzione di nucleo e con una campagna geofisica ha consentito di definire in dettaglio le caratteristiche geologiche, idrogeologiche e geotecniche del sottosuolo. I rilevamenti strumentali hanno consentito poi di monitorare costantemente l'evoluzione della circolazione idrica sotterranea e della dinamica dei versanti.

Parallelamente alla ricostruzione dei processi e fattori geologici che condizionano l'assetto dell'area, si è condotta una campagna di indagine mirata alla valutazione delle proprietà fisiche e meccaniche dei rifiuti abbancati nell'impianto. Le indagini sono state condotte sia sui materiali al momento del conferimento, valutandone le principali proprietà fisiche (contenuto in acqua, densità, granulometria), che sui materiali già abbancati, mediante la realizzazione di 3 prove di carico su piastra; inoltre, si è verificato il comportamento a scala complessiva dell'accumulo, valutando i cedimenti del corpo dei rifiuti e confrontandoli criticamente con quanto disponibile in letteratura per i RSU. I dati ottenuti costituiscono la base conoscitiva necessaria per la definizione dei parametri di progetto, su cui impostare le verifiche successive, in ottemperanza alla normativa vigente, e, in definitiva, valutare la compatibilità tra l'impianto industriale e l'ambiente in cui si colloca.

In generale, lo studio presentato, oltre ai fini applicativi, commissionati da LPL, vuole proporsi come modello di gestione per casi di caratterizzazione geositologica, non solo per l'installazione di impianti a rischio, ma anche per un adeguato recupero dell'area nella fase post-esercizio dell'impianto. L'aumento della

capacità di deposito, e quindi della vita della discarica, rappresenta infatti un'importante possibilità di valorizzazione industriale di un vasto areale degradato, predisponendone la risistemazione ambientale e un recupero naturalistico finale, utilizzando le strutture di servizio e gestione dell'impianto già in essere. Lo stoccaggio definitivo di materiali non pericolosi consente, alla fine della vita dell'impianto, il ripristino di una morfologia prossima a quella iniziale (antecedente alle operazioni di cava) e il raccordo del paesaggio vegetale della vallecola del Rio Filippa con la sovrastante dorsale collinare, raggiungendo di fatto il recupero naturalistico dell'intera area.

I possibili sviluppi della ricerca in questo sito riguardano la valutazione dell'effettiva rispondenza tra il modello ipotizzato e il reale comportamento del cumulo dei rifiuti; inoltre, risulta di notevole interesse la possibilità di correlare il reticolo di solchi di erosione sepolti, rinvenuto grazie alle lavorazioni di cava, con le diversioni fluviali che nel Pleistocene hanno interessato il reticolo idrografico dell'intera area ligure e piemontese.

Per quanto riguarda invece l'area urbana di Como, le indagini si sono concentrate sulla valutazione sitologica delle opere di difesa dalle esondazioni del Lario, attualmente in fase di costruzione; a questo si sono affiancate le elaborazioni volte alla ricostruzione dell'evoluzione paleoambientale della conca comasca a partire dalla deglaciazione.

Le attività sono state focalizzate principalmente su due aspetti operativi, cioè quello litologico-stratigrafico e quello idrogeologico; nel primo caso, si è utilizzato un consistente *database* stratigrafico, tarato e confrontato con i dati puntuali di estremo dettaglio disponibili per il sito di Piazza Verdi, allo scopo di valutare l'assetto stratigrafico e strutturale dell'area. Le analisi hanno portato all'elaborazione di mappe e sezioni geologiche in grado di illustrare gli eventi che si sono susseguiti nel tempo e che hanno concorso alla formazione del sottosuolo comasco.

La circolazione idrica sotterranea è stata monitorata nel tempo e messa in relazione ai parametri idrologici del Lario, identificando le interazioni tra Lago e falda, e alle perturbazioni antropiche indotte dalla realizzazione delle opere di difesa dalle esondazioni. Infine, l'analisi dei dati relativi agli abbassamenti del suolo, desunti dalle livellazioni geometriche di precisione e dall'interferometria satellitare, ha permesso di identificare i tassi di subsidenza degli ultimi anni e le correlazioni temporali con le lavorazioni avvenute nella zona del lungolago.

Per la zona di Como, gli sviluppi della ricerca si indirizzano verso l'approfondimento di alcuni temi specifici (circolazione idrica profonda, assetto strutturale, condizione di *oversteepening*, contributo glaciale e tettonico all'evoluzione dell'area, tassi di sedimentazione ed evoluzione nelle prime fasi successive alla deglaciazione) in modo da confermare o smentire alcune ipotesi avanzate nel corso del presente progetto. Inoltre, a causa del delicato equilibrio geologico che contraddistingue il sottosuolo della città, è essenziale un continuo monitoraggio ambientale dell'intera area; a maggior ragione, questo vale nella zona del lungolago, non soltanto per valutare l'efficacia delle opere in corso di realizzazione nel difendere l'area dalle esondazioni, ma anche per identificare le eventuali perturbazioni a breve e a lungo termine indotte dalle lavorazioni sul contesto naturale e sul tessuto urbano.

In conclusione, dalle considerazioni precedenti emerge come la localizzazione di un sito industriale sia un processo complesso, che richiede analisi approfondite per ridurre i margini di incertezza e selezionare i siti più idonei.

L'integrazione dei vari metodi di indagine all'interno di una visione unitaria consente di superare i limiti di precisione delle tecniche di monitoraggio su tempi storici o geologici, e la ridotta copertura temporale delle tecniche di maggiore sensibilità. In particolare, le misure strumentali sono in grado di identificare accuratamente l'evoluzione nel breve termine dei processi fisici che monitorano: ad esempio, i rilievi piezometrici e inclinometrici sono caratterizzati da una precisione dell'ordine dei centimetri (Tommasi, 1986; Maugeri *et al.*, 1981; Organizzazione Tecnici Riuniti, 1987; Sappa & Sappa, 1995), quelli su capisaldi e assestimetri addirittura dei millimetri; al contrario, altre tecniche di indagine delineano l'evoluzione su scala millenaria.

A valle di questo processo si ottiene pertanto una caratterizzazione puntuale e dettagliata dell'ambiente fisico in esame, e integrata all'interno di una visione complessiva a scala più ampia sia nel tempo che nello spazio; lo studio condotto illustra anche come una rigorosa analisi geologica ed ambientale permette di identificare, valutare e mitigare i rischi derivanti da eventi naturali estremi, che possono costituire un serio fattore di rischio ambientale per gli impianti industriali e le aree metropolitane.

Il modello di indagine qui utilizzato può quindi fornire spunti di notevole interesse per i processi di localizzazione di siti industriali e attività produttive: la conoscenza e la capacità di individuare le problematiche maggiormente impattanti per ogni tipologia di impianto e luogo costituiscono una base imprescindibile per poter assicurare sicurezza, stabilità e integrità degli impianti, in conformità con le sempre più accurate normative nazionali ed internazionali.

Con questi presupposti, lo studio condotto, oltre a risultare efficace per la definizione dell'assetto del sottosuolo e delle tendenze evolutive delle due aree analizzate, costituisce una procedura analitica che può essere esportata con successo in altre realtà locali con analoghe caratteristiche ambientali.

Il modello concettuale qui adottato, in definitiva, risulta validato anche da alcuni recenti eventi critici, tra cui la sequenza sismica dell'Emilia Romagna del maggio – giugno 2012, che hanno mostrato in modo inequivocabile l'importanza della localizzazione ottimale degli impianti, a cui si deve aggiungere un'oculata pianificazione e gestione territoriale.

8. Bibliografia

Inquadramento metodologico:

- ALLEN, C.R. (1975) – *Geological criteria for evaluating seismicity*. Geol. SOC. Am. Bull., **86**, 1041 – 1057.
- EM-DAT (2012) – *The OFDA/CRED International Disaster Database*. www.emdat.be – Université Catholique de Louvain – Brussels – Belgium.
- FAHARANI R. Z., SEIFI M. S & ASGARI N. (2010) – *Multiple criteria facility location problems: a survey*. Applied Mathematical Modeling, **34**, p. 1689-1709.
- IAEA (2002) – *Evaluation of seismic hazard for nuclear power plants*. IAEA Safety Standard NS-G-3.3 - Safety Guide, 31 p., Vienna.
- IAEA (2010) – *Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations*. IAEA Safety Standard SSG-9 – Specific Safety Guide, 55 p., Vienna.
- IGOS INTEGRATING GLOBAL OBSERVING STRATEGY (2004) – *Geohazards theme report*, April 2004.
- MICHETTI A.M., AUDEMARD F. & MARCO S. (2005) - *Future trends in paleoseismology: Integrated study of the seismic landscape as a vital tool in seismic hazard analyses*. In: MICHETTI A.M., AUDEMARD F., MARCO S. (Editors), “*Paleoseismology, integrated study of the Quaternary geological record for earthquake deformation and faulting*”, Special Issue, Tectonophysics, **408** (1-4): 3-21.
- SERVA L. (1990) – *Il ruolo delle scienze della terra nelle analisi di sicurezza di un sito per alcune tipologie di impianti industriali; il terremoto di riferimento per il sito di Viadana (MN)*. Boll. Soc. Geol. It., **109**, No. 2: 375-411.
- STEIN S., GELLER R. J. & LIU M. (2012) – *Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it*. Tectonophysics **562–563** (2012) 1–25.
- WEBER A. (1909, trans. 1929) – *Theory of the Location of Industries*. University of Chicago Press, 256 pages.

Inquadramento regionale:

- ALESSIO M., ALLEGRI L., AMBROSETTI P., BARTOLOMEI G., BELLA F., BELLUOMINI G., CALDERONI G., CARRARO F., CHARRIER G., CORTESI C., ESU D., FORNO M.G., IMPROTA S., MANFRA L. & PETRONE V. (1982) – *Il giacimento fossilifero pleistocenico superiore di Moncucco Torinese*. Geogr. Fis. Dinam. Quat, **5** (1982), 219-239.
- ARCA S. & BERETTA G. P. (1985) – *Prima sintesi geodetico-geologica sui movimenti verticali del suolo nell'Italia Settentrionale (1897-1957)*. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, **XLIV**, n. 2, pp.125-156.
- BERLUSCONI A. FERRARIO M. F., LIVIO F., MICHETTI A. M., VIOLANTE C., ESPOSITO E., PORFIDO S. & FIACCAVENTO P. (in stampa) – *Quaternary faults and seismic hazard in the Lake Garda area*. Ingegneria sismica.
- BERTOTTI G., PICOTTI V., BERNOULLI D. & CASTELLARIN A. (1993) – *From rifting to drifting: tectonic evolution of the South-Alpine upper crust from the Triassic to Early Cretaceous*. Sedimentary Geol. - Vol. **86** p. 53-76.
- BIANCOTTI A. (1981a) – *Geomorfologia delle Langhe sud-occidentali*. Mem. Acc. Sc. Torino, **5**(5), 3-21.
- BIANCOTTI A. (1981b) – *Geomorfologia delle Langhe: il bacino del Fiume Bormida di Millesimo*. Geogr. Fis. e Dinam. Quatern., **4**, 87-101.
- BIANCOTTI A. (1981c) – *Geomorfologia dell'Alta Langa (Piemonte meridionale)*. Mem. Soc. It. Sc. Nat., **22** (3), 59-104.
- BIANCOTTI A. & CORTEMIGLIA G.C. (1982) – *Morphogenetic evolution of the river system of the Southern Piedmont (Italy)*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., **5**, 10-13.
- BIANCOTTI A., MOTTA L. & MOTTA M. (1999) – *Morphotectonics of the Alpine Zone at the contact with the Ligurian and Po Basins*. Z. Geomorph. N.F., **118**, 65-82.
- BINI A., QUINIF Y., SULES O. & UGGERI S. (1992) – *Les mouvements tectoniques récents dans les grottes du Monte campo dei Fiori (Lombardie, Italie)*. Karstologia, **19**(1): 23-30.
- BOANO P., FORNO M.G. & LUCCHESI S. (2004) – *Pleistocene deformation of the Collina di Torino inferred from the modelling of their fluvial succession*. Il Quaternario, It. Jour. of Quaternary Sciences **17** (2/1), 2004, 145-150.
- BONADEO L., MICHETTI A. M., BRUNAMONTE F., FIORASO G., LIVIO F., FERRARIO F., SERVA L. & VITTORI E. (2012) – *The seismic landscape of the Monferrato Arc - NW Po Plain (N Italy)*. Congresso SGI, 18 – 20 Settembre 2012, Cosenza.
- BOSCHI E., GUIDOBONI E., FERRARI G., MARIOTTI D., VALENSISE G. & GASPERINI P. (2000) – *Catalogue of strong Italian Earthquakes, 461 B.C. to 1997*. Annals of Geophysics., **43/4**, 609-868.
- BURRATO P., CIUCCI F. & VALENSISE G. (2003) – *An inventory of river anomalies in the Po Plain, Northern Italy: evidence for active blind thrust faulting*. Annals of Geophysics. Vol. **46**. p. 865-882.
- CARRARO F. (1976) – *Diversione pleistocenica nel deflusso del bacino piemontese meridionale: un'ipotesi di lavoro*. Gruppo Studio Quat. Pad., **3**, 89 – 100.
- CARRARO F., FORNO M.G. & RICCI B. (1980) – *Ricostruzione preliminare dell'evoluzione pliopleistocenica dell'area corrispondente ai rilievi delle Langhe, del Monferrato e della Collina di Torino*. Contributi alla realizzazione della Carta Neotettonica d'Italia. CNR – Prog. Finalizzato Geodinamica – Sottoprogetto Neotettonica. Pubbl. n. 356, 315-330.
- CARRARO F., COLLO G., FORNO M.G., GIARDINO M., MARAGA F., PEROTTO A. & TROPEANO D. (1995) – *L'evoluzione del reticolato idrografico del Piemonte centrale in relazione alla mobilità quaternaria*. In R. POLINO & R. SACCHI

- (Eds.) Atti del Convegno “Rapporti Alpi – Appennino”, Peveragno (CN) 31 Maggio – 1 Giugno 1994. Acc. Naz. Sc., Scritti e Doc., **14**, 445-461.
- CASTELLARIN A., CANTELLI L., FESCE A.M., MERCIER J.L., PICOTTI V., PINI G.A., PROSSER G. & SELLI L. (1992) – *Alpine compressional tectonics in the Southern Alps; relationship with the Appennines*. Ann. Tect. 1 Vol. **6**, p. 62-94.
- CASTELLARIN A. & CANTELLI L. (2000) – *Neo-Alpine evolution of the Southern Eastern Alps*. Journal of Geodynamics. Vol. **30**, p. 251-274.
- CASTELLARIN A. & G.B. VAI (1986) – *Southalpine versus Po Plain Apenninic arcs*. In: *The origin of arcs, Development in Geotectonics*, Wezel, F.C., Elsevier, Amsterdam, 21, 253-280.
- CASTELLARIN A., VAI G.B. & CANTELLI L. (2006) – *The Alpine evolution of the Southern Alps around the Giudicarie faults: a Late Cretaceous to Early Eocene transfer zone*. Tectonophysics Vol. **414**, p. 203-223.
- CNR – CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE (1992) – *Structural Model of Italy. Scala 1:500.000*. Progetto Finalizzato Geodinamica, Sottoprogetto Neotettonica. CNR, Quaderni della Ricerca Scientifica, **114**, vol. 3, Foglio 1.
- CPTI GRUPPO DI LAVORO (2004) – *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04)*. INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI/>
- DAL PIAZ G., BISTACCHI A. & MASSIRONI M. (2003) – *Geological outline of the Alps*. Episodes, vol. **26**, p. 175-180, ISSN: 0705-3797.
- DESIO A. (1965) – *I rilievi isolati della Pianura Lombarda ed i movimenti tettonici del Quaternario*. Rend. Ist. Lom. Acc. Sc. Lett., Sez. A, **99**: 881-894, Milano.
- EHLERS J. & GIBBARD P. L. (2004) – *Quaternary glaciations – extent and chronology. Part I: Europe*. Developments in Quaternary Sciences, **2**. Elsevier.
- FANTONI R., BERSEZIO R. & FORCELLA F. (2004) – *Alpine structure and deformation chronology at the southern Alps-Po Plain border in Lombardy*. Boll. Soc. Geol. Ital., **123**: 463-476.
- FERRARIS F., FIRPO M. & PAZZAGLIA F.J. (2012) – *DEM analyses and morphotectonic interpretation: the Plio-Quaternary evolution of the eastern Ligurian Alps, Italy*. Geomorphology **149–150**, 27–40.
- FORNO M.G. (1982) – *Studio geologico dell’Altopiano di Poirino (Torino)*. Geogr. Fis. Dinam. Quat. **5**, 129-162.
- GALADINI F., POLI M. E. & ZANFERRARI A. (2005) – *Seismogenic sources potentially responsible for earthquakes with $M > 6$ in the eastern Southern Alps (Thiene-Udine sector, NE Italy)*. In “Geophysical Journal International”, **161**, 2005, pp. 739-762.
- GARZANTI G., VEZZOLI G. & ANDÒ S. (2011) – *Paleogeographic and paleodrainage changes during Pleistocene glaciations (Po Plain, Northern Italy)*. Earth-Science Reviews **105** (2011) 25–48.
- LAUBSCHER H.P. (1985) – *Large-scale, thin-skinned thrusting in the Southern Alps: kinematic models*. Geol. Soc. Am. Bull. **96**, 710-718.
- LAUBSCHER H.P., BIELLA G.G.C., CASSINIS R., GELATI R., LOZEI A., SCARASCIA S. & TABACCO I. (1992) – *The collisional knot in Liguria*. Geol. Rund., **81**, 275-289.
- LIVIO F., MICHETTI A. M., SILEO G., CARCANO C., MUELLER K., ROGLEDI S., SERVA L., VITTORI E. & BERLUSCONI A. (2009b) – *Quaternary capable folds and seismic hazard in Lombardia (Northern Italy): the Castenedolo structure near Brescia*. Boll. Soc. Geol. It., Vol **128**(1), 191-200.
- LIVIO F., BERLUSCONI A., CHUNGA K., MICHETTI A. M. & SILEO G. (2011) – *New stratigraphic and structural evidence for Late Pleistocene surface faulting along the Monte Olimpino Backthrust (Lombardia, N Italy)*. Soc. Geol. It., Vol. **14** (2011), pp. 171-25.
- MICHETTI A.M., BERLUSCONI A., LIVIO F. & SILEO G. (2010) – *Terremoti ed evoluzione del paesaggio in Lombardia*. In OROMBELLI G., CASSINIS G. & GAETANI M. (a cura di) – *Una nuova Geologia per la Lombardia*, Collana Ist. Lombardo. Acc. di scienze e lettere), pp. 197 – 212, LED Edizioni Universitarie, Milano.
- MICHETTI A. M., GIARDINA F., LIVIO F., MUELLER K., SERVA L., SILEO G., VITTORI E., DEVOTI R., RIGUZZI F., CARCANO C., ROGLEDI S., BONADEO L., BRUNAMONTE F. & FIORASO G. (2012) – *Active compressional tectonics, Quaternary capable faults, and the seismic landscape of the Po Plain (N Italy)*. Annals of Geophysics, in stampa.
- MOSCA P. (2006) – *Neogene basin evolution in the Western Po Plain (NW Italy). Insights from seismic interpretation, subsidence analysis and low temperature (U-Th) thermochronology*. Ph.D. Thesis. Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands. 190 pp.
- OROMBELLI G. (1976) – *Indizi di deformazioni tettoniche quaternarie al margine meridionale delle Prealpi comasche*. Quaderni del Gruppo di Studio del Quaternario Padano. - Vol. **3**. - p. 25-37.
- OROMBELLI G. (1984) – *Il Pleistocene Superiore in Italia: i depositi glaciali*. In: AIQUA Relazione sul convegno autunnale 1982. Geogr. Fis. Dinam. Quat. **6** (1983), 179-180, 1 f.
- PELLEGRINI M. & VEZZANI L. (1978) – *Faglie attive in superficie nella pianura padana presso Correggio (Reggio Emilia) e Massa Finalese (Modena)*. Geogr. Fis. Dinam. Quat, **1**, 141-149.
- PIERI M. & GROPPI, G. (1981) – *Subsurface geological structure of the Po Plain*. Milano: CNR, Progetto Finalizzato Geodinamica, Sottoprogramma. Modello Strutturale, Agip, 1981, p. 13.
- POSTPISCHL D. (Ed.) (1985) – *Catalogo dei Terremoti Italiani dall’Anno 1000 al 1980*. CNR, Quaderni de “La Ricerca Scientifica”, **114** (2B), 239 pp.

- ROURE F., BERGERAT F., DAMOTTE B., MUGNIER J. & POLINO R. (1996) – *The ECORS-CROP Alpine seismic traverse*. Memoires de la Societe Geologique de France, Nouvelle Serie. 1 : Vol. **170**. p. 113.
- SERPELLONI E., ANZIDEI M., BALDI P., CASULA G. & GALVINI A. (2005) – *Crustal velocity and strain-rate fields in Italy and surrounding regions: New results from the analysis of permanent and non-permanent GPS networks*. Geophys. J. Int., **161**, 861-880.
- SILEO G., GIARDINA F., LIVIO F., MICHETTI A. M., MUELLER K. & VITTORI E. (2007) – *Remarks on the Quaternary tectonics of the Insubria Region (Lombardia, NW Italy, and Ticino, SE Switzerland)*. Boll.Soc.Geol.It. (Ital.J.Geosci.), Vol. **126**, No. 2 (2007), pp. 411-425.
- VEZZOLI G., FORNO M.G., ANDÒ S., HRON K., CADOPPI P., ROSSELLO E. & TRANCHERO V. (2010) – *Tracing the drainage change in the Po basin from provenance of Quaternary sediments (Collina di Torino, Italy)*. Quaternary International **222** (2010) 64–71.
- WINTERER E. L. & BOSELLINI A. (1981) – *Subsidence and sedimentation on a Jurassic passive continental margin, Southern Alps, Italy*. Am. Ass. Petrol. Geol. Bull., **65** (3), pp. 393 - 421, Tulsa.
- ZANCHI A., BINI, A., FELBER, M., RIGAMONTI, I. & UGGERI, A. (1997) – *Neotectonic evidences along the Lombardian foothills of the Southern Alps*. Geol. Insubr. Vol. **2**. - p. 99-112.

Impianto “La Filippa”:

Documenti di progetto:

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELL’INSUBRIA (2006) – Progetto di discarica per rifiuti speciali non pericolosi in loc. Filippa del Comune di Cairo Montenotte (Sv). *Studi e indagini geologiche integrative in riferimento alle tematiche contenute nel Documento della Provincia di Savona (Prot. Gen. N. 65095 del 20.09.2005)*.

Codice	Tipo	Titolo	Scala
	Relazione	Relazione sullo Svolgimento delle Attività di Prima Fase del Piano di studi e indagini geologiche integrative.	
Tavola A	Tavola	Ubicazione indagini geognostiche, monitoraggio piezometrico e rete di controllo topografico nel bacino del Rio Filippa	1:1.000
Tavola B	Tavola	Carta geologica dell’area di progetto relativa all’impianto	1:1.000
Tavola C	Tavola	Schema geomorfologico del bacino del Rio Filippa	1:5.000
Tavola D	Tavola	Carta delle coperture detritiche di spessore significativo e dei processi geomorfologici in atto	1:1.000
Tavola E	Tavola	Carta geologica del bacino del Rio Filippa e profilo geologico	1:5.000
Tavola F	Tavola	Sezioni geologiche e profili longitudinali dei torrenti	1:1.000
Tavola G	Tavola	Sezioni topografiche di controllo nel bacino del Rio Filippa. Primo rilievo, ottobre 2006	1:1.000 / 1:100
Allegato 1	Rapporto	Rapporto SORIGE Agosto 2006 – Risultati indagine geognostica	
Allegato 2	Rapporto	Rapporto SORIGE Settembre 2006 – Risultati indagine geofisica in pozzo	

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELL’INSUBRIA (2007) – Progetto di discarica per rifiuti non pericolosi in loc. Filippa del Comune di Cairo Montenotte (Sv). *Studi e indagini geologiche integrative in riferimento alle tematiche contenute nel Documento della Provincia di Savona (Prot. Gen. n. 65095 del 20.9.2005)*.

Codice	Tipo	Titolo	Scala
	Relazione	Relazione sullo Svolgimento delle Attività di Seconda Fase del Piano di studi e indagini geologiche integrative.	
Allegato 1	Rapporto	Prove geotecniche	
Allegato 2	Rapporto	Tabulati misure inclinometriche	
Allegato 3	Rapporto	Prove su piezometri e documentazione pozzi dismessi	

LPL S.p.A. (2011) – Progetto di completamento della discarica per rifiuti non pericolosi con la ricomposizione ambientale della cava dismessa in loc. Filippa, Cairo Montenotte (SV). *Studi geologici, geotecnici e idrogeologici. Caratterizzazione dei rifiuti*.

Codice	Tipo	Titolo	Scala
R 0	Relazione	Elenco elaborati	
R 1	Relazione	Relazione geologica, geomorfologica, idrogeologica, sismica	
T 1	Tavola	Carta geologica. Profilo geologico	1:5000
T 2	Tavola	Planimetria ubicazione indagini geognostiche	1:500
T 3	Tavola	Carta geologica e geomorfologica dell'area di intervento	1:1000
T 4	Tavola	Carta idrogeologica.	1:25000/1:2500
T 5	Tavola	Profilo idrogeologico	1:1000
R 2	Rapporto	Indagini geognostiche, geofisiche e installazione strumentazione monitoraggio	
R 3	Rapporto	Prove di laboratorio terreni e rocce	
R 4	Relazione	Relazione geotecnica e analisi di stabilità	
T 6	Tavola	Sezioni geotecniche 5 - 6 - 7	1:500
T 7	Tavola	Sezioni geotecniche 11 -12 -13	1:500
T 8	Tavola	Sezioni geotecniche 14 - 15	1:500
R 5	Relazione	Caratterizzazione sperimentale ammasso rifiuti	
R 6	Rapporto	Prove in sito per la definizione del comportamento dei rifiuti a discarica	
R 7	Rapporto	Monitoraggio geotecnico, idrologico e idrogeologico	

Riferimenti normativi:

Gli strumenti normativi sono riportati in ordine cronologico di emanazione. Nello sviluppo dello Studio e della progettazione si è fatto riferimento, sulla base delle successive modifiche e integrazioni, al dettato risultante dalla Norma più recente e/o sostitutiva.

DECRETO MINISTERO LL.PP. 11 MARZO 1988 – “*Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione*” con relativa Circolare n. 30483 del 24 settembre 1988, per quanto non sostituito dal D.M. 14/01/2008.

LEGGE N. 183 DEL 18 MAGGIO 1989 – “*Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo*”.

LEGGE N. 394 DEL 6 DICEMBRE 1991 – “*Legge quadro sulle aree protette*”.

DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA N. 357 DEL 8 SETTEMBRE 1997 – “*Regolamento recante attuazione della Direttiva 92/43/CEE relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali, nonché della flora e della fauna selvatiche*”.

DECRETO LEGISLATIVO N. 152 DEL 11 MAGGIO 1999 – “*Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole*”, a seguito delle disposizioni correttive ed integrative di cui al Decreto Legislativo 18 agosto 2000, n. 258.

AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO (2001) – “*Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI)*”, approvato con D.P.C.M. del 24/05/2001, comprensivo del P.S.45 e del Piano Stralcio delle Fasce Fluviali.

DECRETO PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA N. 380 DEL 6 GIUGNO 2001 – “*Testo Unico dell'Edilizia*”.

DECRETO LEGISLATIVO N. 36 DEL 13 GENNAIO 2003, N. 36 – “*Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti*” (GU n. 59 del 12-3-2003 - Suppl. Ordinario n. 40);

ORDINANZA PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI N. 3274 DEL 20 MARZO 2003 – “*Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*”.

DECRETO LEGISLATIVO N. 42 DEL 22 GENNAIO 2004 – “*Codice dei beni culturali e del paesaggio*”, e smi.

DECRETO LEGISLATIVO N. 152 DEL 3 APRILE 2006 – “*Norme in materia ambientale*”, modificato dal successivo Decreto Legislativo n. 4 del 16 gennaio 2008.

ORDINANZA PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI N. 3519 DEL 28 APRILE 2006 – “*Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone*”.

DECRETO LEGISLATIVO N. 4 DEL 16 GENNAIO 2008 – “*Ulteriori disposizioni correttive ed integrative del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale*”.

DECRETO MINISTERO INFRASTRUTTURE 14 GENNAIO 2008 – “*Norme tecniche per le costruzioni*”, con la relativa Circolare n. 617 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici emanata in data 2 febbraio 2009.

Ordinamento Regione Liguria:

REGIONE LIGURIA, LEGGE REGIONALE N. 14 DEL 3 APRILE 1990 – “*Norme per la tutela e la valorizzazione del patrimonio speleologico e delle aree carsiche e per lo sviluppo della speleologia*”.

REGIONE LIGURIA, LEGGE REGIONALE N. 4 DEL 22 GENNAIO 1999 – “*Disciplina degli interventi in materia forestale*”.

- REGIONE LIGURIA, DELIBERAZIONE GIUNTA REGIONALE N. 530 DEL 16 MAGGIO 2003 – “*Individuazione, formazione ed aggiornamento dell’elenco delle zone sismiche dei comuni della Regione Liguria*”, in ottemperanza al disposto di cui all’O.P.C.M. n. 3274/2003.
- REGIONE LIGURIA, DELIBERAZIONE GIUNTA REGIONALE, N. 154/2004 – “*Estensione dell’obbligo di progettazione antisismica nei comuni liguri in classe sismica 4*”.
- REGIONE LIGURIA, DELIBERAZIONE GIUNTA REGIONALE N. 1308 DEL 24 OTTOBRE 2008 – “O.P.C.M. n. 3519/2006 *Nuova classificazione sismica del territorio della Regione Liguria*”.
- REGIONE LIGURIA, DELIBERAZIONE GIUNTA REGIONALE N. 1362 DEL 19 NOVEMBRE 2010 – “D.M. 14/01/2008 *Norme Tecniche per le Costruzioni. Aggiornamento classificazione sismica del territorio della Regione Liguria*”.

Geologia e geomorfologia:

- BARBERO D., BOANO P., COLLA M.T. & FORNO M.G. (2007) – *Pleistocene terraced fluvial succession, northern slope of Torino Hill*. Quaternary International **171–172** (2007) 64–71.
- BOCCALETTI M., COSENTINO D., DEIANA G., GELATI R., LENTINI F., MASSARI F., MORATTI G., PESCATORE T., RICCI LUCCHI F. & TORTORICI L. (1990) – *Palinspastic restoration and paleogeographic reconstruction of the perytyrrhenian area during the Neogene*. Palaeog., Palaeocl., Palaeoec., **77**, 41-50.
- BONI A. (1984) – *Il Pliocene e la neotettonica nelle Alpi Liguri*. Mem. Soc. Geol. It., **28**, 229-265.
- CAPITANI M. & MARRUCCI M. (2008) – *The Demonte terrace in the Stura Valley (Maritime Alps) between climatic changes and tectonic movements*. Geogr. Fis. Dinam. Quat. **31** (2008), 5-12, 5 figg.
- CARRAPA B., BERTOTTI G. & KRIJGSMAN W. (2003) – *Subsidence, stress regime and rotation(s) of a tectonically active sedimentary basin within the Western Alps: the Tertiary Piedmont Basin (Alpine domain, Northwest Italy)*. In T. McCANN & A. SAINTOT (eds.) - Tracing Tectonic deformation using the Sedimentary Record. Eds. Geological Society of London, 208, 205-227.
- CATTANEO M., AUGLIERA P., PAROLAI S. & SPALLAROSSA D. (1999) – *Anomalous deep earthquakes in Northwestern Italy*. Journal of Seismology, **3** (4), 421-435.
- CAZZOLA C., FONNESU F., MUTTI E., RAMPONE G., SONNINO M. & VIGNA B. (1981) – *Geometry and facies of small, fault-controlled deep sea fan systems in a transgressive depositional setting (Tertiary Piedmont Basin, Northwestern Italy)*. 2nd I.A.S. Regional Meeting. Libro Guida alle escursioni, 8-53.
- COMUNE DI CAIRO MONTENOTTE (1998) – *Piano Regolatore Generale. Note illustrative e Norme tecniche. Studio geologico*. A cura del Dott. Sergio Restagno.
- CNR – CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE – ISTITUTO PER LA PROTEZIONE IDROGEOLOGICA NEL BACINO PADANO (1983) – *Eventi alluvionali e frane nell’Italia Settentrionale. Periodo 1972-1974*. Torino, 485 pp.
- DALLA S., ROSSI M., ORLANDO M., VISENTIN C., GELATI R., GNACCOLINI M., PAPANI G., BELLI A., BIFFI U. & CITRULLO D. (1992) – *Late Eocene-Tortonian tectono-sedimentary evolution in the western part of the Padan basin (northern Italy)*. Palent. Evol., **24-25**, 341-362.
- EVA C., AUGLIERA P., CATTANEO M., PASTORE S. & TOMASELLI A. (1992) – *Sismotettonica dell’Italia Nord-Occidentale*. Atti del Convegno GNDT, Pisa 25-27 Giugno 1990, 1, Zonazione e riclassificazione sismica: 35-51.
- EVA C., AUGLIERA P., EVA E., SOLARINO S. & SPALLAROSSA D. (1999) – *Sintesi delle conoscenze sulla sismotettonica della Liguria Occidentale ed influenza sui parametri di hazard*. In GALADINI F., MELETTI C. & REBEZ A. (Eds.): *Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996 – 1999)*. CNR – Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, 2000, pp. 297, Roma.
- GABERT P. (1962) – *Les plaines occidentales du Pô et leurs piedmonts. (Piemont, Lombardie occidentale et centrale). Etude morphologique*. Imprimerie Louis-Jean, Gap. 531 pp.
- GELATI R. (1968) – *Stratigrafia dell’Oligo-Miocene delle Langhe tra le valli dei fiumi Tanaro e Bormida di Spigno*. Riv. It. Paleont. Strat., **74**(3), 865-967.
- GELATI R. (1976) – *Osservazioni stratigrafiche sull’Oligo-Miocene delle Langhe (Piemonte Italia)*. Pubbl. Ist. Geol. Univ. Milano, s. 6, n. **236**, 18 pp.
- GELATI R. & GNACCOLINI M. (1980) – *Significato dei corpi arenacei di conioide sottomarina (Oligocene-Miocene inferiore) nell’evoluzione tettonico-sedimentaria del Bacino terziario ligure-piemontese*. Riv. It. Paleont. Strat., **86**, 167-186.
- GELATI R. & GNACCOLINI M. (1987/88) – *Sequenze deposizionali in un bacino episuturale, nella zona di raccordo tra Alpi ed Appennini settentrionale*. Atti Tic. Sc. Terra, **31**, 340-350.
- GELATI R. & GNACCOLINI M. (1998) – *Synsedimentary tectonics and sedimentation in the Tertiary Piedmont Basin, Northwestern Italy*. Riv. It. Paleont. Strat., **104**, 193-214.
- GELATI R. & GNACCOLINI M. (2003) – *Genesis ed evolution of the Langhe Basin, with emphasis on the Latest Oligocene – Early Miocene and Serravallian*. Atti Tic. Sc. Terra, **44**, 3-18.
- GIAMMARINO M. (1984) – *Evoluzione delle Alpi Marittime e sue relazioni con il Bacino Terziario del Piemonte ed il Mar Ligure*. Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem. A, **91**, pp. 155-179.

- GNACCOLINI M., GELATI R., CATRULLO D. & FALLETTI P. (1990) – *Sequenze deposizionali nella successione oligo-miocenica delle “Langhe”: un approccio alla stratigrafia sequenziale del Bacino Terziario Ligure-Piemontese*. Mem. Soc. Geol. It., **45**, 671–686.
- ITHACA – *Catalogo delle faglie capaci* (http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Progetti/ITHACA_catalogo_delle_faglie_capaci).
- MERCADANTE S. (2007) – *Caratterizzazione geositologica per una discarica di rifiuti non pericolosi nel bacino del Fiume Bormida*. Università degli Studi dell’Insubria. Tesi di laurea Specialistica.
- MOTTA L. & MOTTA M. (1995) – *Evoluzione dello spartiacque Padano-Ligure presso il Colle di Cadibona*. Atti Conv. “Rapporti Alpi – Appennino”. Acc. Naz. Sc., Scritti e Doc., **XIV**, 485–497.
- REGIONE PIEMONTE (1998a) – *L’evento alluvionale del 2-6 novembre 1994. Le condizioni meteorologiche e idrometriche*. In: Regione Piemonte, direzione servizi tecnici di prevenzione (1998) - Eventi alluvionali in Piemonte, 27–61.
- REGIONE PIEMONTE (1998b) – *Sistemi di controllo ed interventi di mitigazione del rischio su fenomeni franosi*. In: Regione Piemonte, direzione servizi tecnici di prevenzione (1998) - Eventi alluvionali in Piemonte, 317–327.
- SACCO F. (1889-1890) – *Il Bacino Terziario e Quaternario del Piemonte*. Tip. Bernardoni, Milano. 634 pp.
- SCANDONE P. & STUCCHI M. (2000) – *La zonazione sismogenetica ZS4 come strumento per la valutazione della pericolosità sismica*. In GALADINI F., MELETTI C. & REBEZ A. (Eds.) – Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996-1999). CNR – Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma, 2000, 3–14.
- SOCIETÀ GEOLOGICA ITALIANA (1992) – *Guide geologiche regionali – Alpi Liguri*. Coordinatore del volume M. Vanossi. BE-MA Editrice, 293 pp.
- TROPEANO D. (1989) – *Eventi alluvionali e frane nel bacino della Bormida. Studio retrospettivo*. Associazione Mineraria Subalpina, Quaderni di Studi e Documentazione, **1**, 155 pp. Torino.
- TROPEANO D., CHIARLE M., DEGANUTTI A.M., MORTARA G., MOSCARIELLO A. & MERCALLI L. (1993) – *Gli eventi alluvionali del 22 e 27 settembre 1992 in Liguria. Studio idrologico e geomorfologico*. Associazione Mineraria Subalpina, Quaderni di Studi e Documentazione, **13**, 37 pp. Torino.
- TROPEANO D., ARATTANO M., DEGANUTTI A.M., LUINO F., CIARMATORI L. & DUTTO F., con la collaborazione di GODONE F., BERETTA E., CASAGRANDE A. & TREBÒ P.G. (1995) – *L’evento alluvionale del 23 – 25 settembre 1993 in Liguria, Piemonte e Valle d’Aosta. Aspetti idrologici e geomorfologici*. Associazione Georisorse e Ambiente, GEAM. Quaderni di Studi e Documentazione, **18**, 43 pp. Torino.
- TROPEANO D., GOVI M., MORTARA G., TURITTO O., SORZANA P., NEGRINI G. & ARATTANO M. (1999) – *Eventi alluvionali e frane nell’Italia Settentrionale. Periodo 1975-1981*. CNR – Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica nel Bacino Padano, Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche. Pubblicazione n. 1927 del GNDICI. 279 pp.

Cartografia e riprese aeree:

- IGM – ISTITUTO GEOGRAFICO MILITARE (1961) – *Carta Topografica d’Italia a scala 1:25.000, Foglio 81 – Il SO Cairo Montenotte*. Rilievo topografico 1901, ricognizioni generali 1930, aggiornamento con ricognizioni parziali (autostrade) 1961.
- PASQUARÉ G., ABBATE E., BOSI C., CASTIGLIONI G.C., MERENDA L., MUTTI E., OROMBELLI G., ORTOLANI F., PAROTTO M., PIGNONE R., POLINO R., PREMOLI SILVA I. & SASSI F.P. (1992) – *Carta Geologica d’Italia a scala 1:50.000. Guida al rilevamento*. Servizio Geologico d’Italia, Quaderni, serie III, n. 1, 203 pp.
- SERVIZIO GEOLOGICO D’ITALIA (1969) – *Carta Geologica d’Italia a scala 1:100.000. Foglio 81 - Ceva*. Seconda edizione. Ministero dell’Industria, del Commercio e dell’Artigianato.
- SERVIZIO GEOLOGICO D’ITALIA (1971) – *Note illustrative della Carta Geologica d’Italia a scala 1:100.000. Foglio 81 - Ceva*. Ministero dell’Industria, del Commercio e dell’Artigianato, 100 pp. Roma. A cura di FRANCANI V., GELATI R., MARTINIS B., OROMBELLI G., PASQUARÉ G., ROSSI P.M., SFONDRINI G.
- SERVIZIO GEOLOGICO D’ITALIA (2010) – *Note illustrative della carta Geologica d’Italia alla scala 1:50.000 Progetto CARG. Foglio Sanremo*. Serv. Geol. D’It., pp. 134, Roma. A cura di GIAMMARINO S., FANUCCI F., OREZZI S., ROSTI S. & MORELLI D.
- SERVIZIO GEOLOGICO D’ITALIA (2011) – *Carta Geologica d’Italia a scala 1:50.000 Progetto CARG. Foglio 211 - Dego*. ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – ARPA Piemonte, Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche. A cura di GELATI R., GNACCOLINI M., POLINO R., MOSCA P., PIANA F., MORELLI M. & FIORASO G.

Indagini geognostiche:

- ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA (1977) – *Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche*. Roma.
- CESTARI F. (1990) – *Prove geotecniche in sito*. 401 pp. Ed. GEO-GRAPH snc, Segrate (Milano).
- CESTARI F. (2005) – *Prove geotecniche in sito*. 3a edizione, 415 pp. Ed. GEO-GRAPH snc, Segrate (Milano).

- CIRIA – CONSTRUCTION INDUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION (1995) – *The Standard Penetration Test (SPT): Methods and Use*. Report 143. 143 pp.
- COLLOTTA T., CHINI D., LAZZARI A., NERI A. & MORETTI P.C. (1987) – *Il controllo della stabilità dei pendii mediante installazione di tubi inclinometrici*. Autostrade, n. 11/12, 48-59, Novembre – Dicembre 1987.
- GARDNER G.H.F., GARDNER L.W. & GREGORY A.R. (1974) – *Formation velocity and density – The diagnostic basics for stratigraphic traps*. Geophysics, 39, 770-780.
- HOULSBY A.C. (1977) – *Routine interpretation of the Lugeon water-test*. Q. Journal Engineering Geology, vol. 9, 151-154.
- LOLLINO G., BRUNAMONTE F., LARINI G. & MALAGUTI C. (1999) – *Sperimentazione di un monitoraggio in continuo e analisi delle precipitazioni precedenti la frana del Novembre 1994 a Corniglio (PR)*. Associazione Geotecnica Italiana, Atti 20° Convegno Nazionale di Geotecnica, 489-496. Parma, Settembre 1999.
- LOLLINO G., BRUNAMONTE F., LARINI G. & MALAGUTI C. (2001) – *La sperimentazione del Sistema Inclinometrico Automatizzato nel monitoraggio in continuo della frana di Corniglio (Parma) e ricerca di correlazioni significative fra le precipitazioni e la riattivazione del novembre 1994*. Quaderni di Geologia Applicata, 8 (2), 159-187.
- LUGEON M. (1933) – *Barrages et Géologie*. Rouge, Lausanne.
- MAUGERI M., COSTA C.P. & RANDAZZO F. (1981) – *Reliability of the Inclinometer Measurements*. X ICSMFE, 2, 519-522. Stockholm.
- ORGANIZZAZIONE TECNICI RIUNITI S.R.L. (1987) – *Errori nelle misure inclinometriche e sistemi di correzione*. Notiziario Tecnico 1/I 1986. 21 pp.
- SAPPA M. & SAPPA G. (1995) – *Observation on Inclinometer Measurements*. FMGM95-4th International Symposium, 333-340.
- TANZINI M. (2002) – *L'indagine geotecnica*. 364 pp. Dario Flaccovio Editore, Palermo.
- TOMMASI P. (1986) – *La precisione delle misure inclinometriche e le possibilità di elaborazione offerte dai metodi statistici*. Associazione Geotecnica Italiana, Atti 16° Convegno Nazionale di Geotecnica, 3, 525-532. Bologna, 14-16 maggio 1986.
- TORNAGHI R. (1981) – *Indagini geotecniche in sito*. Pubblicazioni Tecniche RODIO S.p.A. - Impresa Costruzioni Speciali. 135 pp.
- Geotecnica e geomeccanica:**
- BRINCH HANSEN J. (1970) – *A Revised and Extended Formule for Bearing Capacity*. Danish Geotechnical Institute, 28, 5-11.
- CASTELLI M., MARELLO S., MARINONI L. & SETTI M. (2006) – *Caratterizzazione del materiale marnoso appartenente a zone di deformazione tettonica nelle Langhe*. Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2006 - IARG 2006, Pisa.
- CHIAPPONE A. & SCAVIA C. (1999) – *Caratterizzazione geotecnica dei materiali marnosi coinvolti negli scivolamenti planari delle Langhe mediante la prova del blu di metilene*. Associazione Geotecnica Italiana, Atti 20° Convegno Nazionale di Geotecnica, 55-62. Parma, Settembre 1999.
- EUROCODICE 7 (2005) – *Progettazione geotecnica. Parte 1: Regole generali*. Norma Europea EN 1997-1 recepita e con status di Norma nazionale italiana UNI EN 1997-1. 168 pp.
- EUROCODE 7 (2006) – *Geotechnical design – Part 2: Ground investigation and testing*. Norma Europea EN 1997-2. 221 pp.
- EUROCODE 8 – *Design of structures for earthquake resistance. Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspect status*.
- HOEK E. (1994) – *Strenght of rock and rock masses*. ISRM News Journal, 2(2), 4-16.
- HOEK E. & BROWN E.T. (1980a) – *Empirical strength criterion for rock masses*. J. Geotech. Engng Div., ASCE 106 (GT9), 1013-1035.
- HOEK E. & BROWN E.T. (1980b) – *Underground Excavations in Rock*. 527 pp. London, Instn. Min. Metall.
- HOEK E., CARRANZA-TORRES C.T. & CORKUM B. (2002) – *Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition*. Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto in July 2002.
- HOEK E., KAISER P.K. & BAWDEN B.F. (1995) – *Support of underground excavations in hard rock*. 215 pp. Rotterdam, Balkema.
- LANCELLOTTA R. (2004) – *Geotecnica*. 3a ed., 481 pp. Zanichelli Editore. Bologna.
- LAUTRIN D. (1987) – *Une procédure rapide d'indentification des argiles*. Bulletin de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées, No. 152, novembre-décembre, 1987, 75-84.
- LAUTRIN D. (1989) – *Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil*. Bulletin de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées, No. 160, féve.-mars 1989, 29-41.
- MEISINA C. (2005) – *Utilizzo della prova al blu di metilene nella determinazione di alcuni parametri geotecnici di terreni argillosi*. Giornale di Geologia Applicata, 2, 237-244.
- TERZAGHI K. (1943) – *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons. New York.
- TIMOSHENKO S. & GOODIER J.N. (1951) – *Theory of Elasticity*. 2a ed., McGraw-Hill Book Co.

VESIC A.S. (1975) – *Bearing capacity of shallow foundation*. Foundation Engineering Handbook. Winterkorn and Fang Eds., Van Nostrand Reinhold.

Idrologia e idrogeologia:

ARPA PIEMONTE (2011) – *Dati rilevati dalla Rete meteorologica nel Bacino del Po*.

ARPA PIEMONTE (2006) – *Rapporto sull'evento meteopluviometrico del 14 – 15 settembre 2006*. 41 pp.

ARPAL LIGURIA (2011) – *Rapporto di evento meteo idrologico del 4-9/11/2011*. A cura di GALLINO S., BONATI V., CAVALLO A., GALVANI G., GIANNONI A., GOLLO P. & TURATO B.

http://www.arpal.gov.it/contenuti_statici/pubblicazioni/rapporti_eventi/2011/REM_20111104_alluvione_genova_%28versione_19122011%29.pdf

CELICO F. (1986-1988) – *Prospezioni idrogeologiche*. 2 voll., 735 + 528 pp. Liguori Editore, Napoli.

CIVITA M. (2005a) – *Idrogeologia applicata e ambientale*. 794 pp. Casa Editrice Ambrosiana, Milano.

CIVITA M. (Responsabile scientifico) (2005b) – *Studio e valutazione della vulnerabilità intrinseca delle acque sotterranee. Relazione finale*. POLITECNICO DI TORINO, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie - Gruppo di lavoro in Idrogeologia Applicata, PROVINCIA DI CUNEO – Assessorato Tutela Ambiente. 138 pp + all.. Torino.

MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI. Servizio idrografico. *Annali Idrologici*, 1951-1991.

POLITECNICO DI MILANO (2007) – *Consulenza tecnico scientifica ai fini della valutazione del rischio idrogeologico del Rio Filippa nel sito della omonima discarica*. Prof. Ing. Renzo Rosso, Dott. Ing. Maria Cristina Rulli. Milano, Rev.01 - marzo 2007.

SIMN – SERVIZIO IDROGRAFICO E MAREOGRAFICO NAZIONALE – *Annali idrologici*. Ufficio Idrografico del Po. Ministero dei Lavori Pubblici.

Geotecnica ambientale e caratterizzazione proprietà rifiuti:

BELFIORE F., MANASSERO M. & VIOLA C. (1990) – *Geotechnical analysis of some industrial sludges*. In “*Geotechnics of waste fills – Theory and practice*”, ASTM STP1070, A. LANDVA, G. D. KNOWLES, Editors, ASTM 1990, 317-330.

BERTAKIS G., LEKKAS E. & LOZIOS S. (1995) – *Landfill selection criteria with emphasis in engineering geology and environment*. Geol Soc Greece, Sp Publ no 4, 1995.

CANCELLI A. & COSSU R. (1984) – *Problemi di stabilità negli Scarichi Controllati*. Ingegneria Ambientale, **13**, 11-12.

CEVASCO A., MAIFREDI P., POLI P. & CARIERI G. (2008) – *Prove geotecniche in situ su rifiuti speciali non pericolosi smaltiti in discarica: risultati, potenzialità e limiti*. Giornale di Geologia Applicata, **10**, 59-68.

CHANG N.B., PARVATHINATHAN G. & BREEDEN J. B. (2008) – *Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region*. Journal of Environmental Management **87** (2008) 139–153.

CHEN Y.M., ZHAN T.L.T., WEI H.Y. & KE H. (2009) – *Aging and compressibility of municipal solid wastes*. Waste Management **29** (2009) 86–95.

COWLAND J.W., TANG K.Y. & STEGMANN R. (1993) – *Density and strenght properties of Hong Kong refuse*. Proc. 4rd Int. Landfill Symposium Sardinia '93 – S. Margherita di Pula, Cagliari.

DIXON N. & JONES D.R.V. (2005) – *Engineering properties of municipal solid waste*. Geotextiles and Geomembranes **23** (2005) 205–233.

DIXON N. & LANGER U. (2006) – *Development of a MSW classification system for the evaluation of mechanical properties*. Waste Management **26** (2006) 220–232.

DODT M.E., SWEATMAN M.B. & BERGSTROM W.R. (1987) – *Field measurements of landfill surface settlements*. Geotechnical Practice for Waste Disposal 87, ASCE Specialty Conference, Ann Arbor, Mich., **13**, 406-418.

EDGERS L., NOBLE J. J. & WILLIAMS E. (1992) – *A biologic model for long term settlement in landfills*. Proceedings, Conference on Environmental Geotechnilogy, Balkan, pp. 177-184.

EDIL T.B., RANGUETTE V.J. & WUELLNER W.W. (1990) – *Settlement of municipal refuse*. Geotechnics of Waste Fills: Theory and Practice, ASTM STP 1070, ASTM, Philadelphia, 225-239.

EISELT H.A. (2007) – *Locating landfills. Optimization vs. reality*. European Journal of Operational Research **179** (2007) 1040–1049.

FAVARETTI M. & MAESTRINI S. (1998) – *Fenomeni di assestamento dei Rifiuti Solidi Urbani: effetti e possibilità di controllo*. Atti Conv. Nazionale “Chiusura e post-chiusura delle discariche controllate”, Castelfranco Veneto (TV), 24-25 settembre 1998, IX-1 ÷ IX17.

GRISOLIA M., GASPARINI A. & SAETTI G.F. (1993) – *Survey on waste compressibility*. Proc. Sardinia 93, S. Margherita di Pula (CA), vol. 2, 1447-1456.

GRISOLIA M. & LUCIANI D. (1995) – *Considerazioni sulla stabilità e sui cedimenti di una discarica di RSU*. Atti Convegno “La progettazione delle discariche”, Bergamo, 1995, 9 pp.

GRISOLIA M. & NAPOLEONI Q. (2004) – *Caratteristiche meccaniche di rifiuti pretrattati*. Incontro annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2004 - IARG 2004, Trento.

- GRISOLIA M., NAPOLEONI Q., PAGNONI A. & TANCREDI G. (1992) – *Considerazioni sulla compressibilità dei rifiuti solidi urbani*. Proc. 1st Italian-Brazilian Symposium on Sanitary and Environmental Engineering, Rio de Janeiro (Brazil), pp. 152-161.
- GRISOLIA M., NAPOLEONI Q. & TANCREDI G. (1995a) – *Modelli di comportamento geotecnico di una discarica di RSU: scelta dei parametri di progetto*. Atti Convegno “La progettazione delle discariche”, Bergamo, 1995, 10 pp.
- GRISOLIA M., NAPOLEONI Q. & TANCREDI G. (1995b) – *Caratterizzazione geotecnica dei rifiuti solidi urbani*. Atti Convegno ALGI “Materiali artificiali ed innovativi. Caratterizzazione geotecnica”. Caltanissetta, 22-23 settembre 1995.
- KAVAZANJIAN E. JR. (1999) – *Seismic design of solid waste containment facilities*. Proc. 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, June 1999, 51-89.
- KAVAZANJIAN E. JR., MATASOVIC N., STOKOE K.H. II & BRAY J.D. (1996) – *In situ shear wave velocity of solid waste from surface wave measurements*. Environmental Geotechnics, Edited by M. Kamon, A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, vol. 1, 97-102.
- MANASSERO M., BENSON C., BOUAZZA A. (2000) – *Solid waste containment system*. Proc. Int. Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, 520-642.
- MANASSERO M., VAN IMPE W.F. & BOUAZZA A. (1997) – *Waste disposal and containment. State of the Art Report*. Proc. 2nd . Int. Congress Environmental Geotechnics (ICEG), Osaka, Japan, 5-8 November 1996, 1245-1474. A.A. Balkema, Rotterdam.
- MANASSERO M., PARKER R., PASQUALINI E., SZABO I., ALMEIDA M.S.S., BOUAZZA A., DANIEL D.E. & ROWE R.K. (1998) – *Controlled landfill design (geotechnical aspect)*. Proc. 3rd Int. Congress Environmental Geotechnics, Lisbon, 1001-1038.
- MATASOVIC M. & KAVAZANJIAN E. (2006) – *Seismic Response of a Composite Landfill Cover*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- MAUGERI M. & SECO E PINTO P.S. (2005) – *Seismic Design of Solid Waste Landfills and Lining Systems*. Chapter 5 TC5 Report, September 2005.
- MORRIS D.V. & WOODS C.E. (1990) – *Settlement and engineering considerations in landfill final cover design*. Geotechnics of Waste Fills. Theory and Practice, ASTM STP 1070, ASTM, Philadelphia, 9-21.
- O'KELLY B.C.O. (2005) – *Mechanical properties of dewatered sewage sludge*. Waste Management 25 (2005) 47-52.
- PASQUALINI E., PATACCHINI C., STELLA M. & VEGGI S. (2003) – *Stabilità delle discariche controllate per rifiuti solidi urbani*. Atti Conferenze di Geotecnica di Torino XIX Ciclo, 19.10, 49 pp. Politecnico di Torino, 4 – 6 Novembre 2003.
- QIAN X., KOERNER R.M. & GRAY D.H. (2002) – *Geotechnical aspects of landfill design and construction*. 717 pp. Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- SHARIFI M., HADIDI M., VESSALI E., MOSSTAFAKHANI P., TAHERI K., SHAHOIE S. & KHODAMORADPOUR M. (2009) – *Integrating multi-criteria decision analysis for a GIS-based hazardous waste landfill siting in Kurdistan Province, western Iran*. Waste Management 29 (2009) 2740-2758.
- SHARMA H.D., LEWIS S.P. (1994) – *Waste, Containment System, Waste Stabilization, and Landfills: Design and Evaluation*. John Wiley & Sons, New York.
- SOWERS G.F. (1973) – *Settlement of waste disposal fills*. Proc. ICSMFE, Moscow.
- SPIKULA D. R. (1997) – *Subsidence performance of landfills*. Geotextiles and Geomembranes 15 (1997) 395-402.
- SUMATHI V.R., NATESAN U. & SARKAR C. (2008) – *GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill*. Waste Management 28 (2008) 2146-216.
- WALL D.K. & ZEISS C. (1995) – *Municipal landfill biodegradation and settlement*. Journal of Environmental Engineering, ASCE, vol. 121, 214-224.
- ZEKKOS D. (2005) – *Evaluation of Static and Dynamic Properties of Municipal Solid Waste*. University Of California, Berkeley, 2005.

Area urbana di Como:**Documenti di progetto:**

- COMUNE DI COMO (1997 a) – *Indagini geognostiche per la caratterizzazione geologica e geotecnica del sottosuolo finalizzata alla progettazione delle opere per la difesa dalle esondazioni della passeggiata a lago*. Rapporto di cantiere, 4 volumi, a cura di So.Ge.Tec.
- COMUNE DI COMO (1997 b) – *Opere per la difesa dalle esondazioni lungo la passeggiata a Lago – Indagini per la caratterizzazione geologica e geotecnica del sottosuolo*. Relazione a cura di Studio Associato Cancelli.
- COMUNE DI COMO (1998-2004) – *Opere per la difesa dalle esondazioni del Lago nel comparto di Piazza Cavour – Lungo Lago. Progetto esecutivo*. A cura di Prof. ing U. Maione (coordinatore), arch. R. Conti, ing. C. Terragni.
- COMUNE DI COMO (1999; 2000) – *Relazioni integrative a seguito delle richieste da parte di Regione Lombardia*.
- INGEGNERIA E CONTROLLI S.R.L. (2010) – *Impianto di monitoraggio strumentale sugli edifici lungo il tratto di banchina compresa tra Viale Cavallotti e Piazza Matteotti – Rapporto interpretativo*.
- INGEGNERIA E CONTROLLI S.R.L. (2011) – *Impianto di monitoraggio strumentale sugli edifici lungo il tratto di banchina compresa tra Viale Cavallotti e Piazza Matteotti – Fase 2. Rapporto interpretativo*.

Geologia e geomorfologia:

- BERNUOLLI D., BERTOTTI G. & ZINGG A. (1989) – *Northward thrusting of the Gonfolite Lombarda ("South-Alpine Molasse") onto the Mesozoic sequence of the Lombardian Alps; implications for the deformation history of the Southern Alps*. *Ecl. Geol. Helv.*, vol. **82**, no.3, pp.841-856.
- BERTOTTI G. (1991) – *Early Mesozoic extension and Alpine shortening in the western Southern Alps: the geology of the area between Lugano and Menaggio (Lombardy, Northern Italy)*. *Mem. Soc. Geol.*, **43**, 17-23.
- BINI A. (1993) – *Geologia del Quaternario e geomorfologia delle piana di Como*. In: M. UBOLDI (a cura di) *Carta archeologica della Lombardia. Como. La città murata e la convalle*. Franco Cosimo Panini, pp 59-63.
- BINI A. & CASTELLETTI L. (1986) – *Geologia e paleobotanica di un sedimento olocenico nel sottosuolo di piazza Roma a Como*. *Natura Bresciana*, **23** (1986), pp. 357-363.
- BINI A., CITA M. B. & GAETANI M. (1978) – *Southern Alpine lakes; hypothesis of an erosional origin related to the Messinian entrenchment*. *Marine Geology*, vol. **27**, no. 3-4, pp. 271-288.
- BINI A., FELBER M., POMICINO M. & ZUCCOLI L. (2001) – *Geologia del Mendrisiotto (Canton Ticino, Svizzera). Messiniano, Pliocene e Quaternario*. *Berichte des BWG, serie geologie - Rapports de l'OFEG, serie geologie n.1* - Berna.
- BINI A., RIGAMONTI I. & UGGERI S. (1993) – *Evidenze di tettonica recente nell'area Monte Campo dei Fiori – Lago di Varese*. *Il Quaternario*, **6**(1): 3-14.
- BINI A. & ZUCCOLI L. (2004) – *Glacial history of the southern side of the central Alps, Italy*. In: J. Ehlers & P.L. Gibbard (Eds.) *"Quaternary Glaciations - Extent and Chronology"*. Elsevier B.V.: 195-200.
- CAPELLETTI S. (2004) – *Studio dei sedimenti recenti nel settore di Como: analisi multidisciplinare ed implicazioni per l'evoluzione ambientale del bacino lariano*. Università degli Studi dell'Insubria. Tesi di Laurea Specialistica.
- CAPELLETTI S. (2008) – *Studio dei sedimenti recenti nella città di Como: analisi multidisciplinari ed implicazioni per l'evoluzione ambientale del bacino idrografico lariano*. Università degli Studi dell'Insubria. Tesi di Dottorato.
- CASTALDINI D. & PANIZZA, M. (1991) – *Inventario delle faglie attive tra i fiumi Po e Piave e il Lago di Como (Italia settentrionale)*. *Il Quaternario*. Vol. **4**. - p. 333-410.
- CHUNGA K., LIVIO F., MICHETTI A. M. & SERVA L. (2007) – *Synsedimentary deformation of Pleistocene glaciolacustrine deposits in the Albese con Cassano Area (Southern Alps, Northern Italy), and possible implications for paleoseismicity*. *Sedimentary Geology*, **196** (2007) 59-80.
- COMUNE DI COMO (2003) – *Agenda 21 Como: Rapporto sullo Stato dell'Ambiente*. Punto Energia di Como, 2003.
- COMUNE DI COMO (2011) – *Documento di Piano del Piano di Governo del Territorio 2011*.
- FANETTI D., ANSELMETTI F., CHAPRON E., STURM M. & VEZZOLI L. (2008) – *Megaturbidite deposits in the Holocene basin fill of Lake Como (Southern Alps, Italy)*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **259** (2008) 323-340.
- FINCKH P.G. (1978) – *Are southern Alpine lakes former Messinian canyons? Geophysical evidence for preglacial erosion in the southern Alpine lakes*. *Marine Geology*, vol. **27**, n. 3-4, pp.289-302.
- FINCKH P. G., KELTS K. & LAMBERT A. (1984) – *Seismic stratigraphy and bedrock forms in perialpine lakes*. *Geological Society of America Bulletin*, vol. **95**, no.9, pp.1118-1128.
- GHEZZI A. & LANDI G. (1992) – *Caratteri geologico-tecnici del tracciato della metropolitana leggera di Como (Grandate - S. Giovanni)*. Relazione tecnica.
- GIANOTTI R. & PEROTTI C. R. (1986) – *Introduzione alla tettonica e all'evoluzione strutturale delle Alpi Lariane*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **32**, 67-99, 15 ff., 1 tav. f.t.
- LIVIO F., BERLUSCONI A., BERNOLLI D., MICHETTI A. M., SILEO G., CHUNGA K., CARCANO C. & ROGLEDI S. (2009a) – *CARG Sheet 75 "Como" (Lombardia, N Italy): stratigraphic observations and evidence for recent surface faulting at Borgo Vico site (Como)*. *GeoItalia 2009; Rimini*, 9-11 Sept., 2009., *Epitome*, Vol. **3** pp.319.

- MICHETTI A.M., BRUNAMONTE F. & CHIESSI V. (2007) – *Il sottosuolo della Città di Como. Indagini stratigrafiche, geotecniche, idrogeologiche*. Convegno di studio CIRLIM “L’ambiente del Lago di Como: conoscenza, rischi, opportunità”. Como, 23 novembre 2007.
- NANGERONI G. (1956) – *Appunti sull’origine di alcuni laghi Prealpini lombardi*. In: *Atti della Società italiana di scienze naturali e del Museo civico di storia naturale in Milano*. Vol. **95** (1956), 176-196.
- NANGERONI G. (1972) – *Il monte Barro (Prealpi Lombarde): note di geomorfologia*. Atti Società Italiana Scienze Naturali e Museo Civico Storia Naturale Milano, **108/2**, pp. 159-196.
- TERZAGHI K. & PECK R. B. (1967) – *Soil Mechanism in Engineering Practice*. John Wiley and Sons, Inc., New York, London, Sidney.

Cartografia e riprese aeree:

- ATTARDO G. (2002) – *Indagine geologico - tecnica di supporto al P.R.U.G..* Comune di Como.
- CERIANI M. & CARELLI M. (2000) – *Carta delle precipitazioni massime, medie e minime del territorio alpino della regione Lombardia (registrate nel periodo 1891 - 1990)*. Servizio Geologico - Ufficio rischi Geologici. Regione Lombardia.
- SERVIZIO GEOLOGICO D’ITALIA (2012) – *Carta Geologica d’Italia a scala 1:50.000 Progetto CARG. Foglio 75 – Como*. ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – Università degli Studi dell’Insubria. A cura di MICHETTI A. M., LIVIO F., PASQUARÈ F.A., VEZZOLI L., BINI A., BERNOULLI D. & SCIUNNACH D.

Indagini geognostiche:

- RADAELLI & CASTELLOTTI S.R.L. (1975) - Commissione per lo Studio dei fenomeni di Subsidenza. *Campagna geognostica per l’esecuzione di sondaggi stratigrafici e installazione di strumentazione di monitoraggio in Como*.
- RCT S.R.L. (2005) – CIRLIM, Università dell’Insubria, Sede di Como. *Campagna geognostica per l’esecuzione di sondaggi stratigrafici e installazione di strumentazione di monitoraggio in Como*.
- RCR S.N.C. di Cibirio Giorgio & c. (2010) – *Esecuzione di sondaggi e installazione di strumentazione piezometrica ad integrazione della rete di monitoraggio comunale esistente*. Relazione tecnica.

Subsidenza:

- ARCA S. & CARDINI A. (1984) – *Misure di livellazione geometrica nella città di Como per lo studio dei movimenti verticali del suolo*. Bollettino di geodesia e scienze affini n° 2, 1984.
- ASCHERI A. (1972) – *Studio geologico sui fenomeni di subsidenza nell’area urbana della città di Como*. Rapporto 1, Comitato per lo studio dei fenomeni di subsidenza, Comune di Como.
- BARZAGHI R., PASSONI D., PINTO L. & SANSÒ F. (2011) – *Livellazione di alta precisione e misurazione di rete GNSS di controllo per l’analisi della subsidenza della sponda meridionale del lago di Como*. Relazione Tecnica. DIIAR, Politecnico di Milano.
- BONCI L., CAMETTI A., COMERCI V., MATARAZZO D., MICHETTI A. M., VITTORI E. & VULLO F. (2004) – *Città di Como - Livellazione di Alta Precisione*. APAT - Dipartimento Difesa del Suolo. Relazione tecnica.
- CANCELLI A. (1986) – *Aspetti geotecnici della subsidenza*. In “Ambiente: Protezione e Risanamento”, a cura di A. ZAVATTI. Pitagora Editrice 1986, Vol. **1**: Le Acque.
- COMUNE DI COMO (1980) – *Relazione di sintesi della Commissione per lo Studio dei fenomeni di Subsidenza*. Documenti e Ricerche, 34.
- GIUSSANI A. (1997) – *Studio dei fenomeni di subsidenza del territorio del Comune di Como. Campagna di misure 1997*. Politecnico di Milano, Milano. Relazione tecnica.
- PROKOPOVICH N.P. (1986) – *Classification of land subsidence by origin*. In: JOHNSON, A.I. et al., (Ed.), *Land Subsidence*, Proc. 3rd Int. Symp. on Land Subsidence, vol. **151**. IAHS Publ., Wallingford, pp. 281-290.
- TRE TELE-RILEVAMENTO EUROPA (2012) – *Analisi satellitare SqueeSAR™ sulla città di Como*. Ottobre 2012, risultati preliminari.

Idrologia e idrogeologia:

- AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI COMO (1998) – *Monitoraggio delle falde idriche sotterranee in Provincia di Como*. ASL Como.
- APUANI T., CANCELLI A. & CANCELLI P. (2000) – *Hydrogeological and geotechnical investigations along the shoreline of the town of Como, Italy*. In: D.P. MOORE & O. HUNGR (Eds.) “*Engineering Geology and Environment*” Proc. 8th. Cong. Intern. Assoc. Engineering Geology (IAEG).
- BERETTA G.P., DENTI E., FRANCANI V. & SALA P. (1984) – *Lineamenti idrogeologici del settore sublacuale della provincia di Como*. Acque sotterranee, **4**, 23-62.

- BERETTA G. P., DENTI E., FUMAGALLI L. & SALA P. (1986) – *Note sull'idrogeologia delle città di Como e Lecco*. Mem. Soc. Geol. It., **32** (1986), 235-251.
- BERTOLI L., DEL PERO G. & TODINI E. (2007) – *Il Telecontrollo del Lago di Como*. Public Utilities International Forum 2007. Cernobbio (Como), 11-12 ottobre 2007.
- CANCELLI A. (1996) – Intervento alla tavola rotonda. *La regolazione del Lago di Como: problemi e proposte*. Kiwanis International Europe. Atti del convegno. Villa Olmo, Como, 19 aprile 1996.
- COLMEGNA F. (2006) – *Sintesi dei dati stratigrafici ed idrogeologici dell'area urbana di Como: realizzazione di un database informatico di supporto alle ricerche sull'evoluzione geologico-ambientale del bacino lariano*. Università degli Studi dell'Insubria. Tesi di Laurea Triennale.
- CROCE A., MAIONE U., MANTOVANI E., MESSINA U. & ZORZI S. (1987) – *Studio per la soluzione dei problemi connessi con l'esondazione del Lago di Como*. Ministero dei Lavori Pubblici. Magistrato per il Po, Parma.
- FANTOLI G. (1921) – *Il Lago di Como e l'Adda emissario nella condizione idraulica odierna e nella divisata regolazione del deflusso mediante opere mobili di trattenuta e di scarico*. Società Generale Edison di Elettricità.
- GHEZZI A. (1972) – *Studio per la valutazione delle risorse idriche sotterranee nel primo bacino del lago di Como*. Studio Idrogeotecnico. Milano.
- MORETTI R. (2008) – *Sintesi dei dati idrometrici ed idrogeologici dell'area urbana di Como: analisi dei rapporti tra la falda freatica e le oscillazioni del livello del lago*. Università degli Studi dell'Insubria. Tesi di Laurea Triennale.
- REGIONE LOMBARDIA (2005) – *Database dell'Osservatorio dei Laghi Lombardi*.
- SALVADÈ G. & GEROSA G. (1997) – *Onde gravitazionali esterne e interne del Lago di Como*. Acqua & Aria, ottobre 1997, pp. 87-96.

Evoluzione ambientale:

- ANSELMETTI F. S., DRESCHER-SCHNEIDER R., FURRER H., GRAF H. R., LOWICK S. E., PREUSSER F. & RIEDI M. A. (2010) – *A ~180,000 years sedimentation history of a perialpine overdeepened glacial trough (Wehntal, N-Switzerland)*. Swiss J Geosci (2010) **103**:345–361
- ASHLEY G. M. (1975) – *Rhythmic sedimentation in glacial Lake Hitchcock, Massachusetts-Connecticut*. In “*Glaciofluvial and glaciolacustrine sedimentation*”, p.304-319, ed. JOPLING, McDONALD. Tulsa (Oklahoma). SEPM, 1975. **IV**, 320 p.
- BASSETTI M. & BORSATO A. (2005) – *Evoluzione geomorfologica della Bassa Valle dell'Adige dall'Ultimo Massimo Glaciale: sintesi delle conoscenze e riferimenti ad aree limitrofe*. Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol., **82**, p 31-42.
- CASTELLETTI L. & OROMBELLI G. (1986) – *Una nuova data 14C per la storia della deglaciazione del bacino del Lago di Como*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., Vol. **9**, p. 56-58.
- CHURCH M. & GILBERT R. (1975) – *Proglacial fluvial and lacustrine environments*. In “*Glaciofluvial and glaciolacustrine sedimentation*”, p. 22-100, ed. JOPLING, McDONALD. Tulsa (Oklahoma). SEPM, 1975. **IV**, 320 p.
- CLAGUE J. J. (1975) – *Sedimentology and paleohydrology of Late Wisconsinan outwash, Rocky Mountain Trench, Southeastern British Columbia*. In “*Glaciofluvial and glaciolacustrine sedimentation*”, p. 223-237, ed. JOPLING, McDONALD. Tulsa (Oklahoma). SEPM, 1975. **IV**, 320 p.
- COMERCI V. (2004) – *Evoluzione geologica e ambientale recente in aree subsidenti, esempio di studio nella città di Como*. Università degli Studi dell'Insubria. Tesi di Dottorato.
- COMERCI V., MICHETTI A.M. & GIARDINA F. (2004) – *Late glacial environmental evolution in the Como urban area (Northern Italy), and the birth of Lake Lario*. In: Program with abstracts, Italia 2004, 32nd International Geological Congress, Florence (Italy), August 20-28, 2004.
- COMERCI V., CAPELLETTI S., MICHETTI A. M., ROSSI S., SERVA L. & VITTORI E. (2007) – *Land subsidence and Late Glacial environmental evolution of the Como urban area (Northern Italy)*. Quaternary International **173-174** (2007) 67-86.
- DEHNERT A., LOWICK S. E., PREUSSER F., ANSELMETTI F. S., DRESCHER-SCHNEIDER R., GRAF H. R., HELLER F., HORSTMAYER H., KEMNA H. A., NOWACZYK N. R., ZÜGER A. & FURRER H. (2012) – *Evolution of an overdeepened trough in the northern Alpine Foreland at Niederweningen, Switzerland*. Quaternary Science Reviews **34** (2012), 127-145.
- ELVERHOI A., LONNE O. & SELAND R. (1983) – *Glaciomarine sedimentation in a modern fjord environment, Spitsbergen*. Polar Research **1**, p. 127-149.
- FERRARIO M. F. (2009) – *Analisi dei rapporti fra la falda freatica e il comportamento meccanico dei terreni nell'area urbana di Como: implicazioni ambientali*. Università degli Studi dell'Insubria. Tesi di Laurea Specialistica.
- FRIGERIO M. (2012) – *Il sottosuolo dell'area urbana di Como: modello dell'evoluzione ambientale post-glaciale*. Università degli Studi dell'Insubria. Tesi di Laurea Specialistica.
- GILBERT R. (1982) – *Contemporary sedimentary environments on Baffin Island, N.W.T., Canada: glaciomarine processes in fiords of Eastern Cumberland Peninsula*. Arctic and Alpine Research, **14**, p 1-12.
- IVY OCHS S., SCHÄFER J., KUBIK P.W., SYNAL H.A. & SCHLÜCHTER C. (2004) – *The timing of deglaciation in the northern Alpine foreland (Switzerland)*. Ecl. Geol. Helv., **97**, pp. 47-55.

- JORDAN P. (2010) – *Analysis of overdeepened valleys using the digital elevation model of the bedrock surface of Northern Switzerland*. *Swiss J Geosci* (2010) **103**:375–384
- MARTINELLI E., MOTELLA S., MICHETTI A.M., HÖBIG N., LIVIO F., TINNER W., REICHERTER K. & CASTELLETTI L. (2012) – *Understanding Late Glacial to Holocene Environmental variability in the Insubria Region, N Italy: new data from the Como-Piazza Verdi drilling*. ESF-LFUI Conference “Modes of Variability in the Climate System: Past-Present-Future”. 27 Maggio-1 Giugno 2012, Obergurgl (Austria).
- MARTINELLI E., MOTELLA S., MICHETTI A.M., HÖBIG N., LIVIO F., TINNER W., REICHERTER K. & CASTELLETTI L. (2012) – *Environmental change between Late Glacial and Holocene: new data from the Como-Piazza Verdi drilling (N-Italy, Southern Alps)*. Aiqua Congress 2012, 15-17 Febbraio 2012, Pisa.
- MAZZOLA E. (2012) – *Evoluzione ambientale recente nell'area di Como e analisi stratigrafiche sui sedimenti del sondaggio di Piazza Verdi*. Università degli Studi dell'Insubria. Tesi di Laurea Triennale.
- MONEGATO G., RAVAZZI C., DONEGANA M., PINI R., CALDERONI G. & WICK L. (2007) – *Evidence of a two fold glacial advance during the Last Glacial Maximum in the Tagliamento end moraine system (SE Alps)*. *Quaternary Research*, **68**, pp. 284-302.
- MOTELLA S. (2007) – *Evoluzione del paesaggio nel bacino del Lago di Como: nuovi dati per la ricostruzione della vegetazione tra Tardiglaciale e Olocene a sud delle Alpi in base allo studio dei macroresti botanici del sondaggio di piazza Verdi a Como*. Università degli Studi dell'Insubria. Tesi di Dottorato.
- PREUSSER F., REITNER J. M. & SCHLUCHTER C. (2010) – *Distribution, geometry, age and origin of overdeepened valleys and basins in the Alps and their foreland*. *Swiss J Geosci* (2010) **103**:407–426
- RAVAZZI C., PERESANI M., PINI R. & VESCOVI E. (2007) – *Il Tardoglaciale nelle Alpi italiane e in Pianura Padana. Evoluzione stratigrafica, storia della vegetazione e del popolamento antropico*. *Il Quaternario - Italian Journal of Quaternary Sciences* **20**(2), 2007 - 163-184.
- RICCI F. (2001) – *La terra segnata. Calamità naturali storiche nella provincia di Como*. I libri del Corriere di Como.
- TARZI L. (2011) – *Caratterizzazione della circolazione idrica sotterranea nell'area urbana di Como: implicazioni geologiche e ambientali*. Università degli Studi dell'Insubria. Tesi di Laurea Triennale.
- VAN HUSEN D. (2004) – *Quaternary glaciations in Austria*. In ELHERS J., GIBBARD P.L. eds., “*Quaternary Glaciations - Extent and Chronology – Part I: Europe*”. Elsevier, Amsterdam.

Allegati

1. Carta ubicazione strumenti e indagini impianto “La Filippa”, scala 1:1.000
2. Carta geologica e geomorfologica impianto “La Filippa”, scala 1:5.000
3. Carta ubicazione indagini Como, scala 1:2.500
4. Profili geologici Como, scala 1:1.000

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare innanzitutto Carlo e Massimo Vaccari, l'ing. Poli e tutto lo staff della LPL; ringraziarli per aver finanziato questo progetto di ricerca sarebbe scontato, e sarebbe soprattutto oltremodo riduttivo: desidero invece farlo per avermi concesso il privilegio di lavorare in un contesto intellettualmente stimolante e in cui impresa e ambiente vanno di pari passo, cosa che difficilmente avrei potuto trovare altrove... peccato solo che Cairo non sia in Riviera!

Grazie ad Alessandro, per avermi regalato questa opportunità, per aver creduto in me più di quanto abbia saputo fare io stessa e per tutto ciò che ha fatto pur non essendo tenuto a farlo; a Fabio per tutte le spiegazioni e la costante e puntuale opera di revisione; e grazie ad entrambi per la qualità del loro lavoro di relatori.

Un doveroso ringraziamento va al Comune di Como, a REA Ricerche Ecologiche Applicate e a TRE Tele-Rilevamento Europa per la preziosa collaborazione.

Grazie a Andrea, Franz e Lucia per avermi sopportato per tutto questo tempo; ai "miei" tesisti, Lucio e Mattia, e, in rigoroso ordine alfabetico, a Donata, Elisa, Giancanio, Licia, Livio, Mario, Marzio, Roberto e Silvia, per aver camminato al mio fianco per qualche tratto più o meno lungo.

Grazie a mia mamma, che se ne è andata troppo presto, e a tutta la mia famiglia, per avermi sempre sostenuto e incoraggiato; ringrazio poi i tanti, e più numerosi di quanto immaginassi, che mi sono stati vicini nei momenti difficili, e infine tutti coloro che hanno condiviso con me un pezzo di strada.