CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO TECNICA DI UN AREA INDUSTRIALE DISMESSA OGGETTO DI RECUPERO AMBIENTALE

Dott. Geol. Stefano Liti

CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO-TECNICA DI UN'AREA INDUSTRIALE DISMESSA OGGETTO DI RECUPERO AMBIENTALE

RIASSUNTO

Il presente lavoro effettuato dallo scrivente ha messo a punto il modello concettuale di un sito industriale potenzialmente inquinato e inserito in un progetto di recupero ambientale. I dati sono stati ottenuti da sondaggi geognostici, da piezometri, da prove geotecniche di laboratorio, da misure di resistività, da analisi paleontologiche, da analisi chimiche su terre ed acque e dalla consultazione di materiale bibliografico.
La redazione del modello geologico-tecnico si è inserita nell'ambito delle indagini preliminari, volte ad una prima caratterizzazione del sito e alla verifica del suo stato di inquinamento. Le indagini geognostiche, assieme alle prove di laboratorio, hanno mostrato la presenza di terreni prevalentemente limo-argillosi, interessati da una debole circolazione idrica sotterranea, che non favorisce la migrazione e la diffusione degli inquinanti nel sottosuolo.
Di grande supporto sono risultate le misure di resistività, utilizzate ai fini dell'individuazione di corpi interrati e alla delimitazione dello spessore del terreno di riporto. Inoltre le analisi micro paleontologiche sono risultate fondamentali per il corretto posizionamento del limite tra il substrato argilloso di origine marina ed i depositi fluvio-lacustri di origine continentale. Ai fini di una miglior comprensione del sistema sono state messe a punto due sezioni geologico-tecniche.
Le analisi chimiche hanno restituito valori di concentrazione di sostanze inquinanti all'interno delle matrici ambientali inferiori alle soglie di contaminazione imposte per legge, per cui il sito potrà essere ripristinato alla sua funzione originaria. Nella trattazione sono stati discussi anche i riferimenti normativi in campo ambientale e le procedure da adottare per la valutazione dello stato di inquinamento di aree simili a quello in esame. I risultati qui ottenuti possono risultare utili per avviare le procedure per il recupero dell'area in accordo con il Piano Regolatore Generale vigente.

INTRODUZIONE

In Italia negli ultimi decenni, a causa dell'abbandono di vecchi siti industriali ed artigianali, sempre più spesso zone di territorio risultano contaminate da diversi agenti chimici derivanti dai residui di produzione. Alcune di queste zone industriali dismesse sono ubicate in zone prossime a centri urbani (Pagliarulo et al., 2006) o in zone vicine a corsi d'acqua o a vie di comunicazione principali. Le normative, sempre più restrittive in campo ambientale (D.Lgs 152/06), impongono la caratterizzazione di ogni sito produttivo dismesso e, se necessario, la bonifica dello stesso, prima della sua possibile riconversione a nuovi usi. La presente tesi raccoglie i risultati derivanti da analisi di sito e di laboratorio utili per la caratterizzazione e realizzazione di un modello geologico – tecnico di un'area interessata da inquinamento ed oggetto di recupero ambientale. Per motivi giudiziari, non si farà riferimento alla denominazione delle Aziende proprietarie del sito sia del passato che attuali nè alla precisa collocazione dello stesso. Il caso in esame è simile a quello dell'ex Fibromit di Bari, descritto da Pagliarulo et al. (2006): la cattiva gestione degli scarti di lavorazione industriali ha portato ad avere oggi su entrambi i siti diversi centimetri, se non metri, di terreno di riporto inquinato o con caratteristiche geotecniche scadenti, con anche modifiche morfologiche sostanziali del territorio circostante.

Il sito in esame è costituito da un capannone commerciale e dal relativo terreno di pertinenza, ed è stato oggetto in passato di numerose peripezie giudiziarie, con molteplici cambi di proprietà, il che non ha sicuramente favorito l'attenzione alle problematiche ambientali, ma ha anzi accentuato la tendenza al degrado e all'abbandono.

Terminate le vicende giudiziarie, il sito è stato oggi acquistato da un'azienda locale che si è presa in carico il suo recupero; è perciò stato riavviato l'iter legislativo che prevede innanzitutto una nuova caratterizzazione chimica di suolo ed acque, essendo trascorsi ormai due anni dalle ultime analisi effettuate.

In un sito industriale dismesso il primo passo della caratterizzazione è la ricostruzione storica delle attività che vi sono state svolte. Queste notizie, unite a topografia, litologia, idrografia ed idrogeologia dell'area, concorrono a formare un primo "modello concettuale" del sito.

Il modello geologico – tecnico realizzato nel presente lavoro, si inserisce nel progetto di analisi dello stato attuale del sito, ossia nella realizzazione del modello concettuale preliminare sopra descritto, e costituisce una parte

fondamentale di un eventuale progetto di bonifica volto al recupero dello stesso. A tal fine sono stati realizzati :

- Cinque sondaggi geognostici a carotaggio continuo, di cui tre spinti fino alla profondità di 10,0 m, uno fino a 15,0 m ed uno fino a 20,0 m, con il prelievo di campioni a diverse profondità per prove di laboratorio (analisi granulometriche, limiti di Atterberg). Tutte le prove sono state eseguite presso il laboratorio di Geologia Applicata del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Perugia;
- Istallazione di tre piezometri nei sondaggi sopra descritti;
- Quattro tomografie elettriche per verificare la presenza di eventuali cumuli di rifiuti interrati.

CAPITOLO 1 - Cenni sull'iter legislativo inerente l'analisi e la bonifica dei siti contaminati

1.1 PREMESSA

La procedura che si segue nel caso sussista l'ipotesi di inquinamento di un sito è descritta, come già accennato nell'introduzione, dal D. Lgs. 152/2006 ed è rappresentata schematicamente in figura 1; la figura professionale del geologo è responsabile della direzione delle indagini volte alla caratterizzazione del sito e

della certificazione della sua avvenuta bonifica, nel caso in cui sia stata verificata la presenza di agenti inquinanti, o del suo stato di non-inquinamento, nel caso in cui le concentrazioni nelle varie matrici ambientali non superino i valori descritti per legge.

Il primo step da seguire è quindi l'analisi chimica di terreno ed acque, al fine di quantificare le concentrazioni dei vari composti chimici rispetto alle CSC (Concentrazioni Soglia Contaminazione), riportate nelle tabelle 1 e 2 degli allegati al presente lavoro di tesi, tratte dal D. Lgs. 152/2006. Nel caso in cui i valori soglia non vengano superati, il sito viene classificato come "*non inquinato*" e l'area viene ripristinata in accordo con la destinazione prevista dal PRG del Comune competente. Nel caso in cui si abbia invece il superamento anche per un solo parametro, il sito viene classificato come "*potenzialmente inquinato*" e si procede all'analisi di rischio sanitario ed ambientale di sito. Nell'ambito dell'analisi preliminare del sito, è prevista la messa a punto di un modello geologico - tecnico che descriva, oltre alle varie caratteristiche geologico - tecniche e chimiche dei litotipi, gli eventuali acquiferi presenti, caratterizzando le acque anche da un punto di vista chimico, con riferimento alle CSC.

Nella procedura di analisi di rischio, invece, le soglie a cui riferirsi non sono più le CSC sopra descritte, ma le CSR (Concentrazioni Soglia di Rischio), del tutto indipendenti dalle CSC e derivanti da un'analisi di rischio specifica per il sito in esame. Da un punto di vista operativo, l'analisi di rischio è un complesso di modelli analitici ed algoritmi, applicati alle matrici naturali, allo scopo di determinare in maniera deterministica eventuali scenari futuri; essa si basa sul sistema *sorgente – percorso - recettore* ed è quindi legata alle caratteristiche specifiche del sito in esame, stabilite sulla base delle caratteristiche geologiche e urbanistiche dell'area (presenza ed entità di sorgenti e recettori).

Il "modello concettuale" è quindi indispensabile per procedere a qualsiasi valutazione successiva. Creare il modello concettuale di un sito contaminato consiste sostanzialmente nel parametrizzare (ovvero semplificare) tutte le variabili che lo compongono.

Nel caso in cui le nuove indagini chimiche mostrino concentrazioni tutte inferiori alle CSR stabilite, la procedura di bonifica non verrà avviata ma si procederà ad

un'attività di monitoraggio del sito; contrariamente, se anche un solo valore risulti superiore alle CSR, si procederà con il progetto di bonifica.

La messa in sicurezza dell'area è la prima operazione da farsi subito dopo l'accertamento del superamento delle CSC, come disposto dall'art. 247 del D.Lgs 152/2006, e consiste nel complesso delle operazioni necessarie a precludere ogni ulteriore contaminazione del sito e salvaguardare la salute delle persone che frequentano l'area.

Nei prossimi capitoli verranno illustrate tutte le indagini eseguite volte alla caratterizzazione del sito, mentre si rimanda alla parte finale della tesi per le considerazioni conclusive e la certificazione dello stato dell'area.

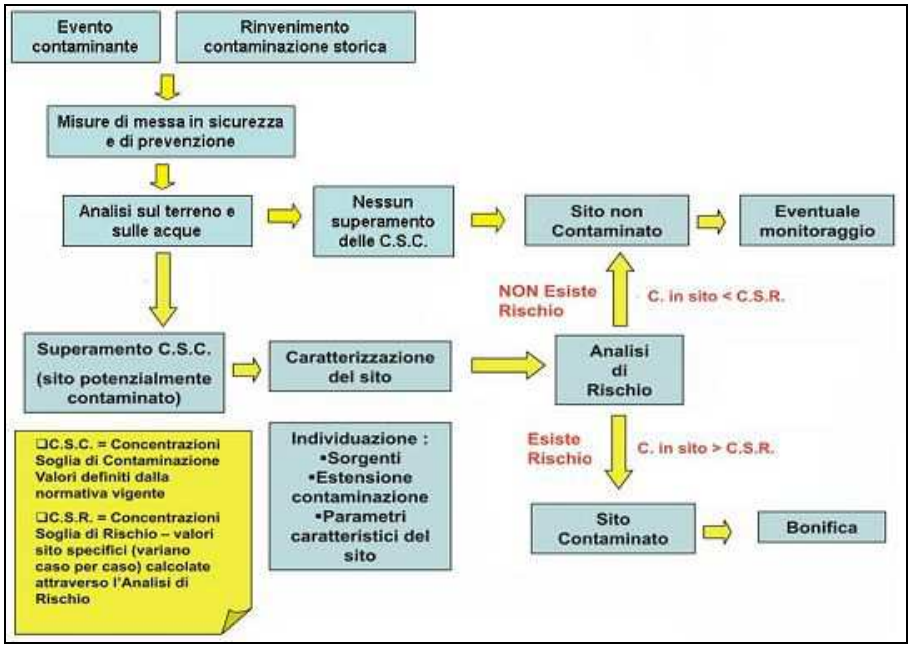

Figura 1: rappresentazione schematica dell'Iter da seguire nel caso di ipotesi di inquinamento in un sito

1.2 L'ANALISI DI RISCHIO SPECIFICA

La caratterizzazione, o "analisi di rischio sanitario ambientale" sito-specifica viene eseguita con criteri stabiliti dal Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, raccolti nell'allegato 1 alla parte IV del D. Lgs. 152/2006 e potrà eventualmente essere utilizzata anche per la definizione degli obiettivi di bonifica.

Come già descritto, in questa fase non si farà più riferimento alle CSC, ma alle CSR, che identificano i livelli di contaminazione residua accettabili, calcolati mediante analisi di rischio, su cui impostare gli interventi di messa in sicurezza e/o bonifica. Nell'applicazione dell'analisi di rischio occorre tener ben presente il concetto di "rischio" che, in qualunque forma si intenda, ha al suo interno componenti probabilistiche; perciò nella realizzazione dell'analisi non si dovrà

tanto tener conto dell'evento di contaminazione, ma della probabilità che questa possa avere effetti nocivi sui recettori, se presenti, relazionando il tutto al tipo di uso cui il sito è soggetto.

Le componenti da parametrizzare sono di un numero discreto: in primis occorre definire i "contaminanti indice", ossia occorre scegliere le sostanze di interesse da sottoporre ai criteri dell'analisi di rischio, in base alla loro entità rispetto alle CSC, alla loro pericolosità e alla facilità di diffusione; la scelta di tali contaminanti dipenderà ovviamente dalle attività pregresse svolte sul sito.

Definiti i contaminanti indice, andrà modellizzata la geometria della sorgente dell'inquinamento, in modo da intuire quali percorsi le sostanze potrebbero aver effettuato, anche in base alle caratteristiche geologico - tecniche ed idrogeologiche dei terreni presenti.

Step successivo è l'individuazione delle "vie e modalità di esposizione", ossia le modalità con cui il recettore viene a contatto con la sorgente, variabili tra "suolo superficiale" (entro 1 m di profondità), "suolo profondo"(compreso tra la base del precedente e la profondità massima investigata), "aria outdoor" (ambiente aperto aeriforme dove si possono verificare fenomeni di evaporazione), "aria indoor" (ambiente aeriforme confinato in spazi chiusi) ed "acqua sotterranea" (falde superficiali o profonde).

Infine vengono individuati i "recettori" o "bersagli" della contaminazione, identificabili in residenti e/o lavoratori presenti nel sito (*on site*) o persone che vivono al di fuori del sito (*off site*); l'articolo riporta che "*Di fondamentale importanza è la scelta del punto di conformità (soprattutto per le acque sotterranee) e il livello di rischio accettabile, sia per sostanze cancerogene che non cancerogene*".

Il primo rappresenta "*il punto a valle idrogeologico della sorgente al quale deve essere garantito il ripristino dello stato originale del corpo idrico sotterraneo, onde consentire tutti i suoi usi potenziali"*, mentre il secondo è "*il valore di rischio incrementale accettabile per le singole sostanze*".

Le procedure di calcolo finalizzate alla valutazione quantitativa del rischio dovranno essere condotte tramite l'ausilio di metodologie di comprovata validità sia da un punto di vista scientifico che della riproducibilità dei risultati.

Qualora gli esiti della procedura dell'analisi di rischio dimostrino che la concentrazione delle sostanze inquinanti è inferiore alle CSR, il processo viene

positivamente concluso, e la conferenza di servizi può predisporre un programma di monitoraggio sul sito per verificare la stabilità dei risultati ottenuti; l'attività di monitoraggio viene avviata entro trenta giorni e, alla scadenza del periodo, il soggetto responsabile né da comunicazione a Comune e Provincia. Qualora il monitoraggio abbia mostrato una tendenza alla stabilizzazione delle concentrazioni, il sito viene ripristinato, altrimenti si provvede al progetto di bonifica.

1.3 PROGETTO DI BONIFICA

La procedura per la bonifica di un sito cui sia stato accertato il superamento delle CSR è descritta al comma 7 dell'art. 242 del D. Lgs. 152/2006; essa impone al soggetto responsabile la presentazione alla Regione, entro sei mesi dall'approvazione del documento attestante l'avvenuta analisi di rischio, di un progetto operativo circa gli interventi di bonifica o messa in sicurezza provvisoria o permanente del sito; il progetto viene quindi approvato dalla Regione. Con il provvedimento di approvazione del progetto sono stabiliti anche i tempi di esecuzione dei lavori, insieme ad eventuali prescrizioni necessarie per l'esecuzione degli stessi. Al termine dei lavori si provvede al ripristino del sito.

Nel caso in esame, trattandosi di inquinamento di acque, il metodo di bonifica migliore sarebbe stato quello noto come "Pump & Treat", chiamato a volte con l'acronimo di "P&T", ampiamente utilizzato in casi simili per la sua rapidità di progettazione e messa in opera. Il metodo consiste nell'emungimento delle acque di falda tramite pozzi, trattamento e successivo scarico in superficie o nella stessa unità geologica dalla quale state prelevate, come prescritto dall'art. 243. Esiste un numero di metodi di trattamento che possono essere utilizzati per la distruzione degli agenti inquinanti o per la rimozione degli stessi; uno dei più conosciuti è sicuramente il trattamento con carboni attivi, che prevede il passaggio delle acque in specifici filtri capaci di assorbire chimicamente le sostanze in questione (EPA, 2006).

E' un metodo sicuro ed efficace, l'unico difetto risiede nella sua lentezza: il processo può durare anni, dipendentemente da tipo ed ammontare delle sostanze inquinanti, entità e profondità della falda acquifera inquinata e tipo di suolo presente nell'area (EPA, 2006).

CAPITOLO 2 - Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche

2.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area oggetto di studio rientra nel Foglio n°345 sezione I della cartografia IGM, serie 25, a scala 1:25.000 (figura 2), mentre ricade nel foglio n°345080- "Attigliano" della CTR dell'Umbria a scala 1:10.000; essa si colloca ai margini dell'Appennino centro-occidentale, sul fianco occidentale della Catena Narnese - Amerina, in una zona a morfologia collinare. Il sito, situato nei pressi dell'abitato di Attigliano ad una quota di circa 80 m s.l.m., si colloca nel vasto bacino idrografico della media valle del Tevere (M.V.T.), in particolare è posto in sinistra idrografica del F. Tevere, che scorre circa 1 km a Sud–Ovest del sito.

La M.V.T. fisiograficamente si presenta come un'area collinare, con quote comprese tra 25 e 500 m circa s.l.m., posta al confine tra Lazio ed Umbria; essa si estende per circa 60 km in direzione NNW – SSE nel tratto compreso tra Castiglione in Teverina e Fiano Romano, ed è posta nella fascia di raccordo pedemontana al margine occidentale della Catena Appenninica centro–settentrionale (Mancini et al., 2004).

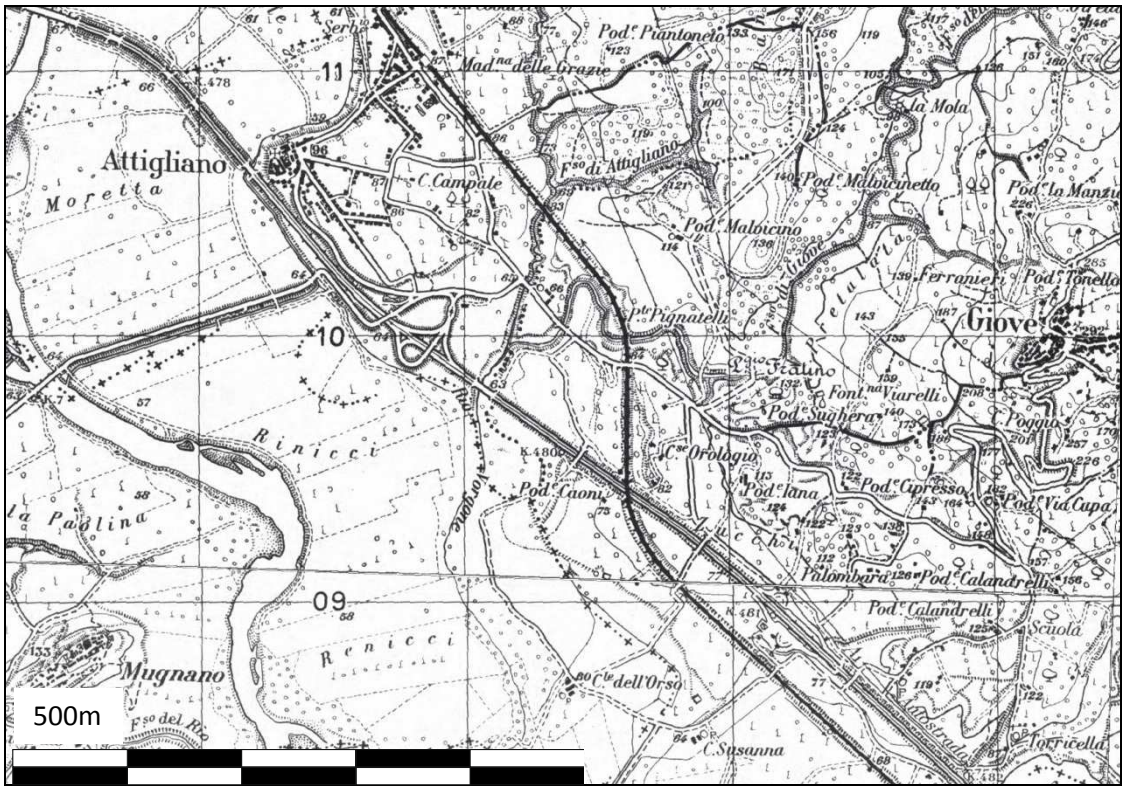

Figura 2: stralcio carta IGM25, Foglio 345, Sezione I-Attigliano; scala 1:25.000

2.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Da un punto di vista geologico - regionale, la zona si colloca tra il dominio vulcanico Vulsino, ad Ovest, ed il dominio carbonatico Umbro-Marchigiano, ad Est; tuttavia i sedimenti e le scorie di origine vulcanica affiorano solo in maniera localizzata poco ad est del sito d'indagine: dalla carta geologica allegata (Figura 3), ripresa da Regione Umbria (2006), si può notare infatti la presenza di rocce vulcaniche a consistenza litoide (subsintema TRSN) solo in maniera localizzata, che riescono comunque a creare, a causa della loro natura litologica, scarpate di discreta entità (8-10 m) (Regione Umbria, 2006).

La M.V.T., da un punto di vista strettamente geologico – strutturale, corrisponde a gran parte del Graben del Paglia – Tevere (Funicello e Parotto, 1978), depressione di origine tettonica complessa, colmata da potenti successioni marine, marino - salmastre e continentali (Ambrosetti et al., 1987). Il bacino si estende longitudinalmente per circa 100 km, con una larghezza fino a 30 km, è formato dalla congiunzione di graben e semi - graben a direzione appenninica ed antiappenninica (Funicello et al., 1981).

In accordo con Ambrosetti et al. (1978), per quello che riguarda i bacini pliocenici in cui si è verificata la sedimentazione marina, questi si sono impostati su fosse tettoniche soggette a movimenti alterni di sprofondamento e sollevamento, con conseguenti fenomeni di ingressione e regressione marina.

Nell'analisi di uno studio della Regione Umbria risalente al 2006, realizzato nell'ambito del progetto per l'analisi delle risorse idriche sotterranee dell'Umbria Nord - Orientale e Sud - Occidentale (Progetto Crisi Idrica), è stata realizzata una cartografia geologica in scala 1:10.000 (Figura 3). In particolare il sito oggetto di studio ricade nelle CTR 345080 e 345120 (Attigliano - Caio), dove affiorano diffusamente gran parte delle litologie appartenenti al Supersintema della Val di Chiana. In corrispondenza del sito troviamo litologie appartenenti al Sintema pleistocenico Chiani – Tevere, denominato già "Argille sabbiose del Chiani – Tevere", composto prevalentemente da litotipi argilloso – sabbiosi di ambiente marino e salmastro, e subordinatamente da depositi ghiaiosi e travertini di ambiente di transizione e continentale (Ambrosetti et al., 1987); lo spessore dei depositi tipici del Sintema varia molto a seconda delle zone: lo spessore massimo in affioramento supera di poco i 300 metri, ma il totale potrebbe anche essere

maggiore, dato che la base non è mai affiorante né è stata mai effettuata una perforazione che l'abbia raggiunta (Di Bella, 1995).

Osservando la carta geologica, possiamo notare che il sito oggetto di studio cade nell'ambito alluvionale del Fiume Tevere, in cui vengono distinti depositi alluvionali attuali (b) e depositi alluvionali terrazzati (b_n) divisi in tre ordini, di cui il maggiore, rinominato "Subsintema FOR", costituisce un sistema a sé stante (Regione Umbria, 2006).

In particolare la zona esaminata rientra nei depositi terrazzati del II ordine (b_{n2}) e caratterizzati dall'affioramento prevalente di sabbie e sabbie limose. I sedimenti terrazzati in questione, assieme alle alluvioni recenti ed ai Subsintemi FOR e TRSN, giacciono al di sopra del Subsintema di Alviano "ALV", come si può dedurre osservando gli affioramenti a N e NE del sito e un piccolo affioramento nelle immediate vicinanze del sito, leggermente a NW.

Il Subsintema di Alviano, appartenente al Sintema Chiani-Tevere, risale al Pleistocene inferiore ed è caratterizzato da terreni di origine prettamente marina, composti prevalentemente da sabbie e sabbie limose di colore giallo nella litofacies ALVa, mentre da argille limose a luoghi marnose di colore grigiastro nella litofacies ALVb. Come studiato di recente da Bizzarri et al. (2010), all'interno di tali sedimenti marini argillosi e sabbiosi, stratigraficamente riferiti al Pleistocene inferiore (Calabriano), sono presenti minerali vulcanici (pirosseni, quarzo, muscovite) e pomici.

Come mostrato nella sezione schematica dei rapporti stratigrafici (figura 4), procedendo verso Ovest si passa dal Sintema Chiani - Tevere al Sintema di Giove in Teverina: questo è si articola nelle litofacies GIOa e GIOb (Pleistocene inf.), rispettivamente composte da conglomerati e da travertini.

Le sottostanti litofacies AMEa ed AMEb appartengono al Subsintema di Amelia, facente parte del Sintema Chiani - Tevere, e risultano costituite da limi sabbioso–argillosi e sabbie argillose di ambiente salmastro, intercalate a livelli di limi travertinosi e travertini litoidi.

Come si vedrà nei capitoli seguenti, i sondaggi geognostici indicano che, analogamente a quanto riportato nella carta geologica (Figura 3), il Substintema ALVb (prevalentemente argilloso) è sub-affiorante, mentre le alluvioni terrazzate si inspessiscono verso SW, cioè verso il F. Tevere.

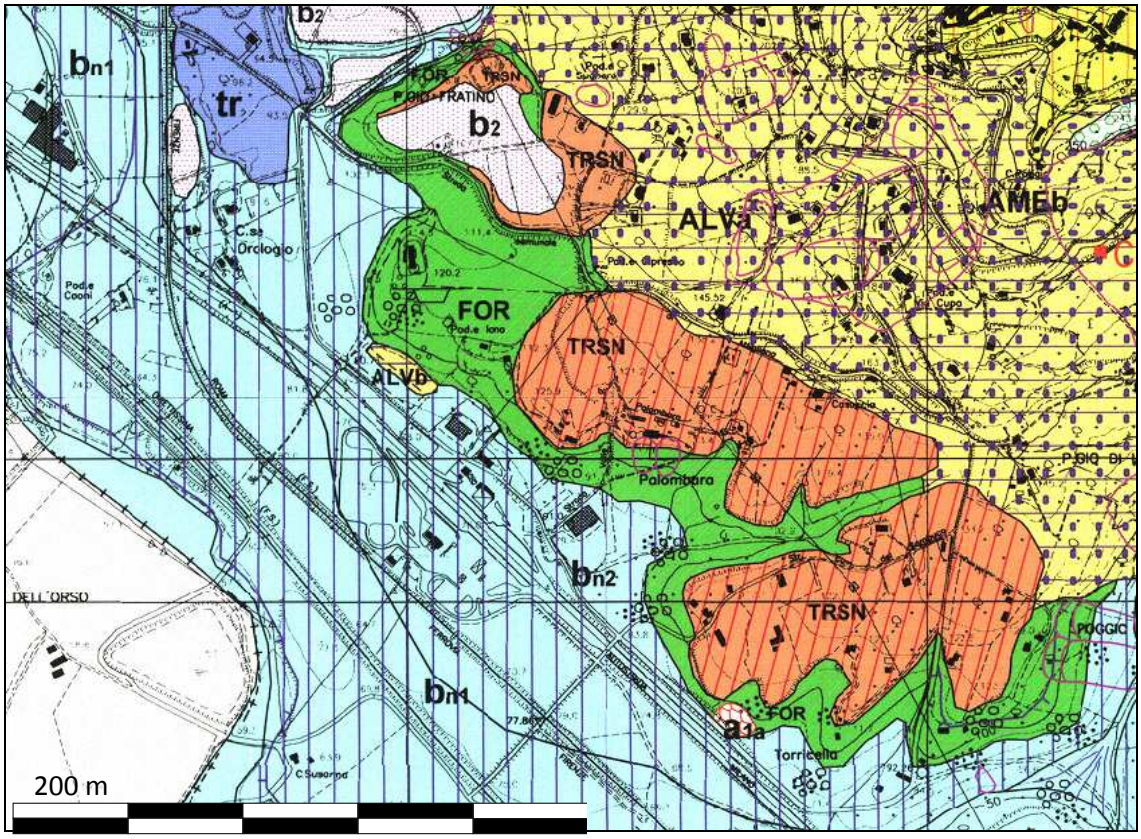

Figura 3: Stralcio della Carta Geologica in scala 1:10.000, Fogli CTR Attigliano – Caio (345080-345120). Ripreso da Regione Umbria (2006).

LEGENDA

Unità stratigrafiche quaternarie non distinte in base al bacino di appartenenza

b_n – Depositi alluvionali terrazzati, non più in rapporto con la morfologia attuale, numerati progressivamente dal più recente al più antico, con prevalenza di sabbie e sabbie limose (puntinato).

b_n – Depositi alluvionali terrazzati, non più in rapporto con la morfologia attuale, numerati progressivamente dal più recente al più antico, con limi, limi argillosi e argille prevalenti (tratteggiato).

b_{n2} –Coltre eluvio-colluviale: depositi essenzialmente fini con clasti di varie dimensioni, provenienti dal disfacimento del substrato, accumulati in posto (eluvium) o sedimentati sui versanti per trasporto in massa e/o ruscellamento diffuso (colluvium). *Pleistocene-olocene.*

SUPERSINTEMA VAL DI CHIANA

Sintema di Attigliano

TRSN – Tufo rosso a scorie nere: deposito piroclastico massivo, di natura tefritico-fonolitica, a matrice cineritica, con abbondanti pomici nere decimetriche ricche in cristalli di sanidino e leucite spesso analcimizzata (Ignimbrite "C" vicana). Localmente può presentarsi litoide per zeolitizzazione e di colore giallo-rossastro. Alla base è localmente presente un livello di pomici di ricaduta. In

discordanza sull'unità delle formiche (FOR). Spessori fino a 30 m. *Pleistocene medio - terminale.*

FOR – Unità delle formiche: ghiaie calcaree di ambiente alluvionale, eterometriche da subangolose ad arrotondate con quantità variabile di matrice sabbiosa grossolana che non sembra contenere materiali vulcanici. *Pleistocene medio - terminale.*

Sintema di Giove in Teverina

GIOb – Travertini litoidi di aspetto prevalentemente massivo in strati da sottili a medi. Sono associati a limi calcarei e più raramente a sabbie e sabbie travertinose. *Pleistocene inferiore*.

GIOa – Conglomerati a clasti calcarei in matrice sabbiosa e spesso cementati. *Pleistocene inferiore*.

Sintema Chiani-Tevere; Subsintema di Amelia

AMEb – Limi sabbioso-argillosi e sabbie argillose di ambiente salmastro, a luoghi fossilifere; si colloca in posizione distale rispetto alla catena ed è eteropico con AMEa. *Pleistocene inferiore*.

Subsintema di Alviano

ALVa – Sabbie e sabbie limose di colore giallo, si presentano ben addensate a volte in strati cementati con granulometria variabile da grossolana a fine. Vi sono intercalati degli orizzonti conglomeratici, elaborati a prevalente componente calcarea in matrice limoso - sabbiosa. *Pleistocene inferiore*.

ALVb – Argille limose di colore grigiastro a luoghi marnose. *Pleistocene inferiore*.

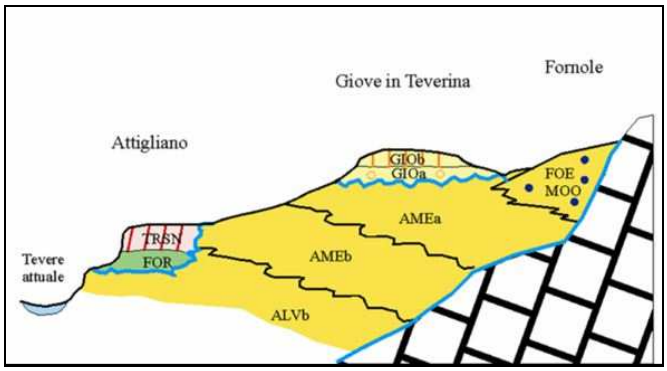

Figura 4: Sezione schematica non in scala dei rapporti stratigrafici. Ripreso da Regione Umbria (2006).

2.3 IDROGEOLOGIA

I dati sulle caratteristiche idrogeologiche dell'area e sulla permeabilità dei terreni presenti sono stati tratti dal progetto della Regione Umbria (2006) già utilizzato per la descrizione della geologia, nell'ambito del quale è stata anche realizzata una legenda dei complessi idrogeologici raggruppando per classi di permeabilità relativa le diverse litologie presenti (Tabella 1).

Il corso d'acqua principale presente nei pressi del sito è rappresentato dal Fiume Tevere, che presenta localmente un tracciato meandriforme; sono inoltre presenti altri corsi d'acqua, ma di importanza minore e a carattere soprattutto stagionale.

Dalle ricerche svolte si è constatata la presenza di due complessi idrogeologici principali: il "complesso delle alluvioni terrazzate" e il "complesso dei sedimenti marini del Pleistocene inferiore", posto immediatamente al di sotto del primo.

In corrispondenza del sito in studio, come si può notare dalla carta idrogeologica (Figura 5), ripresa da Regione Umbria (2006), si trova in affioramento il complesso idrogeologico delle alluvioni che, essendo costituito da alternanze di sabbie, limi e argille, presenta una permeabilità variabile. Questo complesso ha la caratteristica di avere piccoli acquiferi sovrapposti in corrispondenza degli orizzonti più permeabili; questi acquiferi contengono delle piccole circolazioni idriche, spesso non interconnesse tra di loro. I terreni appartenenti al complesso dei sedimenti marini del Pleistocene inferiore, rappresentati nell'area in esame dalla litofacies ALVb, sono da considerarsi a permeabilità molto bassa, in ragione della prevalente componente argillosa; questi terreni fungono pertanto da substrato impermeabile (aquiclude). Le altre litologie indicate nella carta presentano tutte una bassa permeabilità, fatta eccezione per il Sintema di Giove in Teverina, che nell'area di studio è prevalentemente caratterizzato dalla presenza dei depositi di travertini (GIOb), caratterizzati da un'alta permeabilità dovuta sia alla fratturazione che alla porosità intrinseca.

In accordo con la Tavola IIB2 del PTCP di Terni (Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale), che descrive la vulnerabilità degli acquiferi superficiali e sotterranei, l'area in sinistra idrografica del F. Tevere, ricompresa nel territorio provinciale di Terni, risulta a vulnerabilità elevata e/o molto elevata e caratterizzata localmente da una forte presenza o concentrazione di produttori reali e potenziali di inquinamento (figura 6).

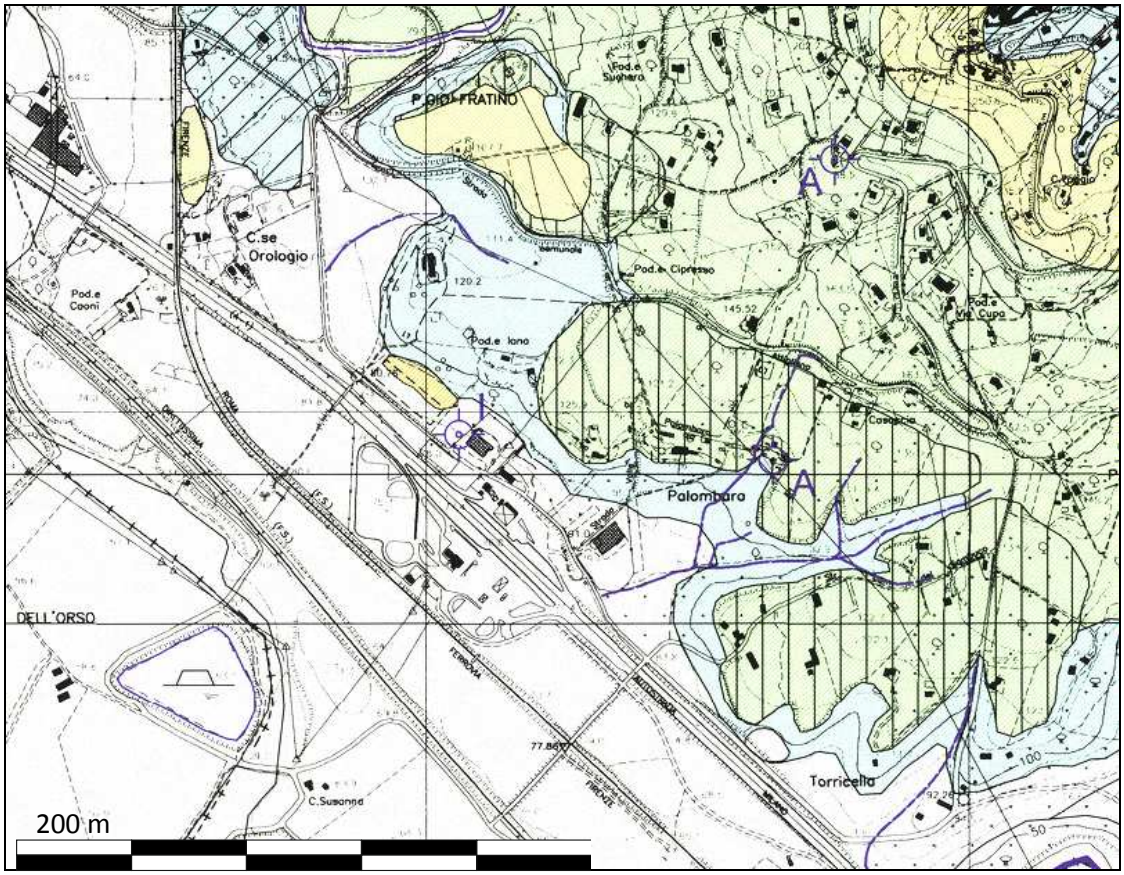

Figura 5: Stralcio Carta Idrogeologica 1:10.000, fogli CTR Attigliano – Caio (345080-345120). Ripreso da Regione Umbria (2006).

LEGENDA

Natura Sedimentaria

Permeabilità ALTA per fratturazione (GIOb: Travertini litoidi massivi)

Permeabilità MEDIA per porosità (ALVa: Sabbie e sabbie limose con orizzonti conglomeratici; FOR: Ghiaie calcaree alluvionali)

Permeabilità BASSA per porosità (AMEb: Limi sabbioso-argillosi e sabbie argillose)

Permeabilità MOLTO BASSA (ALVb: Argille limose a luoghi marnose)

Permeabilità variabile (b: Depositi alluvionali attuali; b_n: Depositi alluvionali terrazzati)

Natura Vulcanica

Permeabilità MEDIA per fratturazione (TRSN: Piroclastiti massive e litoidi)

Permeabilità MEDIA per porosità (TRSN: Piroclastiti massive e litoidi)

TIPO DI PERMEABILITA'	FORMAZIONI	
ALTA PER FRATTURAZIONE	Sedimentario	MAS, COI; GIOb
ALTA PER POROSITA'	Sedimentario	RIG, GIOa
MEDIA PER FRATTURAZIONE	Sedimentario	SAA
	Vulcanico	TRSN
MEDIA PER POROSITA'	Sedimentario	ALVc
	Vulcanico	CO
BASSA PER FRATTURAZIONE	Sedimentario	RSA, POD, CDU
BASSA PER POROSITA'	Sedimentario	AMEa, AMEb
MOLTO BASSA	Sedimentario	ALVb
VARIABILE	Sedimentario	h_{1}, a_{1a}, b, b_{n1}

Tabella 1: permeabilità delle litofacies, ripresa dalle Note Illustrative dei CTR 346050-346090-345080-345120 della cartografia geologica ed idrogeologica in scala 1:10.000 realizzata dalla Regione Umbria (2006).

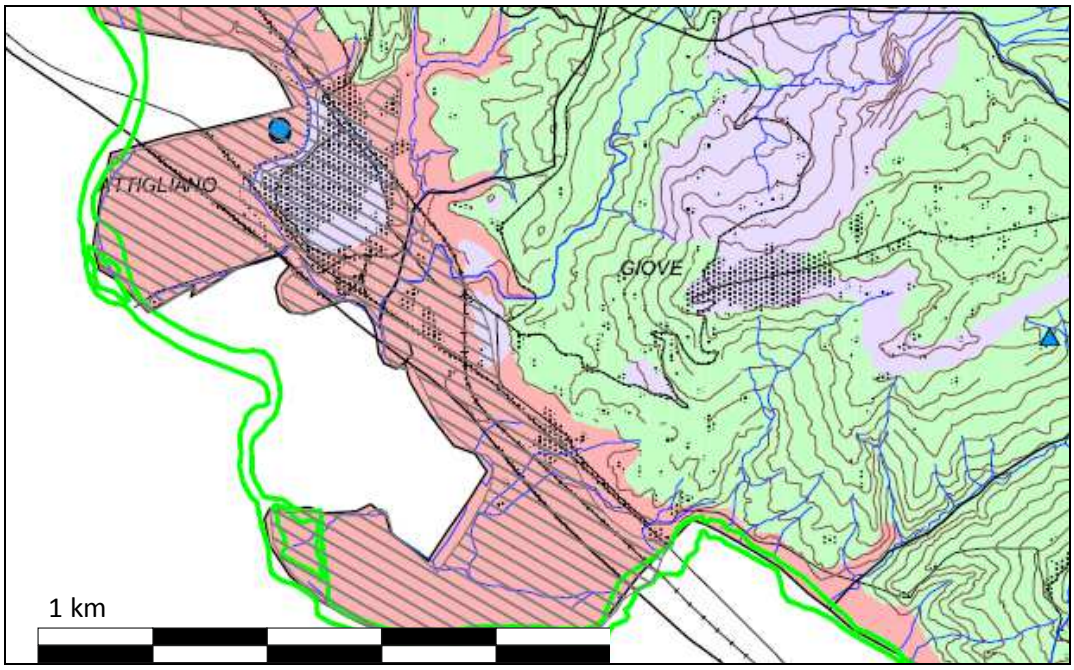

Figura 6: Stralcio Tavola IIB2 del PTCP della Provincia di Terni, scala 1:50.000

LEGENDA

Aree ricomprese nelle classi di vulnerabilità molto elevato (ME) ed elevato (E); sono caratterizzate da una elevata vulnerabilità degli acquiferi e localmente da una forte concentrazione di produttori reali e potenziali di inquinamento.

Aree ricomprese nelle classi di vulnerabilità alto (A) e medio (M); sono caratterizzate da una medio - alta vulnerabilità degli acquiferi e localmente dalla presenza di produttori reali e potenziali di inquinamento.

Aree ricomprese nelle classi con grado di vulnerabilità basso (B) e bassissimo o nullo (BN); sono caratterizzate da acquiferi scarsamente vulnerabili e sottoposti ad una non significativa pressione antropica.

CAPITOLO 3 - Indagini geognostiche e prove in sito

3.1 PREMESSA

Al fine di ricostruire un modello geologico - tecnico del sito il più possibile vicino alla realtà che fornisse dati utili sulle caratteristiche dei terreni presenti e per capire le possibili dinamiche e diffusione degli inquinanti nelle diverse matrici ambientali, sono stati realizzati , cinque sondaggi geognostici ambientali (a secco) a carotaggio continuo, tre dei quali sono stati in un secondo momento attrezzati con piezometri, al fine di controllare localmente l'andamento dei potenziali idraulici nel tempo. Sono inoltre state effettuate diverse analisi geotecniche di laboratorio (granulometrie e limiti di Atterberg) e quattro tomografie elettriche.

In seguito al recente acquisto del sito da parte di un'azienda locale, sono state disposte nuove indagini chimiche, che verranno discusse nel presente capitolo.

Di seguito verranno esposte le modalità di esecuzione delle prove e i risultati ottenuti dalle stesse. L'ubicazione dei sondaggi, dei piezometri e degli stendimenti di tomografia elettrica sono riportati in figura 7.

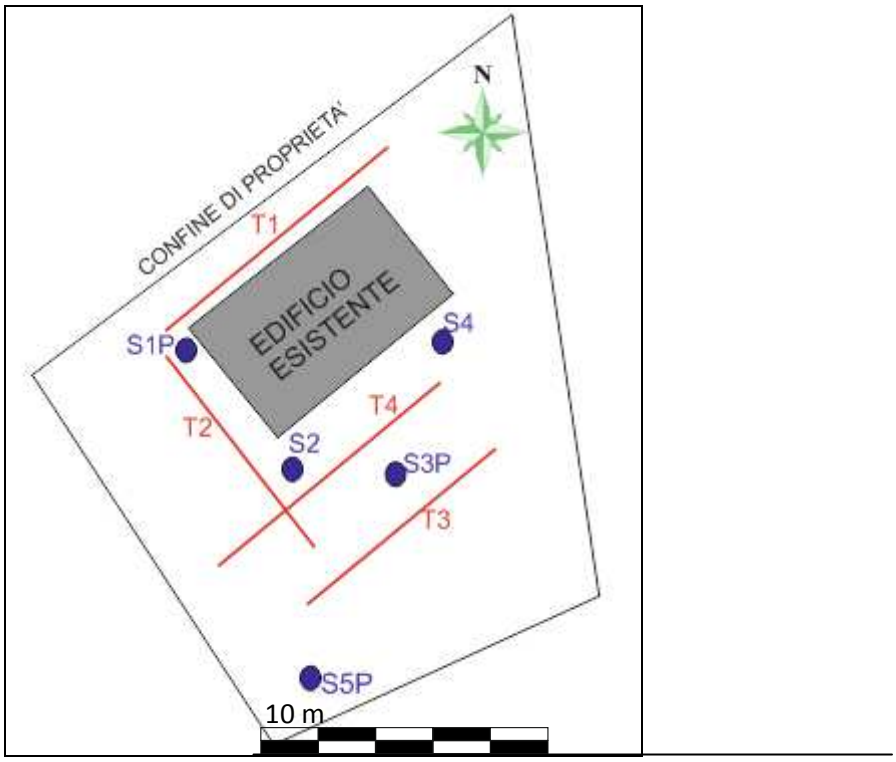

Figura 7: Planimetria schematica dell'area; sono indicati rispettivamente con "S", "SP" e "T" i sondaggi, i sondaggi attrezzati con piezometri e gli stendimenti di tomografia elettrica. Scala 1:1000.

3.2 PRELIEVO DEI CAMPIONI

In riferimento alla figura 7 si riportano di seguito le fotografie delle cassette catalogatrici dei sondaggi S1, S4 e S5, dalle quali sono stati prelevati, a diverse profondità, i campioni per le analisi di laboratorio. Inoltre, per correlare meglio i dati, è stato in un secondo momento analizzato anche il sondaggio S3.

Figura 8: Particolare delle foto delle cassette catalogatrici dei sondaggi, da sinistra verso destra, S1, S4 e S5.

Grazie ai sondaggi geognostici è stato possibile prelevare 9 campioni di terreno, al fine di condurre delle prove di laboratorio che restituissero granulometria e limiti di Atterberg dei terreni, utili a ricostruire le caratteristiche litologiche e la loro continuità spaziale. Con riferimento alla figura 7, la profondità e il sondaggio corrispondenti ad ogni singolo campione sono riportati nella tabella 2.

CAMPIONE	SONDAGGIO	PROFONDITA'(m)
A	S1	5,50/5,80
B	S1	9,20/9,50
C	S4	4,00/4,30
D	S4	8,00/8,30
E	S5	1,50/1,80
F	S5	4,00/4,30
G	S5	10,50/10,80
H	S3	7,70/8,00
L	S5	12,00/12,30

Tabella 2: sondaggio e profondità dei campioni prelevati

3.3 PROVE DI LABORATORIO

Le prove geotecniche sono state condotte dallo scrivente presso il laboratorio di Geologia Applicata del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli studi di Perugia. Tutte le prove sono state svolte rispettando le procedure standard dell'ASTM (American Society for Testing and Materials), descritte nella sezione 4-*Construction*, volume 8-*Soils and Rocks* (I): D420-D5779. In particolare sono state condotte, su tutti i campioni, analisi per la determinazione di:

- Peso specifico dei costituenti;
- Granulometria;
- Limite Liquido e Limite Plastico.

I risultati delle prove sono riportati in forma sintetica in fondo al presente capitolo; di seguito verranno solo esplicate le procedure di ogni prova.

3.4 PROVE GEOELETTRICHE

L'ubicazione dei quattro profili di tomografia elettrica è riportato in figura 12, assieme all'ubicazione dei sondaggi geognostici. L'indagine sfrutta l'immissione di corrente elettrica nel sottosuolo, possibile grazie ad una serie di elettrodi infissi a terra per alcuni centimetri, per desumere caratteristiche litologiche e strutturali. Con riferimento alla figura 13, a prescindere dal numero di elettrodi totali, la corrente passerà solo attraverso due elettrodi alla volta, uscendo dall'elettrodo C1 ed entrando nell'elettrodo C2; avremo poi altri due elettrodi che misureranno la differenza di potenziale (ΔV) nei punti P1 e P2.

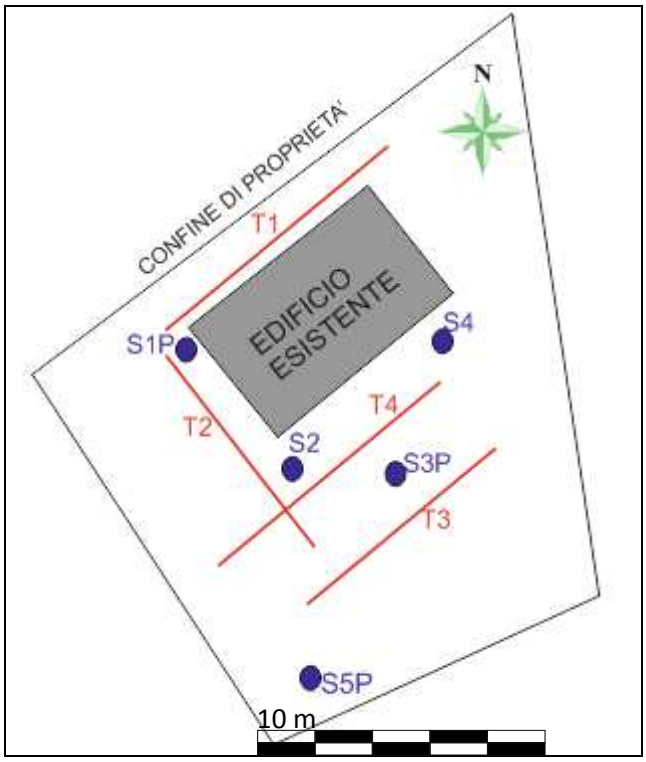

Figura 12: ubicazione in pianta dei profili tomografici e dei sondaggi geognostici, scala 1:1000

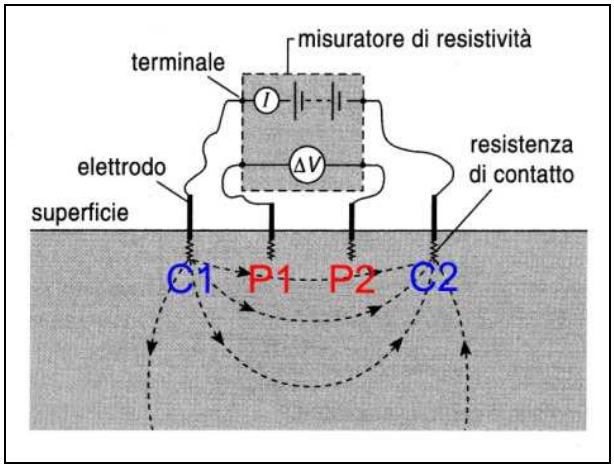

Figura 13: schieramento semplice, tratta da Mussett e Khan (2003)

Nello schieramento più comune, detto di Wenner, si hanno 4 elettrodi posti tutti alla stessa distanza uno dall'altro. Dalle leggi della fisica, ci si potrebbe attendere che la corrente scorra lungo il percorso più breve e semplice per passare da un elettrodo all'altro, ma la situazione è in realtà molto più complicata, in quanto è si vero che è più semplice effettuare un percorso prossimo alla superficie, ma è anche vero che una sezione a diametro maggiore oppone meno resistenza, per cui le correnti tenderanno ad andare anche in profondità: in un terreno uniforme, solo il 30% circa della corrente penetra ad una profondità pari o inferiore alla distanza tra gli elettrodi, va da sé quindi che la distanza tra i singoli elettrodi è proporzionale alla profondità che si andrà ad investigare (Mussett e Khan, 2003). La corrente immessa nel terreno è dell'ordine dei milliampère, così come la differenza di potenziale è dell'ordine dei millivolt; l'alimentatore del sistema, l'amperometro ed il voltmetro sono solitamente combinati in un unico strumento: il misuratore di resistività. L'indagine è genericamente chiamata con l'acronimo VES, sondaggio elettrico verticale, e si basa sul presupposto che il terreno sia costituito da una serie di strati orizzontali sovrapposti, ognuno con resistività uniforme ma diversa dagli altri; alla base di questa indagine vi è il concetto di aumentare progressivamente la distanza tra gli elettrodi, così da investigare profondità man mano crescenti. Le variazioni di resistività elettrica influenzano le linee di corrente più o meno come le variazioni di densità, e quindi di velocità, influenzano le onde sismiche, generando fenomeni di rifrazione che interferiscono con la distribuzione della corrente nel sottosuolo e permettono perciò di rilevare variazioni di resistività.

La profondità massima investigabile è, come già accennato, proporzionale alla distanza tra gli elettrodi, ma dipendente in parte anche dalla differenza di

resistività tra gli strati, in quanto per differenze molto forti si hanno maggiori fenomeni di rifrazione che consentono di investigare profondità maggiori. In ogni caso, data la grande varietà di strutture elettriche che si possono avere, è difficile stabilire delle regole fisse sulle profondità raggiungibili, ma la metà della distanza tra gli elettrodi di corrente può fornire un corretto ordine di grandezza.
Le misure effettuate vengono infine riportate su un grafico avente la profondità per ordinata e la resistività elettrica per ascissa, come mostrato nella figura 14.

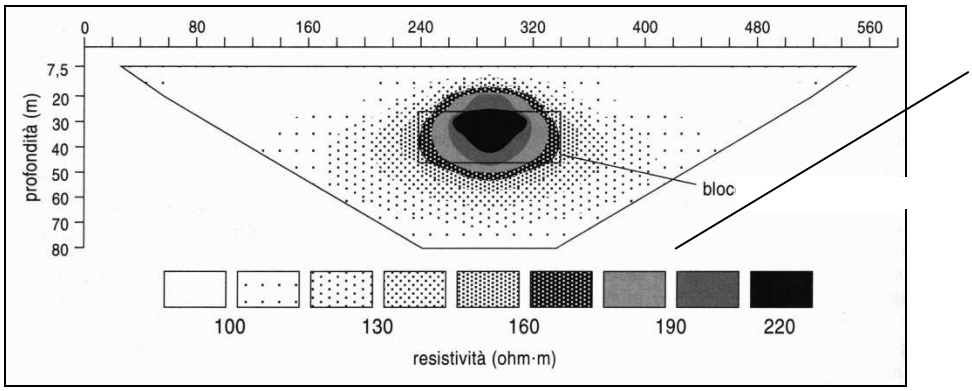

Figura 14: profilo tipico di resistività, tratto da Mussett e Khan (2003).

Da un punto di vista geologico, le misure di resistività forniscono solo un'indicazione approssimativa di quelle che potrebbero essere le litologie, ma purtroppo gli intervalli che caratterizzano ciascuna litologia sono piuttosto ampi, come mostra la tabella 4; inoltre variazioni di resistività sono imputabili alla presenza della falda idrica, o ad una variazione del contenuto in argilla. Le applicazioni che hanno avuto più seguito riguardano la geologia mineraria, dato che diversi minerali portano ad importanti variazioni di resistività, ma non minore è l'applicazione negli studi d'inquinamento del terreno, in quanto tramite il sondaggio VES è possibile localizzare masse d'acqua nel sottosuolo e risalire perciò alla presenza di possibili inquinanti.

MATERIALE	**RESISTIVITA' (ohm*m)**
ROCCE SEDIMENTARIE	
calcare	$50\text{-}10^7$
argilla	1-100
ghiaia	100-5000
marna	1-100
quarzite	$10\text{-}10^8$
shale	10-1000
sabbia	500-5000
arenaria	$1\text{-}10^8$
ROCCE IGNEE E METAMORFICHE	
basalto	$10\text{-}10^7$

gabbro	$1000\text{-}10^6$
granito	$100\text{-}10^6$
marmo	$100\text{-}10^8$
scisto	$10\text{-}10^4$
ardesia	$100\text{-}10^7$

Tabella 4: valori di resistività indicativi per vari tipi di rocce, tratta da Mussett e Khan (2003)

Sul sito oggetto del presente studio le misure di resistività sono state condotte ed elaborate dalla Società Geologica S.r.l. di Terni, la stessa che ha eseguito i sondaggi geognostici ed installato i piezometri. Il metodo usato si discosta leggermente da quello precedentemente descritto, in quanto si tratta di una tomografia elettrica di superficie, nota con l'acronimo TES; le differenze stanno nello schieramento, ossia nella disposizione degli elettrodi: nella TES si esegue un elevato numero di acquisizioni con un numero discreto (32) di elettrodi.

L'indagine è stata volta soprattutto alla rilevazione di rifiuti o oggetti di varia natura nel sottosuolo, alla stima dello spessore di terreno di riporto antropico e all'identificazione dei livelli acquiferi.

Inerentemente alla presenza di rifiuti, i risultati sono stati negativi, perciò si è esclusa qualsiasi ipotesi di interramento degli stessi, mentre per quanto riguarda lo spessore dello strato di riporto, due delle quattro tomografie effettuate sono risultate particolarmente utili, in quanto posizionate in zona con le sezioni geologiche realizzate nel corso del presente lavoro.

Come si può notare dal profilo n°2 (figura 15), lo spessore del terreno di riporto (in rosso-giallo) è compreso tra circa 2,5 m e 3 m; la differenza di resistività con le litologie sottostanti è evidente: la graduale diminuzione della resistività con l'aumento di profondità è associabile ad una diminuzione della granulometria, che da grossolana diventa progressivamente più argillosa. La porzione a bassissima resistività, in blu, è riconducibile ad uno strato saturo, in quanto la presenza di acqua abbassa molto la resistività elettrica; tale situazione è riconducibile al fatto che le indagini sono state svolte dopo alcuni giorni di pioggia ed i terreni erano ancora parzialmente saturi; dal confronto con i piezometri P1 e P3, sarebbe del tutto improprio parlare di falda acquifera. La porzione a maggiore resistività posta in profondità è invece associabile ad un errore di calcolo da parte del software, dato che tale livello non era presente nel grafico delle misure di resistività, prima del processing dei dati. Sostanzialmente,

quindi, il profilo n°2 è utile per definire lo spessore del terreno di riporto, e conferma ulteriormente le ipotesi sulle granulometrie presenti.

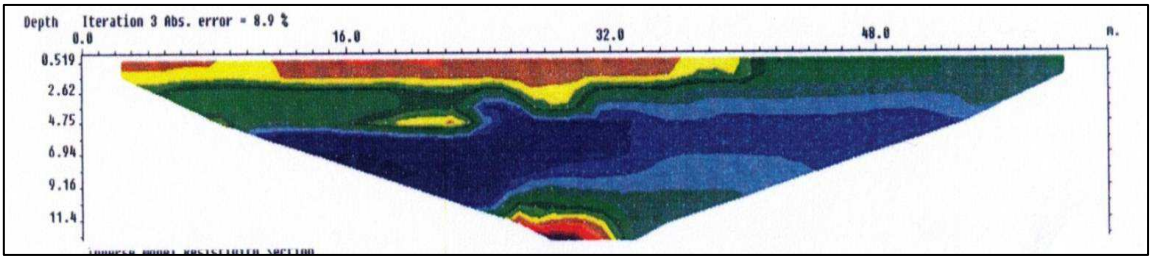

Figura 15: profilo tomografico n°2. I colori indicano: ROSSO = valori di resistività compresi tra 150 e 1000 omh.m; GIALLO = tra 60 e 150 ohm.m; VERDE = tra 20 e 60 ohm.m; AZZURRO = tra 10 e 20 ohm.m; BLU = tra 2 e 10 ohm.m.

Altro profilo risultato particolarmente utile è il n°4 (figura 16); in questo caso si può notare la presenza di uno strato di terreno di riporto ancora dello spessore compreso tra circa 2,5 m e 3 m, che però si assottiglia procedendo verso destra, ossia verso l'S5, cioè verso il Tevere. La situazione è coerentemente schematizzata nella sezione 4-3-5, dove si ha il passaggio da un terreno di riporto antropico ad uno strato pedogenetico procedendo dall'S4 all'S5.

Il profilo tomografico mostra inoltre una grossa parte (in blu) a bassissima resistività; tale porzione è assimilabile, come nel precedente profilo, ad uno spessore terreno saturo, magari a causa delle piogge, ma dal confronto con il sondaggio S5 e con le misure dei piezometri P5 e P3, si può desumere che sono effettivamente presenti dei piccoli livelli di acquifero, ma dalle misure di resistività non è possibile stabilirne con certezza la quota. Ciò che si può però desumere è la presenza di una sorta di barriera impermeabile che separa i due piccoli acquiferi (in verde), individuabile per l'aumento locale di resistività, che indica una diminuzione dell'umidità nel terreno. Ciò risulta essere perfettamente coerente con quanto mostrato nella sezione 4-3-5, dove si può notare la presenza di uno strato sabbioso in corrispondenza dell'S5, che si assottiglia progressivamente fino a scomparire dall'S5 verso l'S3, le cui argille basali costituiscono proprio la barriera impermeabile.

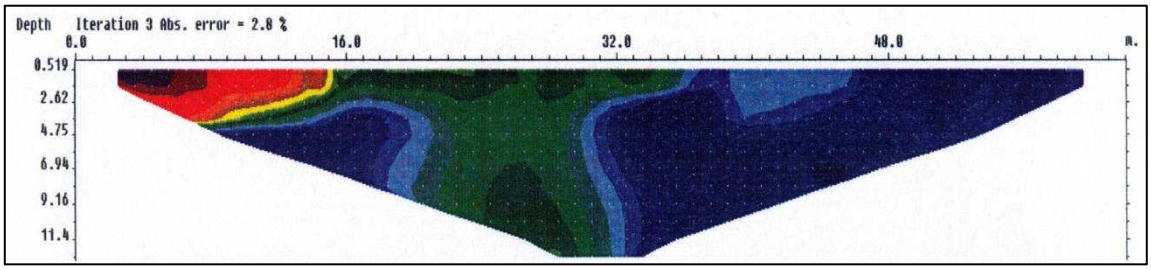

Figura 16: profilo tomografico n°4. I colori indicano: ROSSO = valori di resistività compresi tra 150 e 1000 omh.m; GIALLO = tra 60 e 150 ohm.m; VERDE = tra 20 e 60 ohm.m; AZZURRO = tra 10 e 20 ohm.m; BLU = tra 2 e 10 ohm.m.

In conclusione, le misure di resistività sono risultate uno strumento molto utile per una migliore messa a punto delle sezioni geologiche, e si sono rivelate perciò fondamentali al fine della ricostruzione del modello geologico tecnico del sito, oltre che alla ricerca di eventuali corpi interrati. Dall'esperienza si può però dedurre che è raccomandabile il loro uso combinato con indagini dirette, utili soprattutto per una "taratura" delle indagini elettriche, necessaria a causa dei grandi intervalli di resistività tipici di ogni litologia.

3.5 INDAGINI CHIMICHE

A seguito degli eventi potenzialmente inquinanti succedutisi sul sito, sono stati condotti nel 2009 degli accertamenti chimici analitici al fine di determinare un'eventuale contaminazione dei terreni e della falda; l'assunto di partenza era che fossero presenti rifiuti sull'area, senza presupporre azioni di interramento. Un primo studio è stato disposto dal tribunale, ma in seguito al recente acquisto dell'area da parte di un'azienda locale, sono state condotte dallo scrivente nuove caratterizzazioni chimiche. Per definire i limiti di riferimento con cui confrontarsi per individuare eventuali contaminazioni di terreni ed acque è stato fatto riferimento alle Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC), descritte nel capitolo 2 della presente tesi e riportate nell'allegato 5 al titolo V, parte IV del D. Lgs. 152/2006 (tabelle 1 e 2). La tabella relativa alle concentrazioni nel suolo riporta due diverse serie di CSC, la prima (colonna A) si riferisce ai siti con uso agricolo e/o residenziale, mentre la seconda (colonna B) si riferisce esclusivamente ai siti di uso o derivazione industriale. Per quanto riguarda il sito in esame, ci troviamo in entrambi i casi, dato che il PRG del Comune di Giove classifica il sito parte come zona D1 "Insediamenti produttivi esistenti", parte come "Area agricola di conservazione del territorio" e parte come "Area a trasformazione condizionata per la vulnerabilità degli acquiferi", per cui andranno considerati entrambi i limiti.

Dalla consultazione della carta d'uso del suolo del PRG, si nota che il sito è tagliato in due parti, dando luogo ad una zona ad alta vulnerabilità degli acquiferi

ed un’altra a media vulnerabilità, mentre il PTCP, come già descritto nel capitolo 4, considera tutti gli acquiferi presenti come ad elevata vulnerabilità.
Le modalità ed i risultati degli studi condotti sono esposti nei paragrafi seguenti.

3.5.1 INDAGINI E RISULTATI DELLA CAMPAGNA DI MISURE

A seguito dell’episodio, nel 2009 si è proceduto in fase di caratterizzazione ad effettuare delle indagini che hanno interessato 4 campioni di terreno ed un campione d’acqua, durante il prelievo dei quali è stata riscontrata la presenza anche di rifiuti interrati. L’ubicazione dei prelievi è visibile nella figura 17, assieme alla profondità; il prelievo dell’acqua è relativo al punto T05.
E’ importante considerare che il prelievo dell’acqua, ritenuta “di falda” dal perito chimico, come si vedrà in seguito, è da considerarsi come acqua superficiale dovuta alla percolazione a seguito degli eventi piovosi. Tale campionamento è stato effettuato a soli 170 cm di profondità dal piano campagna; il perito ha descritto questa venuta d’acqua come “falda sospesa”. Come si vedrà nel Capitolo 5, tale assunzione risulta inverosimile considerando che il livello registrato in un piezometro posto nelle immediate vicinanze, anche a seguito di prolungate precipitazioni, si è sempre attestato intorno ai 6 metri dal piano campagna, senza particolari oscillazioni, perciò è improprio descrivere l’acqua contenuta nei primi metri di terreno come “falda”. Ciononostante non è illecito supporre che le sostanze inquinanti possano essere penetrate anche a profondità maggiori rispetto a quella del prelievo a causa dei fenomeni di presa in carico e percolazione prodotti dagli eventi piovosi. Questo verrà discusso nei prossimi paragrafi.

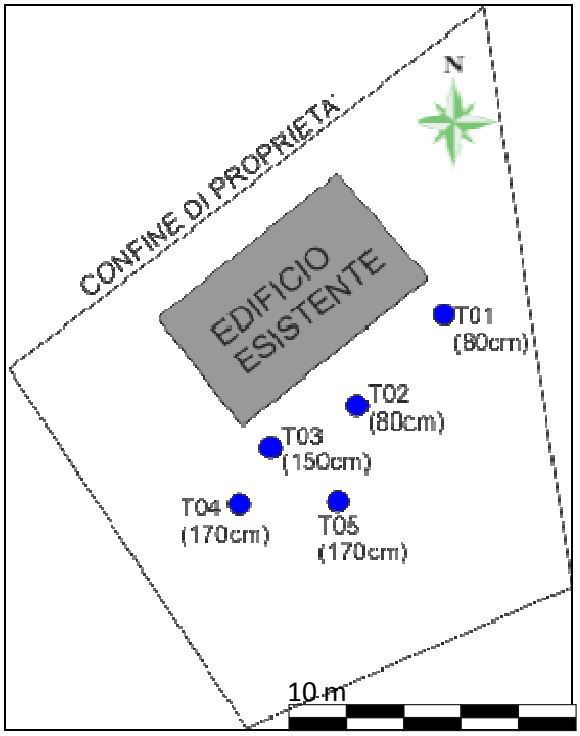

Figura 17:ubicazione e profondità dei tasti chimici esplorativi effettuati nel 2009, scala 1:1000

Dalle analisi sui terreni si è riscontrato che nessun valore superava le CSC (Concentrazioni Soglia Contaminazione) imposte dalla legge, seppure alcuni valori, come quelli relativi al Tricloroetilene e al Dicloroetilene, presentassero valori non trascurabili.

Per quanto riguarda le acque, si è riscontrato che quattro valori, relativi a Dicloroetilene, Tricloroetilene e Dicloropropano eccedevano le concentrazioni soglia di contaminazione CSC e metalli quali Zinco e Cobalto risultavano poco al di sotto.

I composti appartenenti alla famiglia dei solventi alifatici clorurati, quali Dicloroetilene e Tricloroetilene, sono largamente usati in qualsiasi contesto produttivo in cui sia necessario operare lo sgrassamento di superfici, ma il loro uso è stato recentemente oggetto di forti limitazioni, data l'azione fortemente cancerogena. Altre importanti caratteristiche di questi composti sono l'elevata volatilità e la scarsa solubilità in acqua, dovuta all'elevata densità; proprio quest'ultima caratteristica conferisce loro una grande persistenza nei terreni e nelle falde, determinando un forte potenziale di inquinamento; inoltre, a causa dell'elevata densità, la velocità di percolazione verticale è piuttosto alta e si verifica anche attraverso i terreni giudicati scarsamente permeabili, portando ad uno stazionamento dei composti alla base dello strato saturo.

La scarsa, ma non nulla, solubilità con l'acqua provoca una duratura persistenza dei composti nel terreno, unitamente ad un'altrettanto persistente e diffuso inquinamento delle acque; ciò è confermato dal fatto che, come descritto nell'introduzione, il sito giaceva allora in abbandono da circa 13 anni e i valori di concentrazione erano ancora piuttosto alti.
La normativa vigente, nella fattispecie l'art. 240, comma 1, lettera d del D.Lgs. 152/2006, ha definito nel 2009 il sito, in base ai valori riscontrati, "*potenzialmente inquinato*", ma la procedura di analisi di rischio sanitario ed ambientale specifica non è stata avviata, a causa dei procedimenti giudiziari e alla confisca del sito.

3.5.2 INDAGINI E RISULTATI DELLA CAMPAGNA DI MISURE RECENTI

Su disposizione del nuovo proprietario del sito, responsabile dell'analisi dello stato e dell'eventuale processo di bonifica, nuove indagini chimiche volte a verificare lo stato dei parametri rispetto al 2009 sulle matrici suolo ed acqua. Tutte le analisi sono state effettuate dal laboratorio chimico certificato. Le analisi su terre ed acque sono state eseguite in accordo con le metodiche ufficiali CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) ed UNICHIM (ente di normazione tecnica operante nel settore della chimica federato all'UNI, Ente Nazionale di Unificazione). Sono stati analizzati 10 campioni di terreno, del peso di circa 2 kg ognuno, e 2 d'acqua, quest'ultimi, visto il periodo prolungato di esposizione del sito alla sorgente di inquinamento, prelevati direttamente nella zona satura. Si è partiti dal presupposto che il sito non potesse presentare valori superiori a quelli del 2009, in quanto, per ovvi motivi di sicurezza, tutti i rifiuti assieme ai primi 30 cm di terreno erano stati preventivamente asportati, per cui era stata tolta la fonte di inquinamento.

Il prelievo di acque e terre è avvenuto in punti diversi rispetto alla campagna del 2009, come schematizzato nelle tabelle 5 e 6, sulla base delle nuove informazioni derivanti dai sondaggi, descritti all'inizio di questo capitolo. I campioni di terra sono stati estratti nei primi 2 metri fino al contatto del terreno di riporto con i limi argillosi, dove gli inquinanti potevano essere stazionati a seguito della percolazione a causa del netto contrasto di permeabilità.

CAMPIONE	PIEZOMETRO	LIVELLO PIEZOMETRICO DAL P.C. (m)
A1	P3	5,5
A2	P5	8,8

Tabella 5: prelievo delle acque 2011

CAMPIONE	SONDAGGIO	PROFONDITA' DAL P.C. (m)
1	S1	1,00
2	S1	1,50
3	S2	1,00
4	S2	2,00
5	S3	1,00
6	S3	1,50
7	S4	1,00
8	S4	2,00
9	S5	1,00
10	S5	2,00

Tabella 6: prelievo delle terre 2011. Per la localizzazione dei punti di prelievo vedere la Figura 6.

I valori di CSC (Concentrazioni Soglia Contaminazione) ricercati nelle terre imposti per legge, riportati in tabella 7, non sono stati superati da nessun campione, così come per le acque (tabella 8) perciò il sito può essere classificato come "*non inquinato*" e potrà essere avviata la procedura per il suo ripristino, descritta nel capitolo 6 della presente tesi. Come precedentemente descritto, sono state indicate le soglie per entrambi i tipi di sito: commerciale (colonna A) e residenziale (colonna B).

PARAMETRO RICERCATO	CSC A (mg/kg)	CSC B (mg/kg)	VALORE
Zinco	150	1500	<10
Cobalto	20	250	<10
O-xilene	0,5	50	<0,1

Tabella 7: valori su terre disposti dal D.Lgs 152/2006

PARAMETRO RICERCATO	CSC (µg/l)	VALORE
Zinco	3000	<10
Cobalto	50	<10
1,1-dicloroetilene	0,05	<0,01
Trans-1,2-dicloroetilene	60	<0,01
1,1-dicloroetano	810	1,13
Cis-1,2-dicloroetilene	60	<0,01
Tricloroetilene	1,5	1,10
1,2-dicloropropano	0,15	<0,01
toluene	15	1,75
m-xilene + p-xilene	10	<0,01
etilbenzene	50	<0,01

Tabella 8: valori su acque disposti dal D.Lgs 152/2006

3.5.3 CARATTERISTICHE DEI COMPOSTI RICERCATI

I composti che nella campagna 2009 superavano le CSC (Concentrazioni Soglia di Contaminazione) sono dei solventi appartenenti alla famiglia degli idrocarburi alifatici clorurati, tra cui troviamo 1,1 Dicloroetilene, Tricloroetilene e 1,2 Dicloroetilene, quest'ultimo considerato non cancerogeno, ma comunque dannoso per la salute umana e per l'ambiente. I composti rappresentano un caso di idrocarburi in cui uno o più atomi di Idrogeno vengono sostituiti da atomi di Cloro (Graham Solomons, 1988).

La scarsa solubilità in acqua di questi composti, già accennata nel paragrafo relativo alla campagna di indagini del 2009, è accompagnata da una relativamente buona biodegradabilità, per cui la diffusione, sia in senso orizzontale che verticale, risulta piuttosto limitata.

Oltre ai composti chimici, anche alcuni metalli pesanti, quali Zinco e Cobalto, presentavano valori non trascurabili, pur rimanendo al di sotto delle soglie di legge; questi elementi presentano un'elevata tossicità, in quanto capaci di legarsi con le strutture cellulari in cui si depositano, ostacolando le funzioni vitali; la loro solubilità è bassa se si presentano idrati, mentre è più alta se puri (Treccani e ENI, 2009).

In ogni caso la diffusione di un composto nel terreno e nelle acque dipende sia dalle caratteristiche del composto stesso, sia del mezzo in cui avviene la

diffusione: tra le molteplici vie che possono essere percorse da un contaminante, la più rilevante è sicuramente quella che lo porta al contatto con la falda acquifera, sia per il suo valore come risorsa idrica, sia per il suo potere diffondente.

Il potere adsorbente del terreno esercita invece un'azione opposta: l'interazione chimico-fisica e i fenomeni di adsorbimento rendono lentissimi fenomeni di diluizione e smaltimento. La percolazione nel suolo dei contaminanti rilasciati in superficie avviene attraverso le acque meteoriche, che dilavano i contaminanti e si infiltrano nel terreno: inoltre la densità elevata contribuisce al processo di movimentazione verticale degli inquinanti. Va precisato che i composti presenti nel sito e rilevati nel 2009 in concentrazione elevata si trovavano allo stato solido in quanto contenuti nelle resine di scarti di lavorazione. Ciò, assieme alla scarsa solubilità in acqua dei composti ed alla bassa permeabilità dei litotipi presenti (come verrà discusso nel prossimo capitolo), ha contribuito alla scarsa migrazione verticale degli inquinanti, spiegando i valori più bassi del 2011 rispetto a quelli del 2009. Inoltre dopo il 2009, i primi 30 cm di terreno sono stati asportati e portati in discarica a seguito delle operazioni di messa in sicurezza del sito, eliminando la sorgente di inquinamento, e contribuito quindi ad un processo di "purificazione", confermato dalla nuova campagna chimica su tutte le matrici ambientali esaminate.

CAPITOLO 4 – Risultati delle analisi di laboratorio

4.1 ANALISI DEI DATI E CLASSIFICAZIONE DEI TERRENI

I risultati delle prove condotte sui campioni, assieme al sondaggio di riferimento e alla profondità di prelievo, sono raccolti nelle tabelle 9 e 10. La Tabella 9 riporta i dati granulometrici dei nove campioni analizzati: come già accennato, tutti i campioni hanno mostrato una dominante componente limosa, fatta eccezione per il campione "L" che mostra una percentuale di sabbia del 68%. Trattandosi di terre fini, si è ritenuto opportuno effettuare la classificazione

granulometrica con il metodo USDA (Figura 18), specifico per terreni argillosi, realizzato per la prima volta dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti.

La tabella 10 riporta i limiti di Atterberg ottenuti sui campioni. La classifica è stata effettuata con la carta di plasticità di Casagrande (Figura 19) e con la carta di Skempton (1953) modificata, con la sovrapposizione delle rette di attività tipiche dei minerali argillosi (Mitchell and Soga, 2005) e dei campi di rigonfiamento come definiti da Van der Merwe (1964) (Figura 20). Le terre analizzate mostrano un pattern intermedio tra quello della kaolinite e quello della illite, con una attività media (A = Ip/CF) pari a circa 0,57, il che consente di affermare la scarsa attività di tali terreni. Per il campione "L" avente un'elevata frazione sabbiosa il limite liquido e plastico sono risultati non determinabili, motivo per cui è stato classificato come "non plastico".

CAMPIONE	SONDAGGIO	PROFONDITA'(m)	SABBIA %	LIMO %	ARGILLA %	PS
A	S1	5,50/5,80	4	50	46	2,744
B	S1	9,20/9,50	4	66	40	2,736
C	S4	4,00/4,30	2	56	42	2,785
D	S4	8,00/8,30	3	60	37	2,724
E	S5	1,50/1,80	23	33	44	2,706
F	S5	4,00/4,30	21	36	43	2,702
G	S5	10,50/10,80	11	74	15	2,717
H	S3	7,70/8,00	6	55	39	2,731
L	S5	12,00/12,30	68	26	6	2,691

Tabella 9: risultati delle prove granulometriche e peso specifico dei costituenti

CAMPIONE	SONDAGGIO	PROFONDITA'(m)	LL	PL	PI	A
A	S1	5,50/5,80	52	21	31	0,674
B	S1	9,20/9,50	44	21	23	0,575
C	S4	4,00/4,30	45	24	21	0,500
D	S4	8,00/8,30	42	24	18	0,486
E	S5	1,50/1,80	49	27	22	0,500
F	S5	4,00/4,30	55	28	27	0,628
G	S5	10,50/10,80	33	22	11	0,733
H	S3	7,70/8,00	46	27	19	0,487
L	S5	12,00/12,30	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.

Tabella 10: limiti di atterberg dei campioni, indice plastico ed attività

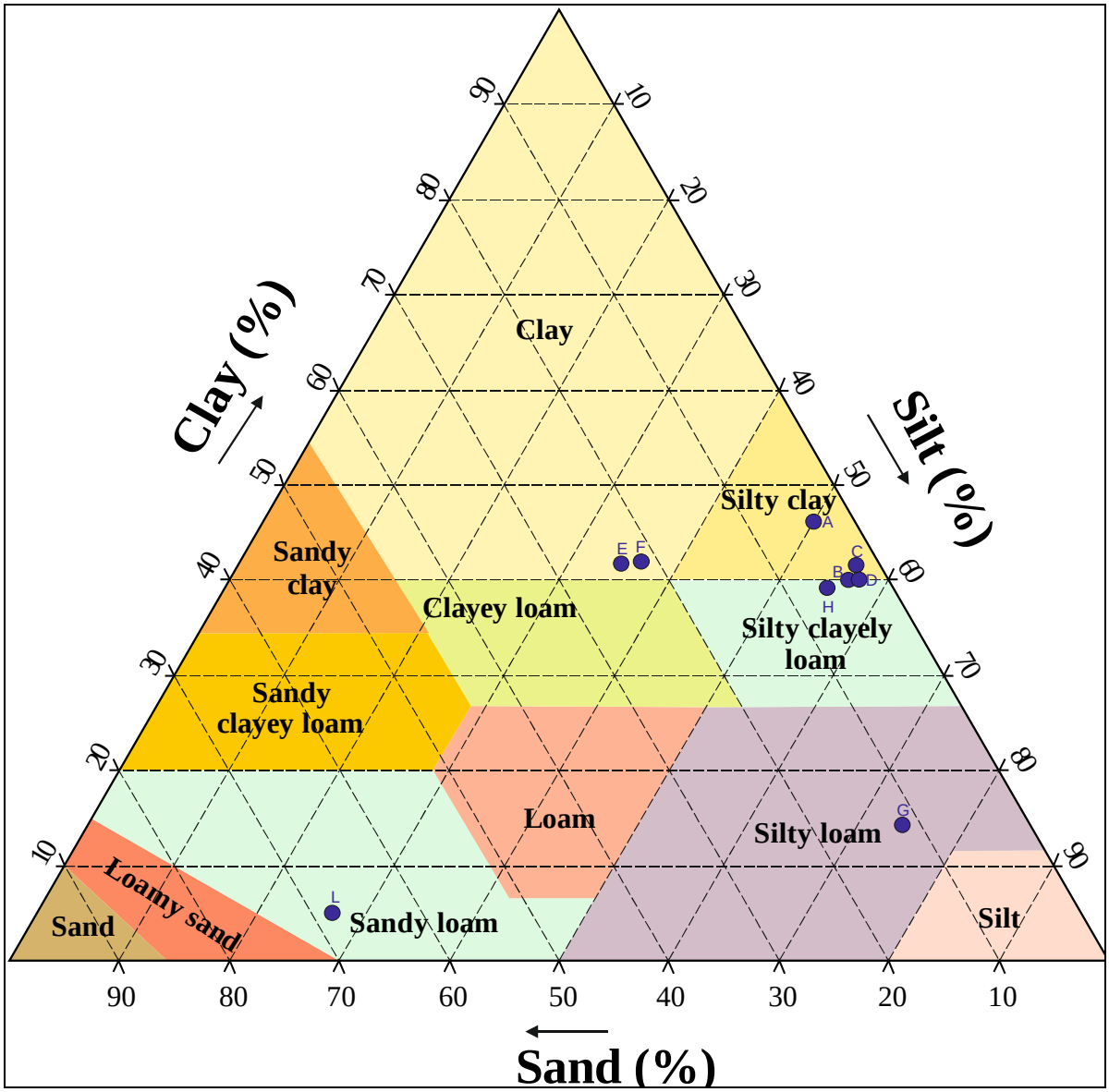

Figura 18: classificazione granulometrica USDA

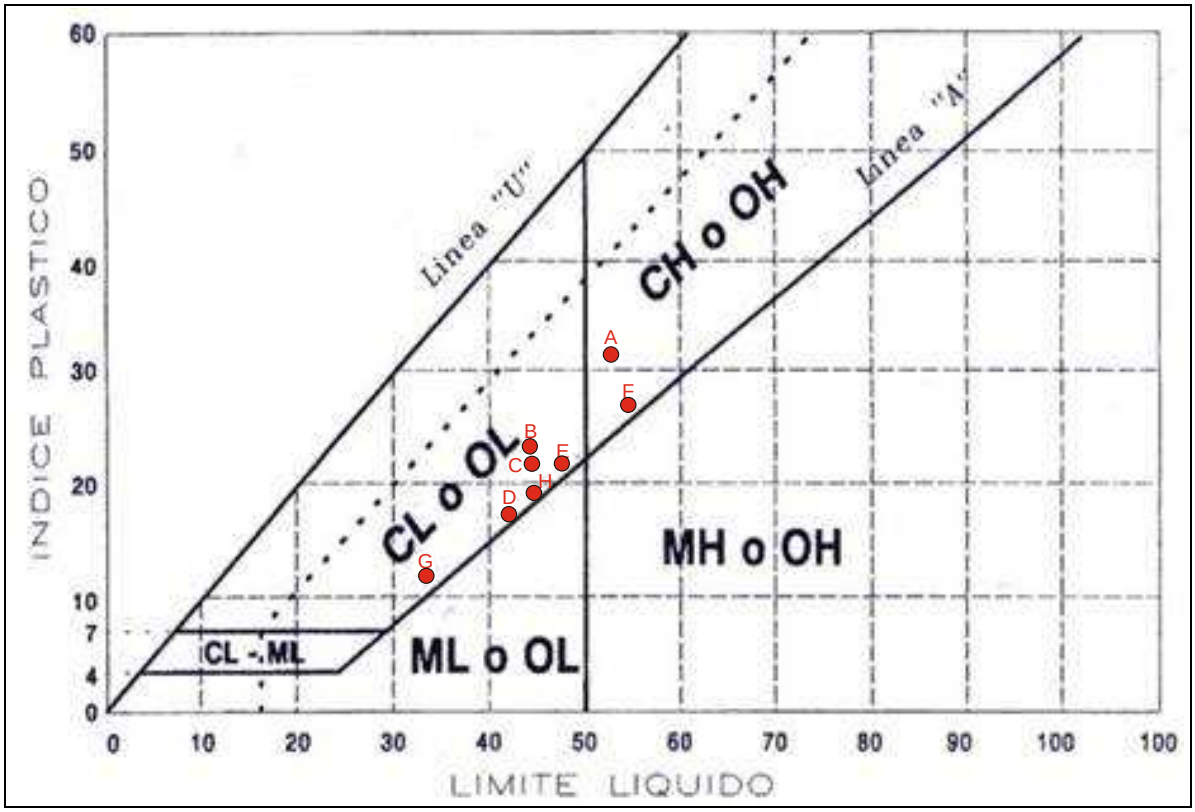

Figura 19: Carta di plasticità di Casagrande; non è ovviamente presente il campione "L", non avendo caratteristiche di plasticità

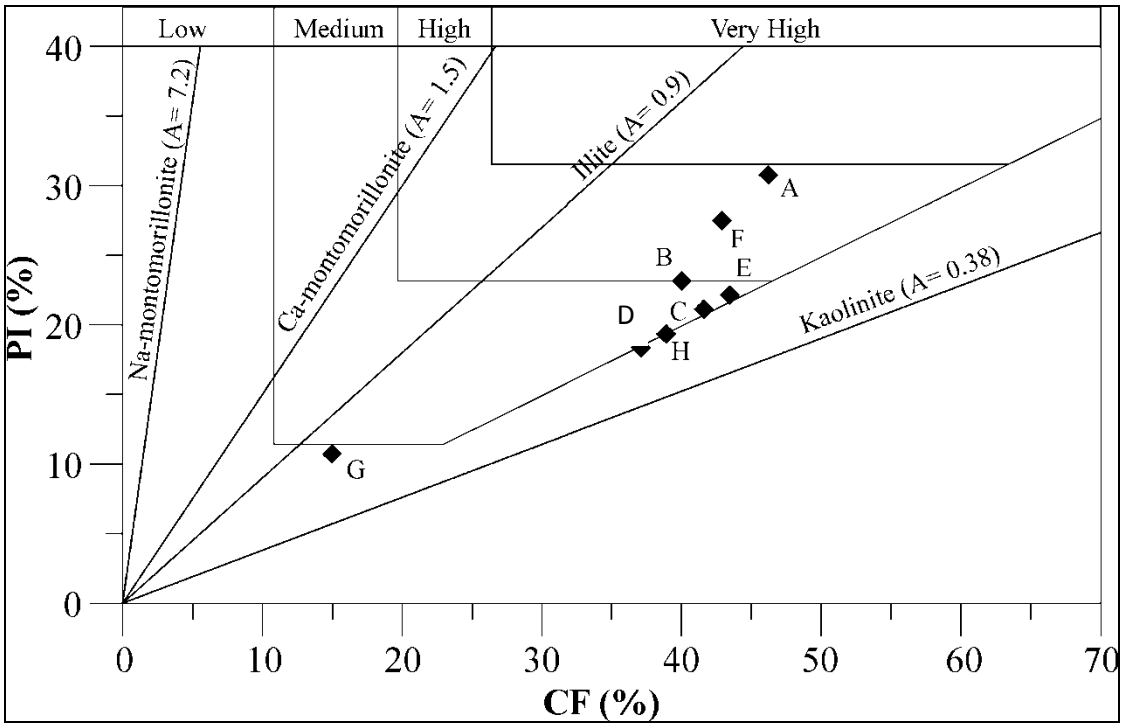

Figura 20: Carta di Skempton modificata, ripresa da Mitchell & Soga, 2005

4.2 CONFRONTO DEI RISULTATI CON PRECEDENTI INDAGINI

In zone limitrofe a quella in oggetto sono precedentemente state effettuate delle indagini, anche geotecniche, come ad esempio nell'adiacente tratto autostradale Orte - Orvieto per conto della società Autostrade S.p.a. (2002).

In particolare per la realizzazione di un piazzale di un area di servizio, posta ad un dislivello di circa 10 metri rispetto al sito in questione, nel 2002 sono stati effettuati 2 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, che hanno mostrato in parte caratteristiche simili ai sondaggi eseguiti nel presente lavoro di tesi, e in parte caratteristiche diverse.

Si può notare dalle stratigrafie dei due sondaggi (Figura 21) che, sotto un primo strato di terreno di riporto, è presente un livello descritto come di origine piroclastica, seguito da ghiaie e sabbie di origine alluvionale che risultano però assenti nelle stratigrafie realizzate dallo scrivente. Caratteristica comune è invece la presenza di un livello argilloso basale di colore grigio-azzurro, precedentemente identificato come appartenente alla litofacies ALVb. Quest'ultimo livello è stato rinvenuto durante l'esecuzione dei due sondaggi alle profondità di 9,4 e 10,0 metri di profondità a partire dal piano di campagna: questo è coerente con le indicazioni di approfondimento del tetto delle argille spostandosi verso il F. Tevere.

Senza porre eccessiva attenzione alle profondità, si propone di seguito un sunto sulle caratteristiche geotecniche dei terreni investigati (Tabelle 11 e 12), ottenute grazie a prove di laboratorio e di campagna effettuate nel 2002, ricordando che il solo livello comune al lavoro di tesi è quello argilloso basale.

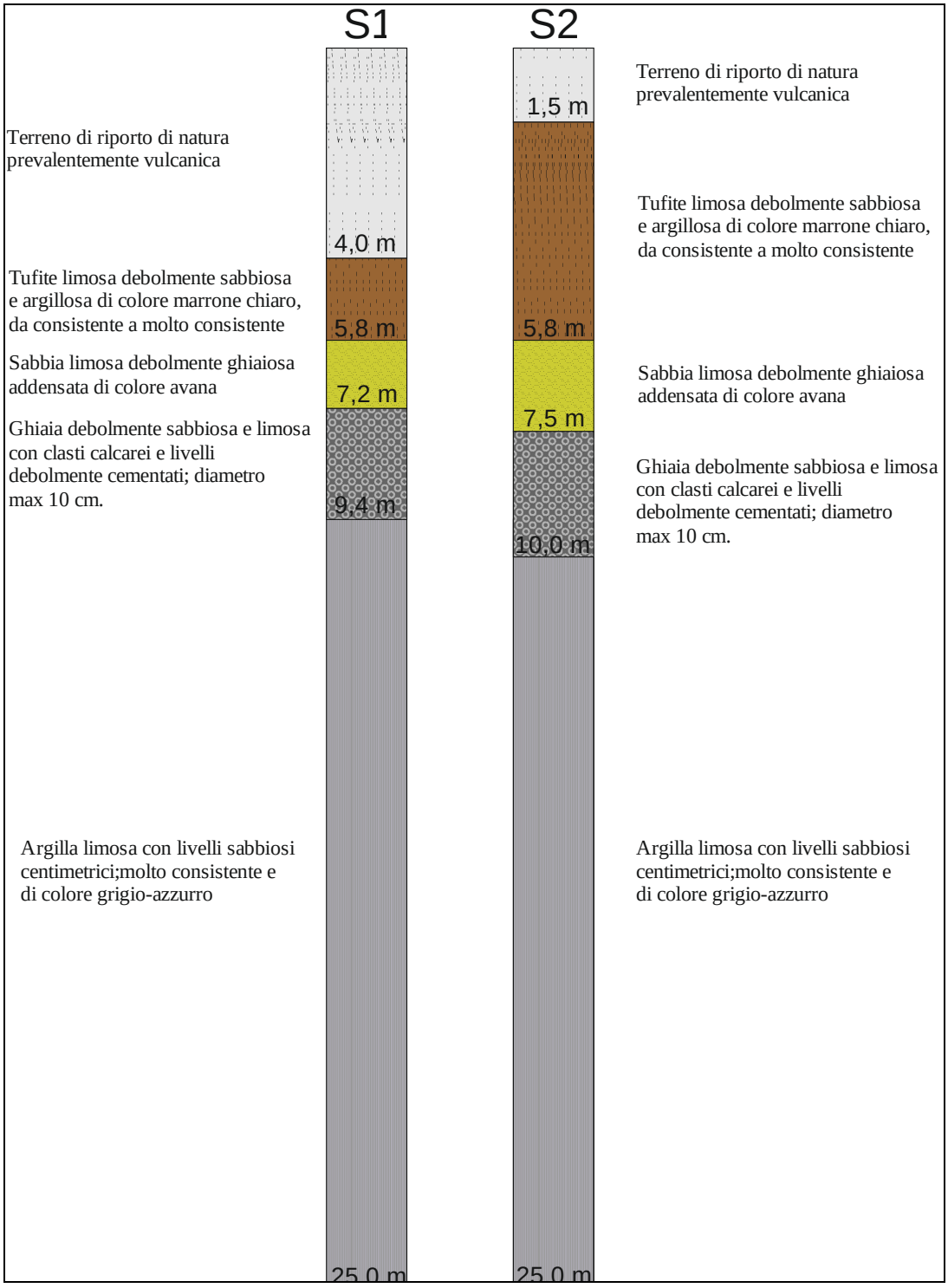

Figura 21: stratigrafie in scala 1:100 dei due sondaggi realizzati in precedenza nella limitrofa aera di sosta autostradale, poco a sud-ovest del sito. Ripreso da Procura della Repubblica del Tribunale di Terni (2009).

LIVELLO	PROFONDITA'(m)	LITOLOGIA	PESO DI VOLUME	INDICE DI PLASTICITA'

			NATURALE (Kn/m^3)	
1	0,0 / 1,5 – 4,0	Riporto sabbioso-ghiaioso	17,5 – 18,5	-
2	1,5 – 4,0 / 5,8	Tufite limoso-sabbiosa	19,5 – 20,5	12 – 33
3	5,8 / 7,3 – 7,5	Sabbie limosa e ghiaiosa	19,0 – 20,0	-
4	7,3 – 7,5 / 9,4 – 10,0	Ghiaia sabbiosa	19,0 – 20,0	-
5	9,4 – 10,0 / 25,0	Argilla limosa con livelli sabbiosi	19,50 – 21,0	22

Tabella 11: principali parametri fisici dei terreni investigati, ripreso da Procura della Repubblica del Tribunale di Terni (2009).

LIVELLO	ANGOLO DI ATTRITO DA S.P.T. (°)	COESIONE NON DRENATA DA POCKET TEST E PROVA UU (kPa)	ANGOLO DI ATTRITO EFFICACE (°)	COESIONE DRENATA (kPa)
1	27	-	-	-
2	-	100 – 150	26	33
3	35 – 38	-	-	-
4	42	-	-	-
5	-	>250	25	29

Tabella 12: principali parametri meccanici dei terreni investigati, ripreso da Procura della Repubblica del Tribunale di Terni (2009).

CAPITOLO 5 - Modello geologico - tecnico del sito

Il modello geologico - tecnico, indispensabile per una buona comprensione del quadro geologico dell'area, per l'analisi dello stato attuale e per progettare eventuali interventi di bonifica, è stato realizzato raccogliendo tutti i dati esposti

nei capitoli precedenti; sono quindi state sviluppate due sezioni litologiche, inserite alla fine del presente capitolo, che fornissero un'immediata comprensione dell'assetto litologico - stratigrafico del sito. Nei prossimi paragrafi verranno inoltre illustrate le considerazioni sviluppate in base alle indagini effettuate e precedentemente illustrate.

5.1 MONITORAGGIO DEI PIEZOMETRI

A partire dal 23 gennaio 2011 fino al 27 marzo 2011, è stato monitorato il livello piezometrico nei tre piezometri installati sul sito, con cadenza settimanale; i dati sono stati in relazione con le piogge della stazione pluviometrica più vicina, ossia quella di Soriano nel Cimino, posta a circa 10 km di distanza a Sud Ovest del sito.

Come si può notare dalla figura 22, il solo piezometro che ha risposto con maggior rapidità alle precipitazioni è stato quello installato in corrispondenza del sondaggio geognostico S5, in ragione della sua componente maggiormente sabbiosa rispetto agli altri.

Il piezometro installato in corrispondenza del sondaggio S1 (perforato interamente nelle argille grigio-azzurre) è rimasto costantemente sterile per molto tempo, ed ha mostrato una comparsa d'acqua solo in occasione di precipitazioni copiose. Tale comportamento indica che le acque misurate nel piezometro non sono acque di circolazione idrica sotterranea ma solo acque piovane di infiltrazione che gradualmente hanno riempito il piezometro. Gli altri due piezometri mostrano una risposta diversa alle precipitazioni. Il piezometro P3, nel periodo di osservazione mostra una costanza dei livelli (intorno ai 5 metri dal p.c.) e solo dopo prolungate precipitazioni, tende a mostrare incrementi di circa 0,60 m. Nel piezometro P3 è presente quindi una debole circolazione idrica all'interno del livello limo-sabbioso posto nei primi 6 metri circa. Il piezometro P5, a parità di evento pluviometrico (ad esempio nell'intervallo 13/3-17/3), risponde velocemente alle precipitazioni con incrementi di circa 3 metri del livello piezometrico.

In conclusione, il monitoraggio effettuato sulla superficie piezometrica ha consentito di confermare ciò che era stato intuito nel corso dello studio sull'idrogeologia dell'area (Cap. 2), ossia che i livelli osservati non appartengono a vere e proprie falde acquifere, bensì a piccoli livelli modestamente permeabili

che si sviluppano al di sopra di substrati impermeabili, consentendo l'instaurarsi di piccole circolazioni idriche scarsamente produttive. L'unica circolazione idrica degna di interesse, perlomeno per il contesto locale, è quella registrata nel piezometro P5 all'interno dei depositi limo-sabbiosi; ciò è meglio comprensibile osservando le sezioni geologiche realizzate e mostrate nel prossimo paragrafo: lo spessore più sabbioso si esaurisce progressivamente procedendo verso monte, spostandosi dal sondaggio S5 all'S3.

Alla luce di quanto appena descritto, ai fini della possibile contaminazione delle risorse idriche, si può affermare che le caratteristiche geologiche e idrogeologiche dell'area in cui è localizzato il sito non favoriscono l'infiltrazione e quindi la migrazione degli inquinanti verso il basso. A causa della prevalenza in affioramento di depositi ad elevata frazione limo-argillosa, i fenomeni di ruscellamento superficiale risultano prevalenti.

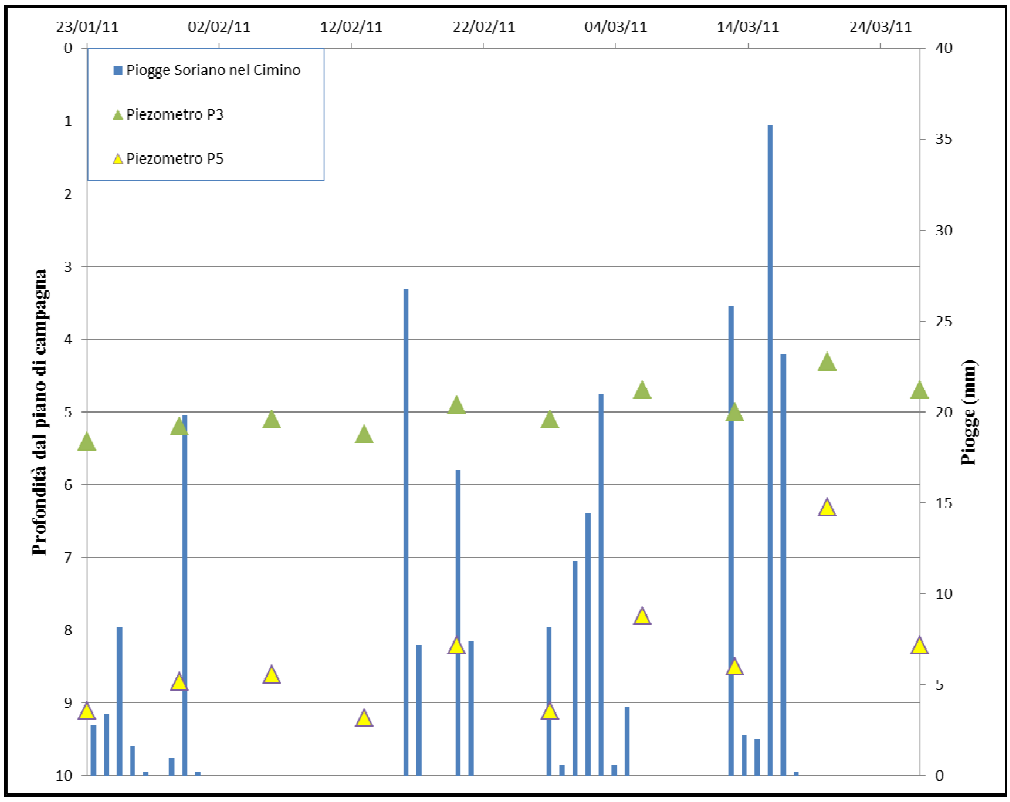

Figura 22: livelli piezometrici dal 23/01/11 al 27/03/11; l'asse primario, a sinistra, mostra la profondità della superficie piezometrica a partire dal piano di campagna, mentre l'asse secondario, a destra, mostra le piogge in mm rilevate dalla vicina stazione di Soriano nel Cimino.

5.2 SEZIONI GEOLOGICO-TECNICHE

Mettendo assieme le considerazioni geologiche, idrogeologiche e geotecniche illustrate nei paragrafi e nei capitoli precedenti, sono state messe a punto due sezioni geologico - tecniche rappresentative del sito, inserite alla fine del

presente capitolo ed orientate rispettivamente NNO-SSE e NNE-SSO, come mostra la planimetria allegata. Nelle sezioni sono state rappresentate le principali litologie individuate, insieme ai parametri ricavati dalle prove di laboratorio. Il passaggio tra i sedimenti prettamente marini (le argille grigio-azzurre basali) e quelli di ambiente transizionale/continentale è stato delineato, oltre che con i dati dei sondaggi e delle analisi geotecniche di laboratorio, soprattutto grazie alle analisi micropaleontologiche a nannofossili calcarei e microforaminiferi condotte su 22 campioni, prelevati dai sondaggi S1 ed S3. Le analisi sono state eseguite dalla sezione di Geologia e Paleontologia del Dipartimento di Scienze della Terra. I campioni sono stati trattati in laboratorio per ottenere lavati micropaleontologici e *smear slides* per analisi del contenuto in nannofossili calcarei. Per ogni campione sono stati lavati 200 gr di sedimento con H_2O_2 ed acqua per allontanare la componente inferiore ai 63 microns. Il residuo di lavato è stato asciugato con stufetta, pesato ed osservato allo stereomicroscopio. Le *smear slides* sono state eseguite seguendo il procedimento di Bown and Young (1998). Le analisi condotte su campioni prelevati dal sondaggio S3 hanno mostrato la presenza sul fondo del sondaggio (da 16 a 14 m dal p.c. circa) di foraminiferi bentonici e planctonici, di ambiente tipicamente marino (Bulimina marginata spinata, in associazione con Hyalinea balthica, di età riferibile al Pleistocene inferiore (Calabriano)), mentre salendo fino a circa 12 m il contenuto micropaleontologico diminuisce drasticamente e si ha una prevalenza di minerali vulcanici (pirosseni, quarzo, muscovite) e pomici; ciò indica il passaggio ad una fase dominata da eventi vulcanoclastici, a cui segue, però, una nuova ingressione marina, testimoniata dalla presenza di microfauna marina fino a circa 6 m di profondità (rimarcata presenza di Hyalinea balthica). Al di sopra dei 6 m i campioni analizzati sono risultati sterili in contenuto micropaleontologico, per cui sono riconducibili ad un ambiente di tipo continentale, e costituiscono il terrazzo costruito dal Fiume Tevere. I campioni prelevati dal sondaggio S1 hanno mostrato la presenza di contenuto micropaleontologico di ambiente tipicamente marino per tutta la lunghezza della perforazione, ad eccezione ovviamente dello spessore di terreno di riporto. E' importante precisare che le analisi micropaleontologiche vengono effettuate, come già detto, su materiale trattenuto al setaccio di apertura 63 micron: ciò consente di avere una stima della granulometria, e si è potuto notare che le argille marine basali contengono al loro

interno delle piccole lenti sabbiose estremamente circoscritte, che provano ciò che era stato affermato nell'inquadramento geologico, ossia che la deposizione di tali argille è avvenuta in un contesto di transizione tra un ambiente marino e un ambiente continentale, per cui si hanno log stratigrafici con alternanze di litologie marine, costiere e continentali, risultato delle ripetute ingressioni e trasgressioni marine.

Sulle sezioni sono stati inoltre inseriti anche i livelli piezometrici minimi e massimi registrati nei piezometri P3 e P5 nel periodo di osservazione (23/01/11 – 27/03/11), per avere una migliore visione d'insieme sia della stratigrafia sia degli acquiferi presenti.

Entrambe le sezioni mostrano la presenza di un substrato argilloso di colore grigio-azzurro, riconducibile, come già accennato, alla litofacies ALVb; nelle porzioni più a monte, in corrispondenza quindi dei sondaggi S1, S2, S3 e S4, è presente uno strato di terreno di riporto dello spessore variabile tra 2 e 2,5 m, al di sotto del quale troviamo litologie prevalentemente argillose, sovrastanti le argille grigio-azzurre basali. Nella porzione intorno al fabbricato, quindi, si trovano terreni a bassa permeabilità, che permettono lo sviluppo solo di una debole circolazione idrica nei livelli più limosi dei depositi limo-argillosi. Diversa è la situazione nell'intorno del sondaggio S5: le litologie prevalentemente sabbiose permettono una più alta infiltrazione delle acque meteoriche ed una circolazione idrica sotterranea, in particolare nel livello sabbioso posto immediatamente sopra le argille basali, che fungono da acquiclude. Nonostante la maggiore permeabilità, l'entità di tali circolazioni idriche rimane comunque piuttosto modesta. L'alternanza tra livelli a componente argillosa ed argilloso - sabbiosa ben riflette l'ambiente di sedimentazione di tipo transizionale tra marino e continentale, ed è coerente con quanto affermato nell'inquadramento geologico dell'area.

I risultati delle analisi geotecniche, in particolare i limiti di Atterberg e le Attività, sono stati messi a confronto con i campioni prelevati ed analizzati da Candio et al. (1992), i quali avevano caratterizzato sia le argille marine che i depositi fluvio - lacustri dell'Umbria.

I campioni argillosi di ambiente marino prelevati nella porzione occidentale dell'Umbria (Castel Viscardo, campioni M22, ed Alviano, campioni M33 e M34), hanno mostrato caratteristiche macroscopiche e geotecniche confrontabili

con i campioni A, B, C, D ed H analizzati nel presente lavoro di tesi: a titolo di esempio la figura 23 riporta l'andamento dei limiti liquidi in relazione all'indice plastico delle diverse argille marine analizzate da Candio et al. (1992) e di quelle qui investigate. La presenza delle litologie sopra descritte può, dal punto di vista ambientale, svolgere un doppio ruolo: garantisce l'isolamento dei terreni più profondi, confinando eventuali sostanze inquinanti negli strati più superficiali, ma, d'altro canto, provoca una maggiore permanenza di tali sostanze nel terreno stesso; in ogni caso la scarsa migrazione degli eventuali inquinanti è assicurata dalla modestissima circolazione idrica.

Dato il contesto in cui si inserisce la realizzazione del presente modello, la caratteristica più importante da determinare sui terreni è, come intuibile già dai commenti di cui sopra, la permeabilità. Nel prossimo paragrafo vengono riportati i risultati di stime di permeabilità attraverso le informazioni granulometriche su alcune delle litologie descritte nel capitolo 3.

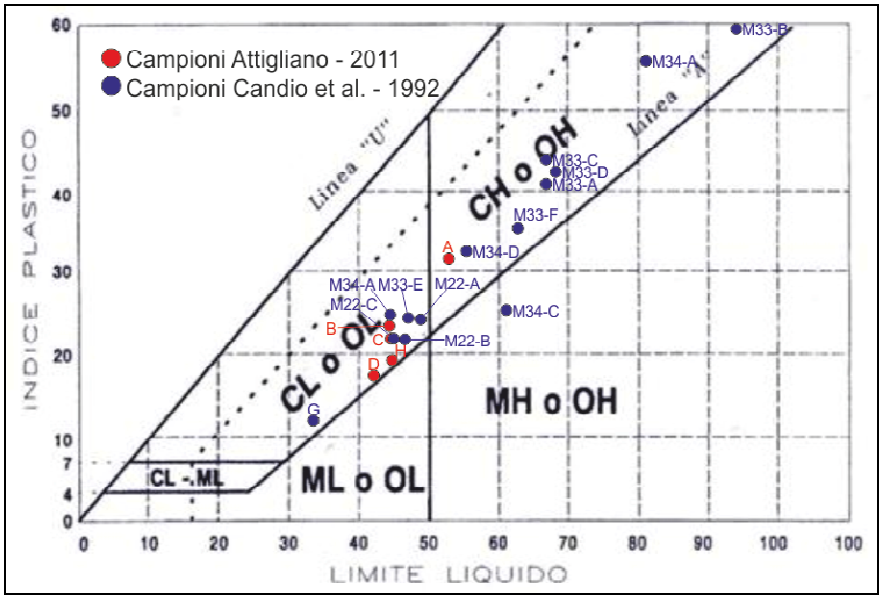

Figura 23: confronto tra i campioni argillosi analizzati nel 2011 e da Candio et al (1992)

5.2.1 STIMA DELLA PERMEABILITA' DEI LITOTIPI

La permeabilità si definisce come la misura della velocità con la quale un fluido attraversa un mezzo poroso, mossa da una differenza di energia potenziale. La misura della velocità delle particelle d'acqua in moti laminari è regolata dalla legge di Darcy: la velocità del flusso (v) è direttamente proporzionale al gradiente idraulico, ossia al rapporto tra la perdita di carico idraulico (δH) e il tratto di mezzo poroso (ossia di terreno) all'interno del quale essa si verifica (δL), come mostra le relazione seguente:

$$v = -K * \left(\frac{\delta H}{\delta L}\right) = K * i$$

Nel caso di terreni argillosi, *K* risulta indipendente dal gradiente idraulico *i* per valori di quest'ultimo compresi tra 0,1 e 50 (Tavenas et al., 1983) e la sua valutazione è di estrema importanza per la realizzazione di molteplici opere geotecniche. La determinazione di *K* in laboratorio è comunque un'operazione complessa, a causa della difficoltà nel non arrecare disturbo al terreno e nella realizzazione di un moto effettivamente laminare, e dipendente da molteplici fattori, il che ha portato a sviluppare prove sia di sito che di laboratorio per la sua determinazione. Non potendo, purtroppo, disporre sempre di tali mezzi, sia per ragioni economiche che di tempo, sono state sviluppate anche relazioni empiriche, tra le quali trova un buon grado di approssimazione quella proposta da Hazen (1982), secondo cui il coefficiente di permeabilità *K* è proporzionale al quadrato del diametro corrispondente al 10% delle particelle della curva granulometrica, per mezzo di una costante sperimentale C variabile tra 90 e 120, ma generalmente considerata pari a 100, per via del suo intervallo di variazione ristretto, che rende l'errore minimo; in ogni caso si riportano in tabella 13 anche i valori di K per C pari a 90 e 120.

$$K = C * (D_{10})^2$$

Il valore del coefficiente di permeabilità è stato determinato per tutti i campioni analizzati con prove di laboratorio, ove fosse possibile la determinazione del D_{10}; i risultati sono raccolti in tabella 13. Solo i campioni G ed L, del sondaggio S5, sono risultati idonei all'applicazione della formula di Hazen, che ha messo in evidenza la presenza di una lente limo-sabbiosa con valori di permeabilità maggiori, anche se in assoluto non elevati, rispetto ai litotipi più superficiali (due ordini di grandezza di differenza).

CAMPIONE	D_{10} (mm)	K (m/s) (C=90)	K (m/s) (C=100)	K (m/s) (C=120)
A	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
B	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
C	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
D	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
E	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
F	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
G	0,001	9,00E-11	1E-10	1,20E-10
H	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
L	0,01	9,00E-09	1,00E-08	1,20E-08

Tabella 13: stima della permeabilità tramite la relazione di Hazen sui campioni ove fosse possibile la determinazione del D_{10}

Conclusioni

Il complesso delle indagini effettuate ha permesso di ricostruire un modello geologico – tecnico utile per caratterizzare un sito ritenuto potenzialmente inquinamento e soggetto a recupero ambientale. L'individuazione dei diversi livelli argillosi (che impediscono la diffusione degli inquinanti nel sottosuolo), la stima della loro permeabilità, l'individuazione della circolazione idrica e della sua risposta alle precipitazioni, le caratteristiche morfologiche del sito e non per ultimo la storia delle attività svolte in passato sull'area, sono indispensabili sia per progettare con dovuta precisione una campagna di indagini chimiche, sia per condurre successivamente, se necessario, un intervento di bonifica. La scelta dei campionamenti da effettuare è infatti un'operazione apparentemente semplice, che però può risultare erronea e soprattutto fuorviante se effettuata senza un criterio preciso e soprattutto logico; allo stesso modo, la realizzazione di un progetto di bonifica non può in alcun modo prescindere dalle caratteristiche geologiche dell'area, in quanto sono proprio queste che condizionano la scelta del miglior metodo di bonifica.

Nel caso in esame i valori degli inquinanti nelle diverse matrici ambientali (terre ed acque) che nel 2009 eccedevano i limiti imposti per legge (Dicloroetilene, Tricloroetilene e Dicloropropano) sono risultati, nella campagna di indagini 2011, al di sotto delle CSC (Concentrazioni Soglia di Contaminazione) e inferiori, quindi, a quelli della campagna 2009. Tale riduzione è ricollegabile alla rimozione dei primi 30 cm di terreno (fonte dell'inquinamento). Inoltre la scarsa solubilità in acqua dei composti, che si trovavano allo stato solido in quanto inglobati nelle resine di lavorazione, non ha sicuramente favorito la loro presa in carico e diffusione. Le analisi condotte sulle terre limo-argillose, poste al di sotto dello strato di terreno di riporto, hanno confermato che gli inquinanti non hanno raggiunto le stesse. Allo stato attuale dei fatti, l'area potrà essere completamente ripristinata alla sua funzione originaria e quindi il presente studio potrà essere di qualche utilità per la certificazione dello stato di *non-inquinamento del sito*, che consentirà di avviare le procedure per permettere al nuovo proprietario di recuperare l'area.